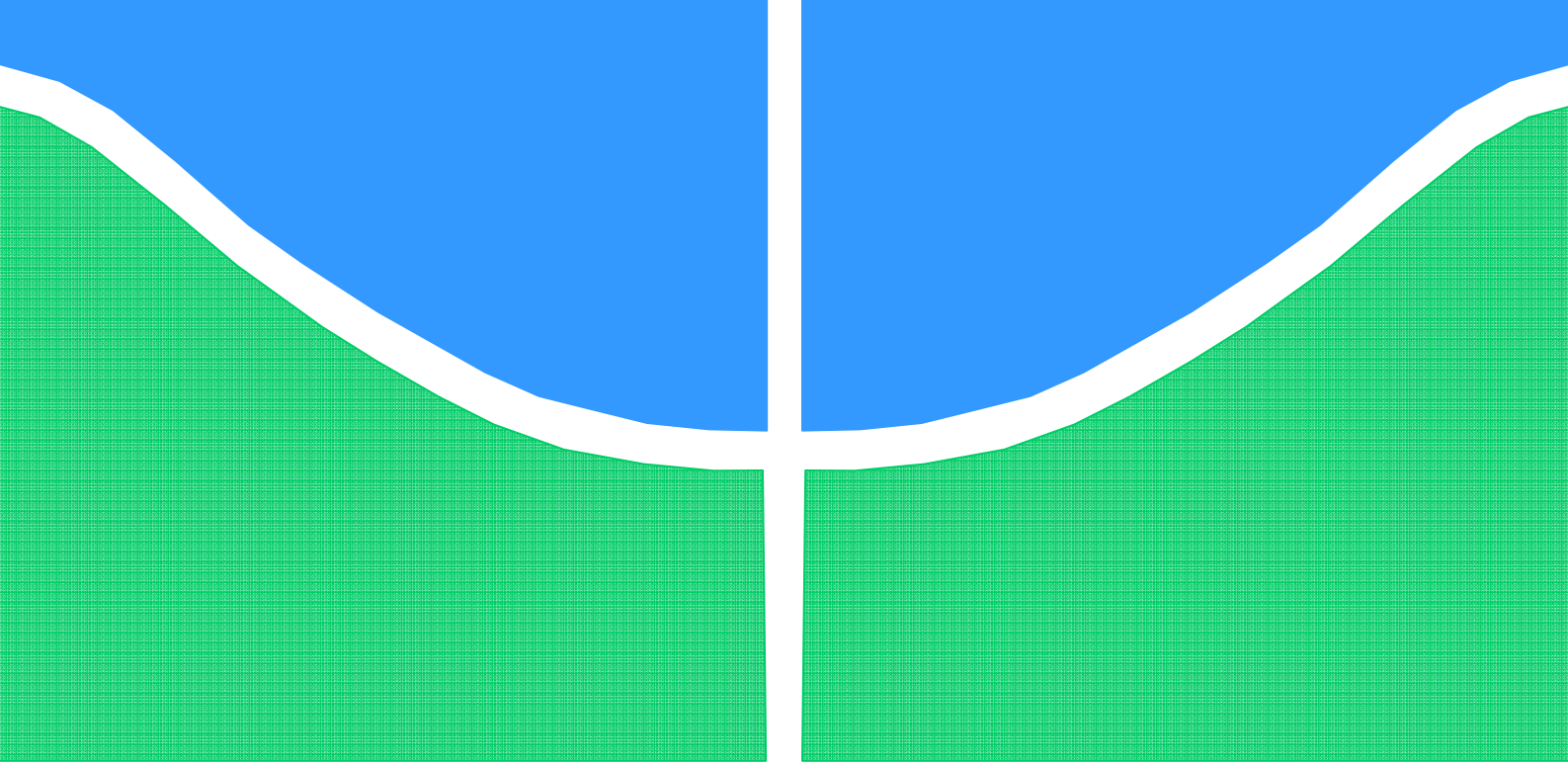




TRABALHO DE GRADUAÇÃO

INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE DE UM SISTEMA DE AR CONDICIONADO HÍBRIDO UTILIZANDO BACNET SOBRE ZIGBEE

**José Urbano Duarte Junior
Mariana Carolina Carvalho Novais**

Brasília, Setembro de 2010



**ENGENHARIA
MECATRÔNICA**
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

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

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE DE UM SISTEMA DE AR CONDICIONADO HÍBRIDO UTILIZANDO BACNET SOBRE ZIGBEE

José Urbano Duarte Junior
Mariana Carolina Carvalho Novais

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

Banca Examinadora

Prof. Adolfo Bauchspiess, UnB/ ENE
(Orientador)

Prof. Lélio Ribeiro Soares Júnior, UnB/ ENE

Prof. Marcelo Menezes de Carvalho, UnB/
REDES

Brasília, Setembro de 2010

FICHA CATALOGRÁFICA

DUARTE, JOSÉ URBANO JÚNIOR &
NOVAIS, MARIANA CAROLINA CARVALHO

Instrumentação e Controle de um Sistema de Ar Condicionado Híbrido Utilizando BACnet sobre ZigBee,

[Distrito Federal, 2010]

xiii, 131p., 297 mm (FT/UnB, Engenheiro, Controle e Automação, 2010). Trabalho de Graduação – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

1. Automação
3. Conforto térmico

2. Controle
4. Ar condicionado híbrido

I. Mecatrônica/FT/UnB

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

DUARTE, J. U. J. & NOVAIS, M. C. C., (2010). Instrumentação e Controle de um Sistema de Ar Condicionado Híbrido Utilizando BACnet sobre ZigBee. Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Publicação **FT.TG-nº XX**, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 131p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: José Urbano Duarte Júnior e Mariana Carolina Carvalho Novais.

TÍTULO DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO: Instrumentação e Controle de um Sistema de Ar Condicionado Híbrido Utilizando BACnet sobre ZigBee.

GRAU: Engenheiro de Controle e Automação

ANO: 2010

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.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, mais importante e maior responsável, por essa conquista que sempre desejei.

Agradeço, também, a todos os amigos que me incentivaram frente aos desafios e compartilharam comigo todos os momentos de dificuldades enfrentados durante a minha graduação.

José Urbano Duarte Júnior

A Deus, por tudo. Aos meus pais, Mário e Zenaide, e a minha irmã, Polyanna, pelo amor incondicional e pela força positiva. Aos parentes, pelo incentivo. Aos colegas de curso, e amigos, por compartilharem os prazeres e as dificuldades. Ao meu orientador, professor Adolfo Bauchspiess, pelo apoio e ensinamento constante. E a todos que direta ou indiretamente contribuíram para o êxito desta missão.

Mariana Carolina Carvalho Novais

RESUMO

Neste trabalho foi desenvolvido um sistema híbrido de refrigeração supervisionado por rede de sensores sem fio. Baseado na associação de modelos evaporativos e convencionais, o sistema proposto utiliza sensores estrategicamente distribuídos no ambiente de estudo, permitindo um melhor controle sobre as variáveis de conforto térmico. Parâmetro geralmente não utilizado em modelos convencionais de refrigeração, a umidade relativa do ar é coletada e processada, juntamente com dados de velocidade do ar e temperatura de todo ambiente de estudo, no novo sistema, favorecendo a obtenção de melhores resultados. Os principais parâmetros utilizados para cálculo do PMV, índice de conforto térmico, são transmitidos pelos sensores ao coordenador de suas redes utilizando o protocolo *wireless*, BACnet sobre Zigbee. O coordenador transmite, então, os dados obtidos a um sistema SCADA utilizando o protocolo BACnet MS/TP sobre uma rede EIA-232. Uma solução de roteamento híbrido é apresentada para integração entre as duas redes. O tratamento dos dados e a interface do operador com o sistema são realizados pelo supervisor.

Palavras-Chave: Sistema Híbrido, Conforto Térmico, Índice de Conforto Térmico PMV, ZigBee, BACnet, Supervisor.

ABSTRACT

We have developed a hybrid cooling system overseen by a wireless sensor network. Based on the combination of evaporative and conventional models, the proposed system uses sensors strategically distributed in the environment of study, allowing better control over the variables of thermal comfort. A parameter that usually is not used in conventional models of refrigeration, air humidity, is collected and processed. Combining with air velocity and temperature of the whole environment in the new system, we get better results. The main parameters used to calculate the PMV index, thermal comfort, are transmitted by the sensors to the coordinator of their networks using the wireless protocol, BACnet over Zigbee. So, the coordinator transmits the data to a SCADA system using the protocol BACnet MS / TP over an EIA-232 network. A hybrid routing solution is presented for integration between the two networks. The data processing and the human-machine interface with the system is carried out by supervisory.

Keywords: Hybrid System, Thermal Comfort, Thermal Comfort Index PMV, ZigBee, BACnet, Supervisory.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 – CONCEITOS DA TERMODINÂMICA APLICADOS A SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO.....	3
2.1 INTRODUÇÃO	3
2.1.1 Carta Psicrométrica	4
2.1.2 Temperatura de Bulbo Seco.....	5
2.1.3 Temperatura de Bulbo Úmido.....	5
2.1.4 Temperatura de Ponto de Orvalho	6
2.1.5 Pressão de Vapor	6
2.1.6 Umidade Relativa	7
2.1.7 Umidade Absoluta	7
2.1.8 Grau de Saturação	7
2.1.9 Volume Específico	7
2.1.10 Entalpia.....	8
CAPÍTULO 3 – SISTEMA EVAPORATIVO DE REFRIGERAÇÃO	9
3.1 INTRODUÇÃO	9
3.2 REDUÇÃO DA TEMPERATURA E A ENERGIA EVOLVIDA NO PROCESSO.....	10
3.3 EFICIÊNCIA DO SISTEMA EVAPORATIVO.....	10
3.4 PRINCÍPIO DO SISTEMA EVAPORATIVO.....	11
3.5 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA EVAPORATIVO.....	11
3.5.1 Método por Cálculo da Carga Térmica.....	12
3.5.2 Método das Renovações de Ar	12
CAPÍTULO 4 – CONFORTO TÉRMICO E O SISTEMA HÍBRIDO DE REFRIGERAÇÃO	14
4.1 INTRODUÇÃO	14
4.2 DEFINIÇÃO DE CONFORTO TÉRMICO E NEUTRALIDADE TÉRMICA	14
4.2.1 Conforto Térmico	14
4.2.2 Neutralidade Térmica	15
4.3 NORMAS ASHRAE PARA CONFORTO TÉRMICO	15
4.4 NORMA ABNT NBR 16401 DE INSTALAÇÕES DE AR CONDICIONADO	16
4.4.1 Parâmetros de Conforto para Verão	16
4.4.2 Parâmetros de Conforto para Inverno	16
4.5 VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM O CONFORTO	16
4.5.1 Metabolismo.....	17
4.5.2 Vestimenta	18
4.5.3 Temperatura Radiante Média	19
4.5.4 Temperatura do Ar.....	19
4.5.5 Velocidade do Ar	19
4.5.6 Umidade relativa do ar.....	19
4.6 VOTO MÉDIO PREDITO (PMV)	20
4.6.1 Equação do PMV	20
4.6.2 Porcentagem de Pessoas Insatisfeitas – PPD.....	22
4.7 SISTEMA CONVENCIONAL DE REFRIGERAÇÃO.....	23
4.8 VANTAGENS DO SISTEMA HÍBRIDO.....	24
CAPÍTULO 5 – PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO	26
5.1 INTRODUÇÃO	26
5.2 BACNET	26
5.2.1 Objetos e Propriedades	27
5.2.2 Serviços	29
5.2.3 Interoperabilidade	32
5.2.4 BACnet MS/TP.....	33
5.3 ZIGBEE	36
5.3.1 Introdução	36
5.3.2 Auto-organização, perfis e cluster	38
5.3.3 Generic Tunnel Cluster	39
5.3.4 BACnet Protocol Tunnel	40
5.3.5 Endpoint.....	40

5.4	BACNET SOBRE ZIGBEE	41
5.5	SUPERVISIONAMENTO	42
5.5.1	ActionView	43
CAPÍTULO 6 – PROTÓTIPO E ANÁLISE DE DESEMPENHO		44
6.1	AMBIENTE DE ESTUDO	44
6.2	SISTEMA EVAPORATIVO PROPOSTO AO AMBIENTE DE ESTUDO	45
6.3	SISTEMA CONVENCIONAL PROPOSTO AO AMBIENTE DE ESTUDO	45
6.4	SISTEMA HÍBRIDO DE REFRIGERAÇÃO APLICADO AO AMBIENTE DE ESTUDO	46
6.4.1	Dimensionamento do Painel Evaporativo.....	46
6.4.2	Dimensionamento do <i>Damper</i>	48
6.4.3	Atuador do <i>Damper</i>	49
6.4.4	Dimensionamento da Caixa Inox.....	50
6.4.5	Duto Externo	50
6.5	IMPLEMENTAÇÃO FINAL	50
6.5.1	Sensor de Temperatura e Umidade SHT71	51
6.5.2	Anemômetro Dwyer 641-12-LED.....	55
6.5.3	Relé.....	58
6.5.4	Módulo Gravador ou Coordenador	60
6.5.5	Módulo Duto.....	61
6.5.6	Módulo de Referência.....	62
6.5.7	Módulo Atuador.....	64
6.6	SOFTWARE EMBARCADO APLICADO AO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO	68
6.6.1	Bitcloud	68
6.6.2	Software Embarcado	69
6.6.3	Lowpower.....	70
6.6.4	Coordenador	71
6.6.5	Enddevice	73
6.7	PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO APLICADO AO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DO AMBIENTE DE ESTUDO	74
6.7.1	Arquitetura da Rede.....	74
6.7.2	VMACTable.....	75
6.7.3	Comandos do Cluster Generic Tunnel	76
6.7.4	Comandos do Cluster BACnet Tunnel Protocol	77
6.7.5	Bacinterface	78
6.7.6	Roteador Híbrido	78
6.8	SUPERVISIONAMENTO APLICADO AO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DO AMBIENTE DE ESTUDO	80
6.9	ESTRATÉGIA DE CONTROLE	85
CAPÍTULO 7 – RESULTADOS E ANÁLISE.....		87
7.1	INTRODUÇÃO	87
7.2	RESULTADOS DO CONFORTO TÉRMICO	87
7.3	RESULTADOS DA COMUNICAÇÃO	94
CAPÍTULO 8 – CONCLUSÃO		99
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		101
ANEXOS.....		103
A – SISTEMA CONVENCIONAL DE REFRIGERAÇÃO		104
A.1	COMPRESSOR	104
A.2	CONDENSADOR.....	104
A.3	DISPOSITIVO DE EXPANSÃO	106
A.4	EVAPORADOR.....	106
A.5	COEFICIENTE DE PERFORMANCE (COP).....	107
B – NÍVEIS DE RUÍDO PERMISSÍVEIS SEGUNDO NORMA NBR 6401 DE INSTALAÇÕES CENTRAIS DE AR CONDICIONADO PARA CONFORTO		109
C – DIAGRAMAS ESQUEMÁTICOS		110
D – VBS.....		112

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Carta psicrométrica de Brasília.....	5
Figura 2.2. Representação da temperatura de bulbo seco na carta psicrométrica, [7].....	5
Figura 2.3. Representação da temperatura de bulbo úmido na carta psicrométrica, [7].....	6
Figura 2.4. Temperatura de ponto de orvalho.....	6
Figura 2.5. Representação da umidade relativa na carta psicrométrica, [7].....	7
Figura 2.6. Representação do volume específico na carta psicrométrica, [7].	8
Figura 3.1. (a) Resfriamento evaporativo direto e (b) Resfriamento evaporativo indireto, [6].	11
Figura 4.1. Taxa metabólica para diferentes atividades segundo ISO 7730 (1994) e ISO 8996/90, [11].	18
Figura 4.2. Porcentagem de pessoas insatisfeitas (PPD), em função do voto médio estimado (PMV), [11].	23
Figura 5.1. Modelagem BACnet no sistema OSI.	34
Figura 5.2. Máquina de estados BACnet (Mestre e Escravo), [18].....	35
Figura 5.3. Máquina de estado do Frame BACnet MS/TP.	36
Figura 5.4. Estrutura ZigBee.....	37
Figura 5.5. Interface dos <i>Clusters</i>	38
Figura 5.6. Interface <i>endpoint</i>	41
Figura 5.7. Diagrama das camadas para uma nó, não roteador, BACnet sobre ZigBee, [23].	42
Figura 6.1. Planta baixa do LARA.	44
Figura 6.2. Perda de carga, [27].	47
Figura 6.3. Eficiência de esfriamento, [27].....	47
Figura 6.4. Tamanhos nominais fabricados, [28].	49
Figura 6.5. Ar híbrido e a localização dos sensores e módulos.	51
Figura 6.6. Sensor de temperatura e umidade SHT71, [30].....	52
Figura 6.7. Condições de operação, [30].	53
Figura 6.8. Seqüência de início de transmissão, [30].	54
Figura 6.9. Exemplo de seqüência de medição de umidade para o valor 0000'0100"0011'0001" = 35,50 %, [30].	54
Figura 6.10. Anemômetro Dwyer 641, [31].	56
Figura 6.11. Ligação elétrica do anemômetro, [31].	57
Figura 6.12. Gráfico anemômetro Dwyer-641.	58
Figura 6.13. Footprint do relé G5LA-1A, [32].	58
Figura 6.14. Conexões internas, [32].	59
Figura 6.15. Capacidade máxima de comutação, [32].	59
Figura 6.16. Módulo atuador ou coordenador, [29].	60

Figura 6.17. Esquemático elétrico do módulo gravador ou coordenado.	60
Figura 6.18. Módulo duto.....	61
Figura 6.19. Esquema elétrico do módulo duto.	62
Figura 6.20. Módulo de referência e sua localização.....	63
Figura 6.21. Esquemático elétrico do módulo de referência.	64
Figura 6.22. Módulo atuador.....	65
Figura 6.23. Projeto do sistema híbrido (diagrama de força).	66
Figura 6.24. Projeto do sistema híbrido (diagrama de comando).....	67
Figura 6.25. Esquema elétrico do módulo atuador.	68
Figura 6.26. Paradigma dirigido a eventos, [25].....	69
Figura 6.27. Máquina de estado comentada <i>lowpower</i>	70
Figura 6.28. Visão geral da API Bitcloud, [25].	71
Figura 6.29. Máquina de estado do coordenador.	72
Figura 6.30. Máquina de estado End-device.	73
Figura 6.31. Arquitetura da rede.....	75
Figura 6.32. Mensagem típica ZigBee sobre BACnet.	78
Figura 6.33. Coordenador híbrido.....	79
Figura 6.34. Detalhamento das mensagens sobre canais ZigBee e RS-232.	80
Figura 6.35. Configuração de IDEs.....	82
Figura 6.36. Configuração do canal BACnet.....	83
Figura 6.37. Árvore do projeto.	84
Figura 6.38. Sinótico do ambiente de estudo.....	85
Figura 6.39. Máquina de estado do sistema de controle.....	86
Figura 7.1. Comportamento da umidade relativa e da bomba d'água das 10 horas às 13 horas do dia 26/08/10.....	87
Figura 7.2. Comportamento da umidade relativa e da bomba d'água das 19:30h às 21:30h horas do dia 26/08/10.....	88
Figura 7.3. Nova máquina de estado do sistema de controle.	89
Figura 7.4. Gráfico referente à atuação do ventilador (BO03) e do compressor (BO02) durante o dia.	90
Figura 7.5. Gráfico referente à atuação do ventilador (BO03) e do compressor (BO02) durante a noite.	90
Figura 7.6. Gráfico referente à atuação da bomba d'água durante o dia.	91
Figura 7.7. Gráfico referente à atuação da bomba d'água durante a noite.	91
Figura 7.8. Gráfico referente às temperaturas e umidades relativas mensuradas durante o dia.	92
Figura 7.9. Gráfico referente às temperaturas e umidades relativas mensuradas durante a noite.	92
Figura 7.10. Gráfico referente ao PMV calculado durante o dia.....	93
Figura 7.11. Gráfico referente ao PMV calculado durante a noite.....	93

Figura 7.12. Tabela VMACTable.	95
Figura 7.13. Logs da comunincação ZigBee sobre BACnet no end-device.....	96
Figura 7.14. Logs de comunicação retirado do SPPCOM.....	97
Figura 7.15. Tempo de resposta média, em segundos, e perda de pacotes.....	98
Figura A.1. Compressão do fluido refrigerante, <i>apud</i> [33].....	104
Figura A.2. Condensação do fluido refrigerante, <i>apud</i> [33].....	105
Figura A.4. Evaporação do fluido refrigerante, <i>apud</i> [33].....	107
Figura B.1. Níveis de ruído permissíveis, [35].	109
Figura C.1. Projeto do sistema híbrido (diagrama de força), [33].....	110
Figura C.2. Projeto do sistema híbrido (diagrama de comando), [33].	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Composição aproximada do ar seco, [3].	3
Tabela 2.2. Propriedades termodinâmicas do ar úmido, [3].	4
Tabela 3.1. Zona térmica, [9].	12
Tabela 3.2. Trocas de ar por hora, [9].	13
Tabela 4.1. Índice de isolamento térmico para vestimentas típicas segundo ISO 7730 (1994) e ISO 9920/95, [11].	19
Tabela 4.2. Escala térmica de Fanger, [10].	20
Tabela 4.3. Tabela de redução de temperatura interna em função da umidade relativa do ar externo e da temperatura do mesmo, [14].	25
Tabela 5.1. Objetos BACnet.	27
Tabela 5.2. Propriedades obrigatória dos objetos BACnet.	28
Tabela 5.3. Categorias BACnet.	29
Tabela 5.4. BIBB's normatizados, [19].	33
Tabela 5.5. Recursos disponíveis conforme função desempenhada.	37
Tabela 5.6. Lista de comandos do <i>Generic Tunnel Protocol</i> .	39
Tabela 5.7. Lista de comandos do <i>BACnet Protocol Tunnel</i> .	40
Tabela 6.1. Número de trocas de ar por hora selecionado para o ambiente de estudo.	45
Tabela 6.2. Carga térmica, [26].	46
Tabela 6.3. Pinos do SHT71, [30].	52
Tabela 6.4. Lista de comandos do SHT71, [30].	54
Tabela 6.5. Coeficientes da umidade, [30].	55
Tabela 6.6. Coeficientes da temperatura, [30].	55
Tabela 6.7. Faixas possíveis em metro por segundo, [31].	56
Tabela 6.8. Especificações de anemômetro Dwyer 641, [31].	57
Tabela 6.9. Dados mensurados e objetos correspondentes.	81
Tabela 6.10. Limite de operação das variáveis mensurado *Modo de operação selecionado para aplicação deste trabalho.	81

LISTA DE SÍMBOLOS, ACRÔNIMOS E ABREVIações

UR	Umidade relativa
TBU	Temperatura de bulbo úmido
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
PPD	Predicted Percentage of Dissatisfied
PMV	Predicted Mean Vote
BTU	British Thermal Unit
dB	Decibel
ISO	International Organization for Standardization
SHT	<i>Sensirion SHT-71 Relative Humidity and Temperature Sensor</i>
API	Application Programming Interface
ANSI	American National Standard Institute
OSI	Open System Interconnection
ARCNET	Attached Resource Computer Network
MS/TP	Master Slave / Token Pass
PTP	Picture Transfer Protocol
VBS	Visual Basic Script
SCADA	Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados
P	Pressão total, KPa
P _i	Pressões parciais, KPa
V	Volume, m ³
T	Temperatura, °C
φ	Umidade relativa, %
m _{vapH₂O}	Massa de vapor d'água presente na mistura ar-vapor, Kg

m_{mvap}	Máxima massa de vapor que a mistura ar-vapor pode conter, Kg
w_{abs}	Umidade absoluta
w_s	Umidade absoluta do ar saturado;
m_w	Massa de vapor d'água, Kg
m_a	Massa de ar seco, Kg
μ	Grau de saturação
$\bar{v}$	Volume específico, m ³ /Kg
H_a	Entalpia do ar seco
H_w	Entalpia do vapor d'água
H	Entalpia do ar úmido
E_F	Eficiência, %
w	Largura, m
l	Comprimento, m
h	Altura, m
M	Taxa metabólica, met ou W/m ²
I_{cl}	Isolamento térmico das roupas utilizadas, clo ou
t_a	Temperatura do ar, °C
t_{rm}	Temperatura radiante média, °C
v_{ar}	Velocidade do ar, m/s
p_a	Pressão parcial do vapor de água no ar ambiente, KPa
p_{as}	Pressão saturada de vapor, KPa
L	Carga Térmica sobre o corpo, W/m ²
W	Trabalho mecânico, em W/m ²
f_{cl}	Razão entre a área superficial do corpo vestido, pela área do corpo nu
h_c	Coeficiente de transferência de calor por convecção, W/m ² .°C
t_{cl}	Temperatura superficial das roupas, °C
v_{ar}	Velocidade relativa do ar, m/s
v_a	Velocidade do ar, m/s

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO

Sistemas de refrigeração estão presentes na maioria dos edifícios públicos e privados de todo o país. A obtenção de conforto térmico se tornou requisito para o bom desempenho de atividades rotineiras na vida dos cidadãos. Edifícios industriais, comerciais, escritórios, hospitais e residências instalam e mantêm onerosos sistemas em busca de condições climáticas que atendam suas necessidades. Entretanto, os sistemas comumente usados hoje apresentam baixa eficiência energética associada a um moderado grau de insatisfação térmica. A natureza do processo de resfriamento e o desprezo das variações térmicas em um mesmo ambiente configuram os maiores desafios para superar esse quadro.

Nas últimas décadas, sistemas alternativos para resfriamentos vêm se difundindo no mercado internacional [1], com grande destaque para o modelo evaporativo. O baixo custo energético é o grande responsável por esse destaque, não maior devido apenas, à limitada capacidade de resfriamento do sistema. Grandes variações térmicas entre a temperatura externa e a temperatura desejada no ambiente a ser climatizado ainda só podem ser enfrentadas com o modelo convencional de refrigeração. Deste fato, infere-se que um sistema ideal deveria apresentar comportamentos evaporativos e convencionais, surgindo a proposta da utilização de um sistema híbrido.

Desenvolvido na Universidade de Brasília, o sistema híbrido está sendo alvo de diversas pesquisas que comprovam sua capacidade de fornecer conforto a um custo inferior ao sistema convencional. Este trabalho está inserido neste contexto e apresentará ao leitor a concepção e implementação de um sistema híbrido de refrigeração. Entretanto, nem todos os desafios presentes para o funcionamento ótimo de um sistema de refrigeração podem ser solucionados com a simples utilização de um sistema híbrido, sendo necessário o desenvolvimento de uma solução que supere também a heterogeneidade dos parâmetros de conforto em um mesmo ambiente.

Em um sistema ideal, parâmetros como umidade relativa, temperatura, velocidade do vento e todos os outros que influenciam direta ou indiretamente o conforto térmico deveriam ser obtidos de forma individualizada. Cada cidadão no ambiente deveria ter um sistema que se adequasse as características do local ocupado pelo indivíduo. Esse sistema é de difícil obtenção. As tecnologias atualmente mais difundidas exigiriam uma ampla rede de cabos por todo o ambiente de refrigeração, implicando em altíssimos custos de instalação, dificuldades para manutenção e grande prejuízo estéticos para o ambiente. Uma nova tecnologia baseada em rede de sensores sem fio mostra ser capaz de superar os problemas citados.

O protocolo de comunicação sem fio, ZigBee, é um dos padrões que mais vem crescendo nos últimos anos. Diferenciando-se de outros por não ser proprietário, o protocolo sem fio

permite a diversos fabricantes desenvolver aplicações com essa tecnologia. Setores de iluminação, segurança, energia, telecomunicações e refrigeração já encontram disponíveis soluções ZigBee. Entretanto, as adoções de novas tecnologias podem implicar em altíssimos custos, caso todo o sistema antigo necessite de um remodelamento. Prevendo essa situação a ASHRAE responsável pelo BACnet, principal protocolo utilizado nos sistemas de refrigeração, desenvolveu em parceria com a ZigBee Alliance, responsável pela normatização do ZigBee, regras permitindo a utilização de seu protocolo sobre o ZigBee. A nova solução proposta se apresenta ideal para este trabalho, por isso o leitor encontrará aqui seu desenvolvimento. Os dados coletados por redes sem fio já podem ser incorporados a SCADAs utilizados na maioria dos sistemas atuais de refrigeração.

O supervisionamento de parâmetros de sistema se tornou fundamental nas últimas décadas. Vantagens competitivas, requisitos de seguranças e amplo controle sobre o estado atual tornaram os sistemas de aquisição de dados em tempo real amplamente utilizado no setor industrial e de automação. A refrigeração, alvo constante de automação, não ficou de fora e, hoje, utiliza de softwares SCADA para armazenar e comandar seus parâmetros. Neste trabalho, esse tópico também é apresentado. O protocolo escolhido para comunicação com supervisório é o BACnet MS/TP sobre rede EIA-232. O coordenador da rede sensores sem fio desempenha, então, a função de um roteador entre as diferentes redes BACnet escolhidas neste trabalho. Entretanto, características deste trabalho implicaram aos seus autores o desenvolvimento de uma solução de roteamento, mais adequada a dispositivos com baixa disponibilidade de recursos de hardware, denominada roteador híbrido.

O desenvolvimento deste trabalho está inserido no ambiente de uma cooperação UNB – Spin Engenharia. O supervisório utilizado, assim como algumas bibliotecas que deram suporte ao desenvolvimento da rede de sensores, foram cedidos pela empresa viabilizando a conclusão do projeto.

CAPÍTULO 2 – CONCEITOS DA TERMODINÂMICA APLICADOS A SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO

2.1 INTRODUÇÃO

Segundo [2], ar condicionado é o processo de tratamento do ar de modo a controlar simultaneamente a temperatura, a umidade, a pureza e a distribuição para atender às necessidades do recinto condicionado.

O ar seco é uma mistura de gases, composta na sua maioria por nitrogênio e oxigênio. A constituição deste tipo de ar varia de maneira pouco significativa com a localização geográfica e a altitude. Devido a este fato, o ar seco apresenta uma composição padrão, exibida na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Composição aproximada do ar seco, [3].

Componente	Fórmula	Conteúdo (%)
Nitrogênio	N ₂	78,08400
Oxigênio	O ₂	20,94760
Argônio	Ar	0,93400
Dióxido de carbono	CO ₂	0,03140
Outros	-	0,00300

O ar que além dos gases já citados possui em sua composição vapor d'água é denominado ar úmido. O vapor d'água no ar úmido comporta-se como um gás ideal, logo obedece a Lei de Dalton, também conhecida como leis das pressões parciais.

Segundo [4], essa lei pode ser enunciada da seguinte forma: “A pressão total da mistura, P , é igual à soma das pressões P_i que cada gás exerceria se ocupasse isoladamente o volume do reservatório, V , que contém a mistura e estivesse à temperatura, T , da mistura.”

Uma vez entendido estes conceitos, é importante ressaltar que o ar que circula em um sistema de ar condicionado é úmido. Logo ao se projetar esse tipo de sistema, deve-se considerar a mistura do ar e do vapor d'água. Um sistema composto por apenas esses dois componentes é frequentemente chamado de psicrométrico, [5]. Este termo deriva de psicrometria, área da ciência responsável pelo estudo das propriedades termodinâmicas relacionadas à mistura de ar e vapor d'água e das alterações de estado que esta pode sofrer.

A psicrometria, para a distinção do estado termodinâmico do ar úmido, vincula os parâmetros psicrométricos à temperatura, à umidade, ao volume ocupado pela mistura e à energia nela contida, como pode ser visto na Tabela 2.2

Tabela 2.2. Propriedades termodinâmicas do ar úmido, [3].

Propriedades vinculadas à temperatura	Propriedades vinculadas à umidade	Propriedade vinculada ao volume ocupado e à energia contida
Temperatura de bulbo seco Temperatura de bulbo úmido Temperatura de ponto de orvalho	Pressão de vapor Razão de mistura Umidade específica Umidade absoluta Umidade relativa Grau de saturação	Volume específico Entalpia Calor específico a pressão constante

2.1.1 Carta Psicrométrica

A carta psicrométrica é um diagrama utilizado para representar e relacionar as diversas propriedades termodinâmicas do ar úmido e mostrar as mudanças ocorridas nessas propriedades durante os processos de aquecimento e resfriamento, entre outros. Caso a pressão do ambiente em estudo seja relativamente próxima da pressão atmosférica, a carta fornece um método rápido e preciso de determinação das características desejadas. São necessárias apenas duas propriedades para a definição de um estado a partir do qual as demais propriedades podem ser estabelecidas, [5].

Um exemplo de carta psicrométrica pode ser visto Figura 2.1. É importante ressaltar que cada região possui o seu próprio diagrama.

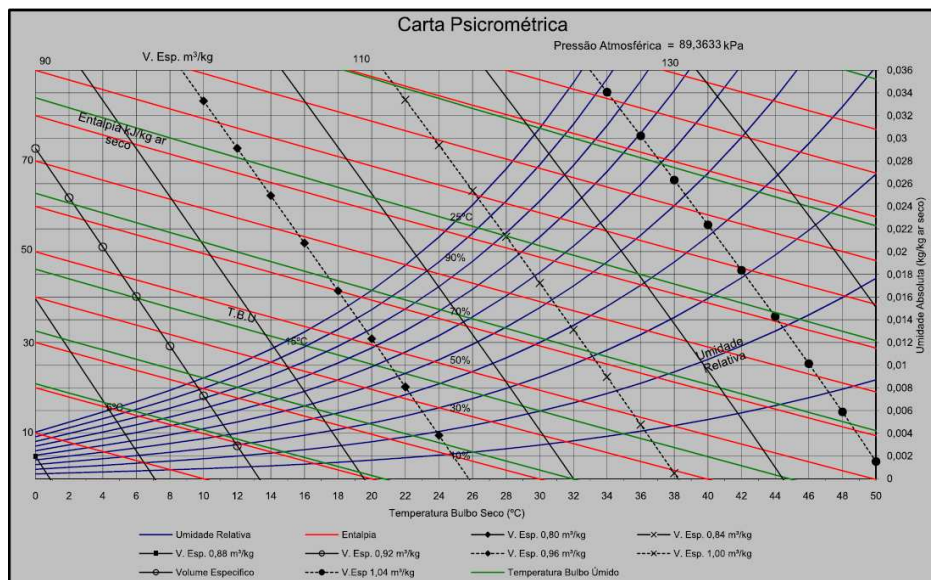


Figura 2.1. Carta psicrométrica de Brasília

2.1.2 Temperatura de Bulbo Seco

Temperatura de bulbo seco corresponde à temperatura da mistura de ar e vapor d'água medida por um termômetro convencional e que não é influenciada pela umidade relativa do ar, [6]. Esta temperatura é indicada, na carta psicrométrica, no eixo da abscissa, como mostrado na Figura 2.2, e é geralmente expressa em °C (grau Celsius) ou °F (grau Fahrenheit).

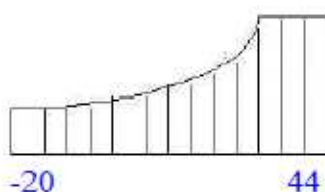


Figura 2.2. Representação da temperatura de bulbo seco na carta psicrométrica, [7].

2.1.3 Temperatura de Bulbo Úmido

Temperatura de bulbo úmido é a temperatura de saturação da mistura ar-vapor, atingida por um processo de resfriamento adiabático, [3]. É medida por um termômetro comum cujo bulbo é envolto por uma gaze umidificada com água destilada e exposto a uma corrente de ar, o que favorece a evaporação desta água.

O valor desta temperatura depende da quantidade de vapor d'água presente no ar. Quando o ar não se encontra saturado, causa a evaporação da água da mecha e, conseqüentemente, a redução da temperatura lida pelo termômetro de bulbo úmido, que, nesta condição, será sempre inferior à temperatura de bulbo seco. Caso o ar se encontre saturado, nenhuma quantidade de água do tecido evaporará e as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido serão iguais.

A temperatura de bulbo úmido, na carta psicrométrica, é representada de acordo com a Figura 2.3 e geralmente é expressa em °C ou °F.

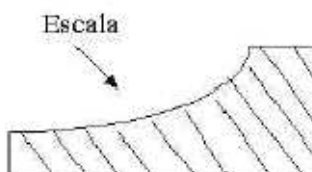


Figura 2.3. Representação da temperatura de bulbo úmido na carta psicrométrica, [7].

2.1.4 Temperatura de Ponto de Orvalho

O ponto de orvalho do ar é obtido quando o ar encontra-se saturado, ou seja, umidade relativa igual a 100%. A temperatura de ponto de orvalho refere-se à temperatura abaixo do qual o vapor d'água presente no ar úmido começa a condensar caso este ar passe por um processo de resfriamento à pressão e à umidade específica constantes, [3].

Quando o ponto de orvalho é atingido, as temperaturas de bulbo seco, bulbo úmido e de ponto de orvalho se igualam.

A temperatura de ponto de orvalho não é representada de maneira direta no diagrama psicrométrico. Para obtê-la, deve-se primeiro registrar na carta as condições do ar úmido e, em seguida, traçar uma linha para a esquerda, paralela ao eixo da abscissa, até encontrar com a linha de saturação, como demonstrado na Figura 2.4.



Figura 2.4. Temperatura de ponto de orvalho.

2.1.5 Pressão de Vapor

Pressão de vapor é a denominação dada à pressão da umidade, [3]. Esta pressão varia de acordo com a quantidade de vapor d'água existente no ar.

Quando o ar encontra-se saturado, a pressão de vapor é denominada pressão de saturação e quando o ar encontra-se insaturado, esta pressão é chamada pressão parcial de vapor.

2.1.6 Umidade Relativa

A umidade relativa, ϕ , é expressa em porcentagem e corresponde à razão entre a massa de vapor d'água presente na mistura ar-vapor, $m_{\text{vapH}_2\text{O}}$, e a máxima massa de vapor que essa mesma mistura poderia conter, m_{mvap} , à mesma temperatura e pressão total, [5].

$$\phi = \frac{m_{\text{vapH}_2\text{O}}}{m_{\text{mvap}}} \times 100 \quad (1)$$

Na carta psicrométrica, a umidade relativa é representada por meio de linhas curvas, Figura 2.5. A linha mais extrema é a linha de saturação, ou seja, UR igual a 100%, sobre a qual a leitura das temperaturas de ponto de orvalho é possível.

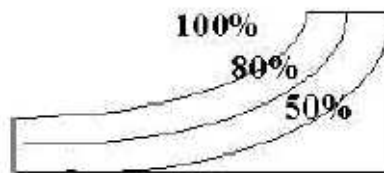


Figura 2.5. Representação da umidade relativa na carta psicrométrica, [7].

2.1.7 Umidade Absoluta

A umidade absoluta, w_{abs} , corresponde à razão entre a massa de vapor d'água, m_w , e a massa de ar seco, m_a , [4].

$$w_{\text{abs}} = \frac{m_w}{m_a} = \frac{\text{Kg de vapor d'água}}{\text{Kg de ar seco}} \quad (2)$$

2.1.8 Grau de Saturação

O grau de saturação, μ , é a razão entre a umidade absoluta do ar e a umidade absoluta do ar saturado, w_s , às mesmas condições de pressão e temperatura de mistura, [4].

$$\mu = \frac{w_{\text{abs}}}{w_s} \quad (3)$$

2.1.9 Volume Específico

O volume específico, $\bar{v}$, é definido como a razão entre o volume ocupado pelo ar úmido, V , e a massa de ar seco que existe no mesmo, m_a , [4]. É geralmente expresso em m^3/Kg de ar seco.

$$\bar{v} = \frac{V}{m_a} \quad (4)$$

O volume específico do ar seco é representado no diagrama psicrométrico como mostra a Figura 2.6.

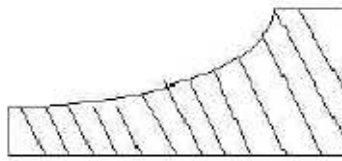


Figura 2.6. Representação do volume específico na carta psicrométrica, [7].

2.1.10 Entalpia

Entalpia é uma combinação de propriedades, sendo, consequentemente, uma propriedade, [5]. A entalpia deve ser definida em relação a um referencial de temperatura e pressão, sendo estes referenciais, em psicrometria, 0 °C e a pressão atmosférica, respectivamente.

A entalpia do ar seco, H_a , é definida como a energia interna de um sistema, U , mais o produto do seu volume, V , pela sua pressão, p , [5].

$$H_a = U + PV \quad (5)$$

Já a entalpia do ar úmido, H , é dada pela soma das entalpias do ar seco e do vapor d'água, H_w , dada a hipótese do gás perfeito, [4].

$$H = H_a + H_w \quad (6)$$

CAPÍTULO 3 – SISTEMA EVAPORATIVO DE REFRIGERAÇÃO

3.1 INTRODUÇÃO

Há décadas, o sistema evaporativo tem sido utilizado em inúmeros países como fonte de resfriamento de ar natural e de baixo consumo de energia.

Resfriamento evaporativo pode ser definido, de maneira genérica, como o processo em que a água evapora ao receber calor de algum meio ou produto, ou seja, é um processo endotérmico (demanda calor para se realizar), [6]. A transferência de calor pode ocorrer de duas maneiras: pode ser forçada, ou seja, quando o calor é fornecido, ou pode ser induzida, quando condições são criadas para que o próprio produto retire calor do meio. No caso do resfriamento evaporativo do ar, a transferência é forçada, pois o ar cede energia para fazer a água evaporar, tendo como consequência uma redução na temperatura do ar que sai do resfriador.

O condicionamento de ar por resfriamento evaporativo auxilia para um melhor desempenho do homem no trabalho e para seu conforto, principalmente durante as épocas mais quentes do ano. Também é eficiente energeticamente, representando uma alternativa econômica aos sistemas de ar condicionado convencionais. Outra vantagem é ser um método ambientalmente correto por utilizar a água como fluido de trabalho, ao invés dos gases CFC ou HFC, [6].

A principal característica do resfriamento evaporativo é o aumento da sua eficiência quanto maior for a necessidade de resfriamento para se atingir o conforto térmico e quanto mais seco for o ar, pois este terá uma maior capacidade de absorver vapor d'água, resultando em uma maior evaporação e redução da temperatura. O aumento da umidade relativa proporcionado por este tipo de resfriamento é benéfico principalmente nas regiões mais secas, pois não causa o ressecamento da pele e mucosas do corpo, geralmente proporcionado pelos sistemas convencionais.

Este tipo de sistema tem a desvantagem do consumo de água, porém possui diversas outras vantagens além das já citadas, como:

- Facilidade e baixos custos de manutenção. O sistema requer apenas uma limpeza periódica e a probabilidade de ocorrer algum defeito mecânico é baixa, pois o sistema conta apenas com um motor elétrico e uma bomba hidráulica;
- Facilidade de instalação. Devido a não complexidade dos seus componentes mecânicos e de operação;

- Melhor qualidade do ar ambiente. O sistema evaporativo é projetado para trabalhar com renovação completa do ar do ambiente climatizado, eliminando, assim, odores, poeira e problemas de proliferação de fungos e bactérias, típicos de sistemas de ar convencionais.

3.2 REDUÇÃO DA TEMPERATURA E A ENERGIA ENVOLVIDA NO PROCESSO

A redução de temperatura do ar em sistemas evaporativos não depende apenas da temperatura de entrada do ar no resfriador. Para uma mesma temperatura, o sistema pode obter diferentes saídas, variando conforme a umidade relativa do ar de entrada. Dessa maneira, a eficiência energética do sistema sofre variações durante todo o dia, atingindo os melhores resultados em horários de maior temperatura e menor umidade relativa.

A evaporação da água é um processo endotérmico e, por isso, necessita de muito calor, que é retirado do elemento que se encontra em contato com a água. A energia envolvida na mudança de fase da água (calor latente) corresponde a uma variação significativa da temperatura da mesma (calor sensível).

3.3 EFICIÊNCIA DO SISTEMA EVAPORATIVO

A condição fundamental para uma alta eficiência do sistema evaporativo é a renovação total do ar, uma vez que, a eficiência do resfriador diminui até ser nula a cada recirculação do ar por ele. Isto se deve ao fato de o ar se encontrar praticamente saturado, umidade relativa de aproximadamente 100%, após passar pelo sistema de resfriamento evaporativo. Ao passar para o ambiente, o ar se aquece e sua umidade relativa diminui, características estas que não voltam aos níveis que se encontravam antes do resfriamento.

Esta renovação total requer um sistema de exaustão ou aberturas compatíveis com a vazão de ar admitida, devido a isto, aberturas como portas, vãos, janelas, dentre outras e exaustores, dependendo das suas localizações, auxiliam na otimização da renovação do ar do ambiente e, conseqüentemente, no aumento da eficiência do sistema evaporativo.

A eficiência dos painéis evaporativos pode atingir até 100%, porém, devido a questões de viabilidade econômicas, os sistemas evaporativos são projetados para que seus painéis apresentem, normalmente, uma eficiência de 80% ou de 90%, [8]. Esta pode ser calculada por meio da fórmula (7), [6].

$$E_F = \frac{T_{\text{entrada}} - T_{\text{saída}}}{T_{\text{entrada}} - T_{\text{BU}}} \quad (7)$$

Onde, E_F corresponde à eficiência e T_{entrada} e $T_{\text{saída}}$ são, respectivamente, temperatura de entrada e de insuflamento do sistema.

3.4 PRINCÍPIO DO SISTEMA EVAPORATIVO

Na maior parte do tempo o ar se encontra insaturado, estando apto a absorver mais umidade. Esta capacidade de absorção de umidade é inversamente proporcional à quantidade de vapor d'água presente no ar.

A primeira etapa para que o ar insaturado possa absorver mais água é passar esta para sua fase de vapor, passagem esta que demanda certa energia, que é retirada do próprio ar, resfriando-o. Segundo um princípio básico das reações físico-químicas, a velocidade da reação é maior quanto maior for a superfície de contato entre os reagentes, desta forma, é necessário dispersar a água, uma vez que o ar já ocupa todo o ambiente.

Os equipamentos de resfriamento evaporativo são divididos em duas modalidades, [6]: equipamentos de refrigeração evaporativa direta (RED), Figura 3.1-a, que resfriam o ar por meio do contato direto com uma superfície líquida ou sólida molhada ou por meio de sprays; e equipamentos de refrigeração evaporativa indireta (REI), Figura 3.1-b, onde o ar que se encontra onde o líquido está sendo vaporizado (lado molhado) é mantido separado do ar praticamente seco.

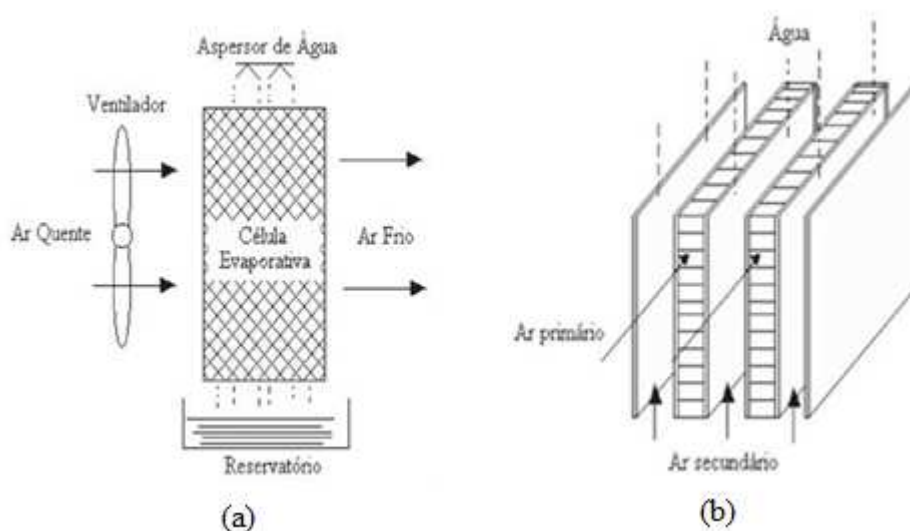


Figura 3.1. (a) Resfriamento evaporativo direto e (b) Resfriamento evaporativo indireto, [6].

3.5 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA EVAPORATIVO

Os métodos básicos para o dimensionamento deste tipo de sistema são dois: Método por Cálculo de Carga Térmica e Método das Renovações de Ar. O primeiro método é mais preciso e, por isso, requer um levantamento mais detalhado e preciso dos dados, como o

número de pessoas que geralmente freqüentam o ambiente em questão, as potências consumidas, o calor dissipado por máquinas, etc. Já o segundo método é mais empírico, demandando certa experiência para a avaliação das condições, [8].

3.5.1 Método por Cálculo da Carga Térmica

A seguir são descritos os passos para dimensionamento do equipamento evaporativo baseado no cálculo da carga térmica, segundo a bibliografia [8].

- Calcular a carga térmica total do ambiente a ser atendido;
- Determinar a temperatura de bulbo seco, a temperatura de bulbo e a umidade relativa do local da instalação;
- Determinar a temperatura de saída do ar do resfriador (temperatura resultante);
- Determinar a temperatura requerida do ambiente a ser atendido. Normalmente de 3°C a 5°C acima da temperatura de saída do ar do resfriador.

3.5.2 Método das Renovações de Ar

A seguir são descritos os passos para dimensionamento do equipamento evaporativo baseado na renovação de ar, segundo a bibliografia [9].

- Determinar a temperatura de bulbo úmido do local da instalação de acordo com a norma 16401 da ABNT e, então, selecionar a Zona Térmica de projeto de acordo com a Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Zona térmica, [9].

Zona Térmica	Temperatura de Bulbo Úmido (°C)
1	22-23
2	24-25
3	26-27
4	28-29

- Determinar se a carga térmica gerada internamente é normal ou excessiva, sendo uma área considerada com carga térmica excessiva quando possui uma grande concentração de pessoas ou equipamentos que produzem calor;
- Determinar se o grau de proteção do ambiente em relação ao calor externo (radiação solar) é bom ou fraco. Para a proteção ser considerada de boa qualidade é necessário que o telhado seja isolado termicamente ou não seja exposto diretamente

ao sol e, também, que as janelas não recebam sol durante os horários mais quentes do dia ou que a área ocupada por estas seja pequena;

- Estimar, segundo a tabela de Trocas de Ar, Tabela 3.2, o número de trocas de ar requeridas por hora para o ambiente a ser climatizado. Como o aparelho nunca funciona com 100% de eficiência, é aconselhado que se considere 5 (cinco) trocas de ar por hora a mais do que o indicado na tabela;

Tabela 3.2. Trocas de ar por hora, [9].

Carga Interna	Proteção Solar	Trocas de Ar por Hora			
		Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
Excessiva	Fraca	30	40	46	86
	Boa	20	30	40	60
Normal	Fraca	20	30	40	60
	Boa	15	20	30	46

- Determinar o volume do ambiente pela fórmula (8):

$$V_{AMB} = w.l.h \quad (8)$$

onde V_{AMB} é o volume do ambiente (m^3), w é a largura (m) e l é o comprimento (m) do ambiente e h é a altura (m) abaixo do duto de insuflamento de ar;

- Calcular a vazão de ar que deve ser insuflada no ambiente pelo equipamento, utilizando a fórmula (9):

$$V_{ar}(m^3/h) = V_{AMB}(m^3) \cdot N_{Trocas}(trocas/h) \quad (9)$$

CAPÍTULO 4 – CONFORTO TÉRMICO E O SISTEMA HÍBRIDO DE REFRIGERAÇÃO

4.1 INTRODUÇÃO

O conforto ambiental é condição necessária para o bem-estar do ser humano e abrange o conforto acústico, antropométrico, olfativo, tátil, visual e térmico.

Os aparelhos de ar condicionado são utilizados com o objetivo de atingir o conforto térmico, um dos objetos de estudo deste trabalho, mas também influencia o conforto acústico e olfativo.

Conforto térmico pode ser definido como o estado mental que expressa a satisfação do homem com o ambiente térmico onde ele se encontra, [10]. Assim, os estudos voltados para o conforto térmico têm como proposta estabelecer métodos para uma análise térmica detalhada de ambientes e também fixar condições necessárias para avaliar e gerar um ambiente térmico favorável à ocupação e às atividades dos seres humanos. Esse estudo baseia-se principalmente em três fatores, [11]:

- A satisfação do homem em se sentir termicamente confortável;
- O desempenho humano;
- A conservação de energia.

A sensação de desconforto térmico pode ser causada quando o balanço térmico não é estável, ou seja, quando o calor produzido pelo corpo e o calor que o mesmo perde para o ambiente são diferentes.

É importante destacar que a satisfação térmica dos seres humanos também depende das características biológicas de cada um, logo, é impossível conseguir que todas as pessoas que estão localizadas em um determinado ambiente se sintam termicamente confortáveis. Devido a isto, as condições de conforto térmico são criadas visando agradar a maior porcentagem do grupo.

4.2 DEFINIÇÃO DE CONFORTO TÉRMICO E NEUTRALIDADE TÉRMICA

Algumas definições são importantes para melhor entender o assunto em questão.

4.2.1 Conforto Térmico

Segundo [2] conforto térmico é definido como: “Conforto térmico é a condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico”.

4.2.2 Neutralidade Térmica

De acordo com Ole Fanger (1970), um pesquisador dinamarquês, neutralidade térmica é definida como “a condição na qual uma pessoa não prefira nem mais calor nem mais frio no ambiente ao seu redor”, [11].

Segundo Shin-Iche Tanabe (1984), neutralidade térmica é “a condição da mente que expressa satisfação com a temperatura do corpo como um todo”, [11].

Analisando os mecanismos de trocas de calor do corpo com o meio ambiente, uma definição de neutralidade térmica que expressa a satisfação das pessoas com a temperatura do corpo de modo geral é: “estado físico no qual todo o calor gerado pelo organismo através do metabolismo seja trocado em igual proporção com o ambiente ao redor, não havendo nem acúmulo de calor, nem perda excessiva do mesmo, mantendo a temperatura corporal constante”, [11].

A partir dessas definições é possível perceber que se uma pessoa estiver exposta a algum tipo de desconforto localizado, ela poderá estar em neutralidade térmica, mas não estará se sentindo termicamente confortável. Logo, pode-se concluir que a neutralidade térmica é uma condição necessária para que a pessoa esteja em conforto térmico, porém não é suficiente.

4.3 NORMAS ASHRAE PARA CONFORTO TÉRMICO

As normas a respeito do conforto térmico reúnem estudos sobre as variáveis que o influencia. O principal guia de referência e as principais normas sobre conforto térmico são, [11]:

- ASHRAE Fundamentals Handbook - cap. 8 Thermal Comfort – 1997. É um guia normativo da sociedade americana de aquecimento, refrigeração e ar condicionado. Este guia expõe os fundamentos da termorregulação humana e do conforto térmico e apresenta, resumidamente, as normas ISO, que serão citadas a seguir.
- ISO 7730/94 - Ambientes térmicos moderados - Determinação dos índices PMV (voto médio predito) e PPD (porcentagem de pessoas insatisfeitas) e especificações das condições para conforto térmico.
- ISO 8996/90 - Ergonomia - Determinação da produção de calor metabólico. Esta norma explica o raciocínio utilizado para se determinar e medir a taxa metabólica dos seres humanos e, também, permite verificar o custo total energético das atividades realizadas por eles.
- ISO 9920/95 - Ergonomia de ambientes térmicos - Estimativa de isolamento térmico e resistência evaporativa de um traje de roupas.

4.4 NORMA ABNT NBR 16401 DE INSTALAÇÕES DE AR CONDICIONADO

A Norma ABNT NBR 16401 foi criada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que é o Foro Nacional de Normalização, com o título geral “Instalações de ar condicionado – Sistemas centrais e unitários”. Esta norma é formada por três partes: projeto de instalações, parâmetros de conforto térmico e qualidade do ar interior, [12].

A parte referente aos parâmetros de conforto térmico indica quais são os parâmetros que os ambientes térmicos influenciados por ar condicionado devem ter para que a sensação térmica seja satisfatória para 20% ou mais dos ocupantes.

4.4.1 Parâmetros de Conforto para Verão

Temperatura operativa e umidade relativa dentro da zona delimitada por, [12]:

- 22,5 °C a 25,5 °C e umidade relativa de 65 %.
- 23,0 °C a 26,0 °C e umidade relativa de 35 %.

A velocidade média do ar (não direcional) na zona de ocupação não deve ultrapassar, [12]:

- 0,20 m/s para distribuição de ar convencional (grau de turbulência 30 % a 50 %);
- 0,25 m/s para distribuição de ar por sistema de fluxo de deslocamento (grau de turbulência inferior a 10 %).

4.4.2 Parâmetros de Conforto para Inverno

Temperatura operativa e umidade relativa dentro da zona delimitada por, [12]:

- 21,0 °C a 23,0 °C e umidade relativa de 60 %.
- 21,5 °C a 24,0 °C e umidade relativa de 30 %.

A velocidade média do ar (não direcional) na zona de ocupação não deve ultrapassar, [12]:

- 0,15 m/s para distribuição de ar convencional (grau de turbulência 30 % a 50 %);
- 0,20 m/s para distribuição de ar por sistema de fluxo de deslocamento (grau de turbulência inferior a 10 %).

4.5 VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM O CONFORTO

Os estudos sobre o conforto térmico, realizados em câmaras climatizadas, apontam seis variáveis que o influenciam das quais duas não dependem do ambiente e, por isso, são classificadas como pessoais ou subjetivas, e as demais, que dependem do ambiente, são denominadas de variáveis ambientais. Essas variáveis são, [11]:

Variáveis pessoais ou subjetivas:

- Atividade desempenhada, M , (W/m^2);
- Isolamento térmico das roupas utilizadas, I_{cl} , (clo).

Variáveis ambientais:

- Temperatura do ar, t_a , ($^{\circ}\text{C}$);
- Temperatura radiante média, t_{rm} , ($^{\circ}\text{C}$);
- Velocidade do ar, v_{ar} , (m/s);
- Pressão parcial do vapor de água no ar ambiente, p_a , (KPa).

Além dessas variáveis, algumas outras, como sexo, idade, raça, hábitos alimentares, peso, entre outras, devem ser consideradas, pois influenciam nas condições de conforto térmico de cada indivíduo.

4.5.1 Metabolismo

O ser humano é homeotérmico, ou seja, a temperatura interna do seu organismo deve permanecer praticamente constante em aproximadamente 37°C , podendo variar de $36,1^{\circ}\text{C}$ a $37,2^{\circ}\text{C}$, sendo o limite inferior para a sobrevivência igual a 32°C e o superior igual a 42°C , [11]. Esta condição é possível porque o organismo humano possui um mecanismo termorregulador que controla as suas variações térmicas.

O corpo humano necessita de calor para que possa desempenhar suas atividades. Parte do calor gerado pelo organismo é necessário para o desempenho das atividades basais, a outra parte é gerada por meio da execução de atividades externas e deve ser dissipada para manter a temperatura interna do organismo em equilíbrio. Desta forma, o organismo experimenta a sensação de conforto térmico quando ele perde para o ambiente o calor produzido pelo metabolismo proporcional à atividade realizada, sem que necessite recorrer a um mecanismo de termo-regulação.

Quando o corpo está exposto a um meio que possui condições térmicas impróprias, o organismo recorre ao seu sistema de termo-regulação, ativando-o. Assim, por meio de mecanismos de controle de temperatura, este sistema reduz ou aumenta as perdas de calor pelo organismo.

O metabolismo pode ser expresso em unidade do metabolismo, met, ou em W/m^2 de pele, sendo que 1 met é igual a $58,15 \text{ W/m}^2$ de área superficial corporal, valor este que corresponde a uma pessoa relaxada.

A Figura 4.1 apresenta as taxas metabólicas em função da atividade desempenhada pelo indivíduo de acordo com ISO 7730 (1994) e ISO 8996/90, citadas na seção 4.3.

Atividades	Taxas Metabólicas	
	W/m ²	met
-Deitado, reclinado	46	0,8
-Sentado, relaxado	58	1,0
-Atividade sedentária (escritório, residência, escola, laboratório)	70	1,2
-Atividade leve em pé (compras, laboratório, indústria leve)	93	1,6
-Atividade média em pé (balconista, trabalho doméstico, em máquinas)	116	2,0
-Andando em nível:	110	1,9
2 km/h	140	2,4
3 km/h	165	2,8
4 km/h	200	3,4
5 km/h		

Figura 4.1. Taxa metabólica para diferentes atividades segundo ISO 7730 (1994) e ISO 8996/90, [11].

4.5.2 Vestimenta

A vestimenta exerce a função de isolante térmico entre o corpo e o meio, sendo um obstáculo para as trocas de calor por convecção. De acordo com o grau de isolamento que ela proporciona, com seu ajuste no corpo e com a área do corpo que cobre, a vestimenta mantém uma camada de ar mais ou menos aquecido próxima ao corpo e, também, faz este ser menos sensível às mudanças de temperatura e de velocidade do ar.

A resistência térmica oferecida pela vestimenta deve ser medida por meio das trocas secas relativas a quem a usa e depende de fatores como: tipo de tecido, da fibra e do ajuste ao corpo. A sua unidade de medida origina-se de clothes, sendo denominada clo, [11].

O isolamento térmico das roupas pode ser determinado diretamente a partir das tabelas da ISO 7730 (1994) e ISO 9920/95. Uma parte dessas tabelas pode ser vista na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Índice de isolamento térmico para vestimentas típicas segundo ISO 7730 (1994) e ISO 9920/95, [11].

Roupas de Trabalho	I_{cl}	
	Clo	$m^2.K/W$
Roupa íntima, macacão protetor, meias, sapatos	0,70	0,110
Roupa íntima, camisa, calça, meias, sapatos	0,75	0,115
Roupa íntima, camisa, macacão protetor, meias e sapatos	0,80	0,125
Roupa íntima, camisa, calça, meias e sapatos	0,85	0,135

4.5.3 Temperatura Radiante Média

A temperatura radiante média representa a temperatura uniforme de um ambiente imaginário no qual a troca de calor por radiação é igual ao ambiente real não uniforme.

4.5.4 Temperatura do Ar

A variável principal que influencia no conforto térmico é a temperatura do ar, pois a sensação de conforto está diretamente relacionada com a perda de calor do corpo devido a diferença de temperatura existente entre o corpo e o meio e devido aos mecanismos termos-reguladores, [10]. Logo é importante conhecer a temperatura operativa, que corresponde a uma temperatura teórica que resume todas as perdas de temperatura que um corpo terá caso esteja submetido a uma temperatura heterogenia.

4.5.5 Velocidade do Ar

A velocidade do ar em ambientes internos é geralmente inferior a 1m/s, [10]. Quando esta velocidade é influenciada por meios mecânicos, a sensação de perda de calor aumenta devido à convecção forçada. A evaporação no corpo humano também aumenta, reduzindo, assim, a sensação de calor.

4.5.6 Umidade relativa do ar

A umidade relativa do ar é outro fator que influencia na perda de calor do corpo por evaporação.

O organismo tende a aumentar a eliminação de calor por evaporação à medida que as perdas por convecção e radiação são dificultadas pela elevação da temperatura ambiente.

Quando a temperatura do meio é maior do que a do corpo e, o ar se encontra saturado, a evaporação se torna impossível e, então, a pessoa localizada no meio começa a ganhar mais calor. Por outro lado, se o ar encontra-se insaturado, as perdas de calor pelo processo da evaporação continuam.

4.6 VOTO MÉDIO PREDITO (PMV)

O PMV é considerado o índice mais completo para a avaliação do conforto térmico, pois se baseia nas seis variáveis citadas no tópico 4.5. Este método foi proposto por Fanger, após a realização de estudos na Dinamarca em câmaras climatizadas, onde um grupo de pessoas registrou seus votos segundo a escala de sensações térmicas de sete pontos da ASHRAE, que pode ser vista na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Escala térmica de Fanger, [10].

Escala	Sensação
+3	Muito quente
+2	Quente
+1	Levemente quente
0	Neutro
-1	Levemente frio
-2	Frio
-3	Muito frio

Este método é utilizado na ISO 7730/94, que considera um ambiente termicamente confortável quando a porcentagem de pessoas insatisfeitas (PPD) é inferior a 10%, para isto o PMV deve se encontra entre -0,5 e 0,5.

4.6.1 Equação do PMV

O índice médio predito pode ser determinado de acordo com a equação (10), citada a seguir, [11].

$$PMV = (0,303 \cdot e^{-0,036M} + 0,028) \cdot L \quad (10)$$

Nesta equação M corresponde a taxa metabólica em função da atividade desempenhada pelo indivíduo e pode ser determinada diretamente utilizando-se a Figura 4.1. L representa a carga térmica sobre o corpo que é gerada pela diferença entre o calor produzido pelo corpo e o trocado com o meio ambiente e pode ser calculada conforme a equação (11), [11].

$$L = (M - W) - 3,05 \cdot (5,73 - 0,007 \cdot (M - W) - p_a) - 0,42 \cdot ((M - W) - 58,15) - 0,0173 \cdot (M - W) \cdot (5,87 - p_a) - 0,0014 \cdot (M - W) \cdot (34 - t_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_{rm} + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a), \quad (11)$$

Onde:

M = Taxa metabólica, em W/m²,

W = Trabalho mecânico, em W/m², sendo nulo para a maioria das atividades,

f_{cl} = Razão entre a área superficial do corpo vestido, pela área do corpo nu,

t_a = Temperatura do ar, em °C,

t_{rm} = Temperatura radiante média, em °C,

p_a = Pressão parcial do vapor de água, em Pa,

h_c = Coeficiente de transferência de calor por convecção, em W/m².°C,

t_{cl} = Temperatura superficial das roupas, em °C.

A razão entre a área superficial do corpo vestido, pela área do corpo nu, f_{cl}, depende da resistência térmica da roupa, I_{cl}, e é definida a partir da equação (12), se I_{cl} for menor ou igual a 0,5 clo, e a partir da equação (13), se I_{cl} for maior do que 0,5 clo. I_{cl} deverá sempre ser usado em m².°C/W nas fórmulas deste trabalho. Para isto é necessário multiplicá-lo por 0,155, [11].

$$f_{cl} = 1,00 + 0,2 \cdot I_{cl} \quad (12)$$

$$f_{cl} = 1,05 + 0,1 \cdot I_{cl} \quad (13)$$

A pressão parcial do vapor d'água, p_a, pode ser determinada pela fórmula (16), tendo como base a fórmula (14) da umidade relativa e a fórmula (15) da pressão saturada de vapor.

$$UR = 100 \cdot \frac{p_a}{p_{as}} \quad (14)$$

$$p_{as} = 0,611 \cdot e^{(17,27 \cdot t_a / (t_a + 273,3))} \quad (15)$$

$$p_a = \frac{UR \cdot p_{as}}{100} \quad (16)$$

Já a temperatura superficial das roupas, t_{cl} , depende do cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção, h_{cl} , e vice-versa. Sendo assim, podem ser calculados iterativamente por meio da fórmula (17) do f_{cl} e da fórmula (18) do h_{cl} , sendo que sempre se deve utilizar o maior valor calculado do h_{cl} para a realização dos demais cálculos, [11].

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028 \cdot M - 0,155 \cdot I_{cl} \cdot \{3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4 + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)]\} \quad (17)$$

$$\begin{cases} h_c = 2,38 \cdot (t_{cl} - t_a)^{0,25} \\ h_c = 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \end{cases} \quad (18)$$

A variável v_{ar} corresponde à velocidade relativa do ar, em m/s, e pode ser estimada, a partir da velocidade do ar mensurada, v_a , pela fórmula (19), [11].

$$v_{ar} = v_a + 0,0052(M - 58) \quad (19)$$

É importante ressaltar que este cálculo do índice do PMV é recomendado apenas para, [11]:

- Valores de PMV entre +2 e -2;
- Taxa metabólica entre 0,8 met e 4 met;
- Resistência térmica das roupas entre 0 clo e 2 clo;
- Temperatura do ar entre 10°C e 30°C,
- Temperatura radiante média entre 10°C e 40°C;
- Velocidade do ar entre 0 e 1m/s.
- Pressão parcial de vapor d'água entre 0Pa e 2700Pa.

4.6.2 Porcentagem de Pessoas Insatisfeitas – PPD

Como já citado anteriormente, o índice PPD estabelece o número aproximado de pessoas que estão insatisfeitas termicamente com o ambiente onde se encontram e é baseado em um grupo de pessoas que gostariam que a temperatura do ambiente fosse mais elevada ou mais baixa.

Este índice pode ser determinado analiticamente em função do PMV, por meio da equação (20), ou pode simplesmente ser extraído da Figura 4.2.

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-(0,03353 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^2)} \quad (20)$$

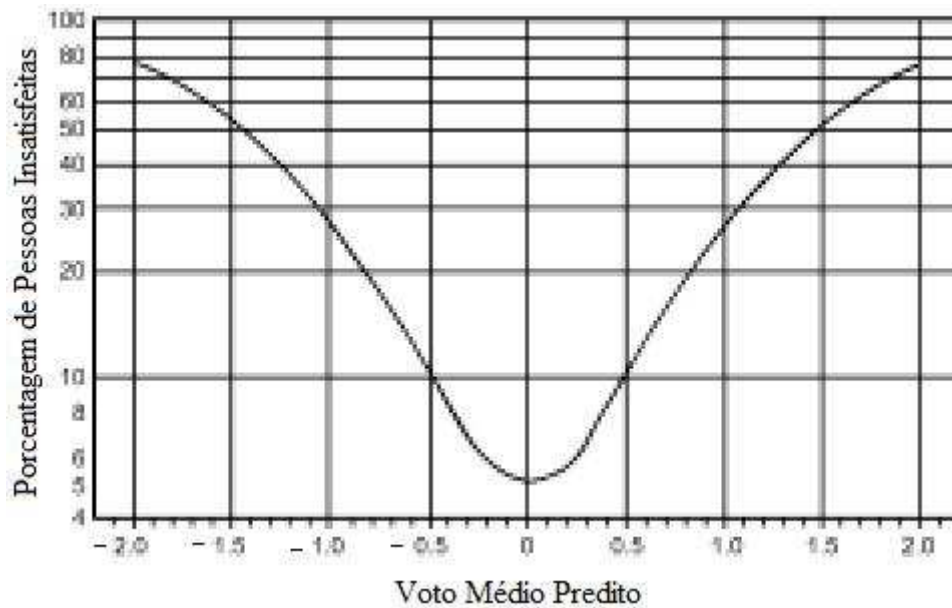


Figura 4.2. Porcentagem de pessoas insatisfeitas (PPD), em função do voto médio estimado (PMV), [11].

4.7 SISTEMA CONVENCIONAL DE REFRIGERAÇÃO

Primeiramente é importante definir refrigeração, sendo esta uma definição vasta. Alguns possíveis significados para este termo estão citados a seguir, [6]:

- Geração em um espaço pré-determinado de uma temperatura inferior à temperatura de outro espaço considerado;
- Processo de retirada de calor de onde ele não é desejado;
- De forma mais completa, o processo de refrigeração pode ser definido como o processo de retirada e transferência de calor, isto é, retira-se o calor indesejado de um espaço ou corpo para reduzir sua temperatura e transfere-se mecanicamente esse calor para outro espaço ou corpo onde ele não seja prejudicial.

Um tipo de sistema convencional muito utilizado é o *split*, que é usado em situações em que o ambiente a climatizar não possui saída para o exterior, uma vez que é composto por duas unidades, uma unidade interna, que fica localizada no ambiente a ser climatizado, e uma unidade condensadora externa, que se localiza no exterior do ambiente a climatizar. A unidade interna é composta por um filtro de ar e um evaporador de tubo aletado, insuflado por ar forçado por meio de um ventilador centrífugo ou turbina. Já a unidade externa utiliza ventilador do tipo helicoidal ou axial para forçar o ar a passar por essa unidade e esfriá-la. A comunicação entre esses dois gabinetes é feita por meio do prolongamento das tubulações

de alta e baixa pressão, que levam, respectivamente, o fluido refrigerante no estado de vapor para o condensador e o fluido refrigerante líquido para o evaporador, [13].

O ciclo frigorífico desse tipo de sistema é caracterizado pela evolução, em um ciclo fechado, do fluido refrigerante. Elemento este que possui características termodinâmicas especiais, podendo vaporizar a temperaturas muito baixas quando comparadas à temperatura de vaporização da água, sendo seu ponto de ebulição inferior à temperatura ambiente. Neste ciclo, o fluido refrigerante, pela sua condensação, rejeita calor a alta temperatura e pressão, e pela sua evaporação, absorve calor a baixa temperatura e pressão, transformando-se, periodicamente, em líquido e vapor, removendo, assim, calor de uma fonte quente.

O funcionamento do sistema por compressão pode ser explicado simplificadaamente da seguinte maneira: o fluido refrigerante entra no evaporador, no estado de líquido mais vapor, e retira calor do ambiente interno onde este se encontra, o que causa a sua mudança para o estado de vapor saturado seco. Esse vapor é succionado pelo compressor e comprimido nele até a pressão de condensação e, em seguida, é transferido para o condensador. Nesta unidade o fluido refrigerante passa para o estado líquido novamente por meio da liberação de calor para o ambiente exterior. Em seguida, o refrigerante passa pelo dispositivo de expansão e a sua pressão é reduzida até a pressão de vaporização. O fluido refrigerante então volta às suas condições de absorver calor e o ciclo se reinicia.

Para melhor entender o que ocorre em cada um dos componentes citados, recomenda-se a leitura do anexo A.

4.8 VANTAGENS DO SISTEMA HÍBRIDO

O sistema híbrido é composto por um sistema evaporativo e por um sistema de refrigeração convencional.

Esse sistema busca combinar as vantagens de cada um dos sistemas que o compõe com a finalidade de consumir menos energia elétrica quando comparado aos sistemas convencionais e fornecer ar refrigerado de melhor qualidade, promovendo melhores condições de conforto térmico.

Como já citado anteriormente, o condicionamento de ar por resfriamento evaporativo é um método que além de não agredir o meio ambiente é energeticamente eficiente. Outra característica que deve ser considerada é que a temperatura do ar insuflado está vinculada à umidade relativa do ar captado e à necessidade de resfriamento para atingir o conforto térmico. Alguns fabricantes fornecem tabelas onde é possível verificar a relação citada acima, como é o exemplo da Tabela 4.3 fornecida pelo fabricante Catermo.

Tabela 4.3. Tabela de redução de temperatura interna em função da umidade relativa do ar externo e da temperatura do mesmo, [14].

Umidade Relativa do ar externo	Temperatura do ar externo				
	25°C	30°C	35°C	40°C	45°C
	Redução de Temperatura (°C)				
30%	8,5	9,6	10,8	12,0	15,0
40%	7,1	8,0	8,8	9,7	12,5
50%	5,7	6,5	7,1	7,8	9,5
60%	4,4	5,0	5,5	5,9	7,0
70%	3,2	3,6	4,0	4,4	5,0

Observando-se a tabela é possível perceber que algumas vezes o sistema evaporativo isolado não é suficiente para que as condições de conforto térmico, que serão citadas nos tópicos seguintes, sejam alcançadas e, por isso, é necessária a utilização de um sistema convencional de refrigeração. O condicionamento de ar por resfriamento evaporativo, então, é usado como pré-resfriador do sistema convencional.

CAPÍTULO 5 – PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO

5.1 INTRODUÇÃO

Protocolo é um padrão ou convenção utilizado para permitir a comunicação, conexão ou transferência de dados entre diversos dispositivos. Um conjunto de regras objetivas que permitem a um emissor e a um receptor a transmissão de informação [15]. Informação, esta, que pode variar de conteúdo e utilidade conforme o propósito preterido pelo protocolo.

A gramática da língua portuguesa, inglesa ou qualquer outra língua falada e utilizada no cotidiano pelos povos, está presente também nos protocolos de comunicação. Regras análogas à linguagem falada como sintaxe da mensagem e a morfologia das estruturas de dados ou regras advindas das necessidades específicas da comunicação entre máquinas como a verificação da existência de um nó de comunicação, a detecção de perda de conexão e o termino de sessão de comunicação compõem a gramática básica de um protocolo.

Definidas as regras de forma clara e objetiva, dispositivos desenvolvidos por companhias diferentes e locais diferentes, podem enfim trocar informações permitindo o monitoramento, controle, acionamento ou qualquer outra atividade advinda da comunicação destas aplicações de hardware ou software [16].

Atividades diversas como refrigeração, automação, internet, telefonia, dentre outras, apresentam necessidades específicas para a composição de suas regras e somente a padronização poderia permitir a comunicação entre componentes de diferentes fabricantes. Surgiram então nestes diversos ramos protocolos consagrados de comunicação como o BACnet, o ZigBee, o TCP/IP e o 3G. Apesar de consagrados, as evoluções de dispositivos de hardware e o software não permitem que estes protocolos permaneçam estáticos, por este motivo, variantes estão constantemente sendo criadas. Podendo, assim, surgir novos protocolos ou a integração entre dois existentes.

5.2 BACnet

O BACnet é um protocolo de comunicação aberto desenvolvido pela ASHRAE e posteriormente adotado pela ANSI/ISO como um de seus protocolos padrão. Criado com o objetivo de acabar com a insatisfação dos protocolos proprietários até então existente, o BACnet permitiu que equipamentos de controle de sistemas possam se comunicar de forma contínua. Para tornar isto realidade, o sistema se baseou em três fundamentos básicos: objetos com propriedades padronizadas, serviços para acessar as informações dos objetos e regras de interoperabilidade, [17].

5.2.1 Objetos e Propriedades

Os objetos foram criados cada qual com sua padronização de propriedades pertinentes com suas funções. A Tabela 5.1 apresenta os objetos disponíveis no protocolo e exemplifica suas utilizações.

Tabela 5.1. Objetos BACnet.

Objetos	Exemplos de Uso
Analog Input	Sensor de Entrada
Analog Output	Sensor de Saída
Analog Value	Setpoint para sistemas de controle
Binary Input	Switch de entrada
Binary Output	Relé
Binary Value	Setpoint Digital para sistemas de controle
Calendar	Definição de datas
Command	Modos de Emergências, economia de energia e outros
Device	Especifica objetos e dispositivos suportados pelo dispositivo
Event Enrollment	Ocorrência de eventos devido a alarme ou erros
File	Escrita e leitura de arquivos
Group	Agrupar objetos
Loop	Padroniza controles de loop
Multi-State Input	Representa o estado de sistemas com vários estados
Multi-State Output	Representa ao estado de saída de sistemas com vários estados
Notification Class	Contém a lista de dispositivos de a serem notificados em caso de alarme
Program	Permiti começar, parar ou carregar programas de forma remota
Schedule	Definição de agenda

Um único dispositivo pode conter um ou mais objetos BACnet sendo escolha do fabricante esta definição conforme funções ou capacidades do equipamento. Uma placa de acionamento de um sistema de refrigeração pode ter objetos de saídas digitais, entradas analógicas e seu *device object*. Enquanto um sistema Supervisório pode apresentar apenas

o seu *device object*. O único objeto que deve estar obrigatoriamente presente em todos os dispositivos é o *device object* o qual descreve todas as características do objeto na rede.

A norma BACnet [18] define 127 propriedades diferentes para os objetos e permite ainda que fabricantes utilizem propriedades próprias para aplicações locais. Em aplicações para automação, objetos de entrada analógica e digital, variáveis de controle analógicas e digitais, saídas analógicas e digitais estão constantemente presentes e o conhecimento de suas propriedades pode auxiliar na elaboração de solução para projetos nesta área. A Tabela 5.2 apresenta as propriedades obrigatórias para cada um dos objetos citados acima. Propriedades optativas também foram normatizadas, mas novamente compete ao desenvolvedor sua aplicação no objeto. As únicas propriedades que devem estar presentes em todos os objetos são o *identifier*, o *name* e o *object type*. Uma tabela completa com as propriedades obrigatórias e optativas de todos os objetos pode ser encontrada na norma BACnet, [18].

Tabela 5.2. Propriedades obrigatória dos objetos BACnet.

Propriedades	Exemplo	Presentes nos Objetos
Object Identifier	Entrada Analógica #1	Todos os Objetos
Object Name	“AI 01”	Todos os Objetos
Object Type	Entrada Analógica	Todos os Objetos
Present Value	5.0	Analog Input ¹ , Analog Value ² , Analog Output ³ , Binary Input ⁴ , Binary Output ⁵
Status Flag	Em alarme/ erro/ sem serviço/Substituído	Analog Input, Analog Value, Analog Output, Binary Input, Binary Output
Event State	Estado – “Normal”	Analog Input, Analog Value, Analog Output, Binary Input, Binary Output
Out of service	Falso/Verdadeiro	Analog Input, Analog Value, Analog Output, Binary Input, Binary Output

¹ Analog Input – Entrada Analógica

² Analog Value – Variável de Controle Analógica

³ Analog Output – Saída Analógica

⁴ Binary Input – Entrada Digital

⁵ Binary Output – Saída Digital

Units	Volts/Celsius/...	Analog Input, Analog Value, Analog Output
Profile Name	“Comercial”	Analog Input, Analog Value, Analog Output
Priority Array	1/2/3/...	Analog Output, Binary Output
Relinquish Default	Falso/Verdadeiro	Analog Output, Binary Output
COV Increment	X – Notificar caso Present Value seja incrementado em X	Analog Output, Analog Value
Polarity	Normal/Reversa	Binary Input, Binary Output

5.2.2 Serviços

Um serviço é um modo pelo qual um dispositivo adquire, controla ou anuncia informações para outros dispositivos. O BACnet define uma lista de 32 serviços disponíveis que podem ser agrupados em 5 categorias diferentes. As categorias são citadas a seguir: Alarm and Event, File Access, Object Access, Remote Device Management e Virtual Terminal Services. Sendo o único serviço obrigatório em todos os dispositivos, o ReadProperty pertencente à categoria Object Access. Uma vez recebido o serviço, compete ao dispositivo à confirmação ou não do recebimento da mensagem. A Tabela 5.3 apresenta as cinco categorias e indica na coluna BACnet a necessidade de acusar recebimento. A letra “C” será utilizada para indicar a necessidade, enquanto a letra “U” será utilizada para indicar a não obrigatoriedade de resposta.

Tabela 5.3. Categorias BACnet.

Alarm and Event		
Serviço	BACnet	Descrição
AcknowledgeAlarm	C	Utilizado para enviar ao gerador do alarme que o humano já o observou
ConfirmedCOVNotification	C	Notificar alterações em variáveis pré-cadastradas
ConfirmedEventNotification	C	Envia ao Remetente uma possível ocorrência de erro
GetAlarmSummary	C	Requisita do dispositivo a sua lista de alarmes

		ativos
GenEnrollmentSummary	C	Requisita do dispositivo uma lista de possíveis erros
SubscribeCOV	C	Notifica um dispositivo para que este seja avisado quando houver variação no valor de uma variável
UnconfirmedCOVNotification	U	Notificar alterações em variáveis pré-cadastradas
File Access		
Serviço	BACnet	Descrição
AtomicReadFile	C	Solicita a leitura de parte ou de todo file object
AtomicWriteFile	C	Escreve em parte ou em todo file object
Object Access		
Serviço	BACnet	Descrição
AddListElement	C	Adiciona um ou mais itens da lista de propriedades
RemoveListElement	C	Remove um ou mais itens da lista de propriedades
CreateObject	C	Utilizado para criação de uma instancia de um objeto
DeleteObject	C	Utilizado para excluir um determinado objetivo de um dispositivo
ReadProperty	C	Retorna o valor da propriedade de um objeto
ReadPropertyConditional	C	Retorna o valor de várias propriedades de um objeto que atendam a uma condição
ReadPropertyMultiple	C	Retorna o valor de várias propriedades de um objeto
WriteProperty	C	Escreve um valor em uma propriedade de um objeto
WritePropertyMultiple	C	Escrever diversos valores em diversas propriedades de um objeto

Remote Device Management		
Serviço	BACnet	Descrição
DeviceCommunicationControl	C	Informa a um dispositivo que deve “Parar” ou “Começar” a receber mensagens
ConfirmedPrivateTransfer	C	Envia uma mensagem proprietária a um dispositivo
UnconfirmedPrivateTransfer	U	Envia uma mensagem proprietária a um dispositivo
ReinitializeDevice	C	Enviar um comando requisitando reinicialização
ConfirmedTextMessage	C	Conduz uma mensagem de texto para outro dispositivo
UnconfirmedTextMessage	U	Conduz uma mensagem de texto para um ou mais dispositivos
TimeSynchronization	U	Envia o tempo atual para um ou mais dispositivos
Who-Has	U	Questiona quais dispositivos dispõem de um determinado objeto
I-Have	U	Reponde ao comando Who-Has
Who-Is	U	Questiona quais dispositivos estão na rede
I-Am	U	Responde ao comando Who-Is
Virtual Terminal		
Serviço	BACnet	Descrição
VT-Open	C	Estabelece um Virtual Terminal com outro dispositivo
VT-Close	C	Fecha um Virtual Terminal com outro dispositivo
VT-Data	C	Envia um texto para um dispositivo no Virtual Terminal

A categoria *Alarm and Events* é responsável pelo monitoramento de variáveis, notificando a aplicação caso haja alterações nos valores pré estabelecidos. A Categoria *File Access*

responsável pela leitura e manipulação de arquivos encontrados em dispositivos BACnet. A categoria *Virtual Terminal Services* é utilizada para comunicação bidirecional de textos. Já as outras duas categorias, *Object Access* e *Remote Device Management*, são utilizadas em basicamente todas as soluções merecendo assim um maior enfoque.

Como apresentado na Tabela 5.3, a categoria *Object Access* dispõem de serviços com a prerrogativa de acessar e modificar as listas de objetos BACnet. Em aplicações práticas, sensores são instalados em dispositivos com objetivo de coletar dados. Estes dados, por sua vez, são armazenados em objetos BACnet correspondente as suas características. O acesso a estes dados por outros dispositivos é então feito por meio do serviço de *ReadProperty* ou *ReadPropertyMultiple*. Obtidas as informações coletadas pelos sensores, um tratamento é feito e outros dispositivos podem ou não serem acionados conforme a solução desejada. Este acionamento é realizado pelo meio do serviço *WriteProperty* e *WritePropertyMultiple* que permitem a escrita na saída de um dispositivo remoto. Outras finalidades podem ser empregadas por esses serviços, sendo essas citadas de maneira ilustrativa.

Responsável pelo gerenciamento da rede, a categoria *Remote Device Management* configura e endereça dispositivos na rede. A fim de determinar o número de dispositivos na rede, o par de serviços *Who-Is* e *I-Am* pode ser implementado. O funcionamento deste par de serviços pode ser descrito como um questionamento sobre quem se encontra na rede, *Who-Is* enviado em broadcast, seguido de uma resposta, *I-Am*, de todos os dispositivos com suas características básicas. Um variante deste par de serviços é o par *Who-has* e *I-Have*, que possibilita à aplicação determinar quais dispositivos com determinadas características se encontram na rede.

5.2.3 Interoperabilidade

A interoperabilidade BACnet está assegurada pela divisão de funções, serviços e requisições em conjuntos. Segundo Bushby, "...It was decided to use small building blocks so that, for each functional area, a specifier can select from a range of capabilities that best meet the intended application of the device. The idea for BACnet Interoperability Building Blocks (BIBBs) was born", [19]. BIBBs são, então, criados permitindo que usuários saibam as limitações e características em determinados blocos sem o conhecimento de como será implementado. Por norma (ASHRAE STANDART, 2008), os BIBB's são definidos como a capacidade de um dispositivo requisitar e responder a um conjunto de serviços. O fabricante deve então determinar quais os BIBB's de seus dispositivos, permitindo assim projetos de sistemas. A Tabela 5.4 ilustra algumas dos BIBB's normatizadas.

Tabela 5.4. BIBB's normatizados, [19].

Data-Sharing BIBBs	
DS-RP-A, DS-RP-B	Data Sharing - ReadProperty
DS-RPM-A, DS-RPM-B	Data Sharing - ReadPropertyMultiple
DS-WP-A, DS-WP-B	Data Sharing - WriteProperty
DS-WPM-A, DS-WPM-B	Data Sharing - WritePropertyMultiple
Alarm and Event Management BIBBs	
AE-N-A, AE-N-I-B	Alarm & Event - Notification - Internal (events internal to the device)
AE-N-A, AE-N-E-B	Alarm & Event - Notification - External (events external to the device)
AE-ACK-A, AE-ACK-B	Alarm & Event - Acknowledgments
AE-INFO-A, AE-INFO-B	Alarm & Event - Information (collect or provide summary information about past events)
Scheduling BIBBs	
SCHED-A, SCHED-I-B	Scheduling actions internal to the device
SCHED-A, SCHED-E-B	Scheduling actions external to the device
Device and Network Management BIBBs	
DM-DOB-A, DM-DOB-B	Device Management - Dynamic Device Binding (find other BACnet devices)
DM-DOB-A, DM-DOB-B	Device Management - Dynamic Object Binding (find other BACnet objects)
DM-DCC-A, DM-DCC-B	Device Management - Device Communication Control (temporarily silence a device)
DM-TS-A, DM-TS-B	Device Management - TimeSynchronization (local time)
DM-UTC-A, DM-UTC-B	Device Management - UTCTimeSynchronization
DM-RD-A, DM-RD-B	Device Management - Reinitialize Device (remotely reset a device)

5.2.4 BACnet MS/TP

A definição dos serviços e estruturação de dados utilizados para a comunicação permite, então, avançar para transferência de informação de um dispositivo para outro. No BACnet, as mensagens podem ser transportadas por diversos meios físicos. Esta independência tecnológica é fator importantíssimo na difusão e perpetuação deste protocolo. Entretanto o ASHRAE definiu cinco modelos de redes como padrões, a fim de normatizar o protocolo.

A *Ethernet*, tipicamente utilizada em estações de trabalho, o *ARCNET*, rede com velocidade moderada e baixo custo, o *LonTalk*, rede proprietária da Echelon, o *PTP*, ponta a ponta utilizado em redes telefônicas e o *MS/TP*, projetado para par-trançado, enumeram os cinco modelos normatizados. A Figura 5.1 ilustra os conceitos apresentados até o momento segundo orientação da ISO OSI.

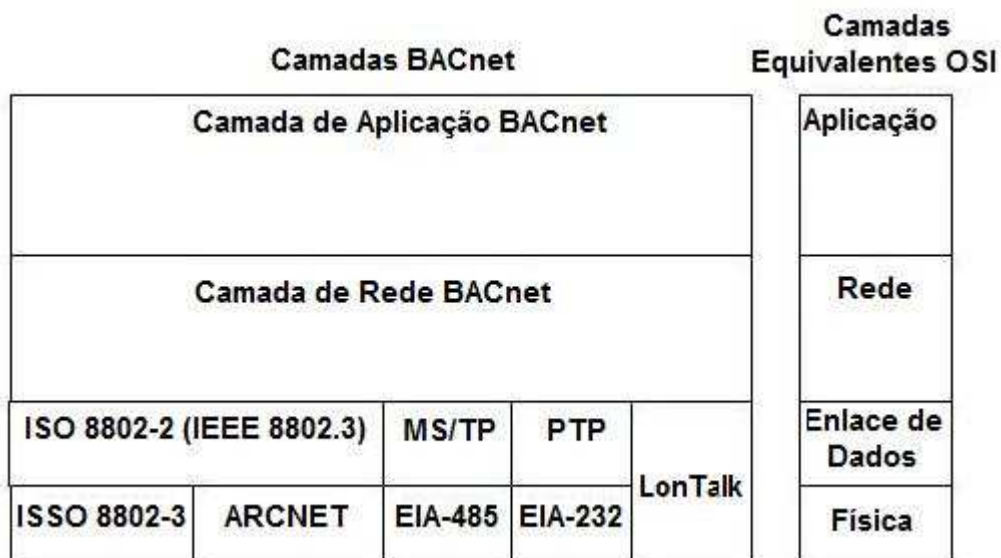


Figura 5.1. Modelagem BACnet no sistema OSI.

Passível de implementação em uma simples rede RS-485, o BACnet MS/TP, *Master-Slave/Token-Passing*, se destaca pela simplicidade e baixo custo. A rede RS-485 permite uma comunicação multi-drop, onde diversos dispositivos com endereços únicos se comunhão sobre um único cabo (conexão elétrica). Entretanto, isso implica em algumas limitações físicas. Um único dispositivo é autorizado a se comunicar por turno, evitando que outros transitem dados de forma simultânea prejudicando o entendimento da mensagem. Esta dinâmica exige certo sincronismo que pode ser mais bem descrita pela máquina de estado ilustrada na Figura 5.2.

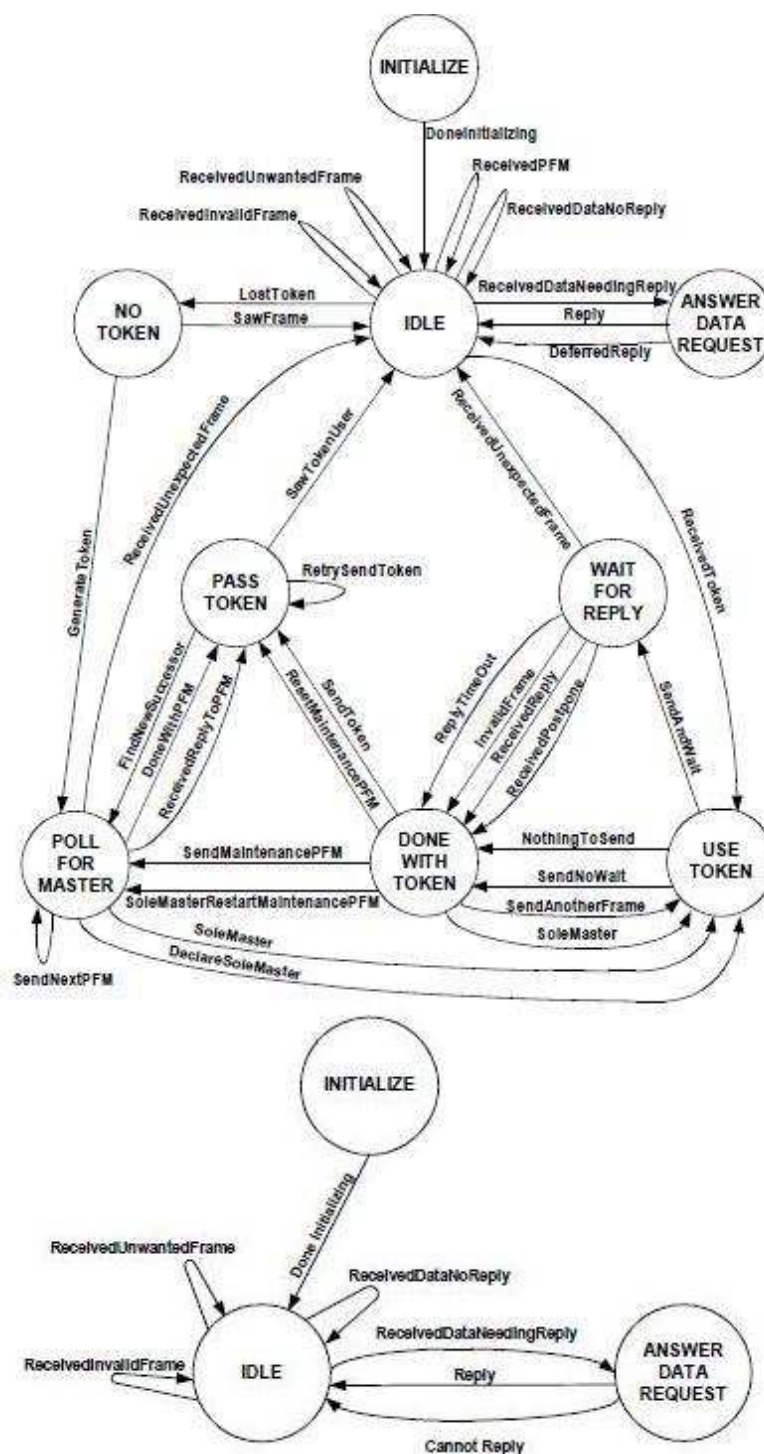


Figura 5.2. Máquina de estados BACnet (Mestre e Escravo), [18].

As máquinas de estados apresentadas na Figura 5.2 seguem o conceito mestre e escravo. O mestre solicita informações do escravo que por sua vez, somente responde o que é questionado, quando for questionado. A análise da máquina de estado do mestre possibilita observar o conceito de Token sendo empregado. Esse comportamento está tipicamente presente em sistema de comunicação onde apenas um dispositivo pode comunicar por turno. O dispositivo mestre, após sua inicialização, verifica se ele está em posse do Token. Caso afirmativo, ele realiza então uma série de perguntas e repassa o Token para que outros mestres também façam perguntas, garantindo assim os requisitos da rede. Estados

e transições adicionais são empregados para garantir o comportamento do sistema caso o Token venha a se perder ou que mensagem seja recebida de forma incompleta ou errônea. A máquina de estado do escravo por sua vez é mais simples competindo a ela, apenas responder sempre que questionada.

As falhas e perdas de bits também são comuns em comunicação RS-485 por isso uma máquina de estado, ilustrada na Figura 5.3, foi normatizada com intuito de permitir ao sistema superar essas dificuldades. O estado *Preamble* que se caracteriza pelo início da transmissão, aguardando, do emissor, informações que indiquem este início e os estados *Header CRC* e *Data CRC* que se caracterizam como dígitos verificadores das informações recebidas garantem que a mensagem seja indicada como recebida com sucesso apenas se o fluxo de controle da máquina percorra estes três estados.

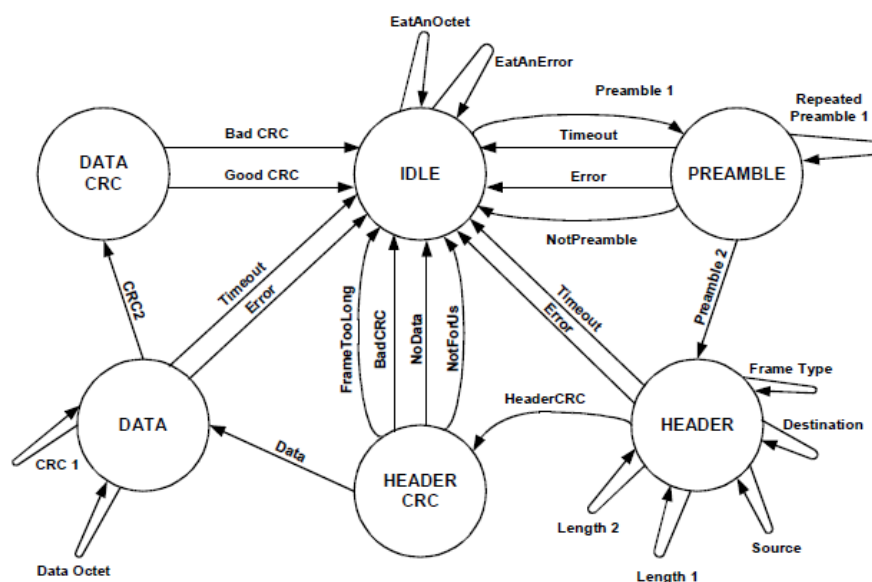


Figura 5.3. Máquina de estado do Frame BACnet MS/TP.

5.3 ZigBee

5.3.1 Introdução

Desenvolvido em 2001, o ZigBee foi criado com necessidade do mercado de um protocolo mais adequado para aplicações de automação e que dispusesse da capacidade de auto-organização. Baixo consumo, custo, alta confiabilidade e interoperabilidade são características que tornaram este protocolo um dos mais difundidos em todo o mundo.

O ZigBee é estruturado em camada de silício, camadas de redes e camadas de aplicação (Figura 5.4). A camada silício determinada pelo IEEE 802.15.4 é composta por camada MAC e camada física. Nela está determinada a banda de operação (2.4 Ghz banda ISM) , a modulação deste sinal (O-QPSK), a detecção do recebimento de energia (ED) e a qualidade

da transmissão (LQI). Controlar o fluxo do uso de transmissor e garantir a segurança da MAC também compete à camada de silício. Os recursos físicos disponíveis podem variar conforme função desempenhada pelo nó na rede - Tabela 5.5.



Figura 5.4. Estrutura ZigBee.

Tabela 5.5. Recursos disponíveis conforme função desempenhada.

Características físicas do dispositivo	Característica Lógica do dispositivo (Função desempenhada na Rede)		
	Coordenador	Roteador	Sensor
Dispositivos com funções completas (Capacidade de memória e recurso adequada para aplicação)	SIM	SIM	SIM
Dispositivo com funções reduzidas (Capacidade de memória e recurso reduzidos)	NÃO	NÃO	SIM

A camada de rede por sua vez é responsável por descobrir novos dispositivos, configuração e topologia da rede. Topologia que pode estar disposta em estrela, mesh ou árvore. Compatibilidade do sistema, definição da estrutura sobre a qual os dados serão enviados aos demais dispositivos e fornecimento de funções básicas para utilização do protocolo são outras funções presente nesta camada.

Para camada de aplicação ficam atribuídas funções desejadas pelos usuários e normatizações de perfil criadas pela ZigBee Alliance.

5.3.2 Auto-organização, perfis e cluster

A auto-organização é uma das características mais importantes do ZigBee, sendo fundamental para transmissão de dados e para aumento da confiabilidade da rede. Em cenários com maior intensidade de ruído, difícil acesso ou monitoramento, a reorganização dos dispositivos a fim de manter a comunicação da rede se torna crítica. Eventuais falhas de fornecimento energético para alguns dispositivos requerem que a rede seja capaz de contornar esta situação. A implementação dessa organização é complexa, porém não compete ao usuário final, sendo de responsabilidade da camada de Rede.

Os perfis, por sua vez, buscam a adequação da estrutura de dados a cada tipo de aplicação. Atualmente a ZigBee Alliance, responsável pela normatização do padrão ZigBee, dispõe de diversos perfis dentre eles: *home automation* (automação residencial), *smart energy* (energia inteligente), *commercial building automation* (automação comercial), *Telecom applications* (aplicação para telecomunicações) e outros. A utilização de um perfil adequado diminui o tráfego de dados necessários na rede e padroniza o transporte dos dados.

Clusters estão diretamente relacionados aos perfis e representam comandos disponíveis nos mesmos. Comandos como ligado/desligado, termostato, controle do ventilador, entre outros estão presentes no cluster. Cada dispositivo deve pertencer a um perfil e apresentar uma lista de clusters compatíveis com seus atributos - Figura 5.5. Um interruptor de uma lâmpada pode pertencer a diversos perfis e com certeza terá como um de seus clusters, o ligado/desligado. Outros clusters como intensidade da iluminação pode estar presente no switch em um perfil de automação comercial, porém ausente em um perfil residencial. O entendimento dos clusters é fundamental, uma vez que diversos fornecedores da tecnologia enviam e recebem comandos baseados em seus clusters. A utilização de *Binding Table* (tabela de amarração) pode tornar esse conceito ainda mais poderoso, uma vez que identifica todos os cluster de cada dispositivo na rede e os agrupa. Isto permite um agrupamento de dispositivos até então desconhecido por suas funções.

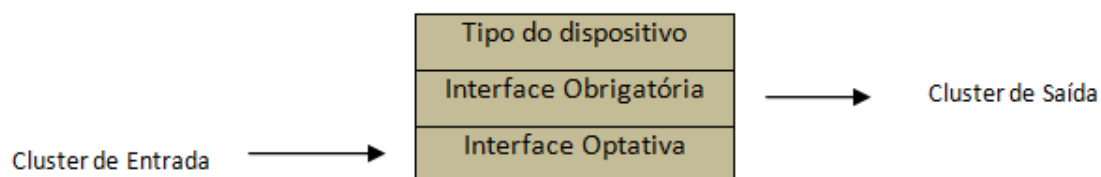


Figura 5.5. Interface dos *Clusters*.

5.3.3 Generic Tunnel Cluster

O *Generic Tunnel Cluster* é utilizado para interfaces com outros protocolos de comunicação e por isso tem uma grande importância neste trabalho. Comandos e atributos mínimos são normalizados com intuito de possibilitar tunelamento de qualquer protocolo. O termo *Protocol Tunneling* é usado para descrever a situação onde um protocolo é encapsulado dentro de outro protocolo, [20]. O motivo deste processo pode ser o trânsito de dados em uma rede incompatível ou o fornecimento de um trajeto seguro para os dados. Um exemplo seria a criptografia de dados de uma rede para trânsito em uma rede pública ou o trânsito de dados de uma rede cabeada em uma rede sem fio.

Os comandos presentes neste cluster são o Match Protocol Address, o Match Protocol Address Response e o Advertise Protocol Address. Os atributos MaximumIncomingTransferSize, MaximumOutgoingTransferSize e ProtocolAddress compõem este cluster. A Tabela 5.6 ilustra as ações esperadas para os comandos listados acima. Maiores informações sobre estes comandos podem ser obtidos na norma [21] de Clusters ZigBee.

Tabela 5.6. Lista de comandos do *Generic Tunnel Protocol*.

Comandos	Ação esperada quando recebido	Quando gerar
Match Protocol Address	O dispositivo deverá verificar seu Atributo Protocol Address com especificado na mensagem, caso semelhante responda por meio do Comando Match Protocol Address Response.	Utilizado por algum outro protocolo específico com objetivo de identificar os endereço e endpoint ZigBee associado ao Atributo Protocol Address
Match Protocol Address Response	Compete a aplicação. O dispositivo recebeu uma confirmação sobre a pergunta realizada pelo Match Protocol Address.	Caso o Protocol Address seja semelhante ao especificado na pergunta.
Advertise Protocol Address	Compete a aplicação. O dispositivo recebeu o endereço Protocol Address de outro nó.	Na inicialização da rede ou quando o Protocol Address for alterado com intuito de anunciar seu endereço.

5.3.4 BACnet Protocol Tunnel

Complementando o Cluster anterior cuja função apresentada é o tunelamento de um protocolo genérico, o *BACnet Protocol Tunnel* apresenta comandos estritos para a necessidade do tunelamento do BACnet pelo ZigBee. Devido às características do tunelamento onde os dados são enviados à camada de rede ou aplicação, não competindo a decodificação da mensagem pelo ZigBee, apenas o comando *TransferNPDU* está presente neste Cluster. A Tabela 5.7 ilustra as ações esperadas para os comandos listados acima. Maiores informações sobre estes comandos podem ser obtidos na norma [21] de Clusters ZigBee.

Tabela 5.7. Lista de comandos do BACnet *Protocol Tunnel*.

Comandos	Ação esperada quando recebida	Quando gerar
TransferNPDU	Repassar as mensagens à camada BACnet que deverá processar a mensagem segundo normas do seu próprio protocolo.	Será gerado quando rede BACnet deseja enviar uma mensagem para outro dispositivo BACnet pela Rede ZigBee

5.3.5 Endpoint

Os *endpoint* podem ser classificados como listas de pontos. Cada dispositivo apresenta um ou mais *endpoint* e associa este a suas características físicas e de projeto. Diversos interruptores podem ser agrupados conforme função no projeto, iluminação da área externa, iluminação de uma ampla sala, entre outros. A aplicação, então, pode se utilizar destes *endpoints* para enviar um comando a um grupo de interruptores que estão todos classificados no mesmo *endpoint*. A Figura 5.6 ilustra a utilização deste conceito. Uma vez que cada dispositivo pode dispor de diversos *endpoints* e cada mensagem é destinada um *endpoint* final. Um dispositivo com sensores de temperatura e luz que apresente dois *endpoints* associados aos respectivos sensores, pode receber mensagens destinadas ao sensor de temperatura ou destinadas ao sensor de luz. Isto permite ao programador realizar um tratamento específico para cada mensagem recebida.

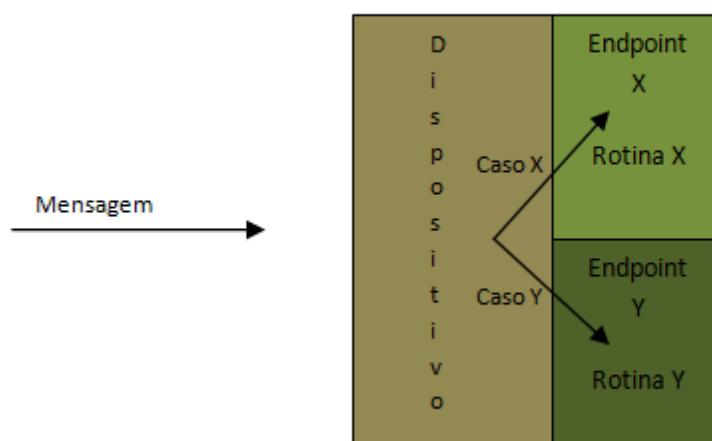


Figura 5.6. Interface *endpoint*.

5.4 BACnet SOBRE ZigBee

As constantes inovações tecnológicas, as buscas por reduções de custos de instalação e manutenção de sistemas levaram ao advento de sistemas sem fio. Neste contexto o BACnet cujas conexões são predominantemente com cabos, precisou se inovar. Em Janeiro de 2006, então, a ZigBee Alliance proprietária do ZigBee juntamente com ASHRAE proprietária do BACnet iniciariam trabalhos a fim de normatizar uma integração entre os protocolos, [22]. Em maio de 2008, como resultado de diversas reuniões, o BACnet publica o *Addendum q*, [23], especificando o funcionamento do BACnet sobre ZigBee. Esta publicação permitiu o BACnet se consolidar como um dos protocolos de automação mais utilizados e garantiu a interoperabilidade de diversos sistemas.

O funcionamento desta inovação foi baseado na utilização do ZigBee como camada de rede e física e do BACnet como camada de rede adicional e aplicação. O modelo OSI tradicional, apresentado para o BACnet nos tópicos anteriores, não se aplica bem a essa inovação proposta.

Devido ao compartilhamento da camada de rede, surge então a necessidade da criação de uma camada de interface a qual foi denominada BACnet/ZigBee Link Layer (BZLL). Esta nova camada é responsável pela troca de dados e gerenciamento de uma tabela de endereços denominada Virtual MAC Table (VMAC Table). O endereço do dispositivo na rede ZigBee, o *Endpoint* correspondente ao BACnet na rede ZigBee, o atributo *Protocol Address* pertencente ao *cluster Generic Tunnel* e finalmente o *device instance* do objeto BACnet *Device Object* devem estar presentes na *VMAC Table* para cada dispositivo encontrado na rede. O VMAC Address de cada dispositivo será a propriedade *device instance* de seu objeto *Device Object*. Com objetivo de sincronização, o *Protocol Address*,

atributo do *Generic Cluster*, e o *Device Instance*, propriedade do *Device Object*, dos dispositivos devem ser iguais e armazenados em uma mesma posição na memória. Definido os dados a serem trocados, o gerenciamento da tabela compete aos comandos pertencentes ao cluster *Generic Tunnel*, Tabela 5.6, juntamente com os comandos comuns a todos os clusters ZigBee, leitura e escrita de atributos. O envio propriamente dos dados deve ser feito pelo comando presente no cluster BACnet Protocol Tunnel, Tabela 5.7.

Os dispositivos *End Devices* devem sempre que se conectar a rede utilizar-se do comando *Advertise Protocol* informando aos demais dispositivos seu *VMAC Address*. Do mesmo modo, alterações em seu *VMAC Address* durante a operação devem ser seguidas por novos comandos *Advertise Protocol*. Já os dispositivos coordenadores ou roteadores devem realizar leituras cíclicas do Protocol Address dos dispositivos na rede, além de verificar a inatividade de dispositivos solicitando sua retirada da rede.

A Figura 5.7 ilustra de maneira geral a interação entre as camadas, clusters e tabelas para o protocolo BACnet sobre Zigbee.

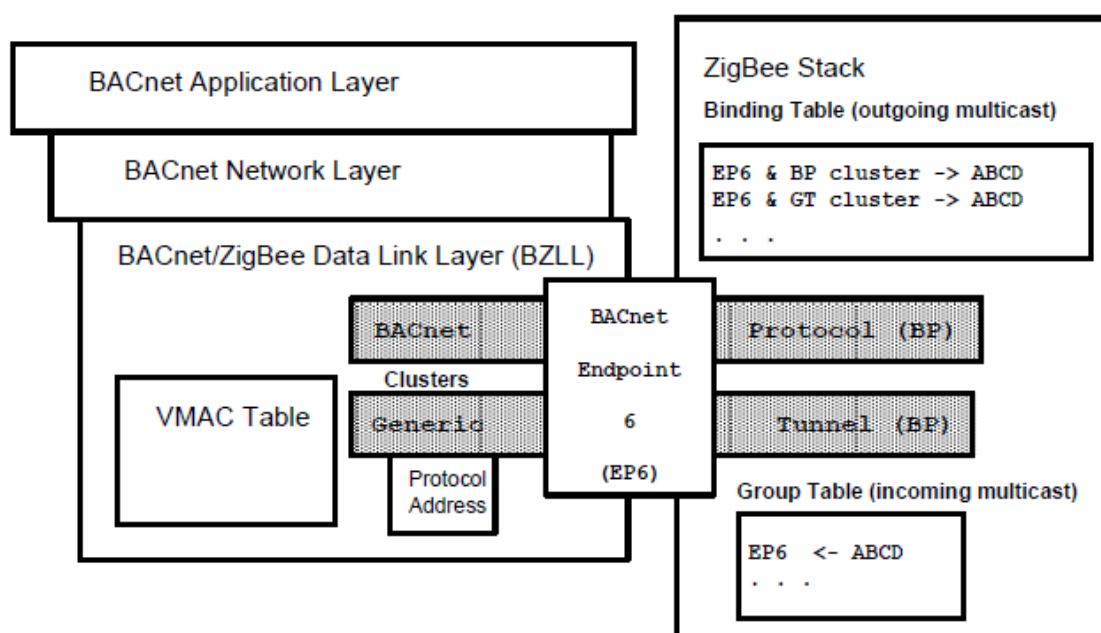


Figura 5.7. Diagrama das camadas para uma nó, não roteador, BACnet sobre ZigBee, [23].

5.5 SUPERVISIONAMENTO

O supervisionamento, etapa onde se monitora e controla parte ou todo sistema, surgiu devido às buscas de empresas por vantagens competitivas e requisitos de proteção. Fatores como qualidade, redução de custos e diminuição de riscos operacionais, maior desempenho de produção ou simplesmente conforto fizeram com que o supervisionamento ganhasse força e se tornasse fundamental no setor de automação.

Dentre os vários modelos e arquiteturas de software de supervisionamento, os sistemas de supervisão e aquisição de dados, SCADA, são os mais comumente e comercialmente utilizados. Indústrias de petróleo, siderurgia, geração de energia, química, nucleares, dentre outras se utilizam do SCADA para obtenção de dados sobre sua produção, [24]. Entretanto estes sistemas não estão restritos apenas as grandes indústrias e seu uso em experimentos laboratoriais vêm crescendo fortemente, apoiado na facilidade de operação.

Os sistemas SCADA geralmente são divididos em dois módulos básicos: o Studio e o Viewer. O Studio é o modulo onde o projeto é desenvolvido. A base de dados dos pontos a ser monitorada, a interface homem máquina a ser utilizada e os dados a serem registrados são configurados neste modulo. Já o modulo Viewer é o responsável pela execução do projeto. Em tempo real, o Viewer realiza as leituras e envia comandos conforme configuração prévia do projeto. Eventualmente a nomenclatura destes módulos pode variar conforme fabricante do software, entretanto as funções desempenhadas pelos mesmos serão as citadas acima.

Atualmente, está disponível no mercado um grande número de softwares SCADA e a escolha de fabricante a ser utilizado deve ser feito com base nos requisitos de projeto e facilidade de suporte. Exemplificando, alguns projetos poderão utilizar-se de protocolos, os quais não são suportados pelo SCADA de determinado fabricante. Assim sendo, a escolha do SCADA adequada deve ser realizada apenas depois de tomadas todas as decisões sobre as especificações de hardware do projeto.

5.5.1 ActionView

Sistema SCADA desenvolvido pela Spin Engenharia com sede em Brasília- DF, o ActionView dispõe de drivers para comunicação BACnet MS/TP e fácil suporte. Sendo o protocolo BACnet selecionado para aplicação neste trabalho, conforme pode ser observado no Capítulo 1, e outro fator essencial na escolha de um supervisório atendido, facilidade de suporte, o ActionView foi escolhido como software a ser utilizado.

Como citado tópico anterior, o ActionView dispõem de dois módulos básicos: o Studio e o RunTime, tendo o segundo com uma pequena alterações na nomenclatura que como previsto poderia acontecer.

CAPÍTULO 6 – PROTÓTIPO E ANÁLISE DE DESEMPENHO

6.1 AMBIENTE DE ESTUDO

O ambiente de estudo está localizado no Lara, que se encontra no primeiro andar do bloco 11 de serviços gerais da Universidade de Brasília. Este prédio está localizado a 53,07° norte, a uma altitude de 1.047 m.

A área 1 da Figura 6.1 corresponde ao ambiente onde o sistema híbrido de climatização foi instalado e a rede ZigBee foi implementada visando atingir o conforto térmico nesta região, fornecendo, assim, melhores condições de trabalho às pessoas que a frequentam.



Figura 6.1. Planta baixa do LARA.

O ambiente de estudo possui uma área de, aproximadamente, $83,53 \text{ m}^2$ e um pé direito igual a 2,72 m.

Apesar da ausência de aparelhos geradores de calor neste ambiente, a carga térmica do Lara pode ser considerada excessiva, devido à grande quantidade de equipamentos e concentração de pessoas.

O grau de proteção desse laboratório é considerado fraco, pois as janelas, viradas para o sudoeste, além de ocuparem uma área significativa, cerca de $9,66 \text{ m}^2$, recebem sol durante os horários mais quentes da tarde e não possuem qualquer tipo de proteção contra a radiação solar.

Outra consideração importante a ser feita é a respeito da temperatura de bulbo úmido de Brasília que segundo a norma 16401 da ABNT é igual a 21,9°C.

6.2 SISTEMA EVAPORATIVO PROPOSTO AO AMBIENTE DE ESTUDO

O método escolhido para dimensionar o equipamento evaporativo do LARA foi o método das renovações de ar, por ser um método mais direto.

De acordo com a temperatura de bulbo úmido de Brasília, citada na seção 6.1, e a Tabela 3.1, esta região está incluída na zona térmica 1 (um).

Ainda considerando as características do ambiente de estudo citadas na seção 6.1 e a Tabela 3.2, observa-se que o número de trocas de ar por hora recomendado para o sistema evaporativo é igual a 30, como mostra a Tabela 6.1.

Tabela 6.1. Número de trocas de ar por hora selecionado para o ambiente de estudo.

Carga Interna	Proteção Solar	Trocas de Ar por Hora			
		Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
Excessiva	Fraca	30	40	46	86
	Boa	20	30	40	60
Normal	Fraca	20	30	40	60
	Boa	15	20	30	46

Entretanto como é aconselhado considerar 5 (cinco) trocas de ar por hora a mais para compensar o fato de que a eficiência não atinge 100%, conclui-se que o número de trocas de ar por hora necessário para o ambiente a ser climatizado é igual a 35.

Para o cálculo da vazão do sistema evaporativo, a altura que deve ser utilizada é a altura do chão até as grelhas de insuflamento, dada por 2,62 m.

De posse desses dados, encontra-se uma vazão igual a 7.659,70 m³/h para o sistema evaporativo, utilizando a equação (9).

6.3 SISTEMA CONVENCIONAL PROPOSTO AO AMBIENTE DE ESTUDO

A capacidade em BTU do aparelho de refrigeração convencional que deveria ser instalado no ambiente de estudo foi calculada utilizando uma planilha [26], Tabela 6.2, que estima a carga térmica do ambiente a partir do fornecimento de alguns dados desse.

Tabela 6.2. Carga térmica, [26].

Tipo I - Janelas c/ isolamento	Largura	Altura	Total	S/ Proteção	Proteção Int.	Proteção Ext.	16229	
1.1 - Norte	0	0	0,00	1000	480	290	16229	
1.2 - Nordeste	0	0	0,00	1000	400	290		
1.3 - Leste	0	0	0,00	1130	550	360		
1.4 - Sudeste	0	0	0,00	840	360	290		
1.5 - Sul	0	0	0,00	0	0	0		
1.6 - Sudoeste	4,6	2,1	9,66	1680	670	480		16229
1.7 - Oeste	0	0	0,00	2100	920	630		0
1.8 - Noroeste	0	0	0,00	1500	630	400		
Tipo II - Janelas Transmissão	Largura	Altura	Total				0	
2.1 - Vidro comum	0	0	0,00	210			0	
2.2 - Tijolo de vidro/ vidro duplo	0	0	0,00	105			0	
Tipo III - Paredes	Largura	Altura	Área Janel	Constr. Leve		Cons. Pesada	204,8	
3.1 - Externas voltadas p/ o sul	0,0	0	0,00	55		42	204,8	
3.2 - Externas outras orientações	2,0239	2,0239	4,096	84		50		
3.3 - Interna // ambientes ã cond.	0	0	0,00	33				
Tipo IV - Teto	Compr.	Largura	Total				22052	
4.1 - Laje	8,367	8,367	70,01	315			22052	
4.2 - Em laje, c/2,5 cm de isolamento ou ma	0	0	0,00	125			0	
4.3 - Entre andares	0	0	0,00	55			0	
4.4 - Sob telhado isolado	0	0	0,00	75			0	
4.5 - Sob telhado sem isolamento	0	0	0,00	210			0	
Tipo V - Piso	Compr.	Largura	Total				3850	
Piso não colocado sobre o solo	8,367	8,367	70,01	55			3850	
Tipo VI - Pessoas							7560	
Em Atividade Normal	12			630			7560	
Em Atividade Física (Academia)	0			1000			0	
Tipo VII - Iluminação e aparelhos							17158,72	
Lâmpadas (Incandescentes)	0		W	4			0	
Lâmpadas (Fluorescentes)	800		W	2			1600	
Aparelhos Elétricos	0		KW	860			0	
Motores	0		HP	645			0	
Número de Computadores	12		Peças	3,412			15558,72	
Tipo VIII - Portas ou vãos	Largura	Altura	Total				2658,6	
Abertos constantemente	1,5	2,72	4,22	630			2658,6	
						SubTotal	69713	
						Fator Climático da região	0,95	
						Carga Térmica Total Btu/h	62784	
						TR	5,23	

Como se pode observar, a carga térmica total recomendada é de 62.784 BTU/h, porém o split dutável da marca Carrier instalado no ambiente de estudo possui uma capacidade igual a 30.000 BTU/h, o que é muito inferior ao valor desejado.

6.4 SISTEMA HÍBRIDO DE REFRIGERAÇÃO APLICADO AO AMBIENTE DE ESTUDO

6.4.1 Dimensionamento do Painel Evaporativo

Para a determinação das dimensões do painel evaporativo, foram considerados quatro importantes parâmetros:

- Perda de carga térmica;
- Eficiência de esfriamento;
- Dimensões físicas do split dutável instalado no ambiente de estudo;

- Vazão do condicionador de ar tradicional instalado no ambiente de estudo.

Analisando-se a Figura 6.2, fornecida pelo fabricante *Munters*, pode-se observar que quanto mais espesso for um painel, maior será a sua perda de pressão dada em polegadas de coluna d'água.

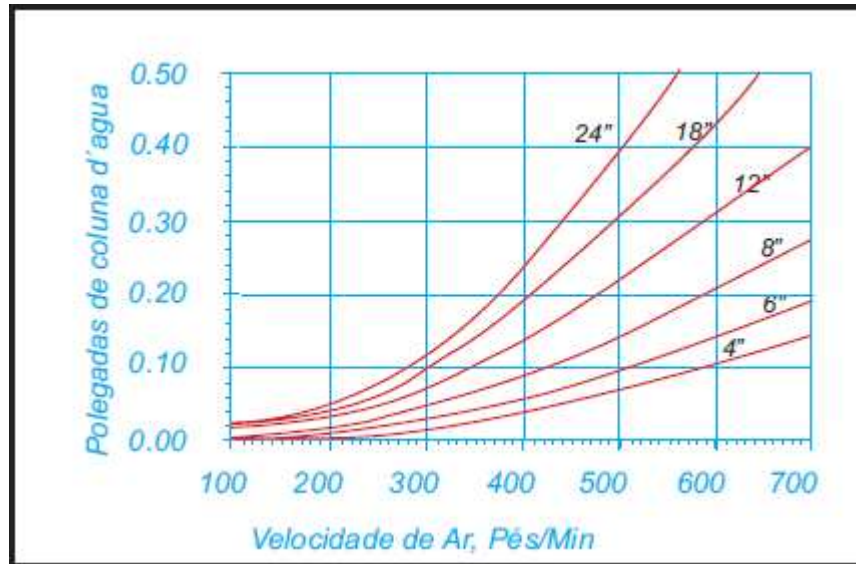


Figura 6.2. Perda de carga, [27].

Porém ao visualizar a Figura 6.3, conclui-se que quanto maior a espessura do painel, maior será a eficiência de esfriamento, devido ao aumento da área de contato entre o ar e o painel, o que possibilita uma maior retirada de calor do ar.

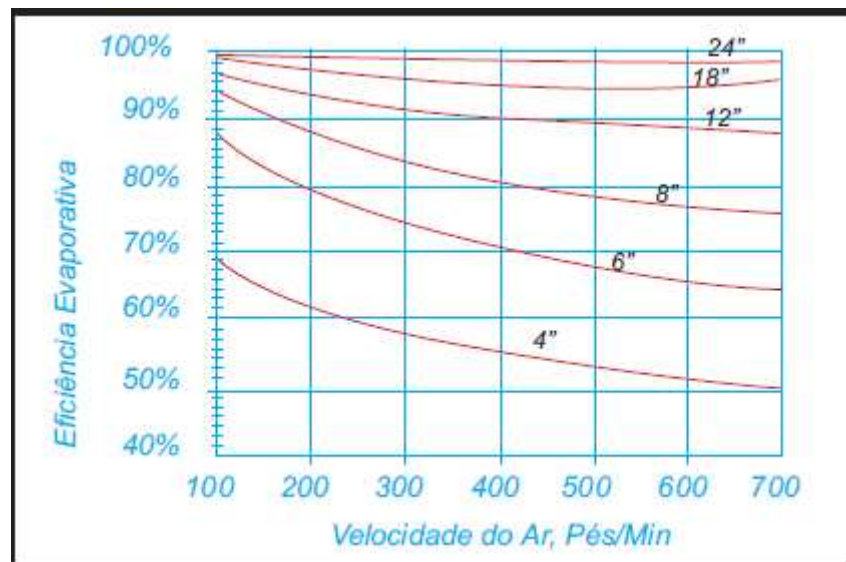


Figura 6.3. Eficiência de esfriamento, [27].

Tendo em vista essas características, verifica-se que existe um compromisso entre a perda de carga térmica e a eficiência de esfriamento, o que torna a seleção do painel evaporativo mais complexa.

Outro fator que deve ser levado em consideração é a perda dinâmica. Quando há uma troca de área ou direção em um duto ou quando o fluxo é dividido e desviado para mais de um ramo, provavelmente irão ocorrer perdas substanciais na pressão total, que, frequentemente, são maiores do que perdas ocorridas em um duto reto. Assim, com a finalidade de reduzir as perdas dinâmicas, a dimensão do painel evaporativo deve ser aproximadamente igual à da entrada de ar do *split* dutável. Caso isso não ocorra, a caixa inox que liga o painel evaporativo ao *split* terá que ter uma redução em sua área, o que causará um aumento das perdas dinâmicas.

Por último, é importante notar que a vazão máxima oferecida pelo aparelho *split* instalado é de 1.090 m³/h. Este valor é notavelmente inferior ao necessário caso o sistema fosse apenas evaporativo. Consequentemente, as dimensões do painel evaporativo utilizado para a montagem do sistema híbrido serão reduzidas ao compará-las com as de um painel utilizado em um sistema puramente evaporativo.

Considerando os critérios de compromisso citados, buscando minimizar as perdas dinâmicas, adequar à vazão do *split* e levando em consideração que as dimensões dos painéis são tabeladas pelo fabricante, o painel escolhido possui as seguintes dimensões: 30,5 x 30,5 x 122 cm.

6.4.2 Dimensionamento do Damper

A função do damper no sistema híbrido de refrigeração é controlar o fluxo de ar, permitindo a recirculação do ar pelo sistema quando o compressor estiver ligado e bloqueando-a quando o compressor estiver desligado, de forma a garantir que apenas o ar externo circule pelo sistema evaporativo, para que este possa apresentar uma maior eficiência. Logo, o *damper* funciona como uma resistência ao fluxo de ar.

Ao encontrar-se totalmente fechado, o damper deve oferecer uma resistência grande ao fluxo de ar e, quando aberto, deve oferecer uma diminuição da resistência proporcional à sua abertura.

As medidas do *damper* são tabeladas pelo fabricante. A primeira medida escolhida foi a altura por ser a mais crítica. O *damper* foi montado na mesma caixa inox do painel evaporativo, assim, para que não houvesse redução ao longo dessa (evitando perda de carga), a altura do *damper* teve que ser aproximadamente igual a do painel (30,5 cm).

Segundo a Figura 6.4, fornecida pelo fabricante, a altura mais próxima é de 33,7 cm.

TAMANHOS NOMINAIS FABRICADOS (mm)		
Comprimento (C)	Altura (H)	n° Lâminas
	DGG / DGA	
200	172	01
300	337	02
400	502	03
500	667	04
600	832	05
700	997	06
800	1162	07
900	1327	08
1000	DGG – moldura galvanizado lâmina galvanizado	
1100		
1200		
Comprimento máximo lâmina simples 1500mm Comprimento máximo lâmina dupla 3000mm		

Figura 6.4. Tamanhos nominais fabricados, [28].

Para conseguir a maior área possível e garantir um estágio de resistência pequena escolheu-se um comprimento igual a 50 cm, sendo este o maior possível devido às limitações físicas do local.

6.4.3 Atuador do *Damper*

Para a escolha do atuador do *damper*, foram levados em consideração três fatores:

- Nível de ruído;
- Velocidade de resposta;
- Torque.

Segundo a tabela de níveis de ruído permissíveis da ABNT, que se encontra no anexo B, o nível de ruído permissível para escritórios em geral/laboratórios é de 40-50 dB. Procurando obedecer a essa norma, o atuador escolhido (modelo LMB24-SR) possui nível de ruído inferior a 35 dB. O seu tempo de resposta é igual a 95 segundos, para qualquer carga dentro do limite de operação. É importante ressaltar que um menor tempo de resposta garante uma mudança mais eficaz no estado do sistema. O tempo de resposta do atuador escolhido comparado com o do atuador da sala de reunião (150s) é 63% mais rápido.

Como o sistema a ser atuado é simples e possui uma baixa carga, o torque escolhido é de 5 Nm.

O atuador escolhido também possui controle proporcional, o que possibilita mais opções de controle. O seu curso é de 0° a 95°.

6.4.4 Dimensionamento da Caixa Inox

Os critérios utilizados para o dimensionamento do invólucro em aço inox foram: as dimensões físicas do painel evaporativo, o *damper* e a entrada do *split* de 30.000 BTU. Sendo assim, a caixa montada possui 40 cm de altura, devido às aletas do *damper*. As outras dimensões são aproximadamente 118 cm, entrada do *split*, e 88 cm, para comportar o painel e o *damper*.

6.4.5 Duto Externo

O duto será acoplado à caixa inox, portanto iniciará com as mesmas dimensões desta, depois terá a sua largura reduzida para ajustar à passagem entre as duas vigas. Também será necessário curvar o duto para que este contorne a parede. Desta forma o duto terá um formato tipo “U”.

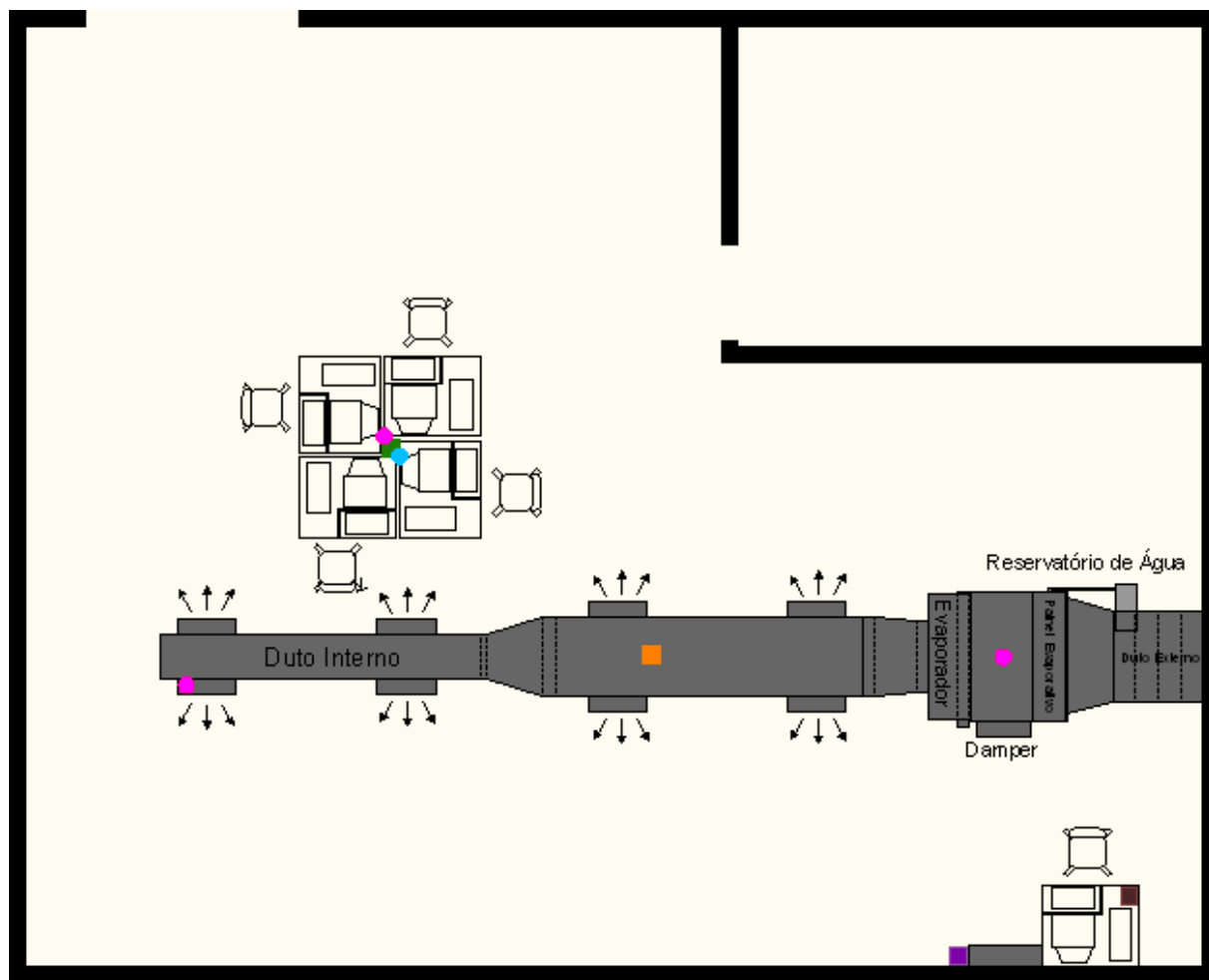
O desejado seria que o duto continuasse reto, para minimizar as perdas dinâmicas do sistema, todavia isto não é possível devido à arquitetura do prédio.

6.5 IMPLEMENTAÇÃO FINAL

Esta seção apresenta os sensores utilizados e os módulos de comunicação sem fio fixados no ambiente de estudo para mensurar e controlar os parâmetros necessários para se atingir o conforto térmico e, também, para tornar possível o cálculo dos índices PMV e PPD. Com este objetivo foram utilizados dois tipos de sensores: o sensor de temperatura e umidade SHT71 e o anemômetro Dwyer 641-12-LED, que serão mais bem descritos nas seções 6.5.1 e 6.5.2.

Os módulos foram criados para proporcionar a correta alimentação para os dispositivos eletrônicos e os circuitos impressos, assim como para acionar os atuadores do sistema, monitorar os sensores e garantir a leitura correta dos valores. Para isto foi necessária a utilização de quatro módulos diferentes: módulo de referência, módulo duto, módulo atuador e módulo gravador. O último citado, módulo gravador, foi criado por [29]. Os módulos foram dispostos no ambiente de estudo de forma a permitir uma medição adequada da umidade relativa, da temperatura e da velocidade do ar e, assim, um controle mais eficiente desses parâmetros para que o PMV fique dentro do intervalo de conforto térmico.

As localizações dos sensores, assim como as dos módulos podem ser vistas na Figura 6.5.



Legenda			
	SHT71		Módulo Duto
	Dwyer 641-12-LED		Módulo Atuador
	Módulo de Referência		Módulo Gravador

Figura 6.5. Ar híbrido e a localização dos sensores e módulos.

De acordo com a estratégia escolhida para monitorar as variáveis necessárias e para controlá-las, dos quatro módulos citados, dois possuem apenas sensores e uma placa ZigBit cada, sendo o módulo duto utilizado apenas para monitoramento e o módulo de referência usado para monitoramento e na estratégia de controle. O módulo atuador possui uma placa ZigBit e os circuitos de acionamento do ventilador, do compressor, do *dampier* e da bomba d'água. O módulo gravador foi criado com o propósito de alimentar o circuito ZigBit para a gravação de programas e testes de portas.

6.5.1 Sensor de Temperatura e Umidade SHT71

O SHT71, mostrado na Figura 6.6, é fabricado pela empresa Sensirion®, e corresponde a um sensor digital de umidade e temperatura que tem um protocolo de comunicação

proprietário. Sua comunicação por ser digital evita que o sinal sofra interferência durante o envio das leituras. Outras vantagens que o sensor possui devido a este tipo de comunicação é de não necessitar de um circuito auxiliar para a regulagem de tensão e amplificação do sinal de saída e de ter a opção de ser projetado utilizando portas I/O's no lugar das analógicas. Outra característica interessante é que o SHT71 já vem calibrado de fábrica.

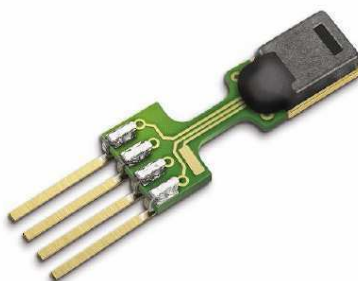
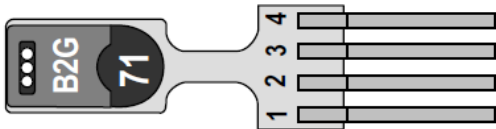


Figura 6.6. Sensor de temperatura e umidade SHT71, [30].

Este sensor, como pode ser visto na Tabela 6.3, possui quatro pinos, que correspondem ao *serial Clock* (SCK), somente entrada, à tensão de alimentação (VDD), ao *ground* (GND) e ao *serial Data* (DATA), bidirecional, possuindo um capacitor de 100nF integrado na parte de trás para dissociação entre VDD e GND. A tensão de alimentação do SHT71 deve estar compreendida entre 2,4V a 5,5V, sendo a alimentação recomendada igual a 3,3V.

Tabela 6.3. Pinos do SHT71, [30].

Pino	Nome	Comentário
1	SCK	<i>Serial Clock</i> , somente entrada
2	VDD	Tensão de alimentação
3	GND	Ground
4	DATA	<i>Serial Data</i> , bidirecional
		

A resolução e a acurácia apresentadas no SHT71 estão dentro da faixa normal recomendada, sendo a resolução de 0,01 com 14 bits de resolução para a temperatura e de 0,05 com 12 bits de resolução para a umidade relativa e a acurácia de $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ e de $\pm 3\%$, respectivamente. A condição de medida da operação do SHT71 está relacionada diretamente com a temperatura em que esse está exposto, sendo seu funcionamento estável dentro da faixa normal recomendada como pode ser visto na Figura 6.7.

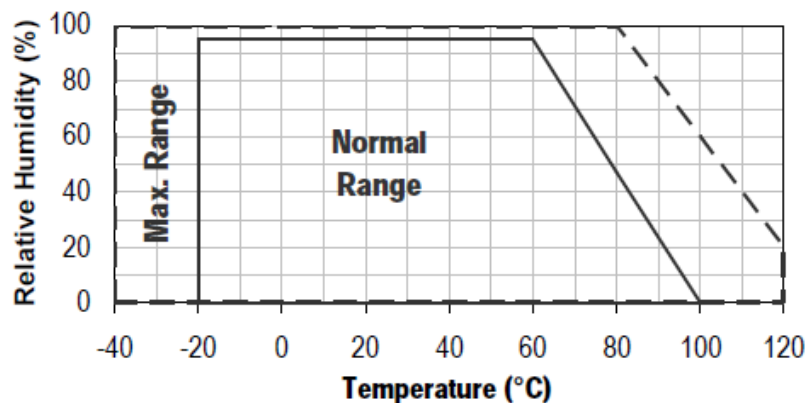


Figura 6.7. Condições de operação, [30].

Um exemplo do funcionamento interno do SHT71 é mostrado na Figura 6.8, que representa o início da transmissão e na Figura 6.9, que expõe um exemplo de medição de umidade relativa. Este sensor apresenta um conversor A/D de 14 bits que pode ter a sua configuração alterada e a comunicação que utiliza é a *half-duplex*, onde o pino do microcontrolador Atmega128 ligado a linha de dados é configurado para funcionar como output e input alternadamente, sendo o sinal SCK utilizado para sincronizar a comunicação entre o microcontrolador e o sensor. A comunicação deste sensor possui diversas etapas, que se encontram listadas a seguir:

- Início de transmissão;
- Envio do endereço de três bits “000”, que é o único permitido, e o comando desejado formado por cinco bits, como demonstrado na Tabela 6.4;
- Recebimento do sinal de *acknowledge*. Após a oitava borda de descida de SCK, o SHT altera o estado de DATA para *low* e, após a nona borda de descida de SCK, libera a linha;
- Espera da conversão. O SHT muda novamente o estado de DATA para *low* e espera a leitura ser feita pelo microcontrolador;
- Recebimento da leitura. O microcontrolador reconhece o recebimento dos dois bytes de medida e um de CRC checksum opcional mudando DATA para *low*;
- Término de comunicação após o *acknowledge* do byte CRC. Caso o byte CRC checksum não esteja sendo utilizado, a comunicação é encerrada pelo microcontrolador após o byte menos significativo da medida.

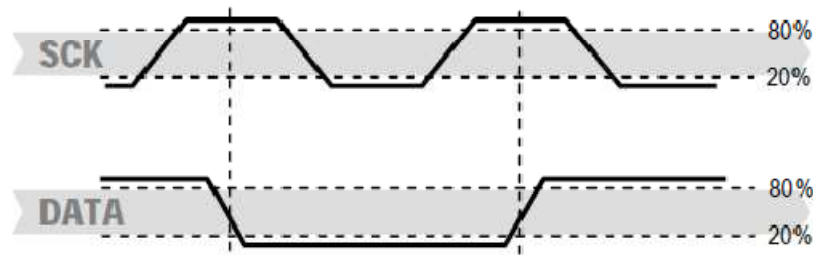


Figura 6.8. Sequência de início de transmissão, [30].

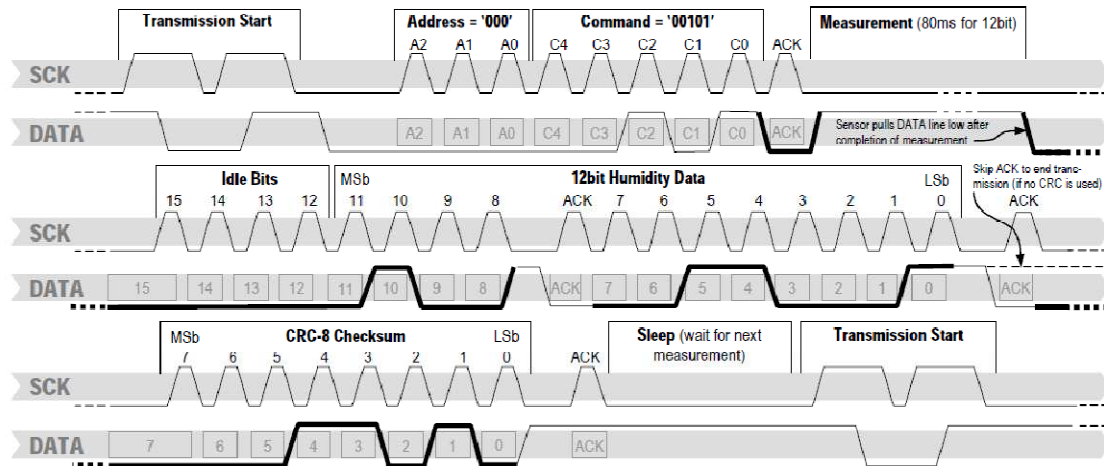


Figura 6.9. Exemplo de sequência de medição de umidade para o valor 0000'0100"0011'0001" = 35,50 %, [30].

Tabela 6.4. Lista de comandos do SHT71, [30].

Comando	Código
Medição da temperatura	00011
Medição da umidade relativa	00101
Ler registrador de status	00111
Escrever registrador de status	00110
Soft reset. Restabelece a interface, limpando o registrador de status para os valores padrão. Aguarda no mínimo 11ms antes do próximo comando	11110

Para compensar a não-linearidade do sensor de umidade e para obter a precisão total do sensor é necessário converter a leitura da umidade (SO_{RH}) utilizando a fórmula (21) e seus coeficientes constantes, Tabela 6.5, fornecidos pelo datasheet.

$$RH_{linear} = c_1 + c_2 \cdot SO_{RH} + c_3 \cdot SO_{RH}^2 (\%RH) \quad (21)$$

Tabela 6.5. Coeficientes da umidade, [30].

SO_{RH}	c_1	c_2	c_3
12 bit	-2,0468	0,0367	$-1,5955 \cdot 10^{-6}$
8 bit	-2,0468	0,5872	$-4,0845 \cdot 10^{-4}$

Para o sensor de temperatura é utilizada uma função afim, equação (22), com o objetivo de converter o valor digital lido (SO_T) para o valor da temperatura. Os coeficientes são apresentados na Tabela 6.6.

$$T = d_1 + d_2 \cdot SO_T \quad (22)$$

Tabela 6.6. Coeficientes da temperatura, [30].

VDD	d_1 (°C)	d_1 (°F)
5V	-40,1	-40,2
4V	-39,8	-39,6
3,5V	-39,7	-39,5
3V	-39,6	-39,3
2,5V	-30,4	-39,9

SO_T	d_2 (°C)	d_2 (°F)
14 bit	0,01	0,018
12 bit	0,04	0,072

6.5.2 Anemômetro Dwyer 641-12-LED

A função do anemômetro é medir a velocidade do vento e indicar a sua direção. Com esta finalidade foi utilizado neste projeto o anemômetro Dwyer 641-12-LED, Figura 6.10, que permite uma medição precisa a diversas temperaturas.



Figura 6.10. Anemômetro Dwyer 641, [31].

Ele permite que a medição seja feita em pés por minuto (FPM) ou em metros por segundo (MPS), possuindo oito faixas diferentes de medição em ambos. A Tabela 6.7 mostra as oito faixas possíveis em metros por segundo, onde 1 (um) representa pino ativo e 0 (zero), inativo. A faixa desejada pode ser facilmente escolhida pressionando o botão *ENTER* para ativar o ajuste, em seguida girando o botão *ADJUST* até a indicação da faixa desejada seja alcançada e para finalizar basta apertar o botão *SELECT* para sair da função de ajuste e segurar o botão *ENTER* por alguns segundos para que a alteração feita seja salva.

Tabela 6.7. Faixas possíveis em metro por segundo, [31].

Faixas (MPS)	Run	Filter	Ranger	Span	4 mA	20 mA
				A	B	C
1,25	0	1	1	0	0	0
2,5	0	1	1	0	0	1
5	0	1	1	0	1	0
10	0	1	1	0	1	1
15	0	1	1	1	0	0
25	0	1	1	1	0	1
50	0	1	1	1	1	0
75	0	1	1	1	1	1

Este sensor utiliza a tecnologia de fluxo de massa quente para a transmissão da velocidade do ar. Algumas especificações são mostradas na Tabela 6.8 fornecida pelo fabricante.

Tabela 6.8. Especificações de anemômetro Dwyer 641, [31].

Item	Especificação
Precisão	3% FE processo com gases: 0 a 50 °C 4 % FE processo com gases: -40 a 0 °C e 50 a 100 °C
Resolução	0,01 m/s
Filtro de saída	0,5 – 15 s
Consumo de corrente	300 mA max.
Tensão de alimentação	12 – 35 VDC, 10 – 16 VAC
Sinal de saída	4 – 20 mA
Resistência do loop de corrente	600 Ω max.

A conexão elétrica do Dwyer 641 é muito flexível permitindo que a alimentação seja feita com fonte de corrente contínua ou alternada.

Neste projeto a alimentação foi feita com uma fonte DC. A ligação elétrica usada para alimentação e recepção do sinal de saída obtido em um loop de corrente de 4 – 20 mA é mostrada na Figura 6.11.

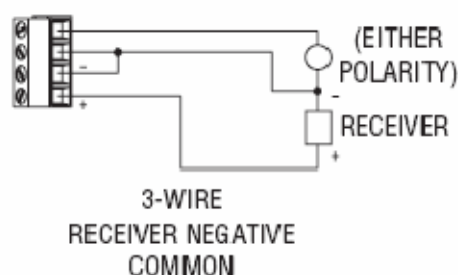


Figura 6.11. Ligação elétrica do anemômetro, [31].

A faixa de atuação escolhida para validação dos resultados foi de 0 – 1,25 m/s, com resolução de 0,01m/s e filtro de saída igual a 10s.

Para a comunicação do sensor com a placa *Zigbit* utilizou-se um circuito intermediário com um resistor de 120 Ω . Devido a este resistor, a corrente de 4mA gera uma tensão de 0,48V e a de 20mA gera uma de 2,4V. Esses dados são necessários para a obtenção da fórmula de velocidade do ar que será utilizada para implementação do *software* e do supervisor. A Figura 6.12 mostra a relação entre a faixa de atuação escolhida e a faixa de voltagem.

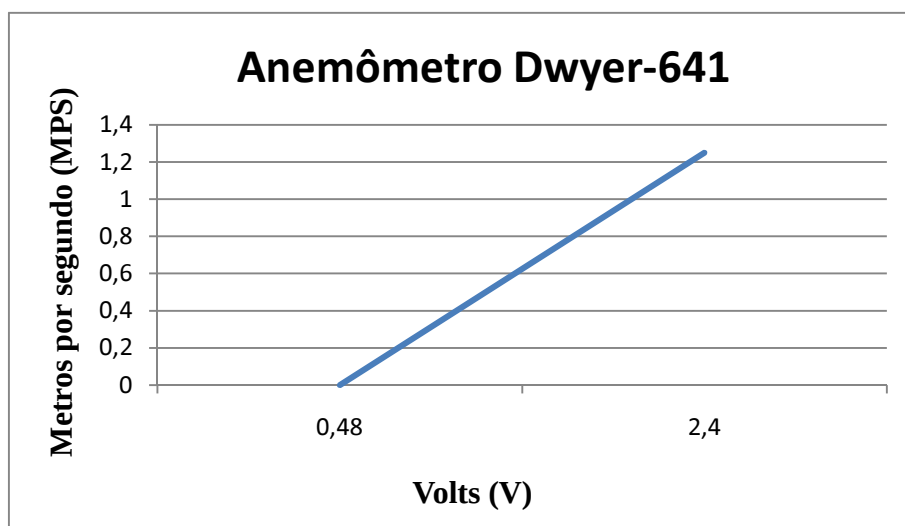


Figura 6.12. Gráfico anemômetro Dwyer-641.

Da figura apresentada acima se pode inferir a fórmula (23).

$$V_{ar} = \frac{(V_{adj} - 0,48) * 1,92}{1,25} \quad (23)$$

Na fórmula citada, V_{ar} representa a velocidade do ar medida pelo anemômetro e V_{adj} é a voltagem ajustada a partir do valor lido do conversor analógico digital, v_{lido} , fórmula (24).

$$V_{adj} = \frac{3,3 * v_{lido}}{1023} \quad (24)$$

6.5.3 Relé

Foi utilizado um relé de montagem em PCB, o G5LA-1A, da OMRON, que possui o footprint mais utilizado para relés, como apresentado na Figura 6.13.

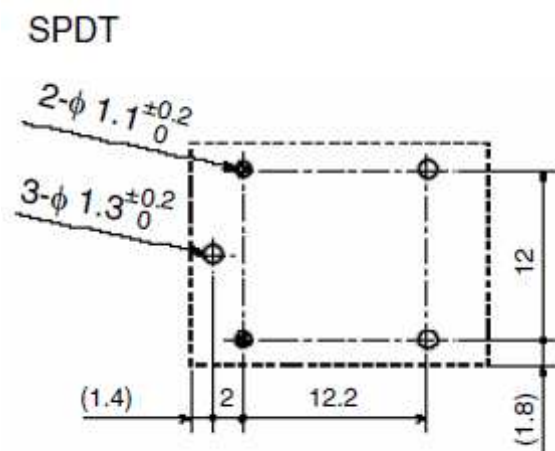


Figura 6.13. Footprint do relé G5LA-1A, [32].

Este é um relé do tipo SPDT (Single Pole Double Throw), que faz uso do modelo apresentado na Figura 6.14: um terminal comum conecta-se a outros dois, comutados em função da bobina, além de possuir os dois terminais da bobina, totalizando, assim, 5 terminais.

SPDT

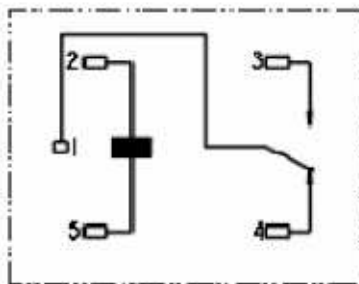


Figura 6.14. Conexões internas, [32].

A Figura 6.15 apresenta um gráfico semi-log e ilustra o limite de funcionamento deste dispositivo, representando a máxima carga que pode ser alimentada, indicando seu valor pela tensão e corrente que a caracteriza. O dispositivo trabalha com cargas que consomem no máximo 10A, e sejam alimentadas com 250V AC. A característica DC também é mostrada, onde percebe-se que a carga DC máxima é inferior a AC, mas como o dispositivo trabalha com até 10A, então é possível reduzir a tensão de alimentação para se trabalhar com correntes mais elevadas: para tensões de 125V DC, pode-se trabalhar com correntes até 500mA, mas reduzindo a tensão para ~25V DC, então pode-se trabalhar com os 10A suportados, sendo esta uma relação exponencial.

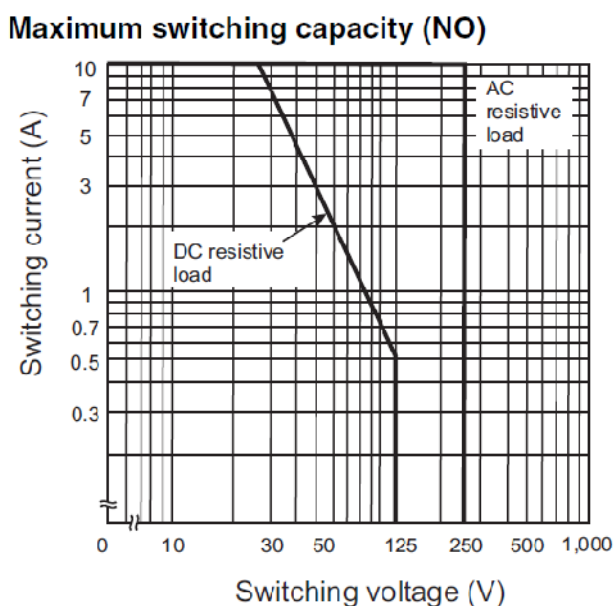


Figura 6.15. Capacidade máxima de comutação, [32].

6.5.4 Módulo Gravador ou Coordenador

O módulo gravador ou coordenador, Figura 6.16, é o único que permite a gravação de programas nos módulos ZigBit presentes nos *breakouts*. Este módulo também é responsável por receber os valores medidos pelos demais módulos e enviá-los ao supervisor Action View, via EIA-232, atualizando os dados anteriores. Após esta atualização, o supervisor analisa se os equipamentos devem ter seus estados alterados ou não e manda esta informação ao coordenador. Assim, outra função deste módulo é rotear as informações recebidas do Action View para o módulo atuador, acionando-o.

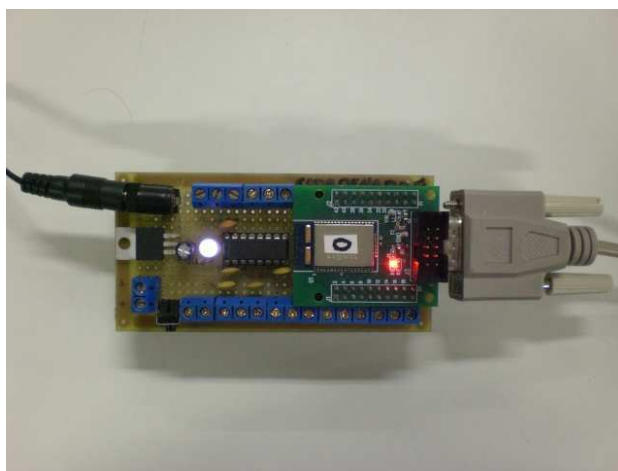


Figura 6.16. Módulo atuador ou coordenador, [29].

A Figura 6.17 representa o esquemático elétrico deste módulo.

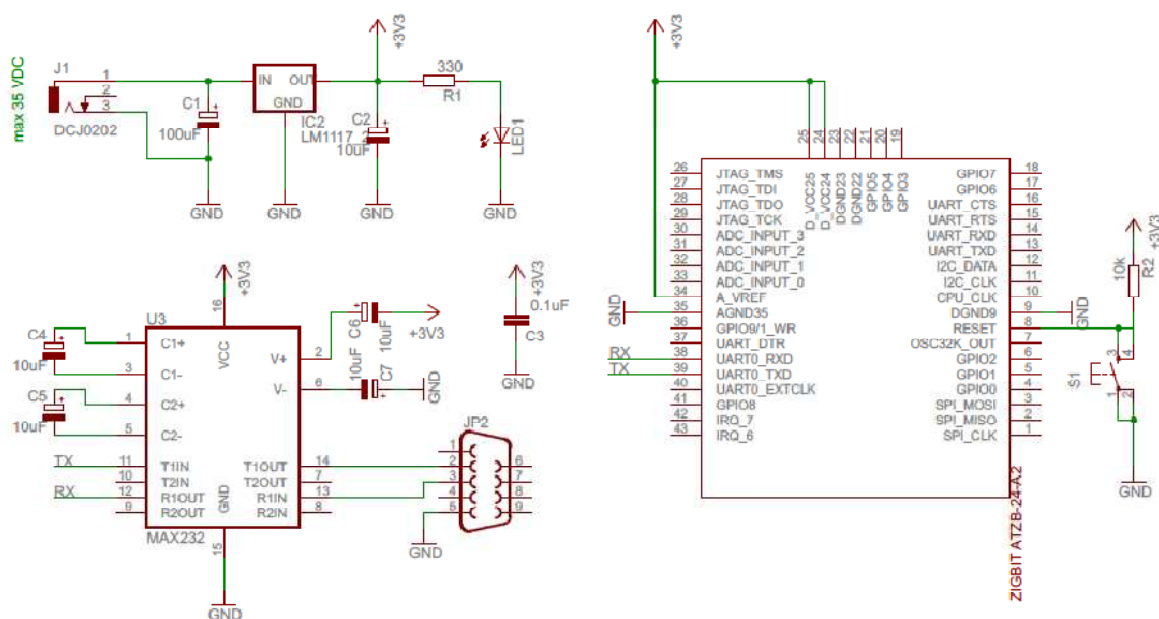


Figura 6.17. Esquemático elétrico do módulo gravador ou coordenado.

6.5.5 Módulo Duto

Os principais componentes do módulo duto, Figura 6.18, são os dois sensores SHT71 e o módulo ZigBit.

Este módulo foi desenvolvido para mensurar os valores da temperatura e da umidade relativa na saída das duas últimas grelhas, com o objetivo de verificar a perda de umidade e o aumento da temperatura após o ar percorrer todo o sistema e, após evaporativo para que fosse possível analisar a queda de temperatura oferecida por esta parte do sistema e o quanto o ar se encontra úmido neste local. Sendo assim as medições feitas por este módulo tem caráter apenas comparativo, não sendo utilizadas no controle do aparelho de ar condicionado.



Figura 6.18. Módulo duto.

Como pode ser observado no esquema elétrico, Figura 6.19, o módulo duto disponibiliza duas portas I/O's para a comunicação do sensor de temperatura e umidade com a placa ZigBit.

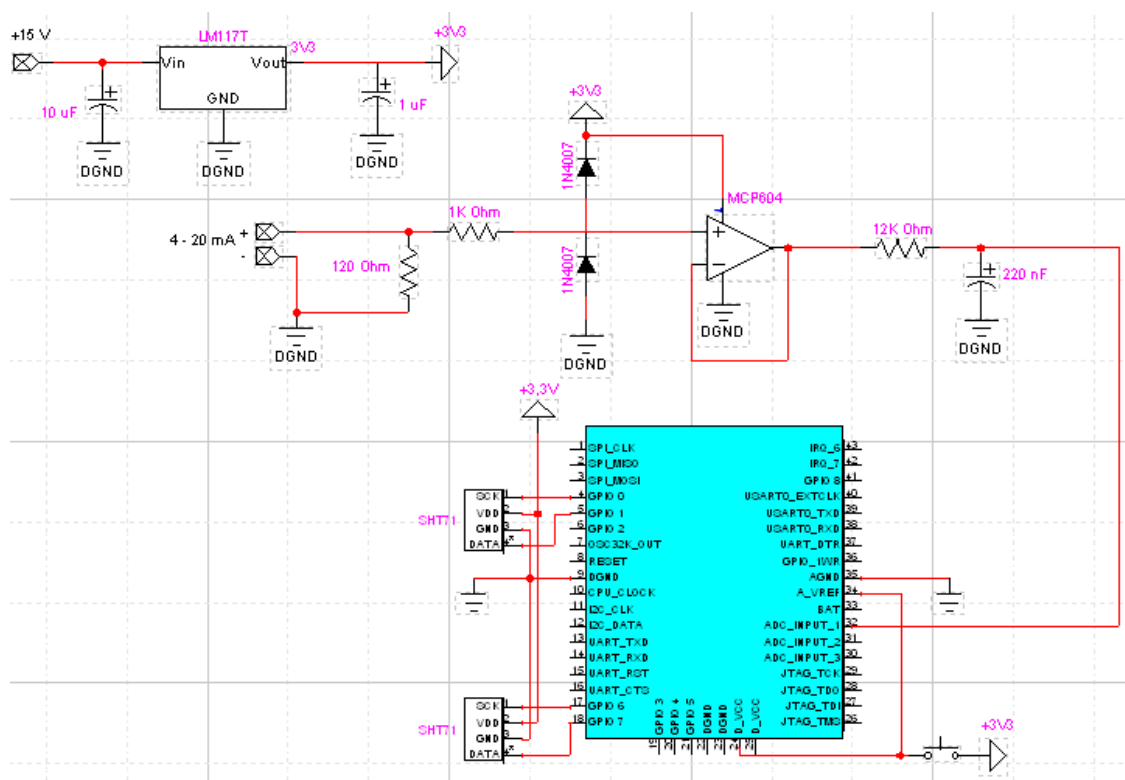


Figura 6.19. Esquema elétrico do módulo duto.

6.5.6 Módulo de Referência

O módulo de referência é utilizado para mensurar três dos parâmetros (temperatura, umidade relativa e velocidade do ar) utilizados para o cálculo do PMV, criando as condições necessárias para o desenvolvimento do controle visando conforto térmico em função deste índice. Devido à sua finalidade, este módulo se encontra posicionado estrategicamente no local onde existe a maior concentração de pessoas. O módulo e a sua localização são mostrados na Figura 6.20.

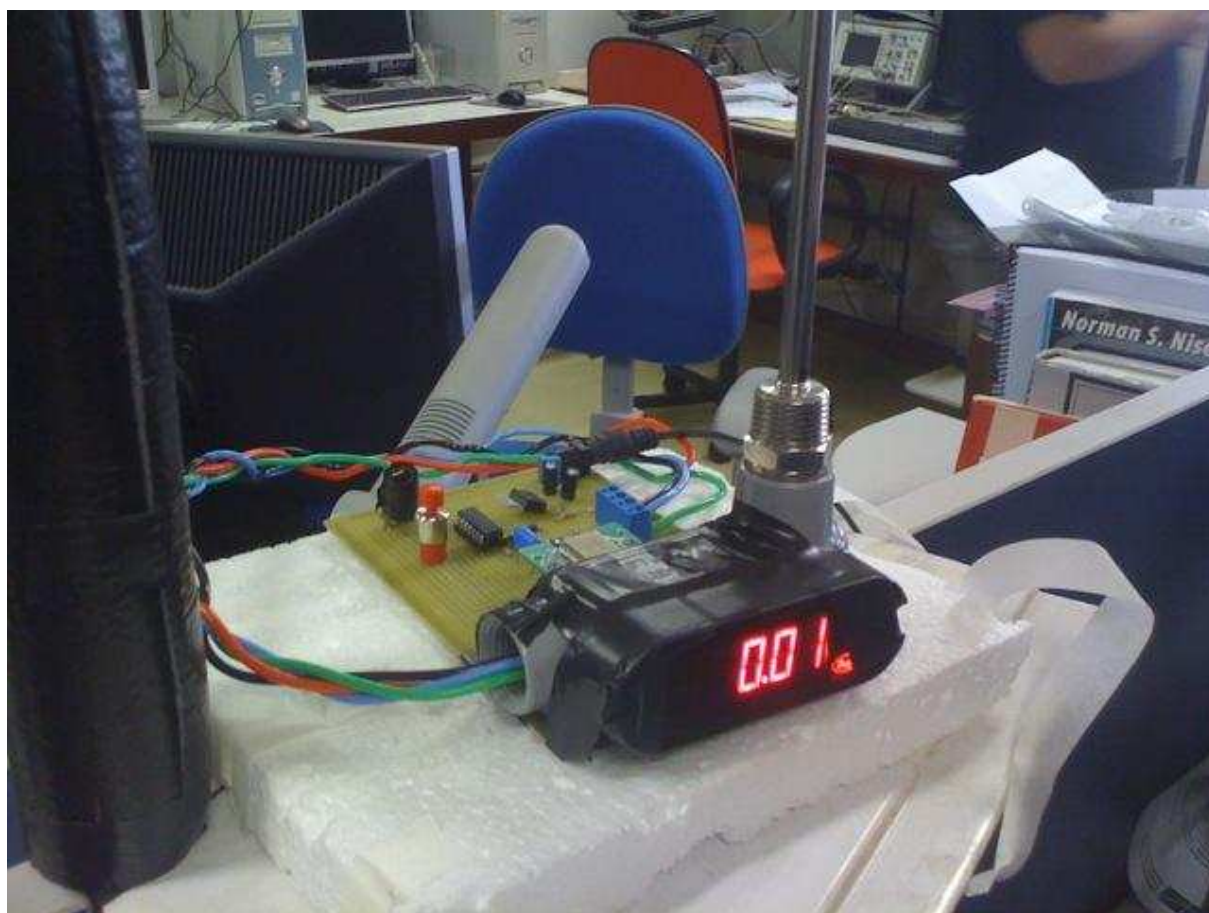


Figura 6.20. Módulo de referência e sua localização.

Este módulo, assim como o módulo externo, utiliza duas I/O's para a comunicação do SHT-71 com o módulo ZigBit. Além disso, também disponibiliza uma porta ADC para conversão do sinal de saída do anemômetro. O esquema elétrico deste módulo pode ser visto na Figura 6.21.



Figura 6.22. Módulo atuador.

O módulo atuador é o destinatário da análise realizada pelo Action View. Após receber e tratar os dados do módulo de referência, o supervisor manda algum comando para o módulo atuador segundo a estratégia de controle elaborada e, em seguida, este módulo faz a atuação no sistema de ar condicionado híbrido, ou seja, a função deste módulo é gerenciar os relés que farão o Liga/Desliga do ventilador, do compressor e da bomba d'água e o multiplexador que fará o controle do atuador proporcional do *damper*. O módulo atuador também deve enviar ao módulo coordenador o *status* dos equipamentos citados.

De acordo com o diagrama elétrico do ar condicionado híbrido elaborado por [33], anexo C, o acionamento do compressor assim como o acionamento da bomba d'água só é possível se o ventilador estiver ligado. Algumas modificações foram feitas no painel elétrico e uma nova chave foi inserida com o objetivo de dar ao usuário a opção de escolher entre a automação ZigBee e a Sitrad. O diagrama de força pode ser visto na Figura 6.23 e o diagrama de comando na Figura 6.24.

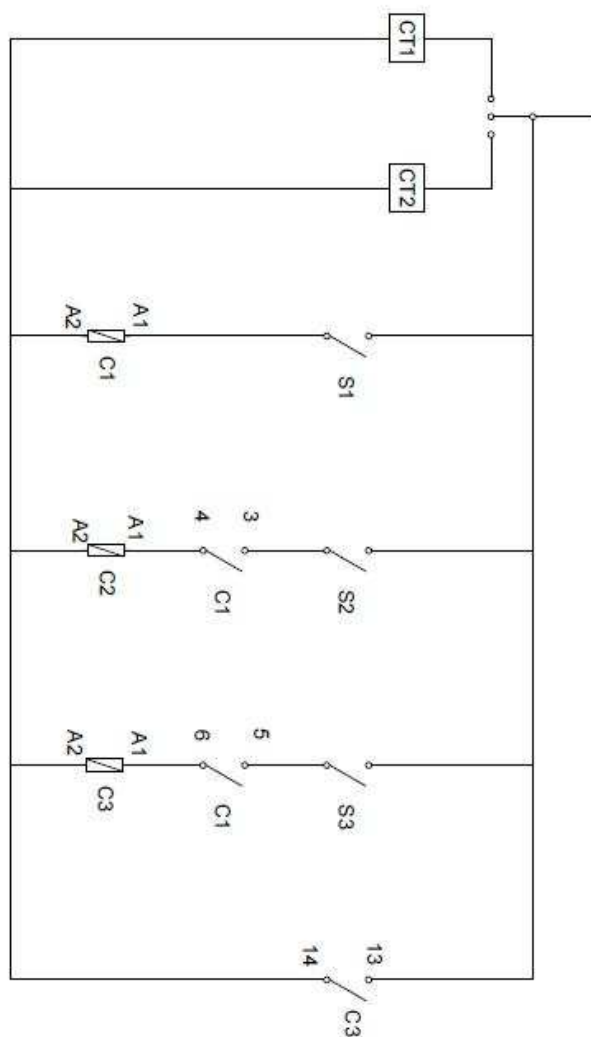


Figura 6.23. Projeto do sistema híbrido (diagrama de força).

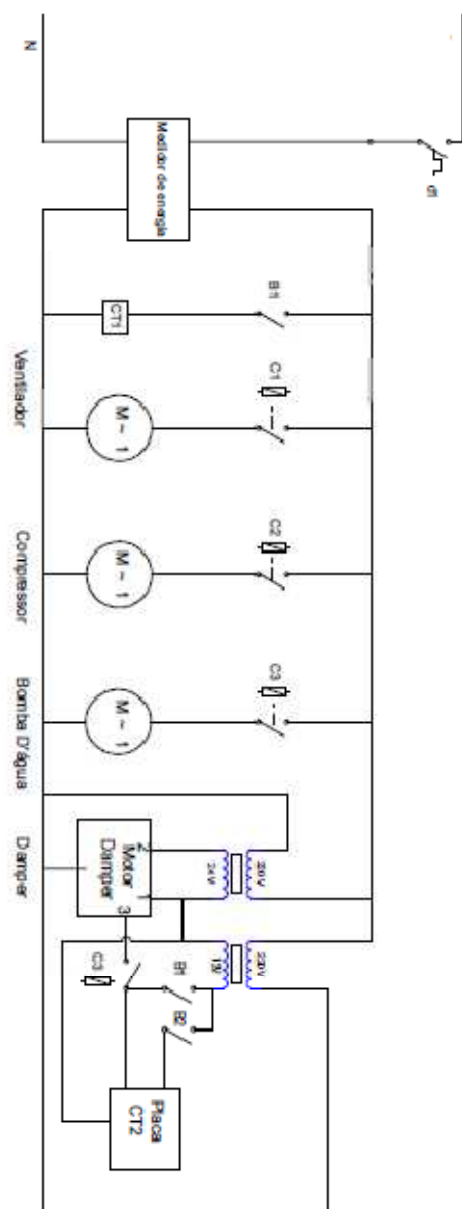


Figura 6.24. Projeto do sistema híbrido (diagrama de comando).

Com as alterações feitas (comparar os diagramas do anexo C com os diagramas da Figura 6.23 e da Figura 6.24), o acionamento do *damper* não é mais condicionado ao acionamento do compressor, abrindo somente quando um comando é enviado pelo multiplexador.

O acionamento do *damper* possibilita quatro possíveis posições: totalmente fechado, aberto 33,33%, aberto 66,66% ou totalmente aberto. Desta forma é possível que o sistema evaporativo e o sistema de refrigeração convencional atuem ao mesmo tempo. Sendo assim o ar que passa pelo sistema convencional pode ser uma mistura do ar que retorna do ambiente condicionado e do ar externo que passa pelo sistema evaporativo.

O modelo elétrico do módulo atuador pode ser visualizado na Figura 6.25.

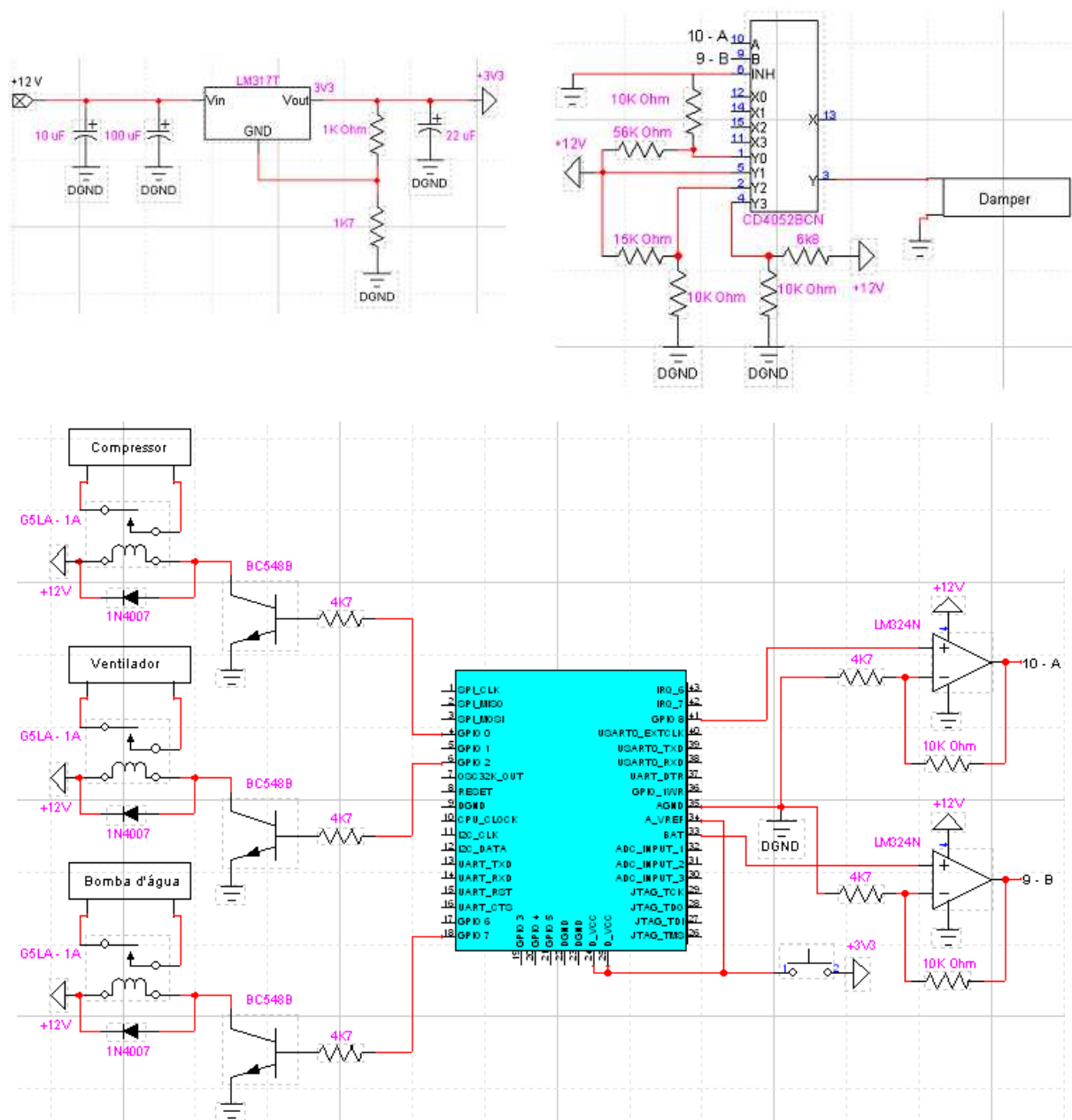


Figura 6.25. Esquema elétrico do módulo atuador.

6.6 SOFTWARE EMBARCADO APLICADO AO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

6.6.1 Bitcloud

Para desenvolvimento do software embarcado foi escolhido o gerenciador de tarefas e *API*, *Application Programming Interface*, Bitcloud. Sistema de tempo real, esse gerenciador utiliza-se do paradigma *Event-driven System*, Figura 6.26, para garantir cumprimento dos deadlines de suas *threats* e simular um sistema multitarefa.

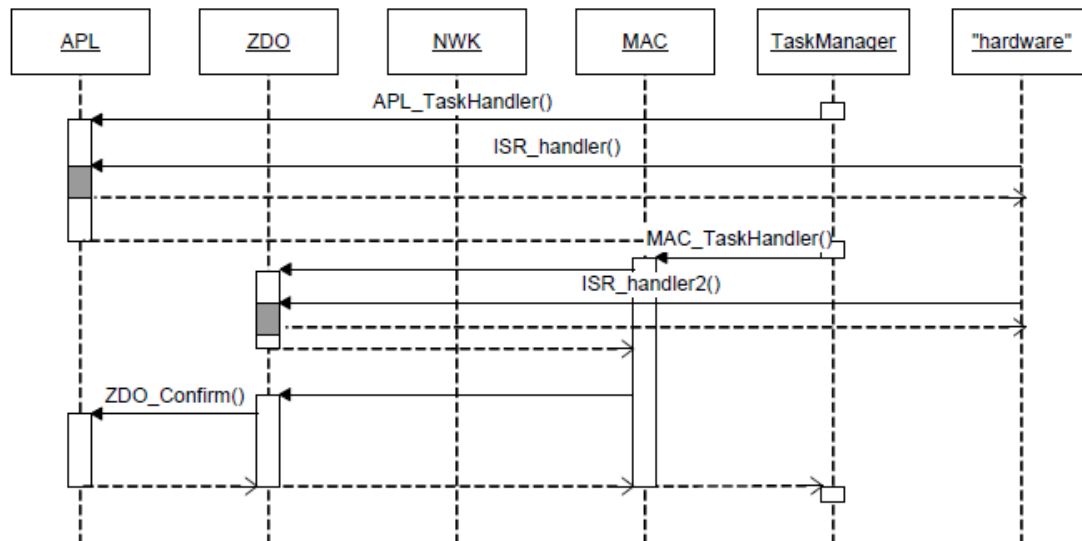


Figura 6.26. Paradigma dirigido a eventos, [25].

A qualidade de sistema de tempos reais pode ser mensurada pela capacidade do sistema de não apenas realizar suas tarefas, mas de executá-las no momento adequado. Neste contexto, o desacoplamento entre as solicitações e as respostas é fundamental. Toda a estrutura BitCloud foi elaborada permitindo a utilização dos recursos computacionais por outros enquanto aguardo de resposta. Desta maneira, requisições assíncronas são escalonadas e suas respostas, denominadas callbacks, são reportadas apenas quando nenhuma atividade de maior prioridade está na lista de tarefas. Esse modo de operação simula, então, sistemas multitarefa apesar do núcleo único de processamento onde que o BitCloud se encontra inserido, ATMEGA128. A execução e ordenamento da rede ZigBee coordenada pelo BitCloud é transparente para a aplicação.

As características BitCloud, entretanto, aplicam ao desenvolvedor uma série de restrições e regras que podem ser encontradas na documentação oficial da API, [25]. Dentre elas, as limitações do tempo de processamento da aplicação e as restrições a alocações dinâmicas de memória se destacam.

6.6.2 Software Embarcado

A aplicação *lowpower* foi desenvolvida como solução de software proposta ao sistema de refrigeração do ambiente em estudo. Divida em três módulos, a aplicação tem como estrutura os seguintes arquivos principais:

- Lowpower;
- Coordenador;
- Enddevice.

A destinação dos módulos apresentados nos tópicos 6.5.4, 6.5.5, 6.5.6 e 6.5.7 foi realizada por meio de macros e definições em arquivos auxiliares. A criação de uma diretiva, BOARD_MIRE, em *makefile* padrão do Bitcloud foi necessária visando adequação dos recursos de hardware dos módulos. Botões, Leds, Sliders e outros precisaram ser retirados da diretiva de placa padrão BitCloud para bom desempenho dos novos hardwares.

Um arquivo auxiliar, denominado *modulos*, também foi utilizado para adequação dos dispositivos. Nele os objetos e serviços BACnet e ZigBee foram alocados conforme objetivo das placas. Essa medida foi realizada com intuito de evitar desperdício de recursos computacionais com serviços e objetos não utilizados.

6.6.3 Lowpower

O arquivo *lowpower* dispõe da estrutura central de todos os módulos. É nesse arquivo, que a rede é inicializada e os módulos passam a apresentar atitudes distintas. A máquina de estado apresentada na Figura 6.27 ilustra o comportamento dessa aplicação.

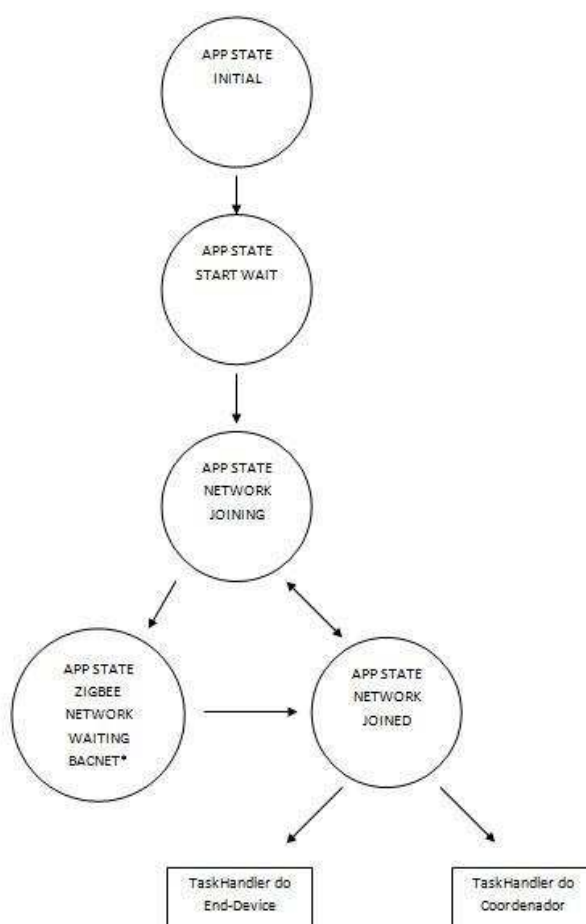


Figura 6.27. Máquina de estado comentada *lowpower*.

Destaca-se a importância desta máquina devido a sua hierarquia. Todas as demais máquinas de estados da aplicação apresentadas neste trabalho estão dispostas em nível superior, tendo sua execução regida pela máquina *lowpower*. A lista de tarefas dos arquivos

Coordenador e *Enddevice* será executada somente se a lista de tarefas do arquivo *lowpower* assim indicar. O *lowpower* é o arquivo que dispõem do *TaskHandler* principal da aplicação.

As funções de recebimento de mensagem e de modificações de parâmetros da rede também estão vinculadas a esse arquivo e podem ser acionadas pelos *callbacks* a seguir:

```
APS_DataInd(APS_DataInd_t ind);
```

```
ZDO_MgmtNwkUpdateNotf(ZDO_MgmtNwkUpdateNotf_t *nwkParams).
```

O controle de alterações na rede é fundamental para sincronização de tabela de endereços, por esse motivo, uma função de remoção da tabela pode ser eventualmente chamada dentro função *ZDO_MgmtNwkUpdateNotf* dependendo do parâmetro de entrada *nwkParams*. Devido à norma [9] a inclusão de registros na tabela de endereço não será feita neste momento, mas sim no recebimento de comandos *Adversting* pelo coordenador. A Figura 6.28 ilustra como as outras camadas se comunicam com a aplicação, neste caso, representada pelo *lowpower*.

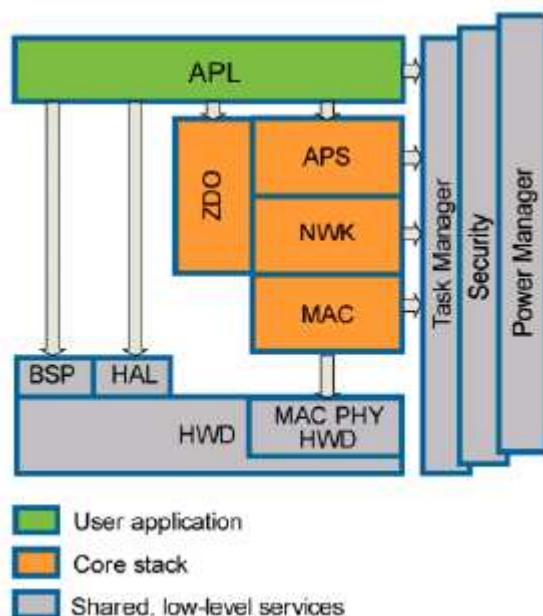


Figura 6.28. Visão geral da API Bitcloud, [25].

6.6.4 Coordenador

Após a etapa inicial e o dispositivo estar devidamente conectado à rede, a máquina de estado *lowpower* indica uma nova rotina de tarefas a ser seguida. Caso na inicialização dos arquivos auxiliares esteja indicado que o dispositivo deva funcionar como coordenador, será então executada a sua máquina de estado, Figura 6.29.

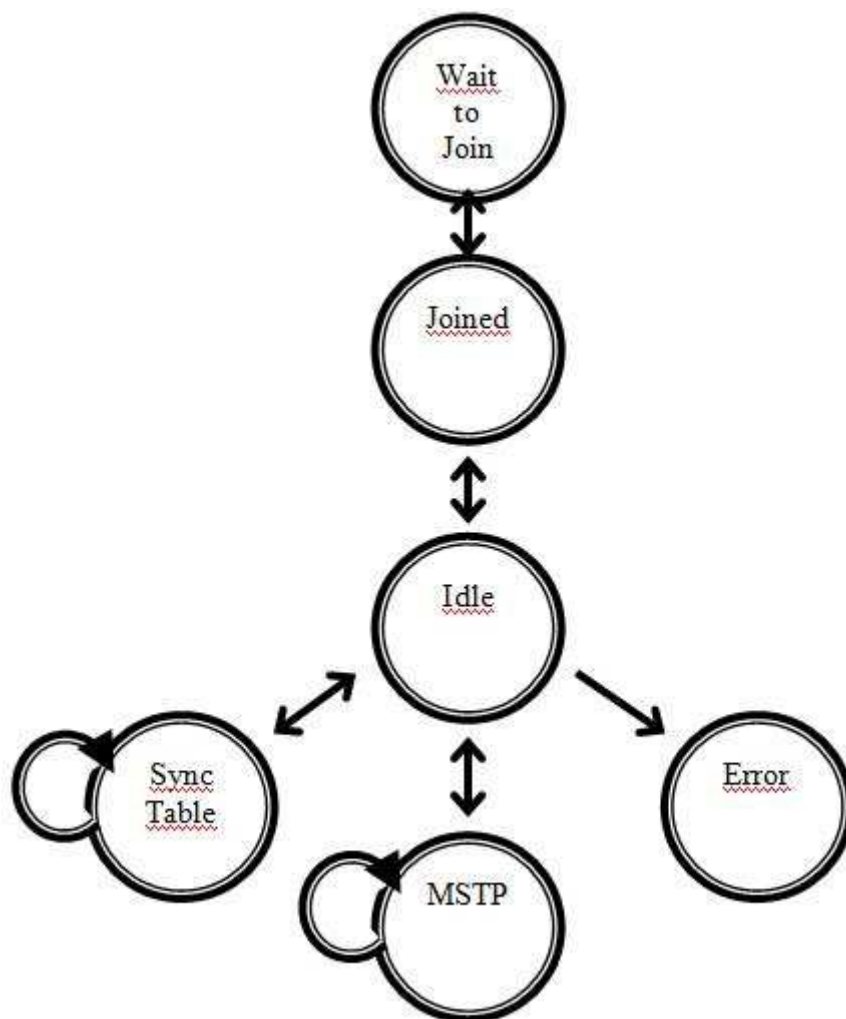


Figura 6.29. Máquina de estado do coordenador.

O “Wait to join” é o primeiro estado desta máquina e somente é alterado após o dispositivo se conectar a rede. O estado “Joined” por sua vez, realiza as funções iniciais obrigatórias posteriormente ao dispositivo se conectar a rede. Um exemplo dessas funções seria um comando *Who-Is*.

Após esses dois estados, o “Idle” assume papel principal nessa máquina. Em regime permanente, os estados de sincronização de tabela, “syncTable” e os de execução da máquina BACnet MS/TP, “MSTP”, se alternam sempre intercalados pelo estado “Idle”.

Devido características do coordenador nesta aplicação, o mesmo somente enviará mensagem em casos de roteamento ou respostas a perguntas do supervisor. Em ambos os casos o recebimento de mensagem se dará por meio de callbacks que são responsáveis pelo tratamento da mensagem e envio da resposta.

A única exceção a esta regra se aplica em situações onde um dispositivo tenta se conectar a rede com um endereço já utilizado por algum outro. Nesse caso, o coordenador envia um comando de escrita sobre o atributo *protocol address* do dispositivo alterando seu endereço na rede.

6.6.5 Enddevice

A escolha do funcionamento do dispositivo como end-device também está relacionada às diretivas definidas, em tempo de compilação, nos arquivos auxiliares. Sua máquina de estado é ilustrada na Figura 6.30.

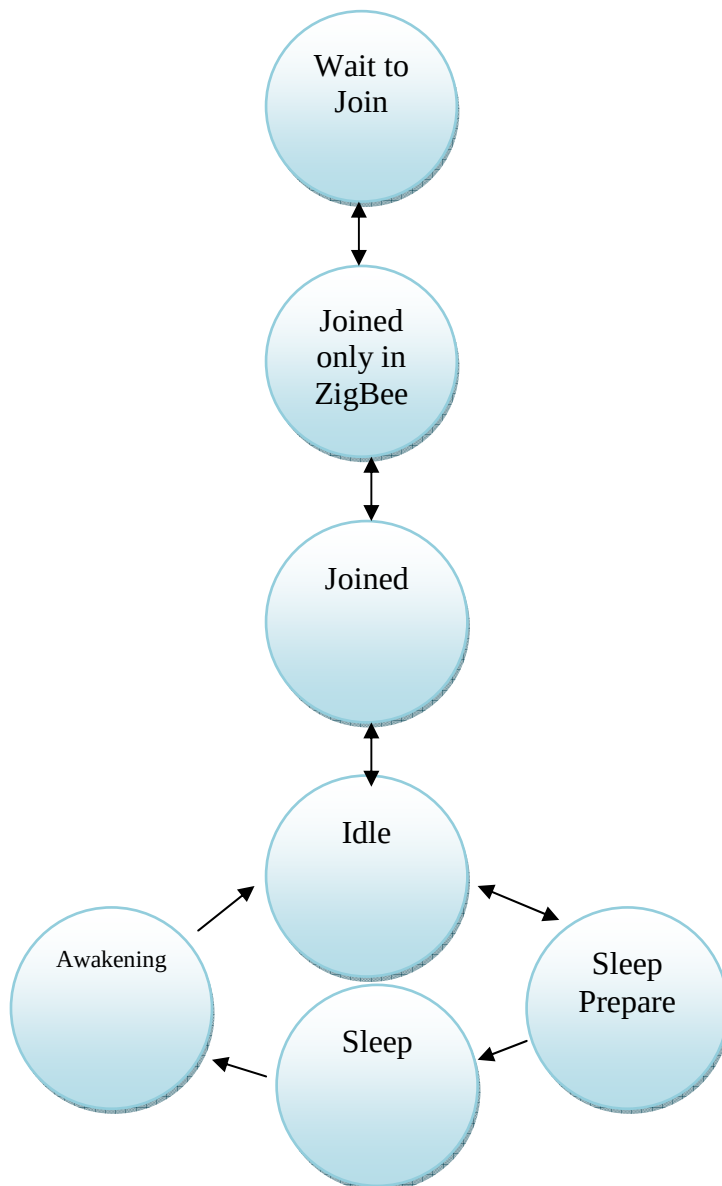


Figura 6.30. Máquina de estado End-device.

O “Wait to join”, assim como no coordenador, é o primeiro estado desta máquina e somente será alterado após o dispositivo se conectar a rede. Já o estado “Joined only in ZigBee” é exclusivo do end-device e indica que o dispositivo, apesar de já se encontrar na rede ZigBee, não está devidamente registrado na rede BACnet. É neste estado que o dispositivo envia o comando *adversting*, norma [23].

Após receber confirmação que o dispositivo está pronto para conectar na rede BACnet, a máquina de estado evolui então para o estado “Joined”. Conectado, o dispositivo pode

enviar sua primeira e única mensagem BACnet não solicitada, o *I-Am*. A partir desse ponto, o end-device irá apenas oscilar entre os estados de leitura de sensores e estados vinculados ao racionamento de energia. Os sensores que serão lidos irão depender das funções dos módulos, mas em qualquer modelo a ser seguido, a leitura sempre será feita no estado “Idle”.

Evidentemente o end-device necessitará responder as solicitações do supervisor por informações de seus sensores e o fará utilizando-se dos callbacks. A analogia mestre/escravo pode ser feita para melhor entendimento dessa situação.

6.7 PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO APLICADO AO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DO AMBIENTE DE ESTUDO

Apresentado alguns dos protocolos de comunicação existentes no mercado e ciente dos objetivos do projeto, foi proposta à utilização do BACnet sobre ZigBee como protocolo adequado devido os seguintes aspectos:

- Alta interoperabilidade do sistema;
- Baixo custo de instalação por se tratar de um sistema sem fio;
- Facilidade de integração com outras soluções de mercado devido à predominância do BACnet como protocolo de automação.

Para realização desta proposta foi criada, então, a biblioteca *BZLL* que dispõe de todas as características requisitadas destacadas nos tópicos anteriores deste trabalho. Uma biblioteca auxiliar denominada *Bacinterface* também foi criada com intuito de facilitar a integração entre os protocolos, entretanto sua criação está relacionada a uma solução local encontrada pelos desenvolvedores deste trabalho. Além destas duas bibliotecas, funções de roteamento foram minuciosamente trabalhadas com a finalidade de permitir a um determinado dispositivo atuar como coordenador ZigBee e roteador híbrido BACnet.

6.7.1 Arquitetura da Rede

Antes de dissertar sobre as bibliotecas criadas para utilização dos protocolos é importante entender a estrutura da rede que foi aplicada ao Sistema de Refrigeração do Ambiente em Estudo. Devido às características de ausência de fios do protocolo ZigBee, se fez uso de cabo apenas para comunicação do coordenador com supervisor. O coordenador atuou, então, como um roteador de mensagens. A opção de uso do coordenador como concentrador também foi levantada, entretanto foi preterida pela opção de economia de memória. A Figura 6.31 ilustra a arquitetura da rede.

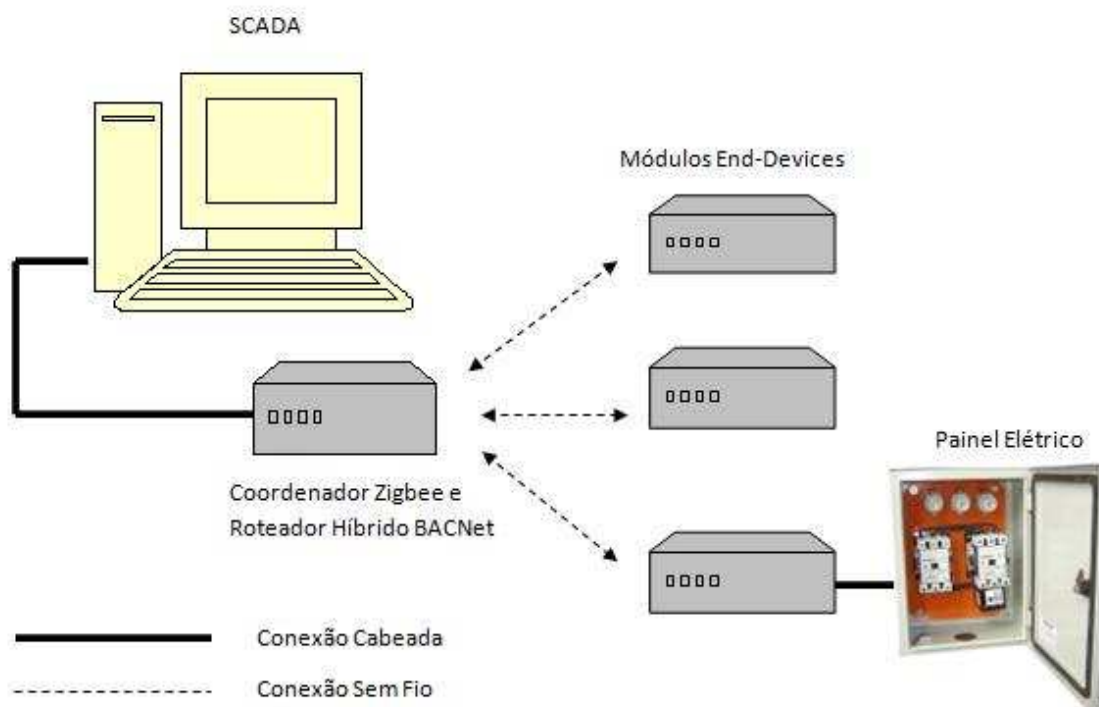


Figura 6.31. Arquitetura da rede.

6.7.2 VMACTable

A VMAC Table, tabela com endereços dos dispositivos, foi estruturada no formato de vetor da seguinte estrutura:

```
typedef struct {
    uint8_t InUse;
    ShortAddr_t ShortAddr;
    OctetString_3t OIB;
    uint8_t Tries;
    uint8_t Atuador;
} VmacTable_t;
```

Todas as informações e os requisitos, destacadas no tópico 5.4, estão presentes nessa estrutura. O *ShortAddr*, endereço de 2 bytes, representando o endereço ZigBee e o OIB, endereço de 4 bytes, representando o endereço BACnet desempenham a função de relacionamento das duas redes. O *Protocol Address* de cada elemento na rede não está explicitamente presente na tabela, mas a partir de determinação da norma BACnet [18], infere-se que o OIB e o *Protocol Address* têm o mesmo valor. De modo semelhante o *Endpoint* BACnet não está explícito, mas é definido de maneira global, uma vez que será o mesmo para todos os dispositivos. As demais três entradas dispostas na estrutura acima são soluções locais aos problemas em que há omissão da norma [18]. *InUse*, com finalidade de verificar se a posição do vetor está sendo usada, *Tries*, com finalidade de contar número de tentativas mal sucedidas de envio de mensagem ao registro e Atuador, com finalidade de realizar interface com futuras soluções de controle,

A fim de administrar essa tabela uma série de funções foi criada permitindo adicionar, retirar, procurar ou alterar registros. As informações dessa Tabela são fundamentais para bom funcionamento da rede BACnet sobre ZigBee, e por isso é possível observar inúmeras funções que abordam os mais diversos modos de acessos a esses dados.

```
void BZLL_AddRegVmacTable(VmacTable_t *VmacTable);
void BZLL_VmacTableClearTry (OctetString_3t *OIB);
void BZLL_VmacTableAddTryUsingOIB (OctetString_3t *OIB);
void BZLL_RemRegVmacTable(VmacTable_t *VmacTable);
void BZLL_RemRegVmacTableShort(ShortAddr_t ShortAddr) ;
ShortAddr_t BZLL_FindRegShorttoOIB (OctetString_3t *OIB);
OctetString_3t BZLL_FindRegOIBtoShort (ShortAddr_t ShortAddr);
uint8_t BZLL_GiveMeAActuator(ShortAddr_t ShortAddr) ;
void BZLL_WriteActuatorShort(ShortAddr_t ShortAddr,uint8_t atuador) ;
void BZLL_WriteActuatorOIB(OctetString_3t *OIB,uint8_t atuador) ;
ShortAddr_t BZLL_GetMACByIndex(uint8_t index) ;
uint8_t BZLL_VmacTableCount(void) ;
```

A nomenclatura utilizada para as chamadas de funções apresentadas acima foi elaborada com intuito de facilitar a compreensão e melhor utilização da biblioteca por outros usuários. Em alguns casos observa-se a utilização de estruturas únicas como parâmetros para as funções. Suas definições são exibidas a seguir. Ressalta-se que estas estruturas estão disponíveis em norma [21].

```
typedef struct {
    unsigned char FrameControl;
    uint16_t manufactory;
    unsigned char Sequence;
    unsigned char Command;
}ZCLHeader_t;

typedef struct {
    uint8_t Count;
    unsigned char Octetdata[3];
}OctetString_3t;
```

A estrutura OctectString tem sua importância ressaltada devido a intensa utilização na biblioteca BZLL. Um vetor de bytes com o primeiro elemento indicando o tamanho da estrutura resume sua funcionalidade.

6.7.3 Comandos do Cluster Generic Tunnel

A fim de complementar as informações contidas na *VMACTABLE*, o atributo do *Generic Tunnel* esta presente na biblioteca na forma a seguir:

```
OctetString_3t A_ProtocolAddr;
```

O atributo *Protocol Address* é requisito do cluster *Generic Tunnel* (ZigBee) e devido à norma BACnet [18] é atribuído na biblioteca com o mesmo endereço de memória que o *device instance* do *Device Object* (BACnet). Esse atributo também precisa ser manipulado ou lido por outros dispositivos, por isso funções de leitura e escrita comuns a todos os *cluster* ZigBee foram elaboradas no formato a seguir:

```
void BZLL_Read_Attribute_Short (uint16_t *atributo, ShortAddr_t ShortAddr, int
macAddresslength, int AddressNetwork, uint8_t NumberOfAttribute, void (*APS_DataConfX)
(APS_DataConf_t*));

void BZLL_Read_Attribute_Response (APS_DataInd_t* ind ) ;

void BZLL_Write_Attribute (uint8_t *tipo_atributo, uint16_t *atributo, OctetString_3t data,
ShortAddr_t ShortAddr, uint8_t Conf);

uint8_t BZLL_Write_Attribute_Response(APS_DataInd_t *ind);
```

Evidentemente as funções obrigatórias do cluster *Generic Tunnel*, citadas no tópico 5.3.3, também foram desenvolvidas e estão disponíveis sobre a forma:

```
void BZLL_Advertise_Indication(APS_DataInd_t* ind) ;
void BZLL_Match_Protocol_Indication_Client_To_Server (APS_DataInd_t* ind);
void BZLL_Match_Protocol_Indication_Server_To_Client (APS_DataInd_t* ind);
void BZLL_Advertise_Protocol(OctetString_3t mensagem, void (*APS_DataConfX)
(APS_DataConf_t*));
```

6.7.4 Comandos do Cluster BACnet Tunnel Protocol

Serviço essencial o comando *TransferNPDU* também está disponível na BZLL e segue o padrão apresentado no tópico 5.3.4. Sua essência está diretamente relacionada ao seu papel de envio da mensagem BACnet propriamente dita a outro dispositivo. A seguir seguem duas chamadas diferentes para o comando.

```
void BZLL_Datareq_Address (int macAddresslength, ShortAddr_t ShortAddr, OctetString_Max_t
NPDU, unsigned short AddressNetwork, uint8_t Conf);

void BZLL_Datareq (int macAddresslength, OctetString_3t OIB, OctetString_Max_t NPDU,
unsigned short AddressNetwork, uint8_t Conf);
```

Em ambas as chamadas, os parâmetros são semelhantes, divergindo apenas, se o endereço ZigBee (*ShortAddr*) ou endereço BACnet (*OIB*) será utilizado pela função para encontrar o destinatário. O tunelamento da mensagem é feito justamente neste serviço. A Figura 6.32 ilustra uma típica mensagem enviada nessa rede ZigBee sobre BACnet.



Figura 6.32. Mensagem típica ZigBee sobre BACnet.

6.7.5 Bacinterface

A biblioteca Bacinterface foi criada com intuito de englobar as funções que fazem interface entre as camadas de rede ZigBee e BACnet. Englobar todas essas funções em uma biblioteca visou modularizar a aplicação. Funções de inicialização de objetos e serviços também foram alocadas nesse espaço.

As principais funções responsáveis por realizar essa interface são as funções de sincronização de tabelas e as de roteamento entre as redes. A seguir é possível observar as chamadas para ambas as funções:

```
bool ADDRESS_request_mstp(uint8_t index)
short BAC_MSTP_Route_Message(uint8_t source, uint8_t destination, uint8_t * pdu,uint16_t pdu_len);
```

A falta de sincronização entre as tabelas é um problema grave e precisa ser constantemente solucionado, devido à estrutura da rede proposta. Em uma situação típica a atualização de parâmetros na rede BACnet não é observada pela rede ZigBee competindo ao desenvolvedor garantir sua atualização. A função `ADDRESS_request_mstp` foi, então, utilizada como solução ao problema. Percorrendo a tabela e verificando a correspondência entre os elementos de ambas, a função se encarrega de verificar qualquer informação inconsistente. A viabilidade dessa solução empregada está diretamente relacionada ao baixo número de dispositivos na rede. Caso a aplicação exija um grande número de dispositivos, a implementação de uma tabela única é recomendada.

Necessidades de roteamento também compõem o escopo deste trabalho. Entretanto, devido à complexidade do assunto, o mesmo será abordado em tópico dedicado.

6.7.6 Roteador Híbrido

Devido aos objetivos expostos no Capítulo 1 desse trabalho e a arquitetura da rede, foi necessária a criação de uma solução ainda não proposta, porém condizente com as normas (ASHRAE Standard, 2008), denominada roteador híbrido.

Na Figura 6.31 é possível observar que foi utilizada comunicação com cabos apenas com o coordenador. Devido à facilidade de implementação e baixo custo, a comunicação coordenador/supervísório escolhida foi o BACnet/MS/TP. O Coordenador, então, recebe a mensagem MS/TP pela rede R-232 e encaminha aos dispositivos finais pela rede ZigBee. A Figura 6.33 ilustra a atitude executada pelo roteador híbrido.

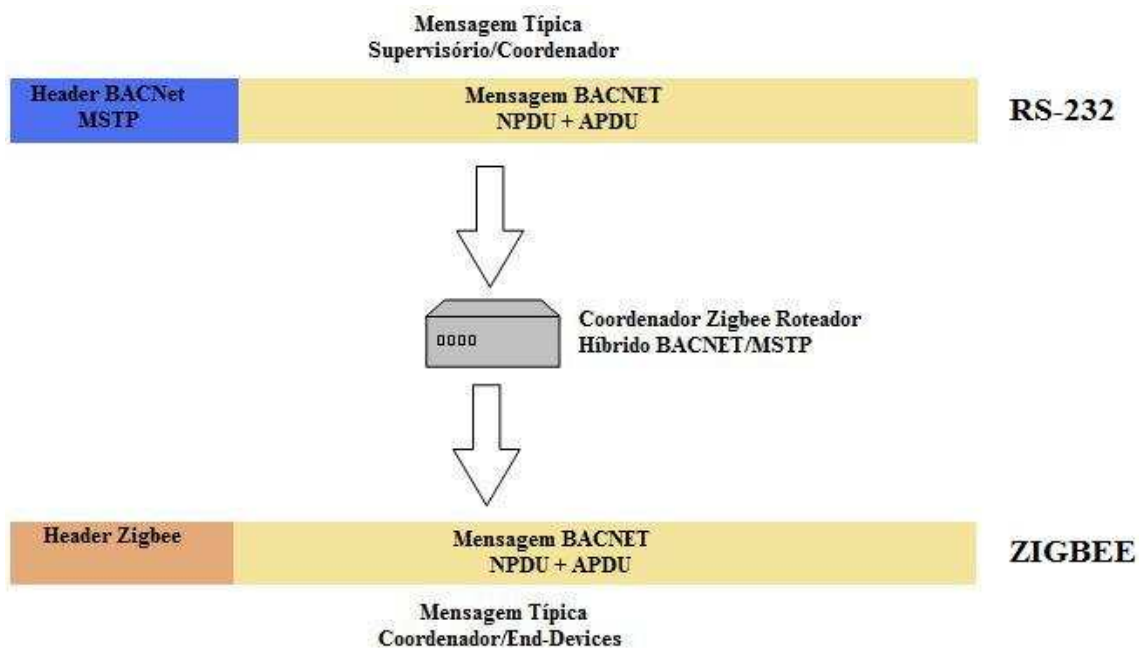


Figura 6.33. Coordenador híbrido.

A mensagem típica transitada na rede RS-232 é composta do Header BACnet MS/TP e do segmento BACnet. Ao receber uma mensagem não destinada a ele, o coordenador utiliza informações da *VMACTable* e Tabela BACnet para identificar o destinatário final. Compete, então, ao coordenador retirar o *Header MS/TP* e incluir informações de roteamento no NPDU da mensagem BACnet. Além disso, o coordenador necessita de incluir o Header ZigBee para que mensagem transite normalmente na rede sem fio.

Em uma análise mais detalhada, Figura 6.34, o coordenador, ao receber a mensagem do supervisor, determina o remetente, pelas informações de destino presente no header MS/TP e o inclui nos campos: SNET, SLEN e SADR do NPDU. A mensagem é, então, enviada ao destinatário. O Dispositivo Final ao recebê-la utiliza-se da informação sobre o remetente para preencher os campos do destinatário: DNET, DLEN e DADR. Finalmente, o coordenador, ao receber a resposta, checa o destinatário final, encontra o respectivo representante MS/TP, preenche o *Header* da rede executada sobre RS-232 e executa o envio da mensagem.

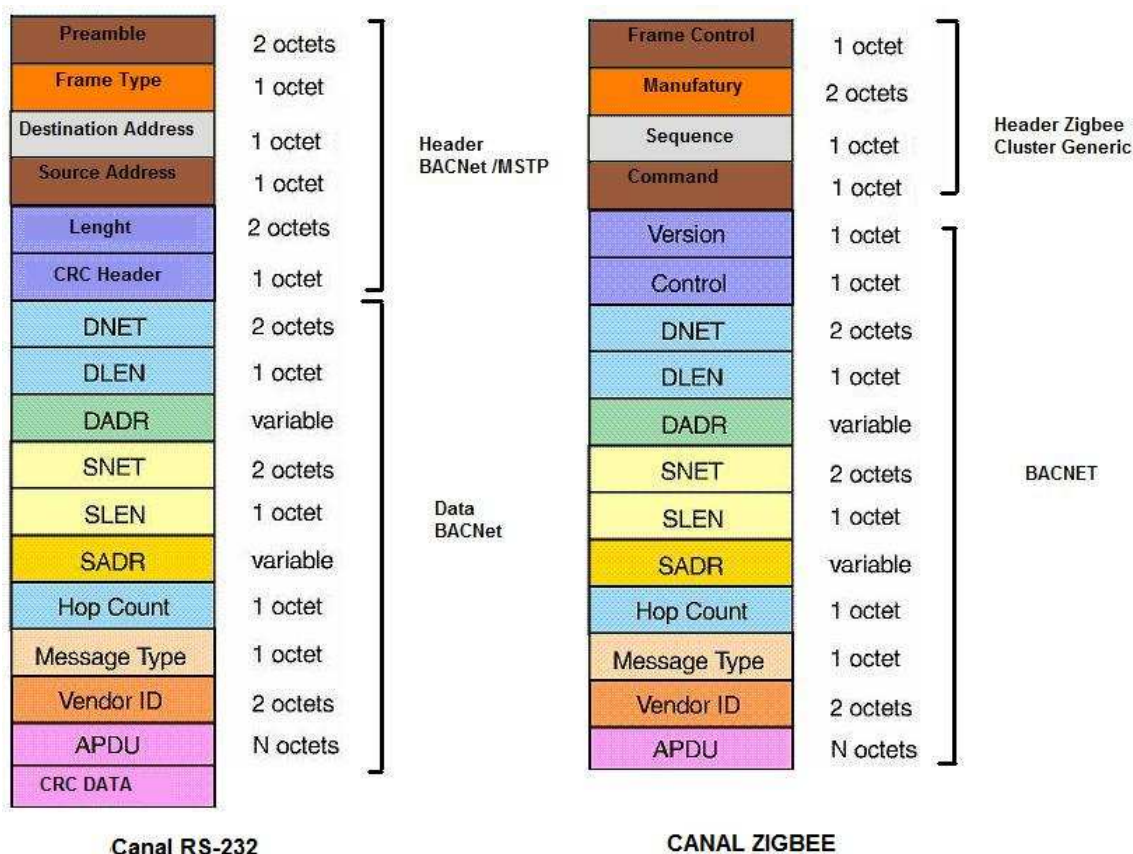


Figura 6.34. Detalhamento das mensagens sobre canais ZigBee e RS-232.

6.8 SUPERVISIONAMENTO APLICADO AO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DO AMBIENTE DE ESTUDO

A configuração e aplicação de um supervisor a um sistema requisitam o conhecimento do objetivo e modo de funcionamento do sistema, por este motivo recomenda-se ao leitor a leitura do 6.1 caso não o tenha feito.

O sistema de Refrigeração proposto neste trabalho apresenta uma série de variáveis a serem monitoradas e controladas. Para isto, é necessário cadastrá-las no SCADA por meio de seu módulo Studio. Temperatura, umidade relativa, velocidade do vento entre outros deverão ser monitorados. A tabela de variáveis, Tabela 6.9, e seus objetos BACnet correspondentes são apresentados conforme objetivo do projeto.

Tabela 6.9. Dados mensurados e objetos correspondentes.

DADO A SER MENSURADO	OBJETO CORRESPONDENTE	DENOMINAÇÃO DO OBJETO NO ACTIONVIEW
TEMPERATURA	ANALOG INPUT	IEA
UMIDADE RELATIVA	ANALOG INPUT	IEA
VELOCIDADE DO AR	ANALOG INPUT	IEA
POSIÇÃO DO <i>DAMPER</i>	ANALOG INPUT	IEA
ESTADOS DOS RELES DE ACIONAMENTO	BINARY OUTPUT	OSD

As escolhas dos objetos BACnet correspondentes é feita pela características dos dados obtidos pelos sensores. A temperatura é mensurada por um sensor analógico. Logo a variável correspondente será o *Analog Input*. O estado de um relé de acionamento, aberto ou fechado, é análogo a uma saída digital, logo seu objeto será o *Binary Output*. Análises semelhantes foram feitas para toda Tabela 6.9. A definição de limite de operação das variáveis também é requisito em sistemas SCADA. Para atender esse requisito foi inferido, dos dados apresentados no tópico 6.5, o resultado disposto na Tabela 6.10.

Tabela 6.10. Limite de operação das variáveis mensurado *Modo de operação selecionado para aplicação deste trabalho.

Dado a ser mensurado	Limite de Operação	Sensor Utilizado
Temperatura	- 40°C a 123,8°C	SHT 71
Umidade Relativa	0 a 100%	SHT 71
Velocidade do AR	0.00 a 1.25 (MPS)*	Dwyer 41
Posição do <i>Damper</i>	0-100%	LMB24-SR
Relés de Acionamento (Bomba de Água, Compressor e Ventilador)	0-1	G5LA-1A

O cadastramento de canais também é primordial para funcionamento do sistema. Informações como timeouts e tempo de atualização das variáveis são configurados neste momento. Determinações equivocadas desses parâmetros podem levar a ausência total/parcial de comunicação com o supervisor ou dificultar ações de controle quando o

tempo de atualização das variáveis se apresentada excessivamente alto em relação à constante de tempo do sistema. A Figura 6.35 e a Figura 6.36 ilustram as configurações de canal utilizadas para cada um dos módulos de monitoramento ou acionamento conforme informação presente no tópico 6.5. Devido também ao papel de roteador do modulo coordenado, apenas ele terá comunicação direta pela rede RS232 com o SCADA necessitando de configurações mais detalhadas.

The image shows three configuration windows for BACNET devices, each with a 'Propriedades' tab. The windows are titled 'Canal0: BACNET - Device1', 'Canal0: BACNET - Device2', and 'Canal0: BACNET - Device3'.

Canal0: BACNET - Device1:

- Endereço do IED: 2
- Descrição do IED: Modulo Duto
- Endereço Físico: 4
- ☐ System
- Endereço de rede: [Empty]
- Objeto Device: [Empty]
- Entradas (ms): 0
- Saídas (ms): 0
- Calendários semanais (ms): 0
- Data e hora (ms): 0
- Variáveis analógicas (ms): 5000
- Variáveis digitais (ms): 0
- Todos objetos (ms): 0

Canal0: BACNET - Device2:

- Endereço do IED: 3
- Descrição do IED: Modulo Ambiente
- Endereço Físico: 3
- ☐ System
- Endereço de rede: [Empty]
- Objeto Device: [Empty]
- Entradas (ms): 0
- Saídas (ms): 0
- Calendários semanais (ms): 0
- Data e hora (ms): 0
- Variáveis analógicas (ms): 0
- Variáveis digitais (ms): 0
- Todos objetos (ms): 5000

Canal0: BACNET - Device3:

- Endereço do IED: 4
- Descrição do IED: Modulo Atuacao
- Endereço Físico: 5
- ☐ System
- Endereço de rede: [Empty]
- Objeto Device: [Empty]
- Entradas (ms): 0
- Saídas (ms): 0
- Calendários semanais (ms): 0
- Data e hora (ms): 0
- Variáveis analógicas (ms): 0
- Variáveis digitais (ms): 0
- Todos objetos (ms): 5000

Each window has buttons for 'Ok', 'Sair', and 'Ajuda' at the bottom.

Figura 6.35. Configuração de IDEs.

The figure displays four screenshots of the 'Canal0' configuration window, arranged in a 2x2 grid. Each window has a title bar 'Canal0' and a menu bar with 'Geral', 'SERIAL', 'Avançado', and 'BACNET'.

- Top-left window (Geral tab):** Shows 'Canal' set to 0, 'Descrição do Canal' as 'Canal RS485', 'Tipo' as 'SERIAL', and 'Protocolo' as 'BACNET - Protocolo BACnet MS/TP'. There is a 'Nenhum' dropdown at the bottom.
- Top-right window (SERIAL tab):** Shows 'Porta' as 'COM1', 'Setting' as '9600,N,8,1', 'Controle fluxo' as 'Nenhum', 'RTS OnDelay (ms)' as 0, and 'RTS OffDelay (ms)' as 0. It also has a 'Porta reserva' section with 'Porta reserva' as 'Nenhum' and 'Setting' as empty.
- Bottom-left window (Avançado tab):** Shows 'Tempo do Ciclo de Ativação' as 50, 'Tempo do Ciclo de Recebimento' as 50, 'Log Report' as 0, 'Mostra status' as 'Ativado', 'Mostra Estatísticas' as 'Ativado', and 'Intervalo das estatísticas (ms)' as 500.
- Bottom-right window (BACNET tab):** Shows 'Modo' as 'Cliente', 'Endereço Computador' as 1, 'Tempo espera de resposta (s)' as 3, 'Número de Tentativas' as 3, 'Ajuste de calendário (min)' as 60, 'Prioridade de comando padrão' as 5, 'Grupo Array Prioridade' as 'G_BACPRI', and 'Variável Array Prioridade' as 'BACPRI'.

Figura 6.36. Configuração do canal BACnet.

Ao final do cadastro de todos os pontos e canais, o resultado obtido é ilustrado na Figura 6.37. Observa-se desta figura, a hierarquia ActionView utilizada na base de dados. A regional foi definida como Serviços Gerais 11, o sistema como LARA, o grupo como os módulos de controle, duto e atuador e finalmente as variáveis foram definidas conforme atribuições dos grupos (módulos). Informações adicionais sobre o cadastramento de pontos ou canais no modulo Studio do ActionView pode ser obtido no manual deste Software encontrado no site oficial do fornecedor.

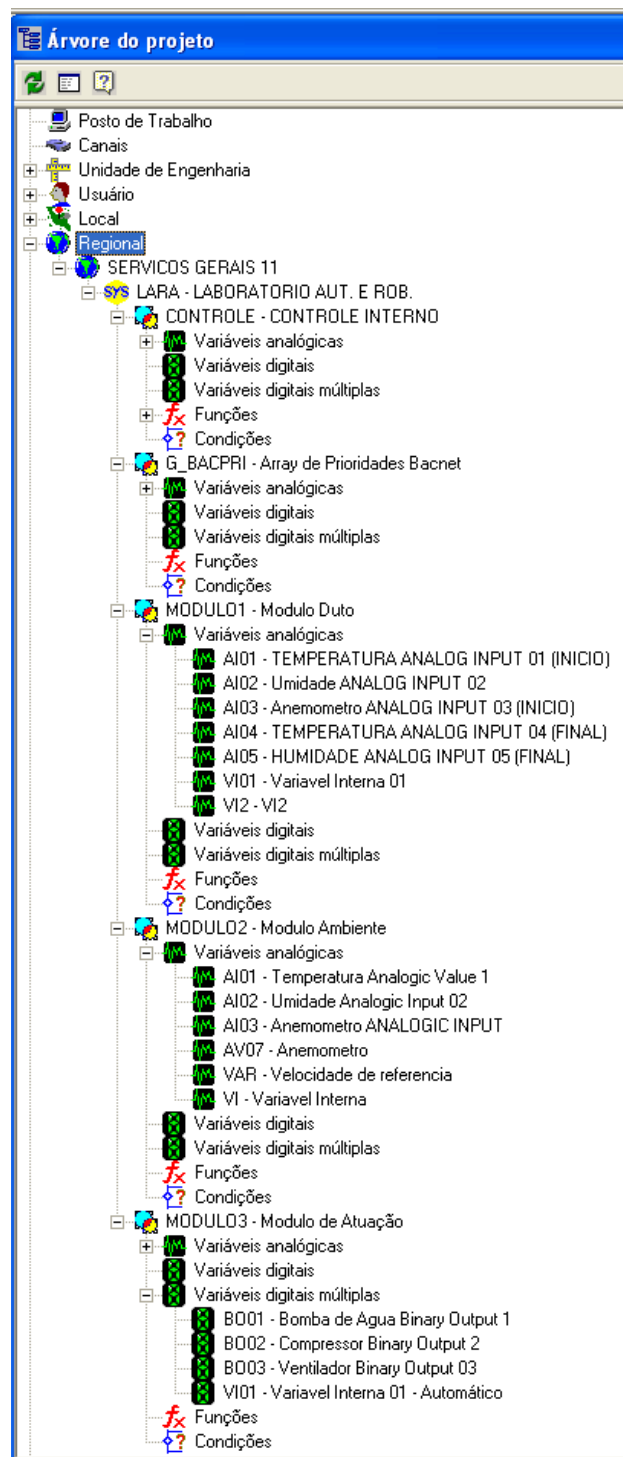


Figura 6.37. Árvore do projeto.

A fase final de configuração do Studio é a elaboração de Sinóticos e eventualmente funções de tratamento de dados. Neste trabalho foi empregada apenas uma tela para supervisionamento do sistema devido à facilidade de operação desejada para este trabalho. A Figura 6.38 ilustra essa tela citada.

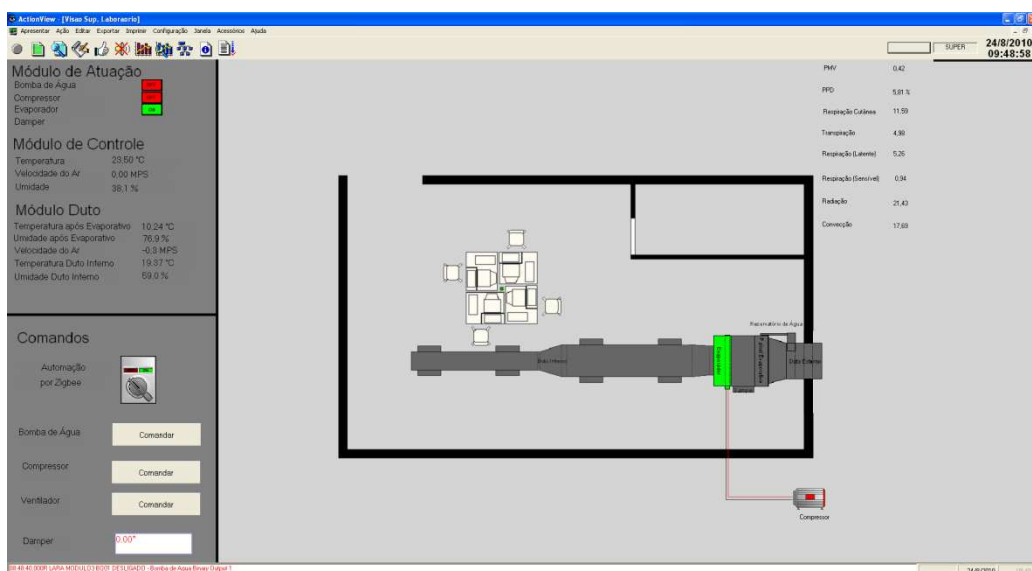


Figura 6.38. Sinótico do ambiente de estudo.

Também devido aos objetivos desse trabalho, funções de tratamento de dados foram realizadas visando à determinação dos parâmetros apresentados no Capítulo 4, como fundamentais para o conforto térmico. O cálculo desses parâmetros foi realizado também segundo fórmulas dispostas no Capítulo 4. A árvore de dados ilustrada na Figura 6.37 apresenta as funções utilizadas.

Finalmente, a configuração do supervisório pode ser finalizada com a determinação de comandos, intertravamentos e alarmes. Os possíveis comandos disponíveis para este trabalho permitem ao operador acionar o compressor, o ventilador, a bomba de água e o *damper* do sistema de refrigeração híbrido presente no ambiente de estudo experimental apresentado no tópico 6.1. Entretanto, os comandos não podem ser enviados em qualquer situação. Para isso, condições de intertravamento foram criadas. Em modo automático de controle, comandos manuais do operador ficam bloqueados evitando a interferência humana em momentos não adequados. Situações onde o ventilador se encontra desligado também implicam no bloqueio de comandos, visto que as características físicas do sistema não justificam acionamento dos demais componentes, caso o ventilador esteja desligado. O desenvolvimento do modo automático implicou na criação de um código VBS, Visual Basic Script, disposto no anexo D, para acompanhamento e atuação sobre as mudanças dos valores dos parâmetros de entrada do controle permitindo a adequação do conforto. Alarmes não permeiam os requisitos básicos de operação deste trabalho, entretanto notificações para situações com extremo desconforto térmico foram criadas.

6.9 ESTRATÉGIA DE CONTROLE

A estratégia de controle foi baseada na máquina de estado da Figura 6.39. Para implementá-la foi utilizado o módulo de referência.

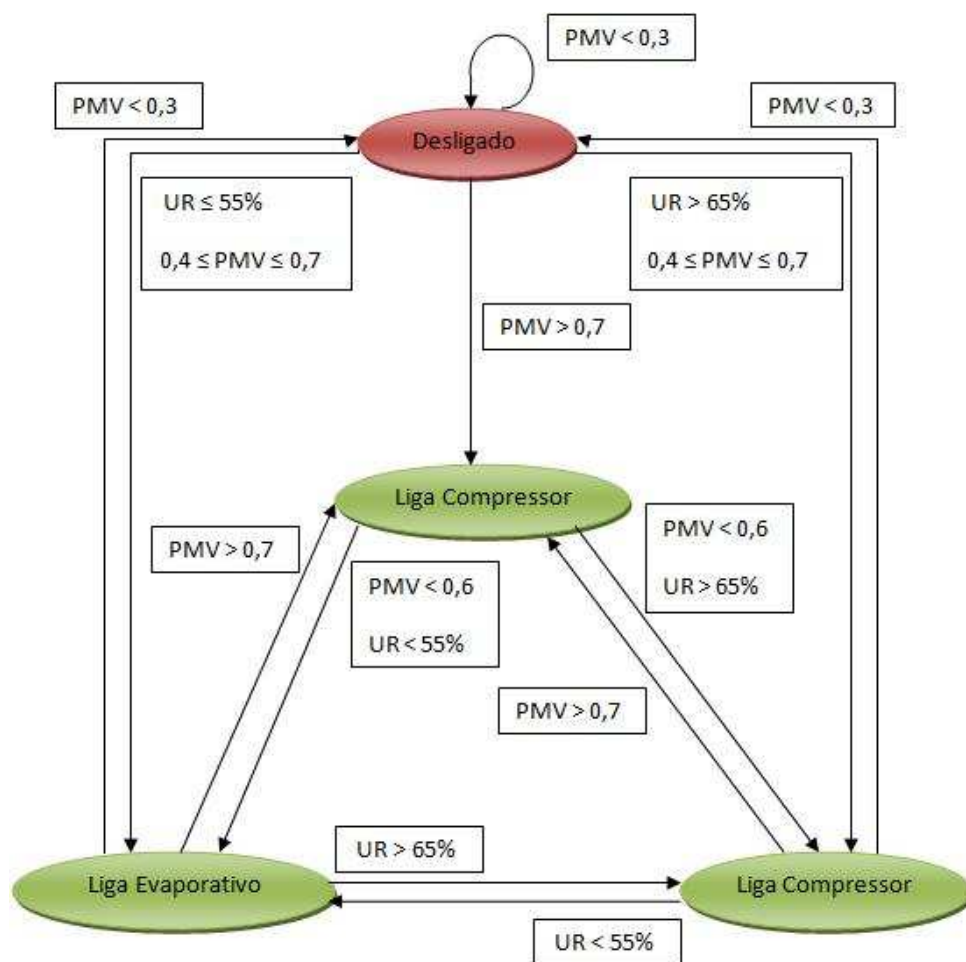


Figura 6.39. Máquina de estado do sistema de controle.

Visando garantir a sensação de conforto térmico, os parâmetros para o controle foram escolhidos de acordo com as normas citadas nos tópicos 4.3 e 4.4.

O sistema híbrido deve permanecer desligado ou, caso esteja ligado, deverá desligar automaticamente caso o PMV seja menor do que 0,3 (este valor mínimo foi fixado a partir de uma pesquisa de opinião realizada com os membros do laboratório).

Sempre que o PMV estiver acima de 0,7, o compressor será acionado, independente da umidade relativa, devido a uma necessidade de uma maior queda no valor da temperatura para que o valor do PMV retorne ao intervalo de conforto.

Caso seja requerida uma queda pequena no PMV ($0,4 \leq \text{PMV} \leq 0,7$) para atingir o conforto e caso a umidade relativa seja inferior a 55%, o sistema evaporativo é acionado até o PMV ultrapassar 0,7 ou até que a umidade relativa ultrapasse 65%, acionando, então, o compressor.

Enquanto o sistema evaporativo estiver ativo, a bomba d'água irá funcionar por 15 s e ficará inativa por 135 s, fechando um ciclo de 150 s.

CAPÍTULO 7 – RESULTADOS E ANÁLISE

7.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos para o caso de estudo proposto. Os parâmetros de conforto térmico e os históricos de comunicação obtidos durante a experimentação estão disponíveis ao leitor neste tópico. Informações adicionais necessárias para comprovação dos resultados também estão presentes. Finalmente, uma análise detalhada sobre os resultados é realizada, com intuito de verificar o cumprimento dos objetivos, aqui, propostos.

7.2 RESULTADOS DO CONFORTO TÉRMICO

De acordo com os tópicos 4.5.1 e 4.5.2, os valores escolhidos para o cálculo do PMV são 1,2 Met (atividade de escritório/laboratório) e 0,75 clo (roupa íntima, camisa, calça, meias, sapatos), respectivamente. O cálculo do PMV é estimado, uma vez que não foi utilizado sensor de temperatura média radiante. O valor desta foi igualado ao valor da temperatura medida pelo módulo de referência.

O experimento utilizando o controle proposto no tópico 6.9 foi realizado dia 26 de agosto de 2010, durante os períodos matutino e noturno. Neste dia, o tempo se encontrava seco e quente. O comportamento da umidade relativa (MÓDULO2 VI) e o comportamento da bomba d'água (MÓDULO3 BO01), no período das 10 horas até as 13 horas, podem ser observados na Figura 7.1.

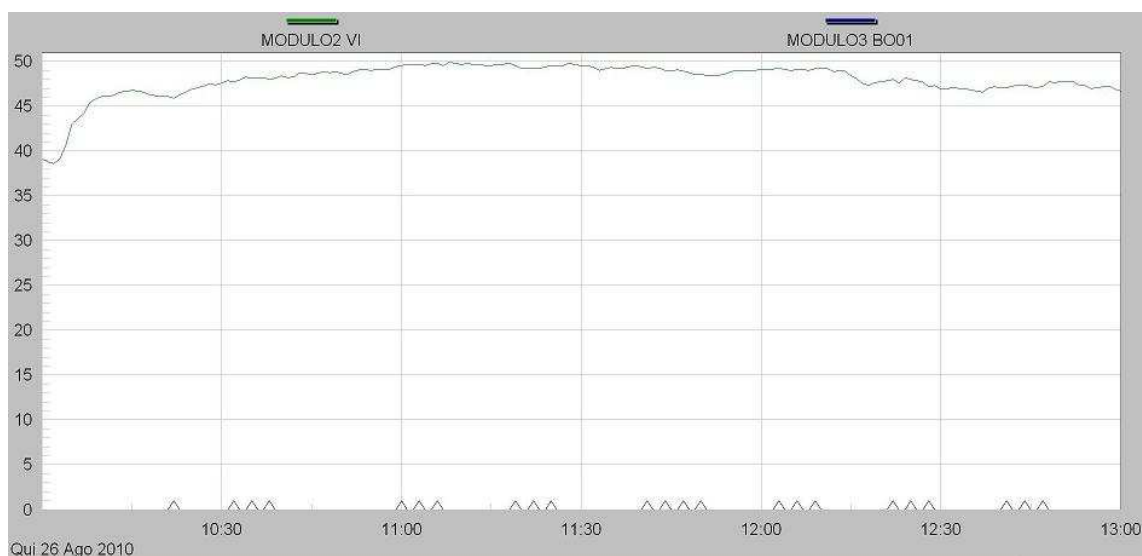


Figura 7.1. Comportamento da umidade relativa e da bomba d'água das 10 horas às 13 horas do dia 26/08/10.

A Figura 7.2 mostra o comportamento da umidade relativa e da bomba d'água no período das 19:30h às 21:30h.

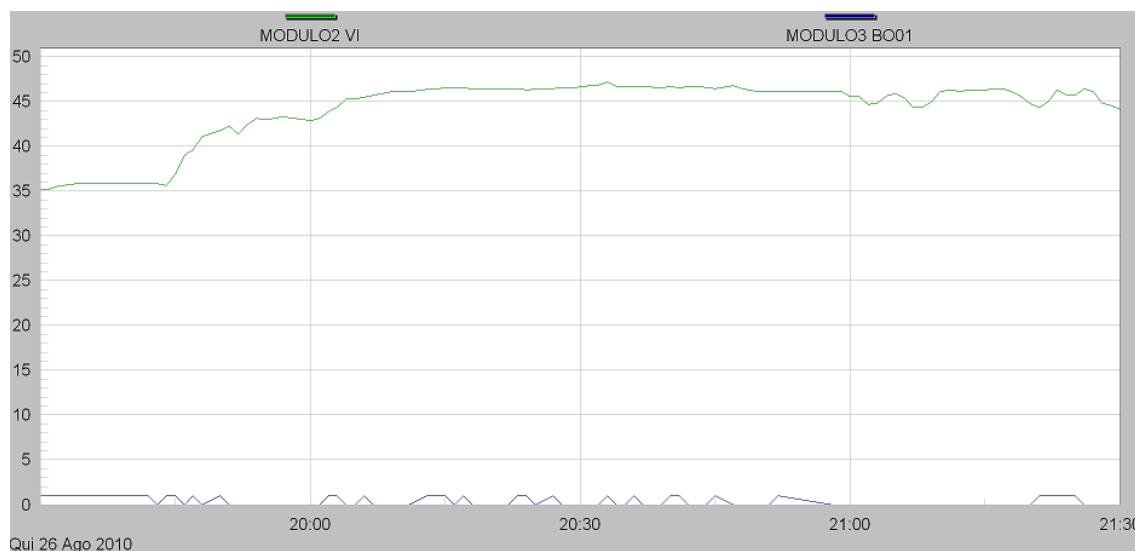


Figura 7.2. Comportamento da umidade relativa e da bomba d'água das 19:30h às 21:30h horas do dia 26/08/10.

Para a bomba d'água era esperado um gráfico com a forma de onda quadrada, porém isso não pode ser observado devido ao período de amostragem ser igual a 1 (um) minuto. Esta limitação é imposta pelo supervisório *Actiow View* ao gerar um gráfico a partir de seus *logs*. Este mesmo erro não ocorre para visualização dos estados ou valores das variáveis em tempo real.

Analisando a Figura 7.1 e a Figura 7.2 é possível notar que a umidade relativa ficou abaixo de 50% durante todo o intervalo, ou seja, o sistema evaporativo ficou ativo no tempo integral da realização do experimento, permitindo a ativação do compressor apenas quando o PMV fosse maior do que 0,7. Devido a isto, e com o objetivo de analisar melhor o funcionamento de cada sistema, algumas modificações foram feitas na estratégia de controle. As alterações podem ser vistas na Figura 7.3 da nova máquina de estado implementada. Toda lógica de atuação do sistema foi baseada nos cálculos do PMV e nas medições da umidade relativa pelo módulo de referência.

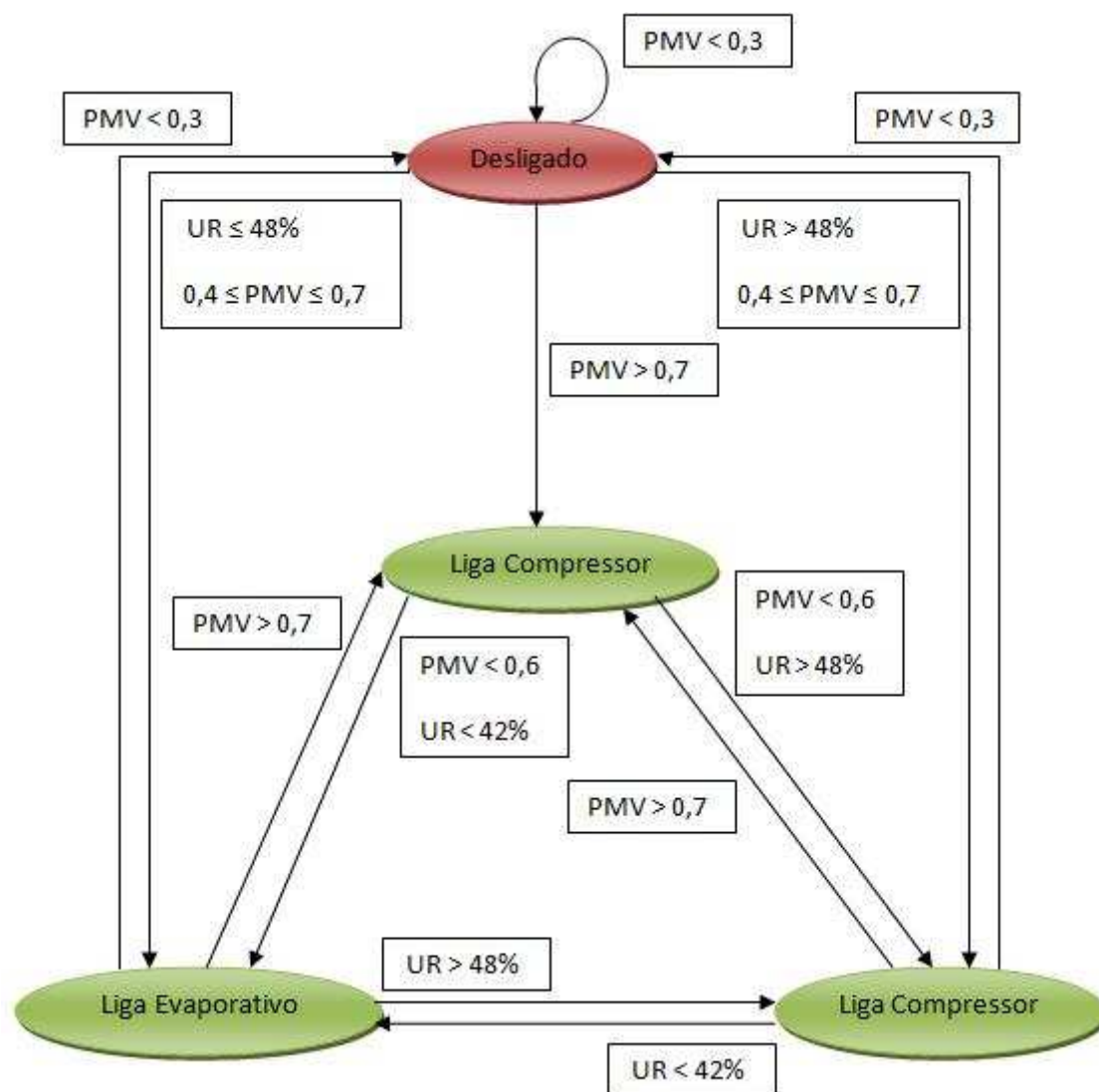


Figura 7.3. Nova máquina de estado do sistema de controle.

O experimento utilizando os novos parâmetros para a umidade relativa foi realizado dia 31 de agosto de 2010 das 8:00h às 20h. Neste dia o tempo se encontrava quente e seco. Durante o período do experimento, ocorreram dois fechamentos de comunicação entre o módulo de referência e o coordenador, devido a um mau contato na alimentação do módulo de referência, que acabaram por interromper a atualização dos dados no supervisório. Os dados coletados são mostrados Figura 7.4 até a Figura 7.11.

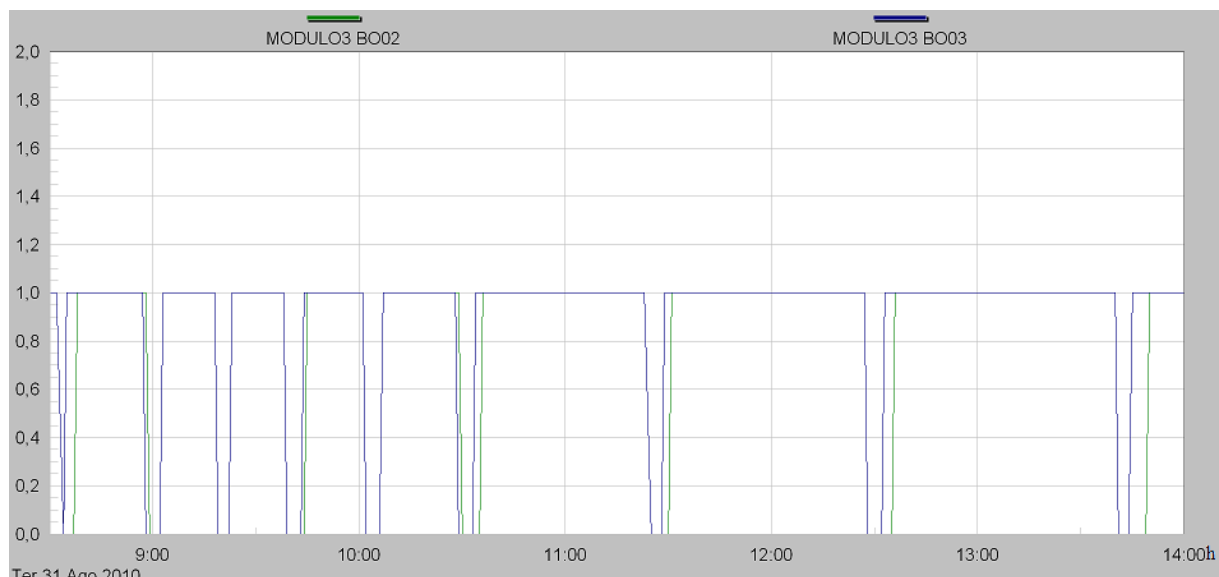


Figura 7.4. Gráfico referente à atuação do ventilador (BO03) e do compressor (BO02) durante o dia.

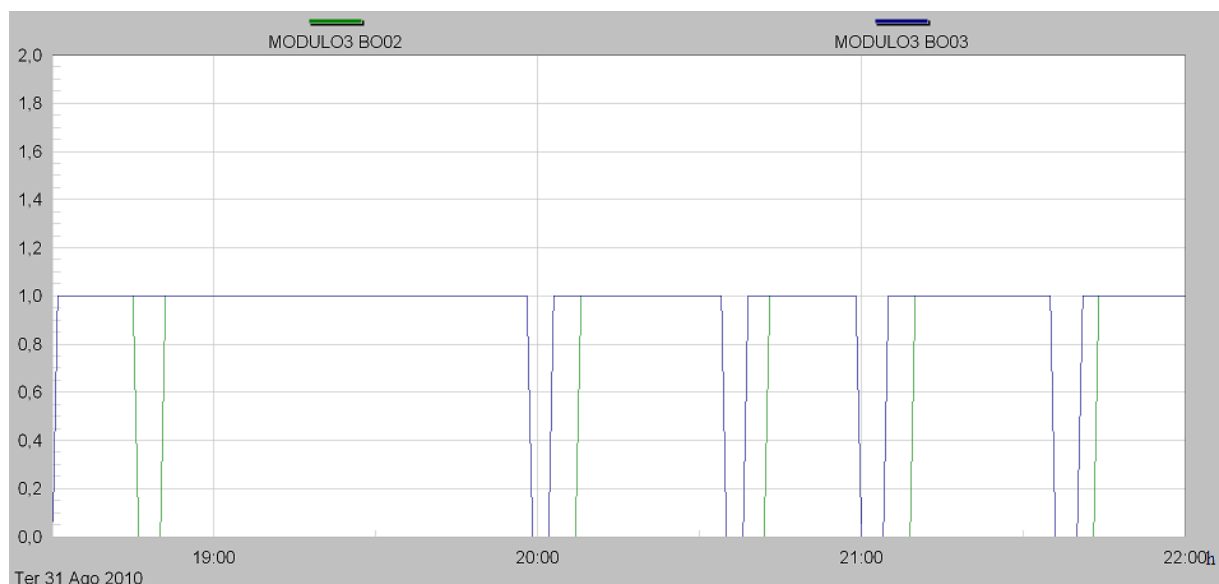


Figura 7.5. Gráfico referente à atuação do ventilador (BO03) e do compressor (BO02) durante a noite.

Observando-se a Figura 7.4 e a Figura 7.5, nota-se que o compressor permaneceu ligado quase todo o tempo, o que não era desejado, pois era esperado que o sistema evaporativo conseguisse reduzir a temperatura e aumentar a umidade relativa de forma a manter o PMV dentro dos valores esperados para o conforto, reduzindo assim, a utilização do compressor. Uma razão para isto ter acontecido é a vazão máxima do sistema evaporativo instalado ($1.090 \text{ m}^3/\text{h}$) ser muito inferior à vazão necessária ($7.659,70 \text{ m}^3/\text{h}$). Outro motivo é a condição de tempo de Brasília não ser favorável para o sistema evaporativo nesta época do ano. Apesar de a umidade relativa estar muito baixa, a temperatura não é alta o suficiente para permitir que o sistema evaporativo proporcione uma grande queda na temperatura.

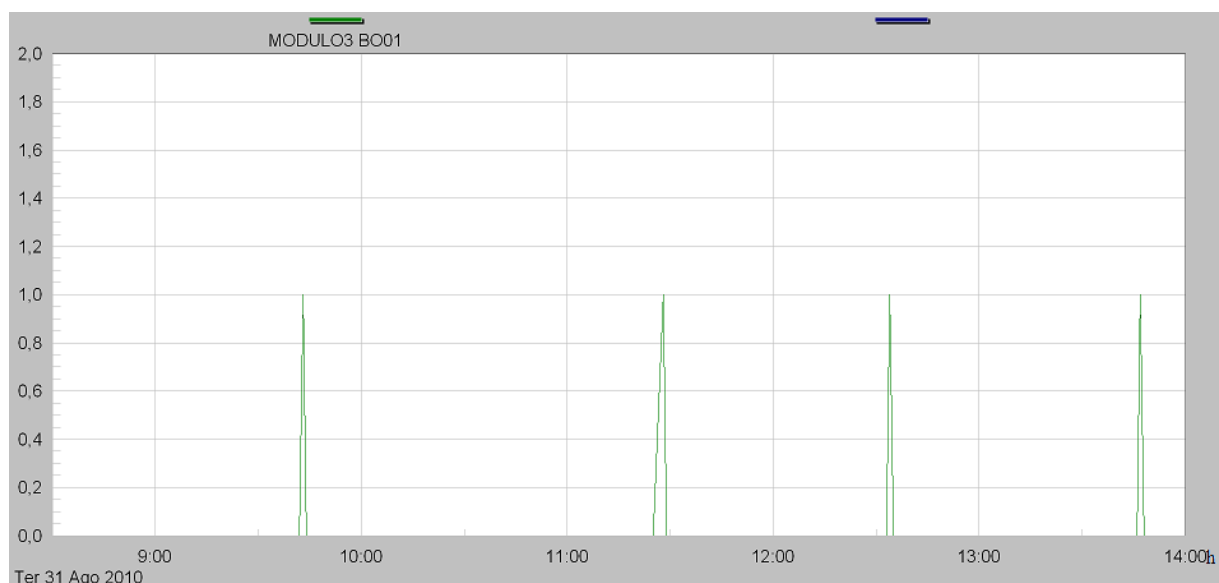


Figura 7.6. Gráfico referente à atuação da bomba d'água durante o dia.

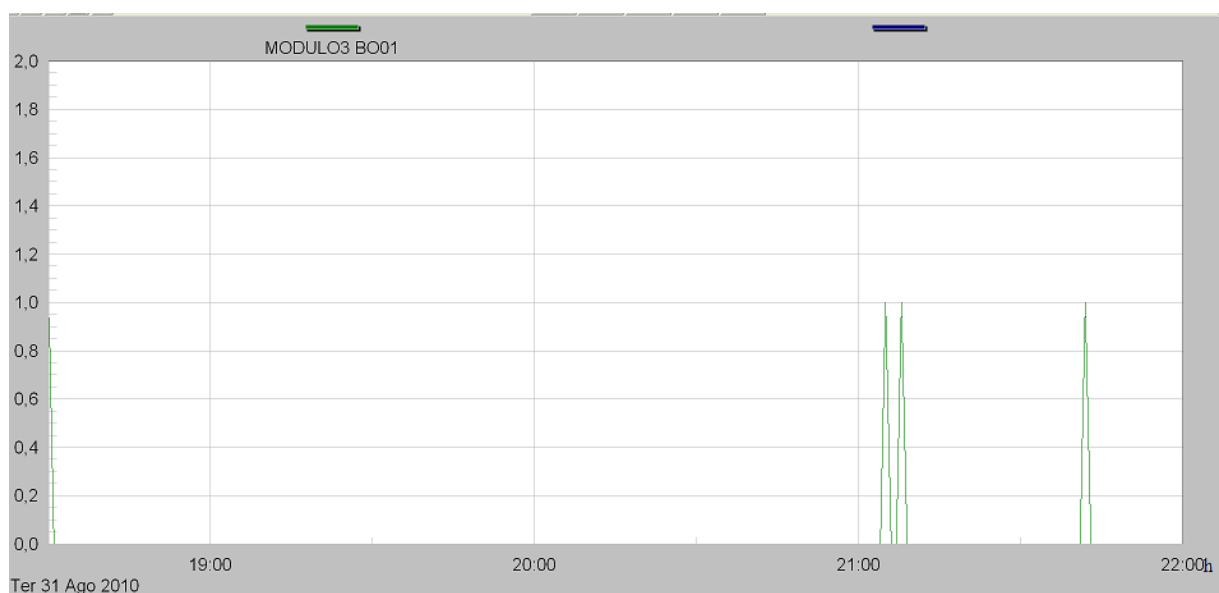


Figura 7.7. Gráfico referente à atuação da bomba d'água durante a noite.

A bomba d'água foi ativada poucas vezes. Isto ocorreu devido à redução do valor de referência. Outro motivo importante para a redução deste valor que não havia sido citado anteriormente é erro de construção da caixa inox que comporta o painel evaporativo. A caixa não se apresenta corretamente encaixada no duto externo, o que provoca vazamento de água quando o fluxo desta é elevado. Este defeito na montagem também impossibilitou que mais testes fossem realizados.

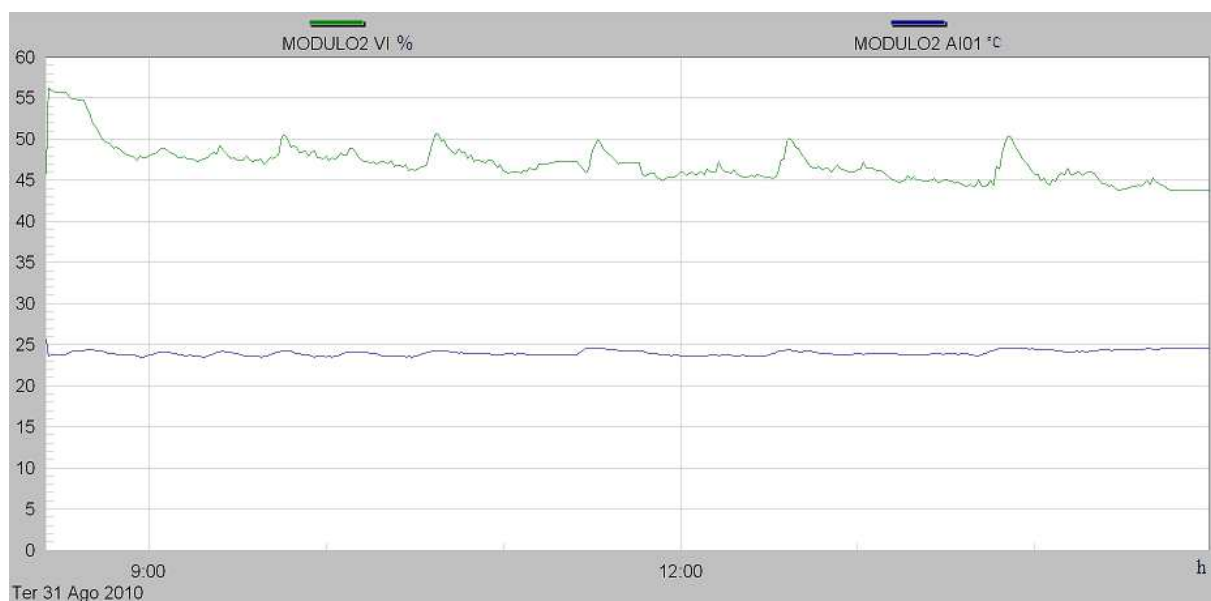


Figura 7.8. Gráfico referente às temperaturas e umidades relativas mensuradas durante o dia.

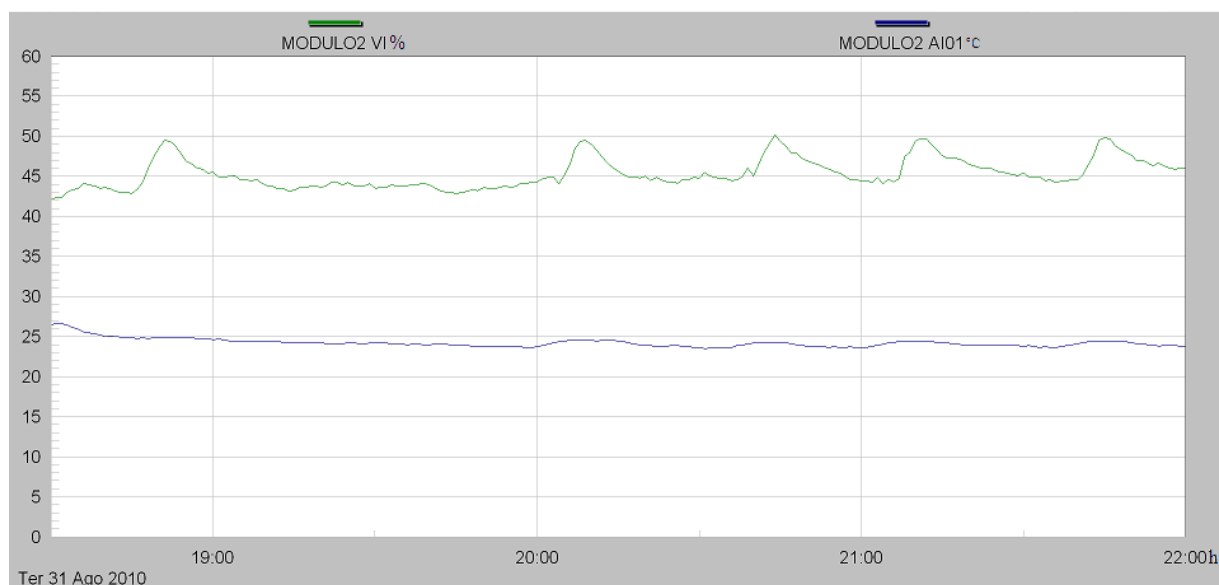


Figura 7.9. Gráfico referente às temperaturas e umidades relativas mensuradas durante a noite.

Analisando-se a Figura 7.8 e a Figura 7.9, é possível notar que o valor da temperatura variou pouco durante o período de teste, caracterizando assim uma temperatura de aproximadamente 24°C para garantir o conforto térmico, como pode ser melhor visualizado na Figura 7.10 e na Figura 7.11, que representam os valores do índice PMV calculado. O mesmo não ocorre com a umidade relativa que se mantém em aproximadamente 47% no período da manhã e, 44% no período noturno.

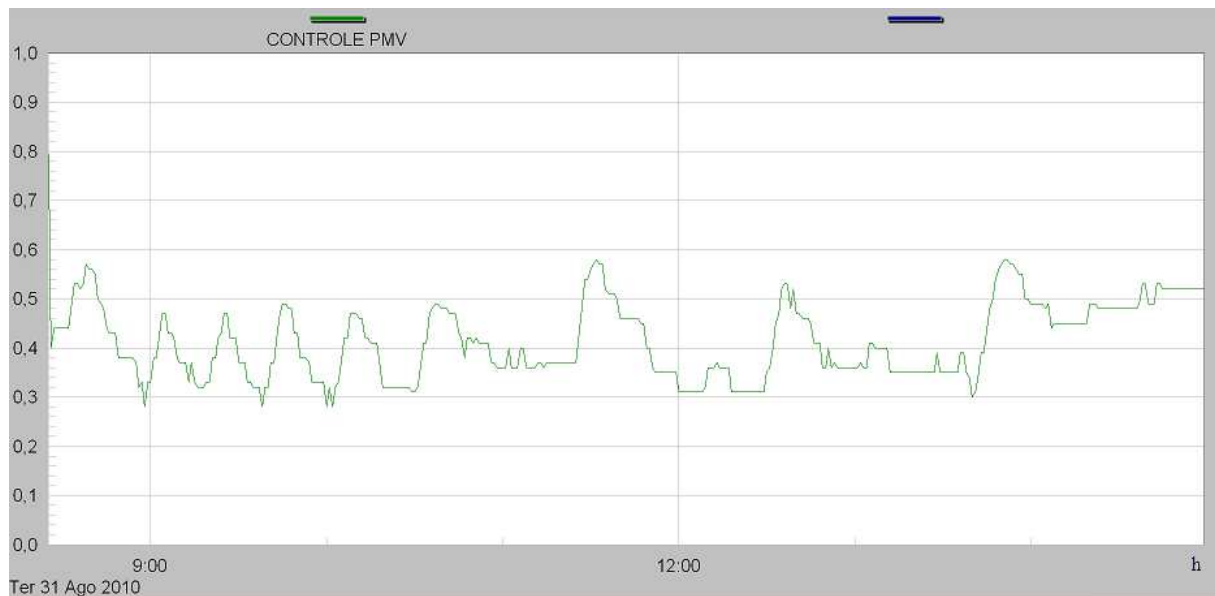


Figura 7.10. Gráfico referente ao PMV calculado durante o dia.

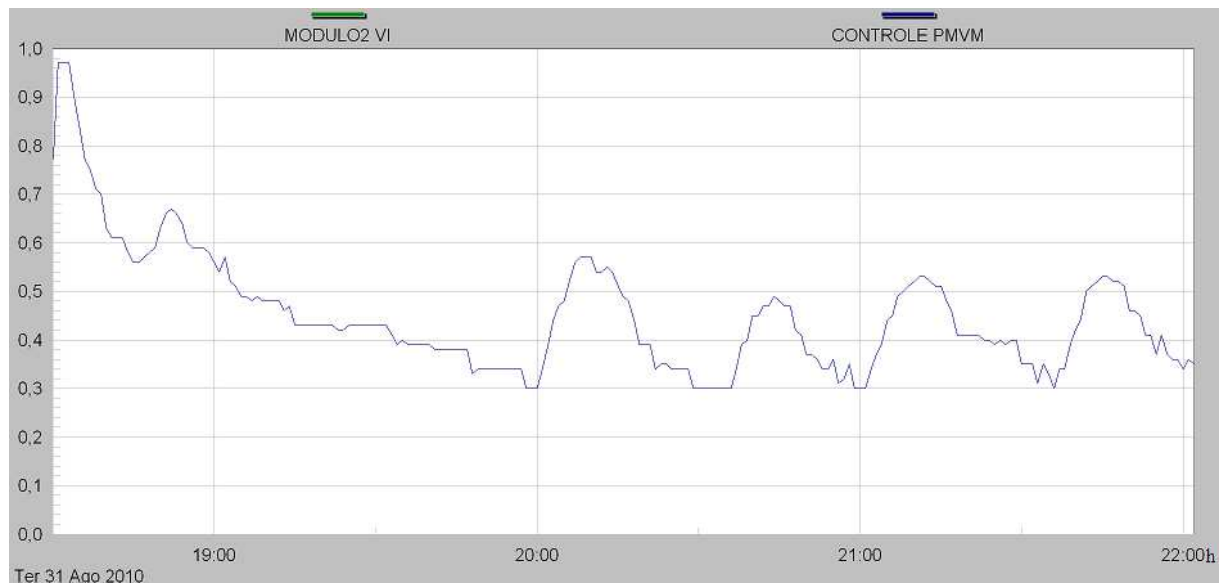


Figura 7.11. Gráfico referente ao PMV calculado durante a noite.

Finalmente, observando-se a Figura 7.10 e a Figura 7.11, conclui-se que o funcionamento do controle do sistema ocorreu como programado, mantendo o PVM na maior parte do tempo entre seu intervalo de conforto escolhido ($0,3 \leq \text{PMV} \leq 0,5$). Os momentos em que o PVM saiu desse intervalo ocorreram devido à umidade ser inferior a 48% e o sistema evaporativo isolado não conseguir manter a temperatura dentro da zona de conforto. Assim, o PMV retorna ao intervalo de conforto apenas quando o compressor é acionado. Percebe-se também que os sensores apresentam um funcionamento adequado.

7.3 RESULTADOS DA COMUNICAÇÃO

Como apresentados nos tópicos anteriores, a comunicação realizada neste trabalho pode ser dividida em duas etapas: wireless, ZigBee sobre BACnet e EIA-232, BACnet MS/TP. Devido a indisponibilidade de interface visual dos dispositivos utilizados neste trabalho, todos os registros de análise obtidos foram realizados pelo *hyperterminal*, software de comunicação serial disponível no sistema operacional Windows ou pelo ActionView, SCADA, aqui escolhido, como solução de supervisionamento. Entretanto esses registros são de difícil análise por se tratarem de informações binárias, linguagem de máquina de difícil compreensão. Uma solução, então, apresentada pelos os autores é a utilização de funções de depuração que durante a aplicação podem ser desabilitadas, não prejudicando o correto funcionamento do sistema. A impressão da tabela de dispositivos presentes na rede em caracteres legíveis ASCII ilustra um das diversas funções de depuração configuráveis em tempo de compilação.

A comunicação BACnet sobre ZigBee tem como um dos seus maiores fundamentos a sincronização de sua tabela de endereços. A Figura 7.12, demonstra a tabela obtida durante a experimentação realizada neste trabalho. Dela é possível inferir todas as informações que serão posteriormente necessárias para comunicação com os dispositivos.

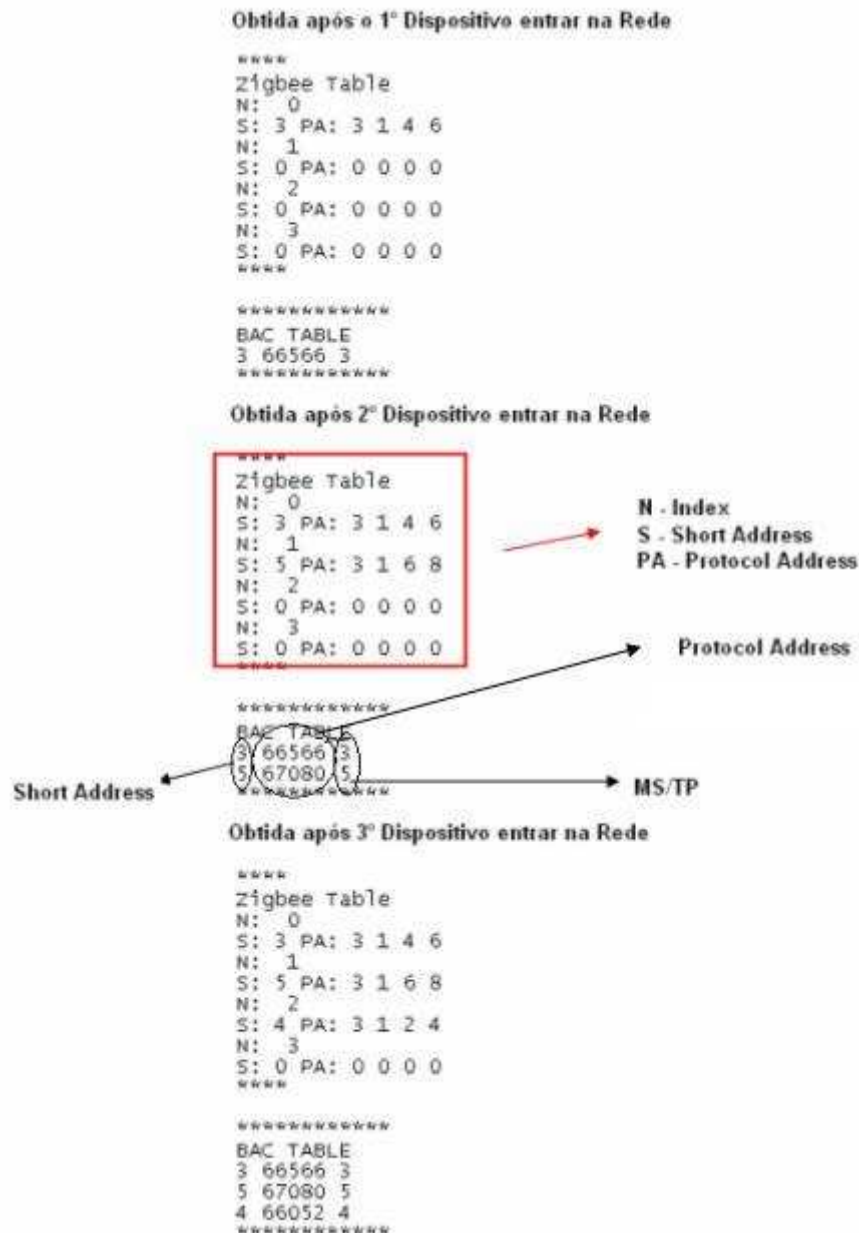


Figura 7.12. Tabela VMACTable.

Apenas como intuito ilustrativo os bytes recebidos pelo dispositivo final na aplicação são detalhados na Figura 7.13. Esses dados ilustram uma típica comunicação dos dispositivos e permite verificar o correto funcionamento do sistema conforme manual normativo dos protocolos, [18][21].

Mensagem Recebida pelo End-Device

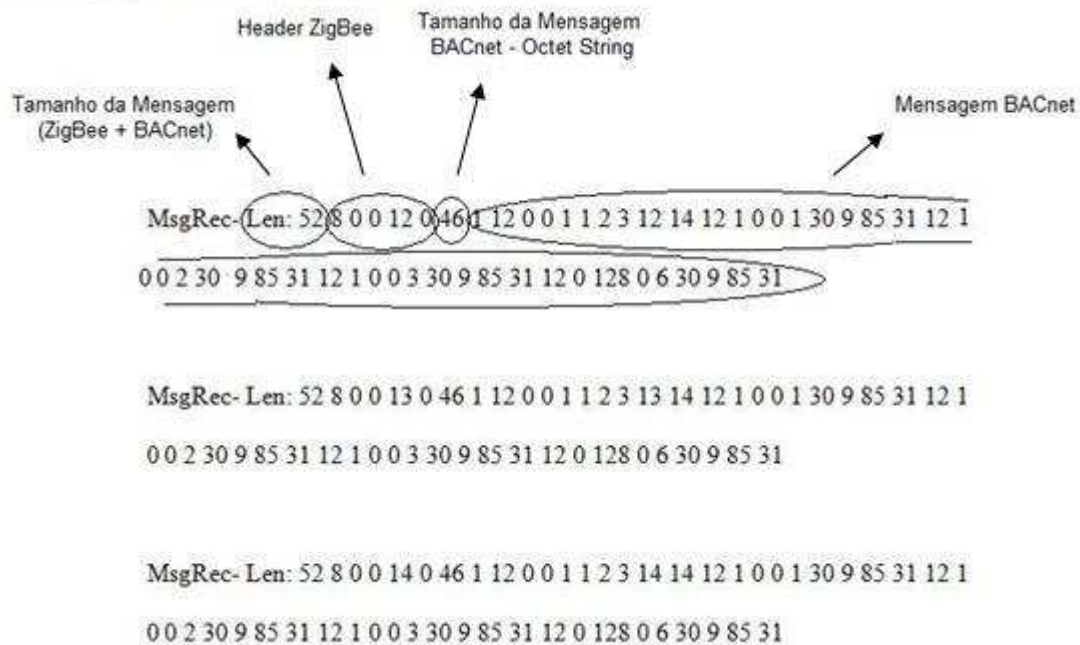


Figura 7.13. Logs da comunicação ZigBee sobre BACnet no end-device.

A comunicação BACnet MS/TP, por sua vez, é fundamentada no conceito de apenas um mestre se comunicar por turno. Por isso, durante sua comunicação, é possível verificar o constante envio de *tokens* entre coordenador e o supervisor, habilitando os dispositivos a se comunicarem caso tenham informações. A Figura 7.14, ilustra uma comunicação típica entre os dispositivos.

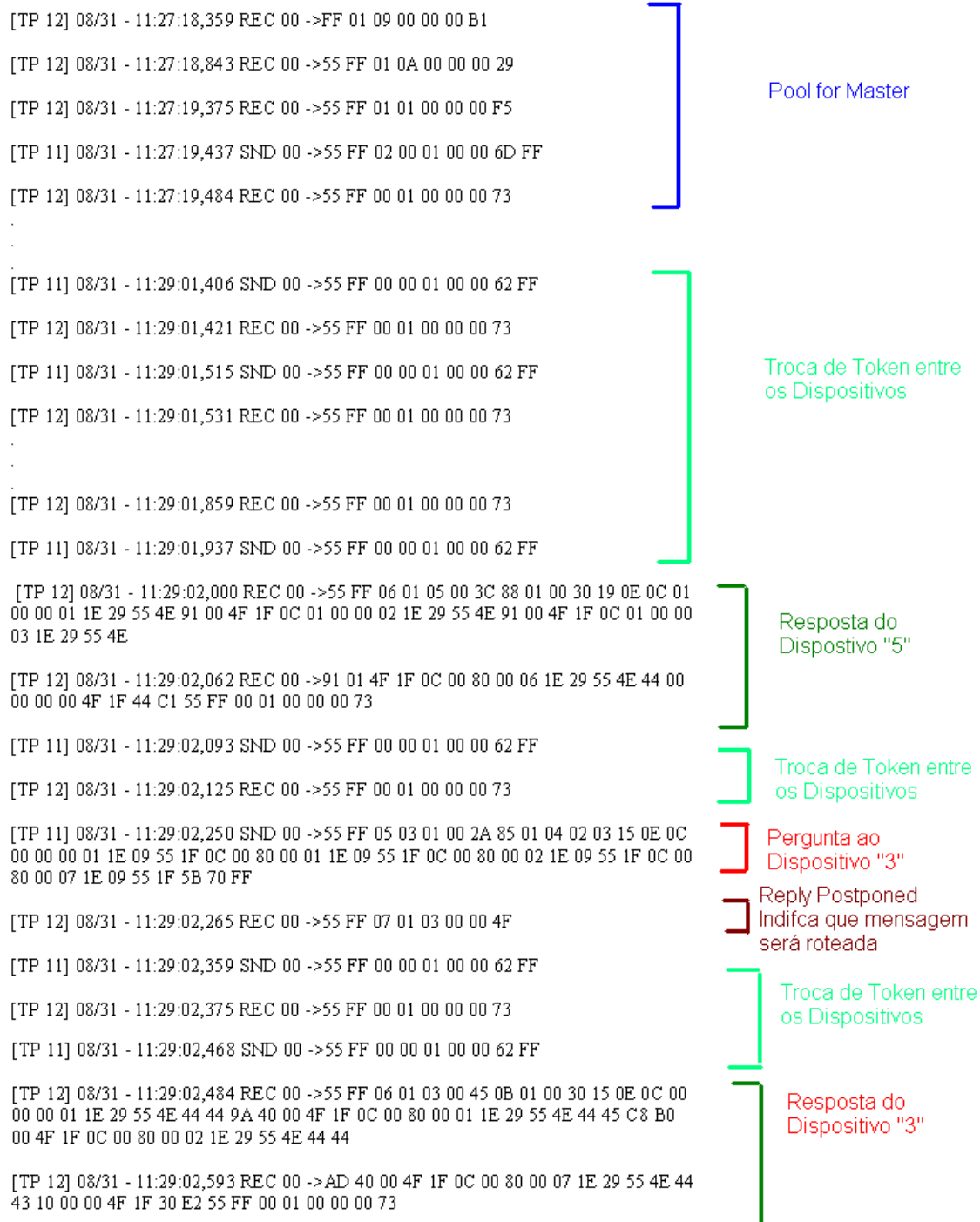


Figura 7.14. Logs de comunicação retirado do SPPCOM.

Observam-se claramente nesta figura diversas perguntas do supervisor aos módulos de sensores empregados nesse trabalho. Entretanto, como apresentado na arquitetura aplicada ao ambiente de estudo, esses dispositivos não estão conectados diretamente à rede EIA-232, sendo necessário o roteamento do coordenador. Por esse motivo, também é possível observar na Figura 7.14, que as respostas dos dispositivos estão sendo enviadas pelo coordenador ao supervisor. Esse comportamento caracteriza o roteamento híbrido proposto nos tópicos anteriores. Caso o leitor faça uma análise entre os resultados da comunicação entre as duas redes será possível observar que as mensagens transitam entre

as duas redes trocando apenas seus *headers*. Esse comportamento era esperado conforme Figura 6.33.

A análise da comunicação não estaria completa sem a verificação do tempo médio de respostas dos dispositivos, tempo entre emissão da pergunta e recebimento da respostas, e do número de pacotes perdidos. Uma amostragem aleatória de um minuto de comunicação, Figura 7.15, foi feita para constatação desses dados.

MSTP3		MSTP4		MSTP5	
Pergunta	Resposta	Pergunta	Resposta	Pergunta	Resposta
08:30:17,296	08:30:19,515	08:30:17,046	08:30:18,281	08:30:17,562	08:30:21,671
08:30:22,328	08:30:22,609	08:30:28,109	08:30:28,281	08:30:20,656	
08:30:27,359	08:30:27,750	08:30:39,109	8:30:39,390	08:30:20,890	
08:30:32,375	08:30:33,203	8:30:50,187	08:30:50,578	08:30:25,765	08:30:26,578
08:30:37,406	08:30:38,343	08:31:01,296	08:31:01,687	08:30:30,781	08:30:31,812
08:30:42,453	08:30:42,625	08:31:12,343	08:31:12,937	8:30:35,812	08:30:36,953
08:30:47,484	08:30:47,765			08:30:40,828	08:30:42,218
08:30:52,531	08:30:54,234			8:30:41,500	
08:30:57,578	08:30:58,421			08:30:45,875	08:30:47,343
08:31:02,625	08:31:03,562			08:30:47,937	
08:31:07,671	08:31:07,953			08:30:50,921	08:30:51,531
08:31:12,765	08:31:13,093			8:30:52,984	
				08:30:55,984	08:30:56,796
				08:30:58,250	
				08:31:01,031	08:31:01,968
				08:31:06,062	08:31:07,203
				08:31:11,109	08:31:12,531
				08:31:16,140	08:31:17,718
Media	00:00:00,800	Media	00:00:00,500	Media	00:00:01,3
Pacotes Perdidos	0,00%	Pacotes Perdidos	0,00%	Pacotes Perdidos	33,30%

Figura 7.15. Tempo de resposta média, em segundos, e perda de pacotes.

Observe-se, da Figura 7.15, que o dispositivo cinco foi o único que apresentou perda de pacotes. Os autores avaliam que a localização do dispositivo pode ser a principal causa desse comportamento. Conforme apresentado em Figura 6.5, o modulo atuador se encontrava sobre o modelo coordenador. Já os tempos de respostas se mostraram satisfatórios devido à grande constante de tempo da maioria dos sistemas de refrigeração.

CAPÍTULO 8 – CONCLUSÃO

Os resultados apresentados neste trabalho permitem aos seus autores concluir os objetivos inicialmente propostos. O controle do sistema híbrido e sua capacidade de refrigeração foram devidamente validados, demonstrando o enorme potencial existente para o projeto.

Os sistemas de refrigeração híbridos, combinação entre modelo convencional e evaporativo, são comprovadamente mais eficientes, como demonstrados em testes e dissertações da Universidade de Brasília. Entretanto os resultados desses documentos apontavam para um super dimensionamento do equipamento utilizado para análise, como os próprios autores relataram. Outro relato importante foi a sugestão de utilização de um *damper* proporcional no sistema, possibilitando testes ainda não feitos. Neste trabalho foi, então, realizado um retrofiting do equipamento de refrigeração híbrido seguindo orientação dos trabalhos anteriores.

O novo equipamento projetado precisaria comprovar sua capacidade de refrigeração e adequação o ambiente de estudo. Os resultados demonstram essa capacidade. Os índices de conforto térmico conseguiam ser obtidos independentes dos parâmetros climáticos externos. O único revés encontrado foi a dificuldade em elevar excessivamente a umidade relativa do ambiente de estudo. Os autores creditam essa dificuldade à substituição de alguns dos equipamentos recomendados por outros já disponíveis no ambiente. Apesar disso, nenhuma das conclusões, aqui, realizadas está prejudicada.

Além da excelente capacidade de refrigeração do sistema, o controle sobre a umidade relativa demonstrou-se extremamente interessante. Nos meses finais de desenvolvimento deste trabalho, julho a setembro de 2010, grande parte do território brasileiro apresentou baixíssimos índices de umidade relativa, sendo considerados em diversos momentos níveis críticos pela ONU. Neste âmbito, o sistema apresentou-se capaz de melhorar as condições climáticas oferecidas ao ambiente de estudo, elevando a umidade relativa do sistema de 20% para 50%. Os autores acreditam que essa característica de resfriamento associada à elevação da umidade relativa apresenta excelente potencial em regiões de baixa umidade relativa.

As conclusões sobre este trabalho não estariam completas sem a análise do modelo de comunicação utilizado. A escolha do BACnet sobre ZigBee demonstrou-se extremamente satisfatória para o sistema de refrigeração proposto. A escalabilidade, a ampla capacidade de integração a outras soluções existentes no mercado e a robustez demonstrada nos resultados deste trabalho comprovam os bons resultados obtidos com esse protocolo. Entretanto os autores ressaltam que a utilização do BACnet sobre ZigBee pode ser insatisfatória para sistemas com constante de tempo muito baixa. Isso pode ocorrer

devido às características de economia de energia do ZigBee que implicam em *timeouts* de mensagens excessivamente altos. Caso o leitor desenvolva alguma aplicação com baixa constante de tempo, os autores sugerem uma redução brusca nos tempos de sleeps dos dispositivos ZigBee implicando em *timeouts* menores. Já a comunicação EIA-232, BACnet MS/TP, também se mostrou interesse pelo baixo custo de implementação, mas poderia ser substituída sem prejuízo pelo BACnet IP. A grande vantagem dessa substituição seria a versatilidade implicada pela utilização da rede *Ethernet* normalmente existente na maioria dos ambientes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CAMARGO, J.R. *Resfriamento Evaporativo: poupando a energia e o meio ambiente*. Rev. ciênc. exatas, Taubaté, v. 9/10, n. 1-2, pp. 70, 2003/2004.
- [2] ANSI/ASHRAE Standard 55 (2004). "Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy".
- [3] LOPES, P. R. et al. *Princípios Básicos de Psicrometria*. Minas Gerais: Universidade Federal de Viçosa. pp. 39-62.
- [4] PIMENTA, João. *Ar Condicionado: Psicrometria*. Agosto a Dezembro de 2009. 123 slides. Notas de Aula. Apresentação MS PowerPoint.
- [5] POTTER, C. M.; SCOTT, P. E. *Ciências Térmicas: Termodinâmica, Mecânica dos Fluidos e Transmissão de Calor*. 1a Edição. São Paulo: Thomson Learning, 2007. pp. 772.
- [6] MILLER, R.; MILLER, R. M. *Refrigeração e Ar Condicionado*. 1a Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2008. pp. 524.
- [7] IOSHIMOTO, E.; PRADO, T. A. R. *Conforto e Psicrometria*. São Paulo: USP, 2004. 19 slides. Notas de Aula. Apresentação MS PowerPoint.
- [8] REVISTA DO FRIO E AR CONDICIONADO. *Resfriamento Evaporativo de Ar*. Disponível em: <<http://www.revistadofrio.com.br>>. Acessado em: 10 set. 2009.
- [9] MUNTERTS CORPORATION. *Boletim de Engenharia*. Curitiba, v.1, nº.3-5 p.1-1.
- [10] LAMBERTS, R. *Desempenho Térmico de Edificações*. 3a Edição. Santa Catarina: UFSC, 2005. pp. 90.
- [11] LAMBERTS, R.; Xavier, A. A. de P. *Conforto térmico e stress térmico*. Florianópolis, 2002. pp. 111.
- [12] ABNT, NORMA NBR 16401 INSTALAÇÕES DE AR CONDICIONADO. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2008.
- [13] CURSO DE REFRIGERAÇÃO E AR CONDICIONADO. Parte 1. Rio Grande do Sul: Edubras, 2008. pp. 32.
- [14] CATERMO INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA. *Climatizadores Evaporativos: Como Funciona*. São Paulo: Catermo, 2007.
- [15] Javvin Technologies. *Network Protocols Handbook*. Edição 2. Pittsburgh: Jieliin Dong, 2005. pp. 380.
- [16] Protocolos de comunicação. In Infopédia. Porto: Porto Editora, 2003-2010. [Consult. 2010-06-27].
- [17] SWAN, W., Julho 1996. "The Language of BACnet" Engineered Systems. Vol. 13, No. 7, pp. 24-32.
- [18] American National Standards Institute/American Society of Heating, Refrigerating, Air-Conditioning Engineers. Standard 135-2008, BACNet® -- A Data Communication Protocol for Building Automation and Control Network. Atlanta: ASHRAE, 2008. pp. 545.
- [19] BUSHBY, S.T., Março 2002. "New Tools for Specifying BACnet" ASHRAE Journal. Vol. 44, No. 3, pp. 33-37.
- [20] CHIN, L K. Redes Privadas Virtual – VPN. Boletim Bimestral sobre Tecnologias e Redes da RNP – Rede Nacional de Pesquisa e Ensino, v.2, n.8, pp. 5, 1998.
- [21] ZigBee Alliance. *ZigBee Cluster Library Specification*. San Ramon: ZigBee Alliance, 2008. pp. 420.
- [22] MARTOCCI, J.P., June 2008. "BACnet Unplugged - ZigBee and BACnet Connect" ASHRAE Journal. Vol 50, No. 6, pp. 42-46.

- [23] American National Standards Institute/American Society of Heating, Refrigerating, Air-Conditioning Engineers. Addendum q to Standard 135-2008, BACNet® -- A Data Communication Protocol for Building Automation and Control Network. Atlanta: ASHRAE, 2009. pp. 14.
- [24] Internacional Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control System, 1999, Itália. What is SCADA? Itália, 1999.
- [25] Atmel. BitCloud User Guide. San Jose: ATMEL, 2010.
- [26] PORTAL DA REFRIGERAÇÃO. *Planilha de Carga Térmica*. Disponível em: <<http://www.refrigeração.com.br>>. Acessado em: 16 nov. 2009.
- [27] MUNTERS BRASIL. *Clima Controlado*. Curitiba: Munters Brasil. pp. 16.
- [28] COMPARCO INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE COMPONENTES DE AR CONDICIONADO LTDA. *Seleção Técnica: Dampers de Precisão*. São Paulo: Comparco, 2008. pp. 2.
- [29] SALOIO, B., e ÁVILA, A. (2009). *Instrumentação e controle de um sistema de ar condicionado híbrido*. Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, pp. 107.
- [30] SENSIRION. *Datasheet SHT7X (SHT71, SHT75): Humidity and Temperature Sensor*. Estados Unidos, v. 4.3, pp. 11, mai. 2010.
- [31] DWYER INSTRUMENTS, INC. *Series 641 Air Velocity Transmitter: Specifications – Installation and Operating Instructions*. Estados Unidos, pp. 4, nov. 2004.
- [32] OMRON ELECTRONIC COMPONENTS LLC. *PCB Relay: G5LA*. Estados Unidos, pp. 8, jun. 2009.
- [33] OLMOS, L. J. *Sistema híbrido de climatização visando conforto térmico e eficiência energética*, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, 2009. pp. 81.
- [34] CURSO DE REFRIGERAÇÃO E AR CONDICIONADO. Parte 5. Rio Grande do Sul: Edubras, 2008. pp. 32.
- [35] ASHRAE GUIDE 1976 – Systems. Capítulo 35.

ANEXOS

A – SISTEMA CONVENCIONAL DE REFRIGERAÇÃO

A.1 COMPRESSOR

O compressor é considerado o “coração” do sistema de refrigeração por compressão e seu objetivo é recuperar o fluido para que este possa circular novamente no sistema, reiniciando o ciclo.

O processo que ocorre no compressor é adiabático reversível, portanto isentrópico. A descrição do ciclo será iniciada por esta unidade, como mostra a Figura A.1.

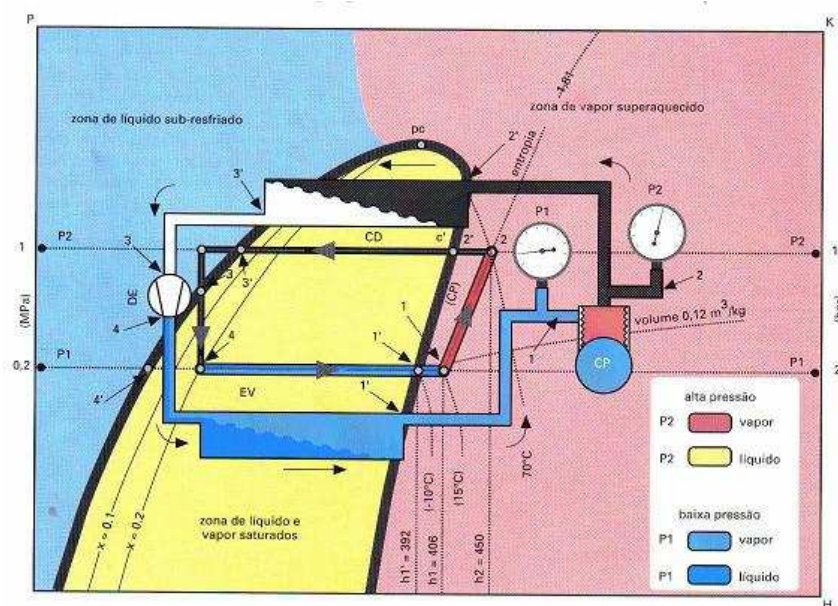


Figura A.1. Compressão do fluido refrigerante, *apud* [33].

Ao se ligar um aparelho de refrigeração, o fluido refrigerante é aspirado à pressão do evaporador pelo compressor, o que causa a redução da sua pressão e temperatura (4-1').

Durante o percurso pela linha de sucção (1-1'), o fluido refrigerante na fase gasosa absorve calor do ambiente externo e superaquece. Neste trajeto a pressão se mantém constante, a temperatura aumenta de 1' para 1 e a entalpia aumenta de $h_{1'}$ para h_1 .

O compressor então comprime o refrigerante gasoso (1-2), aumentando a sua pressão até atingir a pressão de condensação e, conseqüentemente, a entalpia aumenta de h_1 para h_2 . O fluido ao sair do compressor está superaquecido a uma temperatura superior à temperatura de condensação.

A.2 CONDENSADOR

O objetivo de um sistema de refrigeração é evaporar o fluido refrigerante para retirar calor do ambiente que se deseja refrigerar, por este motivo, o refrigerante deve ser condensado

antes de ser enviado ao evaporador [34]. Assim, a tarefa do condensador é liquefazer o fluido refrigerante que é descarregado do compressor no estado de vapor.

O processo que ocorre no condensador é um processo de rejeição de calor do refrigerante para alguma fonte de resfriamento, à pressão constante. Para dissipar o calor de forma mais efetiva, o contato entre o refrigerante e esta fonte deve ser relativamente grande, para isso, o condensador possui uma serpentina onde são fixadas algumas aletas feitas do mesmo material dessa, que pode ser cobre ou alumínio, [34].

O processo que ocorre no condensador pode ser visto na Figura A.2.

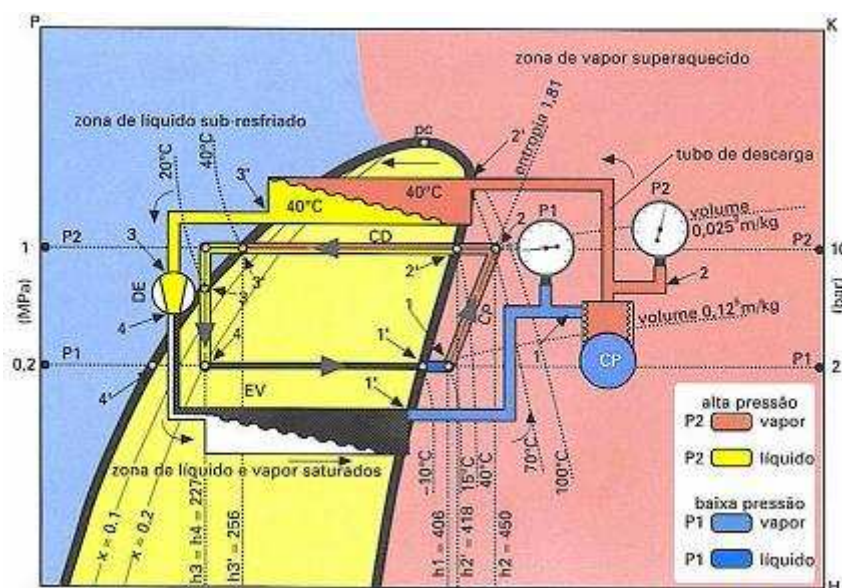


Figura A.2. Condensação do fluido refrigerante, *apud* [33].

O fluido refrigerante, ao sair do compressor, passa pelo tubo de descarga (2-2'), a alta pressão e a alta temperatura, e entra no condensador, ainda na fase gasosa. O primeiro passo então é reduzir esta temperatura até a temperatura de condensação por meio da troca de calor sensível com o ar do ambiente externo, que se encontra menos quente. A entalpia então reduz do ponto h_2 para h_2' .

No condensador, a mudança de estado do refrigerante é iniciada. Durante este processo, o refrigerante libera calor latente para o ambiente externo, à temperatura e à pressão constantes, e começa a se condensar (2'-3'), se tornando 100% líquido saturado no ponto 3'. Por este processo envolver transferência de calor, a entalpia diminui de h_2' para h_3' .

A fase final é a de sub-resfriamento que ocorre no trecho 3'-3. Nesta etapa, o líquido saturado é resfriado em mais alguns graus com o auxílio de um trocador de calor intermediário, ocorrendo transferência de calor e a redução da entalpia do ponto h_3' para h_3 . Esta fase tem dois objetivos: garantir que chegue apenas líquido na entrada do dispositivo de expansão e aumentar a capacidade do fluido absorver calor no evaporador.

A.3 DISPOSITIVO DE EXPANSÃO

O dispositivo de expansão vem depois do condensador e é uma parte muito importante do equipamento de refrigeração por controlar a passagem do fluxo do refrigerante na entrada do evaporador e, conseqüentemente, controlar a quantidade de vapor que o compressor deve succionar, [34]. Além disso, também tem a função de reduzir a pressão e a temperatura do refrigerante na entrada do evaporador. A Figura A.3 ilustra o que ocorre neste dispositivo.

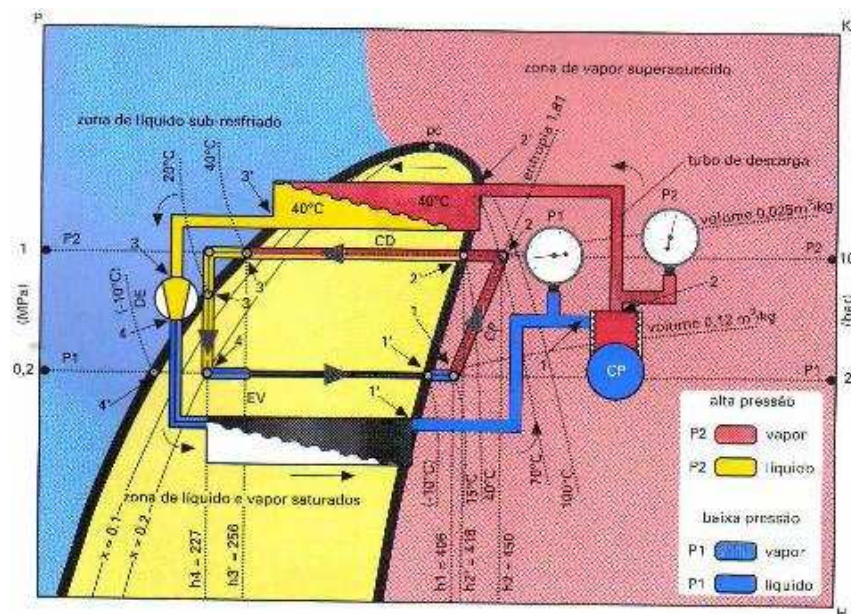


Figura A.3. Expansão do fluido refrigerante, *apud* [33].

O processo que ocorre no dispositivo de expansão é adiabático, ou seja, a troca de calor com o meio externo é desprezada, deste modo, a entalpia não varia ($h_3 = h_4$). Isto ocorre devido ao fenômeno conhecido como *flash gas*, que consiste na evaporação de parte do líquido para resfriar o restante, [33].

Quando este dispositivo possui uma abertura maior do que necessária para a carga imposta no evaporador, pode ocorrer uma inundação de fluido refrigerante no evaporador e o compressor pode bombear vapor úmido na saída, o que compromete o aparelho de refrigeração.

A.4 EVAPORADOR

O evaporador é a unidade responsável pela produção do efeito frigorífico desejado. Ele é formado por uma serpentina, geralmente metálica. O fluido refrigerante ao sair do dispositivo de expansão passa por esta serpentina e evapora devido ao calor contido no ar que se encontra próximo dela, [34].

O processo que ocorre no evaporador é um processo de transferência de calor, à pressão e à temperatura constantes, que resulta na mudança de estado do refrigerante (4-1'). A entalpia neste trecho aumenta como mostra a Figura A.4.

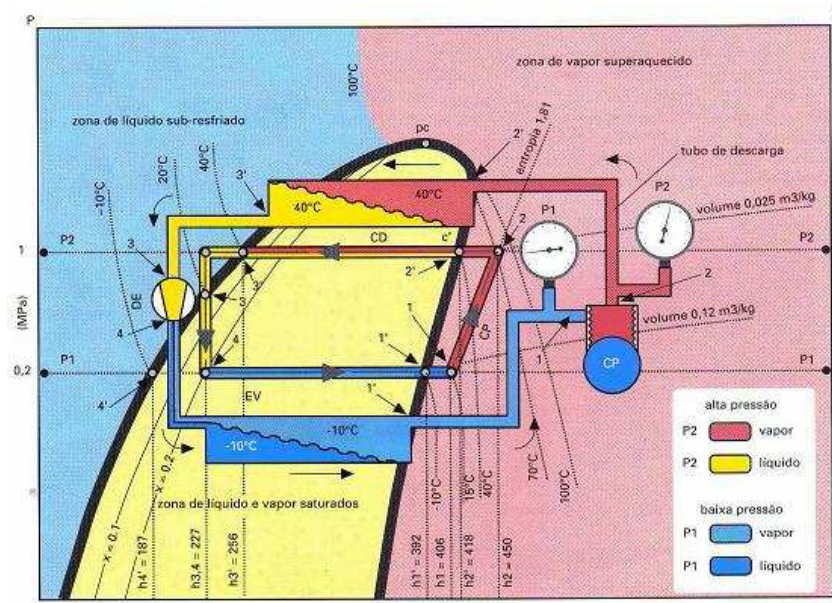


Figura A.4. Evaporação do fluido refrigerante, *apud* [33].

O fluido refrigerante, que ao entrar no evaporador encontra-se uma parte na fase de líquido saturado e outra parte na fase de vapor saturado, absorve calor do ambiente interno do refrigerador, fazendo a porcentagem de vapor aumentar até atingir 100% no ponto 1'. Neste ponto o vapor encontra-se superaquecido e, no trecho que vai do ponto 1' ao ponto 1, é aspirado e depois comprimido pelo compressor. O ciclo frigorífico é então reiniciado, sendo interrompido apenas quando o compressor é desligado.

Com o objetivo de aumentar a eficiência de refrigeração, alguns aparelhos são dotados de trocadores de calor, que corresponde à junção da linha de sucção (1'-1) com a linha de líquido (3'-3) que sai do condensador, [33].

A.5 COEFICIENTE DE PERFORMANCE (COP)

O coeficiente de performance (COP) é um índice importante para analisar a eficiência energética de um sistema frigorífico. Ele relaciona a capacidade de remoção de calor do equipamento, ou seja, a sua potência de refrigeração ($\dot{Q}_E$, [kW]) à potência de compressão ($\dot{W}_C$, [kW]), sendo uma grandeza adimensional [6], como se pode ver na equação A.1.

$$COP = \frac{\dot{Q}_E}{\dot{W}_C} \quad \text{A.1}$$

Observando a equação A.1 pode-se perceber que quanto maior for o COP melhor será a eficiência energética do equipamento e quanto mais próximo de 1, pior ela será.

B – NÍVEIS DE RUÍDO PERMISSÍVEIS SEGUNDO NORMA NBR 6401 DE INSTALAÇÕES CENTRAIS DE AR CONDICIONADO PARA CONFORTO

Finalidade do local	dBa ^(A)	NC ^(B)
Residências		
Casas particulares (zona rural e suburbana)	25 - 30	20 - 30
Casas particulares (zona urbana)	30 - 40	25 - 35
Apartamentos	35 - 45	30 - 40
Hóteis		
Quartos individuais	35 - 45	30 - 40
Salões de baile ou banquetes	35 - 45	30 - 40
Corredores	40 - 50	35 - 45
Garagens	45 - 55	40 - 50
Cozinhas e lavanderias	45 - 55	40 - 50
Escritórios		
Diretoria	25 - 35	20 - 30
Sala de reuniões	30 - 40	25 - 35
Gerência	35 - 45	30 - 40
Sala de recepção	35 - 50	30 - 45
Escritórios em geral	40 - 50	35 - 45
Corredores	40 - 55	35 - 50
Sala de computadores	45 - 55	40 - 50
Auditórios e Salas de música		
Estúdios para gravação de som e salas para concertos musicais	20 - 30	15 - 25
Teatros	30 - 35	25 - 30
Cinemas, auditórios, anfiteatros	35 - 45	30 - 40
Salas de leitura	40 - 50	35 - 45
Igrejas e Escolas		
Templos	25 - 35	20 - 30
Bibliotecas	35 - 45	30 - 40
Salas de aula	35 - 45	30 - 40
Laboratórios	40 - 50	35 - 45
Corredores e salas de recreação	45 - 55	40 - 50
Cozinhas	45 - 55	40 - 50
Edifícios públicos		
Bibliotecas, museus	35 - 45	30 - 40
Correios, bancos	40 - 50	35 - 45
Banheiros e toaletes	45 - 55	40 - 50
Restaurantes		
Restaurantes, boates	40 - 50	35 - 45
Lanchonetes	40 - 55	40 - 50
Lojas comerciais		
Lojas de muito público	45 - 55	40 - 50
Lojas de pouco público	40 - 50	35 - 45
Supermercados	45 - 55	40 - 50
Ginásios esportivos cobertos		
Ginásios	40 - 50	35 - 45
Piscinas	45 - 60	40 - 55
Transportes		
Local de venda de passagens	35 - 45	30 - 40
Salas de espera	40 - 55	35 - 50
Áreas de produção		
Exposto durante 8h/dia	< 90	
Exposto durante 3h/dia	< 97	

^(A) dBa - É o nível de ruído lido na escala "A" de um medidor de nível de som, que, por meio de um filtro eletrônico, despreza ruídos de baixa frequência que, devido à baixa sensibilidade nesta faixa, não são perceptíveis pelo ouvido humano.

^(B) NC - É o valor obtido nas curvas de NC, quando traça-se o gráfico dos níveis medidos em bandas de oitava de frequência.

- O nível de ruído deve ser medido em 5 pontos do ambiente a 1,2 m do piso.

Figura B.1. Níveis de ruído permissíveis, [35].

C – DIAGRAMAS ESQUEMÁTICOS

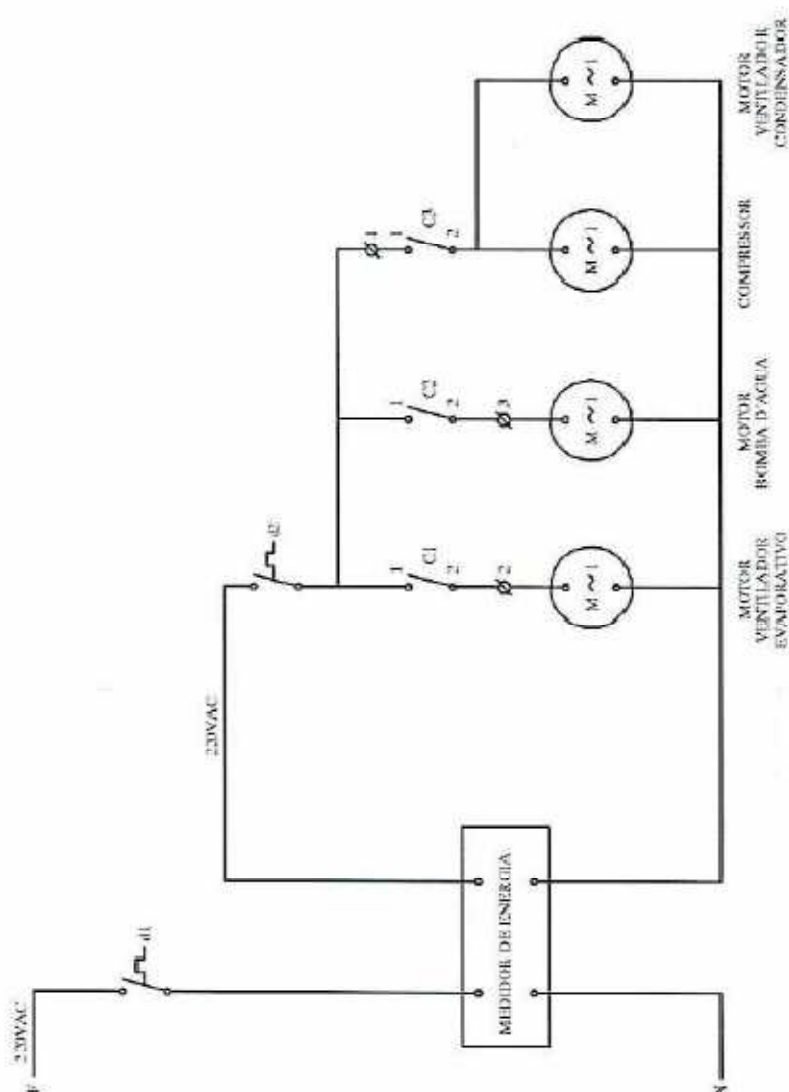


Figura C.1. Projeto do sistema híbrido (diagrama de força), [33].

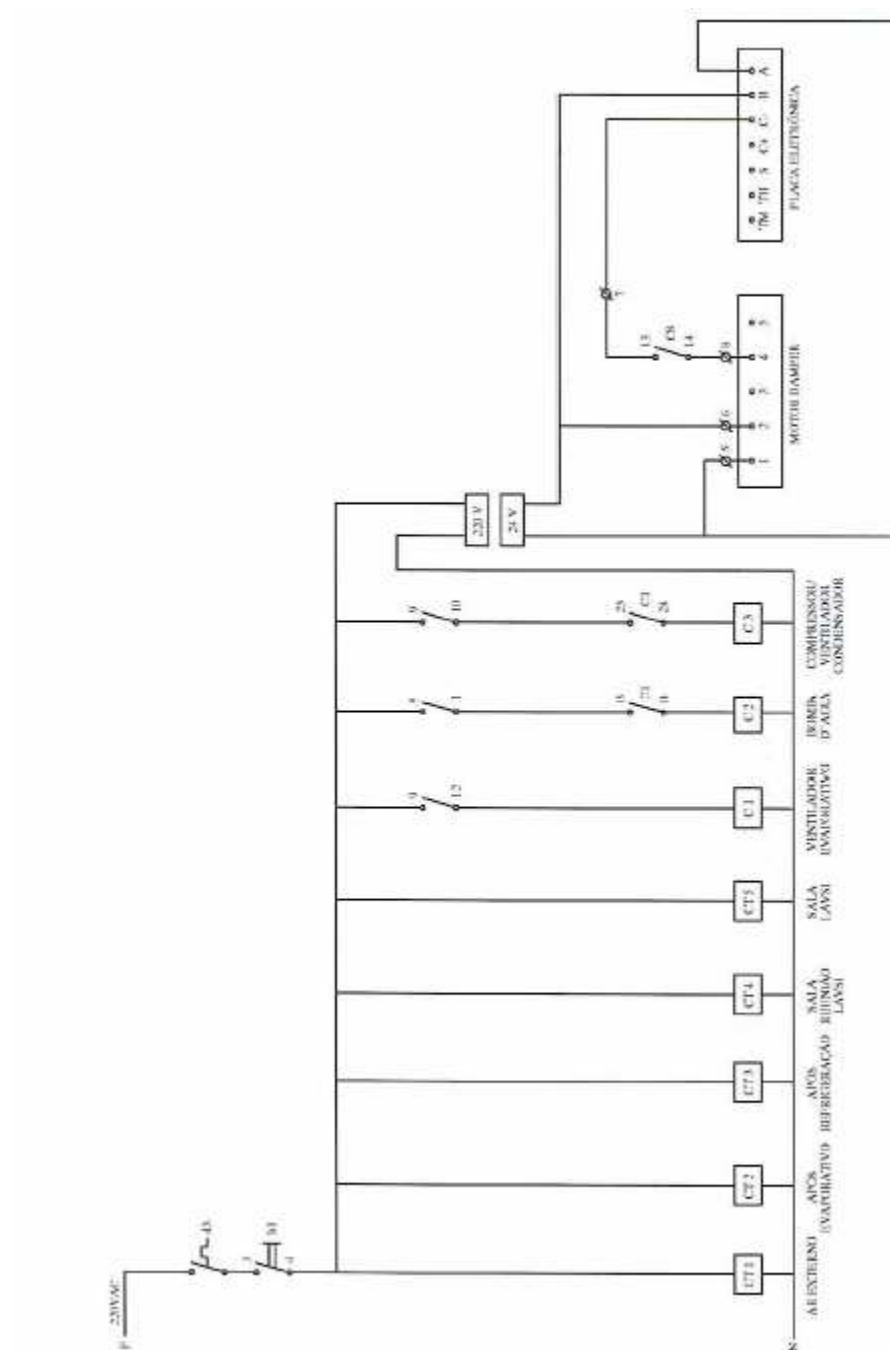


Figura C.2. Projeto do sistema híbrido (diagrama de comando), [33].

D – VBS

```
Sub OnTimer()
```

```
dim n,TCL, TCL_ant, M,W, ICL, TPele, FCL, HC1, HC2, T_amb, Vel_ar, HC, TCL_X
```

```
n = 0
```

```
TCL = 33.0
```

```
TCL_X = 33.0
```

```
TCL_ant = 0.0
```

```
M = 69.8
```

```
W = 0.0
```

```
ICL = 0.75
```

```
TPele = 35.7-0.028*(M-W)
```

```
FCL = 1.05+0.1*ICL*0.155
```

```
T_amb = 20.0
```

```
T_amb = Var.Value("MODULO2","AI01")
```

```
Vel_AR = Var.Value("MODULO2","AV07")
```

```
if (Vel_Ar < 0) then
```

```
    Vel_AR = 0.0
```

```
end if
```

```
while( ((TCL - TCL_ant > 0.2) or (TCL - TCL_ant < -0.2)) and n < 100 )
```

```
    'msgbox "Diferenca " & (TCL - TCL_ant)
```

```
    TCL_ant = TCL_X
```

```
    HC1 = 2.38*((TCL_ant-T_amb)^(0.25))
```

```
    HC2 = 12.1*((Vel_AR)^(0.5))
```

```
    if(HC2>HC1)then
```

```
        HC = HC2
```

```
    else
```

```
        HC = HC1
```

```
    end if
```

```
    TCL = Tpele - ICL * 0.155*3.96*0.00000001* FCL * ( ((TCL_ant + 273)^4) - ((T_amb + 273)^4) ) - (ICL * 0.155 * FCL * HC * (TCL_ant - T_amb))
```

```
    n = n + 1
```

```
    TCL_X = TCL_X - 0.10
```

```
Wend
```

```
dim P_AS, U_R, Pres_Atm, RESP_CUT,RESP_LAT, RESP_SENS, Metabolismo, Transpiração, LCL, conveccao, Balanco, PMV
```

'VERIFICAR PRESSAO QUE FOI UTILIZADA P_AS E O TCL

'Calculo respiracao cutanea

P_AS = 3.84

Metabolismo = 70

U_R = Var.Value("MODULO2","VI")

Pres_Atm = (U_R/100) * P_AS

RESP_CUT = $(3.05 \cdot 10^{-3}) \cdot (5733 - 6.99 \cdot (\text{Metabolismo}) - (\text{Pres_Atm} \cdot 1000))$

Var.Value("CONTROLE","RC") = RESP_CUT

'Calculo Transpiracao

Transpiracao = $0.42 \cdot (\text{Metabolismo} - 58.15)$

Var.Value("CONTROLE","TRANS") = Transpiracao

'Calculo Respiracao latente

RESP_LAT = $1.7 \cdot 10^{-5} \cdot \text{Metabolismo} \cdot (5867 - (\text{Pres_Atm} \cdot 1000))$

Var.Value("CONTROLE","RESP_L") = RESP_LAT

'Calculo Respiracao Sensivel

RESP_SENS = $0.0014 \cdot \text{Metabolismo} \cdot (34 - T_{\text{amb}})$

Var.Value("CONTROLE","RESP_S") = RESP_SENS

'Calculo Radiacao

Radiacao = $3.96 \cdot 10^{-8} \cdot \text{FCL} \cdot ((\text{TCL} + 273)^4 - (T_{\text{amb}} + 273)^4)$

Var.Value("CONTROLE","RADIACAO") = Radiacao

'Calculo Conveccao

conveccao = $\text{FCL} \cdot \text{HC} \cdot (\text{TCL} - T_{\text{amb}})$

Var.Value("CONTROLE","CONVECCAO") = conveccao

'Calculo do Balanco

Balanco = metabolismo - conveccao - Radiacao - RESP_SENS - RESP_LAT - Transpiracao - RESP_CUT

'Calculo PMV

PMV = $((0.303 \cdot \text{EXP}(-(0.036 \cdot \text{metabolismo}))) + 0.028) \cdot \text{Balanco}$

Var.Value("CONTROLE","PMV") = PMV

if(Var.Value("CONTROLE","FILTRO") = 0) then

Var.Value("CONTROLE","PMV1") = Var.Value("CONTROLE","PMV")

```

Var.Value("CONTROLE","PMV2") = Var.Value("CONTROLE","PMV")
Var.Value("CONTROLE","PMV3") = Var.Value("CONTROLE","PMV")
Var.Value("CONTROLE","PMV4") = Var.Value("CONTROLE","PMV")
Var.Value("CONTROLE","PMV5") = Var.Value("CONTROLE","PMV")
Var.Value("CONTROLE","UCR1") = Var.Value("MODULO2","VI")
Var.Value("CONTROLE","UCR2") = Var.Value("MODULO2","VI")
Var.Value("CONTROLE","UCR3") = Var.Value("MODULO2","VI")
Var.Value("CONTROLE","UCR4") = Var.Value("MODULO2","VI")
Var.Value("CONTROLE","UCR5") = Var.Value("MODULO2","VI")
Var.Value("CONTROLE","FILTRO") = 1
end if

Var.Value("CONTROLE","PMV5") = Var.Value("CONTROLE","PMV4")
Var.Value("CONTROLE","PMV4") = Var.Value("CONTROLE","PMV3")
Var.Value("CONTROLE","PMV3") = Var.Value("CONTROLE","PMV2")
Var.Value("CONTROLE","PMV2") = Var.Value("CONTROLE","PMV1")
Var.Value("CONTROLE","PMV1") = Var.Value("CONTROLE","PMV")
Var.Value("CONTROLE","UCR5") = Var.Value("CONTROLE","UCR4")
Var.Value("CONTROLE","UCR4") = Var.Value("CONTROLE","UCR3")
Var.Value("CONTROLE","UCR3") = Var.Value("CONTROLE","UCR2")
Var.Value("CONTROLE","UCR2") = Var.Value("CONTROLE","UCR1")
Var.Value("CONTROLE","UCR1") = Var.Value("MODULO2","VI")

Var.Value("CONTROLE","PMVM")      =      (      Var.Value("CONTROLE","PMV1")      +
Var.Value("CONTROLE","PMV2")      +      Var.Value("CONTROLE","PMV3")      +
Var.Value("CONTROLE","PMV4") + Var.Value("CONTROLE","PMV5")) / 5

Var.Value("CONTROLE","UCRM")      =      (      Var.Value("CONTROLE","UCR1")      +
Var.Value("CONTROLE","UCR2")      +      Var.Value("CONTROLE","UCR3")      +
Var.Value("CONTROLE","UCR4") + Var.Value("CONTROLE","UCR5")) / 5

'Calculo do PPD
Var.Value("CONTROLE","PPD") = ( 100 - (95 * EXP(- ( (0.03353*PMV)^4 + (0.2179*PMV)^2 ) ) ) )

dim PMVC, URC, URref, TC, Text, getout, breakout
getout = 0
breakout = 0

'Se tiver no modo automatico
if(Var.Value("MODULO3","VI01") = 0) then

    PMVC = Var.Value("CONTROLE","PMVM")
    URC = Var.Value("CONTROLE","UCRM")

```



```
select case Var.Value("CONTROLE","STATE1") 'Rotina executada a cada 5 segundos
```

```
case 1
```

```
    if(Var.Value("MODULO3","BO01") <> 0 and getout <> 1) then
        Call Command("MODULO3","BO01_D",6,,,0,,false,false)
        getout = 1
    end if
    if(Var.Value("MODULO3","BO03") <> 0 and getout <> 1) then
        Call Command("MODULO3","BO03_D",6,,,0,,false,false)
        getout = 1
    end if
    if(Var.Value("MODULO3","BO02") <> 0 and getout <> 1) then
        Call Command("MODULO3","BO02_D",6,,,0,,false,false)
        getout = 1
    end if
    if ( (PMVC < 0.3) and (breakout = 0)) then
        Var.Value("CONTROLE","STATE1") = 1
        breakout = 1
    end if
    if ( (PMVC > 0.7) and (breakout = 0) ) then
        Var.Value("CONTROLE","STATE1") = 2
        breakout = 1
    end if
    if ( (URC <= 48) and (PMVC > 0.4) and (PMVC <= 0.7) and (breakout = 0) ) then
        Var.Value("CONTROLE","STATE1") = 3
        breakout = 1
    end if
    if ( (URC > 48) and (PMVC > 0.4) and (PMVC <= 0.7) and (breakout = 0) ) then
        Var.Value("CONTROLE","STATE1") = 4
        breakout = 1
    end if
```

```
case 2
```

```
    if(Var.Value("MODULO3","BO01") <> 0 and getout <> 1) then
        Call Command("MODULO3","BO01_D",6,,,0,,false,false)
        getout = 1
    end if
    if(Var.Value("MODULO3","BO02") <> 1 and getout <> 1) then
        Call Command("MODULO3","BO02_L",6,,,1,,false,false)
        getout = 1
    end if
```

```

end if
if(Var.Value("MODULO3","BO03") <> 1 and getout <> 1) then
    Call Command("MODULO3","BO03_L",6,,1,,false,false)
    getout = 1
end if
if(Var.Value("MODULO3","AV6") <> 1 and getout <> 1) then
    Call Command("MODULO3","AV6",6,,1,,false,false)
    getout = 1
end if
if (PMVC < 0.6 and URC < 42 and breakout = 0) then
    Var.Value("CONTROLE","STATE1") = 3
    breakout = 1
end if
if (PMVC < 0.6 and URC > 48 and breakout = 0 ) then
    Var.Value("CONTROLE","STATE1") = 4
    breakout = 1
end if

case 3
    Var.Value("CONTROLE","COUNT") = (Var.Value("CONTROLE","COUNT") + 5)
    Var.Value("CONTROLE","COUNT2") = (Var.Value("CONTROLE","COUNT2") + 5)

    if(Var.Value("MODULO3","BO01") = 0 and getout <> 1 and
Var.Value("CONTROLE","ESPERA") = 0) then
        Call Command("MODULO3","BO01_L",6,,1,,false,false)
        getout = 1
        Var.Value("CONTROLE","COUNT") = 0
    end if

    if( Var.Value("CONTROLE","COUNT") > 15 and Var.Value("CONTROLE","ESPERA")
= 0 and getout <> 1) then
        if(Var.Value("MODULO3","BO01") = 1) then
            Call Command("MODULO3","BO01_D",6,,0,,false,false)
        end if
        getout = 1
        Var.Value("CONTROLE","ESPERA") = 1
        Var.Value("CONTROLE","COUNT2") = 0
    end if

    if (Var.Value("CONTROLE","ESPERA") = 1 and getout <> 1 ) then
        if(Var.Value("MODULO3","BO01") = 1) then
            Call Command("MODULO3","BO01_D",6,,0,,false,false)
        end if
    end if

```

```

end if
if( Var.Value("CONTROLE","COUNT2") > 135 ) then
    Var.Value("CONTROLE","COUNT") = 0
    Var.Value("CONTROLE","COUNT2") = 0
    Var.Value("CONTROLE","ESPERA") = 0
end if
if(Var.Value("MODULO3","BO02") <> 0 and getout <> 1) then
    Call Command("MODULO3","BO02_D",6,,,0,,false,false)
    getout = 1
end if
if(Var.Value("MODULO3","BO03") <> 1 and getout <> 1) then
    Call Command("MODULO3","BO03_L",6,,,1,,false,false)
    getout = 1
end if
if (PMVC < 0.3 and breakout = 0) then
    Var.Value("CONTROLE","STATE1") = 1
    breakout = 1
end if
if ( PMVC > 0.7 and breakout = 0) then
    Var.Value("CONTROLE","STATE1") = 2
    breakout = 1
end if
if ( URC > 48 and breakout = 0) then
    Var.Value("CONTROLE","STATE1") = 4
    breakout = 1
end if

```

case 4

```

if(Var.Value("MODULO3","BO01") <> 0 and getout <> 1) then
    Call Command("MODULO3","BO01_D",6,,,0,,false,false)
    getout = 1
end if
if(Var.Value("MODULO3","BO02") <> 1 and getout <> 1) then
    Call Command("MODULO3","BO02_L",6,,,1,,false,false)
    getout = 1
end if
if(Var.Value("MODULO3","BO03") <> 1 and getout <> 1) then
    Call Command("MODULO3","BO03_L",6,,,1,,false,false)
    getout = 1
end if
if(Var.Value("MODULO3","AV6") <> 1 and getout <> 1) then

```

```

        Call Command("MODULO3","AV6",6,,,1,,false,false)
        getout = 1
    end if
    if ( PMVC < 0.3 and breakout = 0) then
        Var.Value("CONTROLE","STATE1") = 1
        breakout =1
    end if

    if ( PMVC > 0.7 and breakout = 0) then
        Var.Value("CONTROLE","STATE1")= 2
        breakout =1
    end if

    if ( URC < 42 and breakout = 0) then
        Var.Value("CONTROLE","STATE1") = 3
        breakout =1
        Var.Value("CONTROLE","COUNT") = 0
        Var.Value("CONTROLE","COUNT2") = 0
        Var.Value("CONTROLE","ESPERA") = 0
    end if

end Select

end if 'Fecha automatico

End sub

```