



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
UNIDADE ARAXÁ**

**HUMBERTO DOS SANTOS CARDOSO JÚNIOR**

**CONTROLE DE UMIDADE E TEMPERATURA EM UMA BANCADA  
HÍBRIDA DE CLIMATIZAÇÃO**

**ARAXÁ/MG**

**2016**

**HUMBERTO DOS SANTOS CARDOSO JÚNIOR**

**CONTROLE DE UMIDADE E TEMPERATURA EM UMA BANCADA  
HÍBRIDA DE CLIMATIZAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Automação Industrial, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Automação Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Morais de Oliveira

**ARAXÁ/MG**

**2016**



Serviço Público Federal  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL/ ARAXÁ

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – TCC – ATA DE DEFESA**

ATA DA DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL do aluno *Humberto Santos Cardoso Júnior*

Às 18h do dia 11 de julho de 2016, reuniu-se, no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG/ Unidade Araxá, a Comissão Examinadora de Trabalho de Conclusão de Curso para julgar, em exame final, o trabalho intitulado **Controle de Umidade e Temperatura em uma Bancada Híbrida de Climatização** como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Engenheiro de Automação Industrial. Abrindo a sessão, o Presidente da Comissão, Prof. Dr. Alexandre Morais de Oliveira, após dar a conhecer aos presentes o teor das Normas Regulamentares do Trabalho Final, passou a palavra ao candidato para apresentação de seu trabalho. Seguiu-se a arguição pelos examinadores, com a respectiva defesa do candidato. Logo após, a Comissão se reuniu, sem a presença do candidato e do público, para julgamento e expedição do resultado final.

Após a reunião da Banca Avaliadora, o candidato foi considerado: aprovado Com nota final de: 87 / 100.

O resultado final foi comunicado publicamente ao candidato pelo Presidente da Comissão. O aluno abaixo-assinado declara que o trabalho ora identificado é da sua autoria material e intelectual, excetuando-se eventuais elementos, tais como passagens de texto, citações, figuras e datas, desde que as mesmas identifiquem claramente a fonte original, explicitando as autorizações obtidas dos respectivos autores, quando necessárias. Declara ainda, neste âmbito, não estar a violar direitos de terceiros.

Humberto Santos Cardoso Júnior  
Nome do aluno

Humberto Santos Cardoso Jr  
assinatura

Araxá, 11 de julho de 2016.  
local e data

Nada mais havendo a tratar, o Presidente encerrou os trabalhos e lavrou a presente ATA, que será assinada por todos os membros participantes da Comissão Examinadora.

Araxá, 11 de Julho de 2016

Alexandre Morais de Oliveira  
Prof. Dr. Alexandre Morais de Oliveira (Orientador)

Alexandre Dias Linhares  
Prof. Me. Alexandre Dias Linhares

Cláudio Pereira Lima  
Prof. Dr. Cláudio Pereira Lima

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos que contribuíram, de alguma forma, para a realização deste trabalho.

## RESUMO

Sistemas baseados no ciclo de compressão do vapor apresentam alto consumo de energia elétrica e os fluidos refrigerantes utilizados em seus circuitos frigorífico têm considerável potencial de aquecimento global. Sistemas híbridos de climatização de ar que incorporam duas ou mais tecnologias de resfriamento são vistos como boas alternativas em substituição aos métodos convencionais de tratamento de ar. Este trabalho versa sobre o desenvolvimento de um sistema híbrido de climatização que combina resfriamento evaporativo com compressão do vapor tradicional, utilizando um sistema de controle e automação para gerenciar os processos termodinâmicos sofridos pelo ar. Como objetivos do trabalho, destaca-se o desenvolvimento de um sistema de controle e automação aplicado a uma bancada de climatização híbrida que permita a obtenção do controle da temperatura e da umidade do ar climatizado, de maneira a proporcionar o conforto térmico. Com relação a metodologia, foram implementados o aparato de climatização, o sistema físico de automação, o controlador e o software de supervisão, através dos quais foram realizados ensaios respectivos aos modos de operação idealizados. Por fim, relatórios de supervisão e gráficos das grandezas psicrométricas relevantes foram gerados, inferindo a capacidade do protótipo de controlar a temperatura e a umidade.

**Palavras-chave:** Sistema híbrido de climatização. Conforto térmico. Condicionador de ar automatizado. Controle de temperatura e umidade.

## ABSTRACT

Systems based on vapor compression cycle have high-energy consumption and refrigerant fluids used in the cooling circuit have considerable global warming potential. Hybrid air conditioning systems, which incorporate two or more cooling technologies, are seen as good alternative to replace the conventional methods of treating air. This work deals with the development of hybrid air conditioning system that combines evaporative cooling with the traditional vapor compression cycle using a control and automation system to manage the thermodynamic process suffered by air. As work's objectives, it can be highlight the development of air a control and automation systems applied to a hybrid-cooling bench that allows obtaining the control of temperature and humidity of the conditioned air, to provide thermal comfort. With respect to the used methodology, have been implemented the air conditioning apparatus, the automation hardware, the controller and the supervisory software, that in combination, allow to perform tests based on the designed operational modes. Finally, supervisory reports and graphs of relevant psychrometric quantities have been generated and they showed the ability to control temperature and humidity of the prototype.

**Keywords:** Hybrid air conditioning system. Thermal comfort. Autonomous HVAC. Temperature and humidity control.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Propriedades na carta psicrométricas .....                       | 22 |
| Figura 2 – Dispositivo de saturação adiabática. ....                        | 23 |
| Figura 3 – Sistema de resfriamento evaporativo .....                        | 27 |
| Figura 4 – Ciclo de refrigeração a compressão do vapor .....                | 27 |
| Figura 5 – Evaporador de um ar condicionado tradicional. ....               | 28 |
| Figura 6 – Sistema híbrido de climatização laboratório Lavsi da UnB.....    | 32 |
| Figura 7 – Exemplo de sistema híbrido .....                                 | 32 |
| Figura 8 – Diagrama de um sistema de controle com realimentação.....        | 35 |
| Figura 9 – Ação de controle liga-desliga .....                              | 37 |
| Figura 10 – Funcionamento controlador liga-desliga com histerese .....      | 37 |
| Figura 11 – Resposta do controlador proporcional para diferentes Kc's ..... | 39 |
| Figura 12 – Resposta do controlador PI para diferentes valores de Ti.....   | 41 |
| Figura 13 – Resposta do controlador PD para diferentes valores de Td.....   | 43 |
| Figura 14 – Resposta para os controladores P, PI e PID .....                | 45 |
| Figura 15 – Representação do sistema de climatização. ....                  | 51 |
| Figura 16 – Fluxograma de funcionamento do controlador .....                | 54 |
| Figura 17 – Sistema de supervisão. ....                                     | 56 |
| Figura 18 – Elemento cerâmico poroso de troca de calor e massa.....         | 58 |
| Figura 19 – Ventilador NMB .....  | 59 |
| Figura 20 – Unidade refrigeradora de água.....                              | 59 |
| Figura 21 – bomba hidráulica. ....  | 60 |
| Figura 22 – Sistema híbrido de climatização implementado. ....              | 60 |
| Figura 23 – Microcontrolador Arduino Mega 2560. ....                        | 61 |
| Figura 24 – Sensor de temperatura DS18B20. ....                             | 62 |
| Figura 25 – Sensor de umidade relativa DHT11. ....                          | 63 |
| Figura 26 – Módulo Relé. ....   | 64 |
| Figura 27 – Ponte H L298n. ....   | 65 |
| Figura 28 – Estratégia de controle implementada. ....                       | 69 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|   |    |
|---|----|
| Gráfico 1 – Controle de velocidade dos ventiladores. ....           | 68 |
| Gráfico 2 – Temperatura de bulbo seco – modo UMID – ensaio 1.....   | 73 |
| Gráfico 3 – Umidade relativa – modo UMID – ensaio 1.....            | 73 |
| Gráfico 4 – Umidade absoluta – modo UMID – ensaio 1. ....           | 74 |
| Gráfico 5 – Temperatura de bulbo seco – modo UMID – ensaio 2.....   | 75 |
| Gráfico 6 – Umidade relativa – modo UMID – ensaio 2.....            | 76 |
| Gráfico 7 – Umidade absoluta – modo UMID – ensaio 2. ....           | 76 |
| Gráfico 8 – Temperatura de bulbo seco – modo SEC – ensaio 1. ....   | 79 |
| Gráfico 9 – Umidade relativa – modo SEC – ensaio 1. ....            | 79 |
| Gráfico 10 – Umidade absoluta – modo SEC – ensaio 1. ....           | 80 |
| Gráfico 11 – Temperatura de bulbo seco – modo SEC – ensaio 2. ....  | 81 |
| Gráfico 12 – Umidade relativa – modo SEC – ensaio 2. ....           | 82 |
| Gráfico 13 – Umidade absoluta – modo SEC – ensaio 2. ....           | 82 |
| Gráfico 14 – Temperatura de bulbo seco – modo VENT – ensaio 1. .... | 84 |
| Gráfico 15 – Umidade relativa – modo VENT – ensaio 1.....           | 85 |
| Gráfico 16 – Umidade absoluta – modo VENT – ensaio 1.....           | 85 |
| Gráfico 17 – Temperatura de bulbo seco – modo VENT – ensaio 2. .... | 87 |
| Gráfico 18 – Umidade relativa – modo VENT – ensaio 2.....           | 87 |
| Gráfico 19 – Umidade absoluta – modo VENT – ensaio 2.....           | 87 |

## LISTA DE QUADROS

|   |    |
|---|----|
| Quadro 1 – Efeito das ações de controle na resposta.....        | 44 |
| Quadro 2 – Modos de Operação do Sistema Híbrido.....            | 66 |
| Quadro 3 – Relatório de supervisão – modo UMID – ensaio 1. .... | 72 |
| Quadro 4 – Relatório de supervisão – modo UMID – ensaio 2. .... | 75 |
| Quadro 5 – Relatório de supervisão – modo SEC – ensaio 1. ....  | 78 |
| Quadro 6 – Relatório de supervisão – modo SEC – ensaio 2. ....  | 81 |
| Quadro 7 – Relatório de supervisão – modo VENT – ensaio 1.....  | 84 |
| Quadro 8 – Relatório de supervisão – modo VENT – ensaio 2.....  | 86 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|                  |   |
|------------------|---|
| ASHRAE           | <i>American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers</i> |
| BP               | Banda Proporcional  |
| CFC              | Clorofluorcarbono   |
| COP              | Coeficiente de Performance  |
| GUI              | <i>Graphical interface user</i>   |
| $h_{as,1}$       | Entalpia de ar seco na entrada do volume de controle                              |
| $h_{as,2}$       | Entalpia de ar seco na saída do volume de controle                                |
| $h_e$            | Entalpia na entrada do volume de controle   |
| $h_L$            | Entalpia da água líquida  |
| $h_s$            | Entalpia na saída do volume de controle   |
| $h_{v,1}$        | Entalpia de vapor de água na entrada do volume de controle                        |
| $h_{v,2}$        | Entalpia de vapor de água na saída do volume de controle                          |
| IDE              | <i>Integrated Development Environment</i>   |
| INPI             | Instituto Nacional da propriedade Industrial                                      |
| ISO              | <i>International Organization for standardization</i>                             |
| KP               | Ganho Proporcional  |
| $\dot{m}_{as}$   | Vazão mássica de ar seco no volume de controle                                    |
| $\dot{m}_{cond}$ | Vazão mássica de água condensada para o volume de controle                        |
| $\dot{m}_e$      | Vazão mássica na entrada do volume de controle                                    |
| $\dot{m}_{evap}$ | Vazão mássica de água evaporada para o volume de controle;                        |
| $\dot{m}_s$      | Vazão mássica na saída do volume de controle                                      |
| $m_{sat}$        | Massa de vapor de água na saturação do ar   |
| MV               | Variável Manipulada   |
| $m_v$            | Massa de água presente em uma amostra de ar úmido                                 |
| $\dot{m}_{v,1}$  | Vazão mássica de vapor de água na entrada do volume de controle                   |
| $\dot{m}_{v,2}$  | Vazão mássica de vapor de água na saída do volume de controle                     |
| P                | Proporcional  |
| PD               | Proporcional – Derivativo   |
| PI               | Proporcional – Integral   |
| PID              | Proporcional – Integral – Derivativo  |

|                |   |
|----------------|---|
| PV             | Variável de Processo                                |
| PWM            | <i>Pulse Width Modulation</i>                       |
| $q_{lat}$      | Calor latente no volume de controle                 |
| $\dot{Q}_E$    | Taxa de refrigeração                                |
| $q_f$          | Calor do fluido no volume de controle               |
| $q_{sens}$     | Calor sensível no volume de controle                |
| $\dot{Q}_{VC}$ | Quantidade de calor no volume de controle           |
| SEC            | Resfriamento com Secagem                            |
| SP             | Valor Desejado ( <i>setpoint</i> )                  |
| $T_1$          | Temperatura do ar na entrada do dispositivo         |
| $T_2$          | Temperatura do ar na saída do dispositivo           |
| Ta             | Temperatura da Água                                 |
| Tbs            | Temperatura de Bulbo Seco                           |
| TbsIn          | Temperatura de Bulbo Seco na Entrada                |
| TbsOut         | Temperatura de Bulbo Seco na Saída                  |
| $T_{bu}$       | Temperatura de Bulbo Úmido                          |
| TD             | Tempo Derivativo                                    |
| TI             | Tempo integral                                      |
| TO             | Ponto de orvalho                                    |
| To             | Ponto de orvalho na Entrada                         |
| UMID           | Resfriamento com Umidificação                       |
| Ur             | Umidade Relativa                                    |
| UrIn           | Umidade Relativa na Entrada                         |
| UrOut          | Umidade Relativa na Saída                           |
| VENT           | Ventilação  |
| VC             | Volume de Controle                                  |
| $\dot{W}_c$    | Potência de compressão.                             |
| WIn            | Umidade Absoluta na Entrada                         |
| WOut           | Umidade Absoluta na Saída                           |
| $\eta$         | Eficiência do processo de resfriamento evaporativo. |
| $\omega$       | Umidade Absoluta                                    |

# SUMÁRIO

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b> .....                                    | <b>14</b> |
| <b>2</b> | <b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....                           | <b>19</b> |
| 2.1      | Fundamentos de Climatização.....                           | 19        |
| 2.1.1    | Conforto Térmico.....                                      | 19        |
| 2.1.2    | Propriedades Psicrométricas do Ar .....                    | 20        |
| 2.1.3    | Resfriamento Evaporativo .....                             | 23        |
| 2.1.4    | Ciclo de Refrigeração Baseado na Compressão do Vapor ..... | 27        |
| 2.1.5    | Sistemas de Condicionamento Híbrido .....                  | 30        |
| 2.2      | Fundamentos de Controle e Automação .....                  | 34        |
| 2.2.1    | Sistema de Controle .....                                  | 34        |
| 2.2.2    | Ações de Controle .....                                    | 36        |
| 2.2.3    | Sensores e Atuadores .....                                 | 45        |
| 2.2.4    | Microcontrolador .....                                     | 46        |
| 2.2.5    | Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados .....           | 48        |
| <b>3</b> | <b>METODOLOGIA</b> .....                                   | <b>50</b> |
| 3.1      | Descritivo do Sistema .....                                | 50        |
| 3.2      | Desenvolvimento do Controlador .....                       | 52        |
| 3.3      | Desenvolvimento do Software de Supervisão.....             | 56        |
| 3.4      | Implementação do Sistema.....                              | 58        |
| 3.5      | Modos de Operação .....                                    | 65        |
| 3.5.1    | Modo Resfriamento com Umidificação – UMID .....            | 65        |
| 3.5.2    | Modo Resfriamento com Secagem – SEC .....                  | 65        |
| 3.5.3    | Modo Ventilação – VENT .....                               | 66        |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....                       | <b>67</b> |
| 4.1      | Sistema de Controle e Automação .....                      | 67        |
| 4.2      | Bancada Híbrida de Climatização.....                       | 71        |
| 4.2.1    | Modo Resfriamento com Umidificação – UMID.....             | 71        |
| 4.2.2    | Modo Resfriamento com Secagem – SEC .....                  | 77        |
| 4.2.3    | Modo Ventilação – VENT .....                               | 83        |
| 4.3      | Qualificação do Protótipo Desenvolvido .....               | 88        |

|                          |           |
|--------------------------|-----------|
| <b>5 CONCLUSÕES.....</b> | <b>90</b> |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>  | <b>92</b> |

# 1 INTRODUÇÃO

O condicionamento de ar para promoção do conforto térmico é um procedimento bastante realizado na sociedade atual. Grandes sistemas realizam essa tarefa de maneira eficiente, entretanto, apresentam certos pontos negativos, tais como o alto consumo de energia e o alto custo de instalação e manutenção. Sistemas convencionais, que operam sob a compressão do vapor, têm um elevado consumo de energia elétrica. Em contas da Califórnia, EUA, no ano de 1999, o consumo energético de sistemas de climatização representava 5% do consumo total do país (BOURASA, 2002). No Kuwait, a energia gasta com condicionamento de ar corresponde a 50% do consumo total do país e é responsável pelo consumo de 70% de toda energia elétrica produzida pela matriz energética nacional (MAHESHWARI, 2001). Sendo assim, é possível observar a grande quantidade de energia gasta na promoção do conforto térmico quando se utiliza sistemas de climatização tradicionais.

Nessa medida, a utilização de sistemas híbridos de climatização torna-se uma boa alternativa em substituição e ou complementação às tecnologias convencionais de condicionamento de ar. Esses sistemas estão sendo aplicados com grande sucesso em países europeus, entretanto, no Brasil, poucos projetos optaram por fazer uso de sistemas híbridos. A economia de energia é uma das principais características desse tipo de sistema de resfriamento, pois ele se baseia no aproveitamento das características climáticas locais no auxílio do processo de condicionamento de ar (FLORES, 2009; OLIVEIRA, 2007). Nessa medida, um sistema híbrido combina duas ou mais tecnologias de climatização em um só sistema, aproveitando as melhores características de cada uma delas, bem como as particularidades do clima local, visando proporcionar conforto térmico no ambiente climatizado, ao mesmo tempo em que se economiza energia de compressão. Com isso, fica evidenciado que esse tipo de sistema apresenta uma melhor alternativa quando comparado aos sistemas tradicionais usados na climatização de um ambiente habitado.

O conforto térmico é um conceito muito variável, sendo esse descrito por diversos autores. De acordo com a *American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE), conforto térmico é definido pela satisfação pessoal com o ambiente térmico ocupado (FANGER, 1972 apud VILLANI, 2000). É visto que o homem se sente confortável termicamente quando, sem utilizar

mecanismo de regulação, seu organismo encontra-se em equilíbrio com o meio ambiente. Dessa forma, melhores condições de vida são experimentadas quando as pessoas não são expostas à fadiga e ao estresse térmico (FROTA; SCHIFFER, 2006). Sendo assim, pode ser dito que o conforto térmico é um conceito subjetivo e que tem papel importante na qualidade de vida das populações humanas.

Vários estudos vêm sendo feitos para determinação das condições de conforto térmico. Essas condições apresentam uma grande quantidade de variáveis, sendo que a condição final de conforto pode ser alcançada de várias formas, por meio da atuação em diferentes variáveis. O conforto térmico é representado por características do ar que tornam o ambiente habitado confortável para as pessoas que usufruem desse espaço. Nesse sentido, uma edificação habitada deve propiciar condições térmicas internas que se adequem aos padrões de conforto térmico humano, independente das condições climáticas externas (FROTA; SCHIFFER, 2006). Para tanto, as principais variáveis relacionadas nesse contexto para a promoção do conforto são: a temperatura, a umidade e a velocidade do ar; entretanto, vários outros fatores podem estar correlacionados (FROTA; SCHIFFER, 2006). Logo, um sistema de climatização deve atender a esses requisitos quando projetado.

Ao realizar o controle térmico, o controle tanto da temperatura quanto da umidade é muito importante, conforme foi ressaltado. Temperatura e umidade apresentam uma relação de dependência quando se analisa um processo termodinâmico na carta psicrométrica<sup>1</sup>. Esse fato torna o controle do sistema mais complexo, sendo necessária a utilização dos conceitos de automação para o alcance dos objetivos definidos. Um exemplo desse fato é que mais da metade da automação predial implementada corresponde a automatizações dos sistemas de climatização (ALVAREZ, 1998; PINTO, 2000; MONTEBELLER, 2006).

A automação surgiu na indústria com o objetivo de substituir a mão de obra humana por sistemas automáticos que visam a otimização dos processos, aumentando, assim, a qualidade e a produtividade. Esses conceitos passaram a ser aplicados em edifícios na intenção de promover segurança, conforto e economia de energia (MONTEBELLER, 2006). Logo, a automação versa sobre a implementação de sistemas que comunicam entre si, compreendendo sistemas de supervisão,

---

<sup>1</sup> Carta que representa graficamente as características do ar.

interfaces e máquinas que auxiliam a execução do processo a ser realizado por meio da supervisão e da análise de problemas que possam ocorrer (MATUCHAKI, 2011).

Levando em consideração essas ponderações, um sistema de climatização automatizado interage com o meio em que está inserido por meio de sensores e de atuadores, sendo capaz de captar dados referentes às características do ambiente e atuar no processo de modo a controlar a saída como desejada. Em vista disso, um controlador é necessário para a interpretação dos dados de entrada e para definir as ações de controle necessárias para o alcance dos objetivos. Esses são fornecidos para o sistema por meio da programação da faixa de parâmetros relativos às características a serem mantidas no ambiente. Logo, cabe ao sistema a manutenção das condições internas do ambiente, de maneira automática, independentemente das características do ambiente externo.

Diante do exposto, este trabalho propoz a implementação experimental de uma bancada para controle de temperatura e de umidade do ar baseado em um sistema híbrido de climatização. O equipamento conta com um sistema de resfriamento evaporativo e um dispositivo de resfriamento de líquido a partir do ciclo de compressão do vapor. O funcionamento individual de tais sistemas já é bem conhecido, no entanto, a bancada híbrida apresentada neste trabalho é inédita, proporcionando um sistema com uma grande variedade de opções de controle tanto da temperatura quanto da umidade. O protótipo desenvolvido neste trabalho foi submetido ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), pelo professor orientador dessa pesquisa, sob o número BR1020150225113 para a obtenção da patente definitiva da invenção. Essa patente foi depositada como invenção de um condicionador de ar evaporativo e seus respectivos processos, sendo o CEFET-MG o detentor da patente.

Vários estudos sobre a viabilidade de equipamentos híbridos já foram feitos para diferentes tipos de sistemas. Muitos apresentaram bons resultados quando comparados às alternativas convencionais. Ghali (2008), com um sistema híbrido dessecante, conseguiu reduzir o tamanho do sistema de compressão do vapor de 23kW para 15kW, ou seja, 35%. Ademais, nesse estudo, Ghali (2008) salienta que, baseando-se na economia anual, o sistema híbrido tem um tempo de retorno menor que 5 anos, fato que demonstra sua viabilidade. Outro pesquisador nessa área, Dai (2001), também utilizando um sistema híbrido de climatização, verificou que a combinação dos sistemas pode aumentar a produção de resfriamento em

aproximadamente de 20 a 30%, quando comparado ao equipamento tradicional de climatização utilizado individualmente (DAI, 2001).

Em vista do exposto, aventa-se a seguinte hipótese de pesquisa: se ocorrer o desenvolvimento de um sistema de controle e automação para gerenciar um equipamento de climatização híbrida, que combine resfriamento evaporativo e compressão do vapor, as variáveis do condicionamento do ar, temperatura e umidade serão atingidas para a promoção do conforto térmico.

Como justificativa é possível dizer que este estudo apresenta uma grande relevância no contexto atual, uma vez que os sistemas convencionais de climatização são responsáveis por um alto consumo de energia. Ademais, sabe-se que o consumo energético de sistemas se tornou um fator de grande importância, devido à disponibilidade e aos custos da energia. Nessa medida, alternativas inovadoras, que possam substituir os métodos tradicionais, são bem-vindas no cenário da climatização.

A abordagem experimental visou a realização da montagem de uma bancada híbrida de climatização, bem como obter uma avaliação das alternativas operacionais para o controle da temperatura e umidade do ar de um ambiente. Os principais pontos positivos deste estudo são a possibilidade de avaliação do protótipo de climatização híbrida; a aplicação prática da teoria previamente estudada e o desenvolvimento de um trabalho científico e tecnológico na área de atuação do problema. Outro aspecto positivo desta abordagem é a aplicação da automação na promoção do conforto térmico, fato que pode gerar muitos benefícios na área de estudo.

O estudo realizado buscou avanços científicos, tecnológicos, econômicos e humanos. Como benefício para o meio científico, pode-se destacar a comprovação de uma nova técnica de condicionar o ar. A bancada apresentada torna-se o ponto de partida de um novo modelo de equipamento para climatizar ambientes. Outro benefício é que as características operacionais de controle do modelo permitem uma economia do consumo de energia projetado, uma vez que utiliza do clima local como aliado nas alternativas de condicionamento do ar. Ressalta-se, que o sistema híbrido de climatização automatizado é capaz de controlar as características climáticas em um ambiente habitado, independente das características externas do ar, de maneira a proporcionar o conforto térmico dos habitantes. Já sobre a melhora na condição de vida humana, é de conhecimento que os sistemas evaporativos melhoram a qualidade do ar, não agredem a atmosfera e também não afetam a saúde humana como os

condicionadores tradicionais, os quais secam o ar em damasia. Sendo assim, o desenvolvimento de protótipos que operam com base híbrida é de suma importância para a realização de um estudo para confirmação de sua viabilidade.

O sistema proposto para controle da temperatura e da umidade irá utilizar um microcontrolador, sensores e atuadores que irão possibilitar a aplicação dos conhecimentos obtidos no curso de Engenharia de Automação Industrial. Com base nisso e nos benefícios apresentados anteriormente, é visto que o estudo proposto é de grande relevância, apresentando justificativas para a sua realização como trabalho de conclusão de curso, uma vez que pode trazer melhorias em diferentes áreas do desenvolvimento humano.

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um sistema de controle e automação para gerenciar uma bancada híbrida de climatização, que incorpora o resfriamento evaporativo ao ciclo de compressão do vapor, com relação ao controle da temperatura e umidade do ar, para o conforto térmico.

Já os objetivos específicos necessários para atingir o objetivo geral são:

- Montar uma bancada híbrida de climatização;
- Desenvolver um sistema de automação e supervisão utilizando de sensores, atuadores, controlador e interface com o usuário.
- Desenvolver estratégias de controle para o sistema;
- Obter uma avaliação concreta dos modos de operação;
- Qualificar o protótipo desenvolvido;

O capítulo seguinte apresenta o referencial teórico tanto sobre climatização de ar, quanto sobre automação. A seguir é apresentada a metodologia utilizada no estudo, a abordagem experimental e as especificações do projeto. Os resultados são apresentados no capítulo 4, bem como as discussões relevantes. Por fim, é feita uma conclusão sobre todos os aspectos do projeto.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Fundamentos de Climatização

#### 2.1.1 Conforto Térmico

De acordo com a ASHRAE *fundamentals handbook* (2009), conforto térmico é uma característica subjetiva que está relacionada ao grau de satisfação da pessoa com o ambiente térmico ao qual ela está submetida. Sendo assim, não é possível garantir a satisfação de todas as pessoas envolvidas em um ambiente com uma determinada característica térmica. Entretanto, o estudo de conforto térmico visa determinar condições ambientais que possam trazer o conforto térmico para a maioria das pessoas de maneira simultânea.

Existem vários índices de conforto para avaliação de ambientes térmicos, sendo esses criados para representar a satisfação em relação a determinados ambientes. Esses índices são padronizados pela *International Organization for standardization* (ISO), visto que são divididos em três tipos de classes para avaliar ambientes quentes, moderados e frios. Dentre esses índices, são destacados os índices TE, índices racionais e índices diretos. O índice TE relaciona as temperaturas de bulbo seco, temperaturas de bulbo úmido, pressão barométrica e a velocidade do ar para a mensuração do nível de conforto. Já os índices racionais utilizam as equações de transferências de calor para obtenção de modelos matemáticos que possibilitarão a obtenção de respostas térmicas. Por fim, os índices diretos são baseados na temperatura de bulbo úmido, sendo esse índice o adotado pela legislação brasileira (FLORES, 2009).

Com relação ao lado físico, é possível afirmar que um ambiente é confortável quando o organismo se encontra em balanço térmico com o ambiente que o envolve, ou seja, quando as condições ambientais possibilitam a manutenção da temperatura sem que seja necessária a utilização dos mecanismos termorreguladores do corpo. Várias características ambientais podem ser consideradas na medição do nível de conforto térmico do indivíduo. Sobre essas, Ferreira, Almeida e Mafrá (2006) afirmam que temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento e tempo de exposição

são as principais variáveis que contribuem para o conforto térmico (FERREIRA; ALMEIDA; MAFRA, 2006).

No estudo, Ferreira, Almeida e Mafra (2006) alegam que a temperatura do ar é o fator mais relevante e usual quando se busca a promoção do conforto térmico, visto que determinadas temperaturas trazem conforto, enquanto que outras são altamente desagradáveis. O autor enfatiza que o nível de conforto térmico está relacionado a uma combinação de fatores. Entretanto, no estudo realizado, a temperatura do ambiente e a umidade relativa do ar são de direto interesse, atendendo às necessidades de conforto térmico estabelecidas previamente.

Villani (2000) estabelece que as principais características de um ambiente térmico são:

- Temperatura do ar, que influencia na troca de calor por convecção;
- Temperatura radiante média, que influencia a troca de calor por radiação;
- Velocidade relativa do ar, que influencia a troca de calor na convecção forçada;
- Pressão do vapor do ambiente ou umidade, que influencia a troca de calor por respiração e por evaporação de água e suor.

Com base nesses parâmetros, a ASHRAE define as condições de conforto térmico para climas mais quentes como o Brasil. De maneira resumida, essas características são: 25°C de temperatura ótima, podendo essa ser variável entre 23°C e 27°C, velocidade relativa do ar igual a 0,5 m/s e uma umidade relativa variável entre 40% e 60%. Esses valores levam em consideração os principais parâmetros do conforto em um ambiente térmico, além de avaliar a salubridade do ambiente com relação a temperatura, a umidade relativa e a velocidade do ar, visto que essas têm grande impacto no bem-estar pessoal em um ambiente (VILLANI, 2000).

Essa definição de parâmetros para a promoção do conforto térmico proposta por Villani (2000) está dentro do esperado para a realização deste trabalho. Sendo assim, valores aproximados foram adotados para o sistema de climatização híbrido proposto.

### **2.1.2 Propriedades Psicrométricas do Ar**

A psicrometria é a ciência que estuda as propriedades e os processos relacionados ao ar úmido, de maneira a possibilitar a ilustração e a análise dos ciclos

de condicionamento de ar usados na promoção do conforto térmico (SHERIFF, 2002). Sendo assim, essa ciência, a psicrometria, é de grande importância, visto que é ela a responsável por apresentar as propriedades do ar atmosférico (FLORES, 2009). Como se sabe, o ar atmosférico não é totalmente seco, sendo esse constituído de uma mistura de gases e uma quantidade variável de vapor de água. O foco principal da psicrometria é inventariar as propriedades dessa mistura (FLORES, 2009). Uma dessas propriedades é a umidade, a qual é de grande relevância para diversas áreas da atividade humana, podendo ser vista nos processos de condicionamento de ar, evidenciando a importância da psicrometria (SILVA, 2000).

A composição aproximada do ar seco é 79.08% de nitrogênio, 20.95% de oxigênio, 0.93% de argônio, 0.03% de dióxido de carbono e 0.01% de outros gases, quando uma análise do volume é feita (SHERIFF, 2002). Quando somente esses componentes são avaliados, o ar apresenta uma composição relativamente constante, porém demonstra pequenas variações em função da localização geográfica (SILVA, 2000). Já a quantidade de água presente no ar apresenta grandes variações baseadas na localização e nas condições climáticas, sendo que essa quantidade pode normalmente representar 1% a 3% da massa da mistura. Nessa medida, a umidade atmosférica varia muito com a região, visto que é proveniente da evaporação superficial das massas de água, logo, regiões mais áridas apresentam menor umidade quando comparadas a regiões úmidas (FLORES, 2009).

Segundo Silva (2004 apud FLORES, 2009, p. 12), as propriedades e os processos psicrométricos do ar são melhores representados em cartas psicrométricas de modo a facilitar a solução de problemas práticos e permitir a análise gráfica de dados relevantes, os quais, de outro modo, requereriam soluções matemáticas complexas. As principais propriedades do ar representadas na carta psicrométrica são: 1 – temperatura de bulbo seco, 2 – umidade absoluta, 3 – escala de umidade absoluta, 4 – temperatura de bulbo úmido, 5 – volume específico, 6 – escala de entalpia específica, 7 – temperatura do ponto de orvalho, 8 – umidade relativa e 9 – fator de calor sensível. Essas propriedades são respectivamente demonstradas na figura 1.

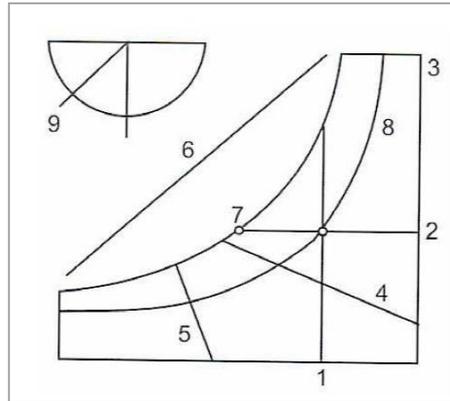


Figura 1 – Propriedades na carta psicrométrica

Fonte: Flores (2009, p. 13).

As principais propriedades do ar utilizadas na psicrometria são: temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido, ponto de orvalho, umidade absoluta e umidade relativa. As definições dessas propriedades são demonstradas a seguir, baseando-se no que foi proposto por SHERIFF (2002):

- Temperatura de bulbo seco (T<sub>bs</sub>): é a temperatura do ar medida com um termômetro comum. Essa propriedade é a real temperatura do ar.
- Temperatura de bulbo úmido (T<sub>bu</sub>): é a temperatura medida por um termômetro com o bulbo úmido submetido a um fluxo de ar, depois que essa temperatura tenha se estabilizado. Essa temperatura é sempre menor ou igual a temperatura de bulbo seco, uma vez que o resfriamento evaporativo reduz a temperatura do termômetro.
- Ponto de orvalho (T<sub>o</sub>): é a temperatura em que a umidade presente no ar irá começar a condensar, ou seja, o vapor de água presente no ar se tornará líquido espontaneamente, se o ar for submetido a uma superfície nessa temperatura.
- Umidade relativa (U<sub>r</sub>): é a proporção entre a massa de vapor de água presente em uma amostra de ar úmido e a massa de vapor de água necessária para saturar o ar úmido que apresente a mesma temperatura e pressão.

$$U_r = \frac{m_v}{m_{sat}}$$

Onde:

U<sub>r</sub> = Umidade relativa do ar;

m<sub>v</sub> = Massa de água presente em uma amostra de ar úmido;

$m_{\text{sat}}$  = Massa de vapor de água na saturação do ar.

- Umidade absoluta ( $\omega$ ): é a relação entre a massa de vapor de água presente no ar e a massa de ar seco que constitui a mistura.

$$\omega = \frac{m_v}{m_{as}}$$

Onde:

$\omega$  = Umidade absoluta do ar;

$m_v$  = Massa de água presente em uma amostra de ar úmido;

$m_{as}$  = Massa de ar seco.

Os processos psicrométricos também podem ser representados e analisados na carta psicrométrica. As transformações ocorridas com as propriedades do ar durante o processo de climatização podem ser representadas no diagrama demonstrado na figura 1. Entre essas transformações, destacam-se o resfriamento, a umidificação e a secagem (FLORES, 2009). Sendo assim, a carta apresenta grande importância na análise do desempenho de sistemas de condicionamento de ar.

### 2.1.3 Resfriamento Evaporativo

A evaporação é um processo natural que ocorre quando algum meio fornece calor para que algum fluido evapore. O resfriamento evaporativo do ar ocorre de maneira semelhante, sendo este baseado no processo de saturação adiabática. O ar, ao entrar em contato com uma lâmina de água, fornece calor para que essa seja evaporada, resultando, assim, no resfriamento do ar e no aumento da umidade presente no mesmo (FLORES, 2009). O modelamento do resfriamento evaporativo, segundo Wylen, Sonntag e Borgnakke (2003) é apresentado a seguir.

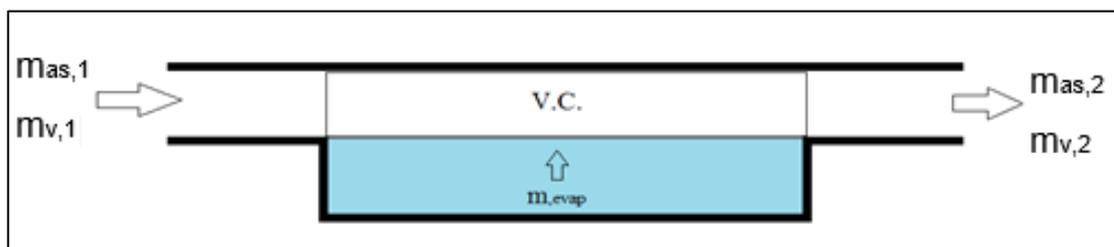


Figura 2 – Dispositivo de saturação adiabática.

Como o processo de resfriamento evaporativo é similar ao conceito fundamental de saturação adiabática, o modelamento do resfriador evaporativo é construído a partir do dispositivo de saturação adiabática apresentado na figura 2.

Pela 1ª lei da termodinâmica aplicada ao volume de controle (V.C.), tem-se:

$$\dot{Q}_{VC} = \Sigma \dot{m}_e \cdot (h_e) - \Sigma \dot{m}_s \cdot (h_s)$$

Onde:

- $\dot{Q}_{VC}$  = Quantidade de calor no volume de controle;
- $\dot{m}_e$  = Vazão mássica na entrada do volume de controle;
- $\dot{m}_s$  = Vazão mássica na saída do volume de controle;
- $h_e$  = Entalpia na entrada do volume de controle;
- $h_s$  = Entalpia na saída do volume de controle.

Aplicando continuidade à equação de energia, a mesma pode ser escrita função das quantidades de entalpia referente a suas massas parciais:

$$\dot{Q}_{VC} = (\dot{m}_{as} \cdot h_{as,2} + \dot{m}_{v,2} \cdot h_{v,2}) - \dot{m}_{as} \cdot h_{as,1} + \dot{m}_{v,1} \cdot h_{v,1} + \dot{m}_{evap} \cdot h_L$$

Onde:

- $\dot{Q}_{VC}$  = Quantidade de calor no volume de controle;
- $\dot{m}_{as}$  = Vazão mássica de ar seco no volume de controle;
- $\dot{m}_{v,1}$  = Vazão mássica de vapor de água na entrada do volume de controle;
- $\dot{m}_{v,2}$  = Vazão mássica de vapor de água na saída do volume de controle;
- $\dot{m}_{evap}$  = Vazão mássica de água evaporada para o volume de controle;
- $h_{as,1}$  = Entalpia de ar seco na entrada do volume de controle;
- $h_{as,2}$  = Entalpia de ar seco na saída do volume de controle;
- $h_{v,1}$  = Entalpia de vapor de água na entrada do volume de controle;
- $h_{v,2}$  = Entalpia de vapor de água na saída do volume de controle;
- $h_L$  = Entalpia da água líquida.

Dividindo a equação acima pela vazão de ar seco, exprime-se a equação de energia em função das umidades absolutas à entrada e à saída do trocador:

$$\frac{\dot{Q}_{VC}}{\dot{m}_{as}} = (h_{as,2} - h_{as,1}) + [(\omega_2 \cdot h_{v,2} - \omega_1 \cdot h_{v,1}) - (\omega_2 - \omega_1) \cdot h_L]$$

Onde:

$\omega_1$  = Umidade absoluta na entrada do volume de controle;

$\omega_2$  = Umidade absoluta na saída do volume de controle;

Haja visto que no processo de saturação adiabático, a quantidade total de calor no volume de controle é nula:  $\dot{q}_{VC} = 0$ . Tem-se que a primeira parcela do lado direito da igualdade refere-se ao calor sensível e a segunda refere-se à parcela de calor latente. Sendo assim:

$$q_{sens} = (h_{as,2} - h_{as,1})$$

$$q_{lat} = [(\omega_1 \cdot h_{v,1} - \omega_2 \cdot h_{v,2}) + (\omega_2 - \omega_1) \cdot h_L]$$

Onde:

$q_{sens}$  = Calor sensível no volume de controle;

$q_{lat}$  = Calor latente no volume de controle.

A eficiência do processo de resfriamento evaporativo é dada por:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_{bu}}$$

Onde:

$\eta$  = Eficiência do processo de resfriamento evaporativo.

$T_1$  = Temperatura do ar na entrada do dispositivo;

$T_2$  = Temperatura do ar na saída do dispositivo;

$T_{bu}$  = Temperatura de bulbo úmido do ar na saída;

O resfriamento evaporativo é amplamente utilizado em aplicações de refrigeração, como torres de resfriamento, condensadores evaporativos e resfriadores de líquidos, entretanto, ainda não apresenta grande utilização na promoção do conforto térmico humano (CAMARGO, 2004). As aplicações englobam ambientes com grandes áreas, grande público, áreas industriais, ambientes que necessitem de controle de umidade e condicionamento comercial e residencial (CAMARGO; CARDOSO; TRAVELHO, 2000).

Diante disso, tem-se que o resfriamento evaporativo apresenta certas qualidades intrínsecas, como a melhoria da qualidade do ar, o baixo consumo de energia, o baixo custo de produção, de implementação e de manutenção e, ainda, não agride o meio ambiente (OLIVEIRA, 2007). Camargo (2004) sugere que sistemas de resfriamento evaporativos sejam usados como redutores do consumo de energia,

redutores de emissão de clorofluorcarbono (CFC) e CO<sub>2</sub> e gerenciadores de demanda. O pesquisador também evidencia o grande potencial do resfriamento evaporativo na promoção conforto térmico, devendo esse ser explorado.

Ressalta-se, ainda, que o princípio de funcionamento do resfriamento evaporativo é baseado no comportamento da mistura entre ar seco e vapor de água, ou seja, no ar atmosférico. Essa mistura, quando submetida a uma dada situação de temperatura e pressão, pode conter uma quantidade máxima de água. Quando essa quantidade é atingida, é dito que o ar está saturado (umidade relativa = 100%). Porém, geralmente o ar atmosférico encontra-se insaturado e apto a receber umidade (FLORES, 2009). Logo, quanto mais seco o ar, mais umidade pode ser absorvida por ele. A absorção só ocorre quando há a evaporação da água. Essa evaporação, como dito anteriormente, necessita de calor, o qual é fornecido pelo ar. Esse evento faz com que o ar seja resfriado e a umidade seja agregada ao ar. É visto que quanto maior a área de contato entre o ar e a água, maior a evaporação e, conseqüentemente, maior o resfriamento. Nesse processo, o calor referente ao resfriamento do ar (calor sensível) é utilizado na evaporação da água (calor latente), que aumenta a umidade absoluta da mistura (FLORES, 2009).

Dessa forma, o funcionamento de um sistema de resfriamento evaporativo é feito da seguinte maneira: uma corrente de ar é forçada a atravessar uma superfície sólida molhada conhecida como célula evaporativa, a qual pode ser feita de papel, cerâmica ou outros materiais porosos. Essa célula funciona como um meio de troca de calor e massa, ou seja, o calor é fornecido a água, essa evapora e fornece massa ao ar, aumentando a sua umidade. Para que o sistema funcione de maneira correta, o trocador deve sempre estar úmido, para isso, uma bomba de recirculação de água é utilizada de maneira a fornecer umidade ao trocador durante todo o período de operação. Sobre esse aspecto, Flores (2009, p. 31) afirma que “o resultado é um equipamento de grande eficiência, compacto, simples, durável e de baixa manutenção que produz ar limpo e de excelente qualidade, não saturado e resfriado até 12°C abaixo da temperatura do ar externo”. A figura 3 demonstra uma representação de um sistema de resfriamento evaporativo.

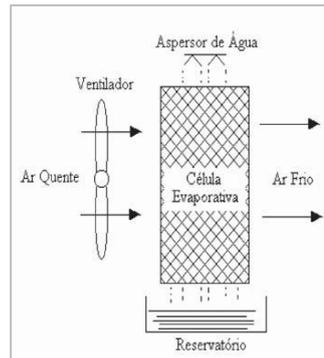


Figura 3 – Sistema de resfriamento evaporativo

Fonte: Camargo (2004, p. 70).

### 2.1.4 Ciclo de Refrigeração Baseado na Compressão do Vapor

Refrigeração é o termo usado quando um sistema é mantido em uma temperatura inferior ao seu entorno (CREDER, 2004). Para que isso seja possível, são necessários equipamentos de refrigeração. Segundo Flores (2009), os equipamentos de refrigeração convertem trabalho em calor. Nessa medida, eles atuam de forma a remover calor do ambiente a ser climatizado por meio de operações de absorção e de rejeição de calor, realizadas pelos seus componentes. Para isso, os equipamentos utilizam fluidos de trabalho ou fluidos refrigerantes que percorrem todo o sistema. O ciclo de refrigeração é dado por um sistema fechado, no qual circula o fluido refrigerante, de forma a executar as tarefas de absorção e rejeição de calor necessárias ao processo de climatização.

Um sistema de refrigeração simples, baseado na compressão do vapor, é composto basicamente por quatro dispositivos diferentes, sendo eles: um compressor, um condensador, uma válvula de expansão e um evaporador. A figura 4 apresenta uma demonstração do sistema.

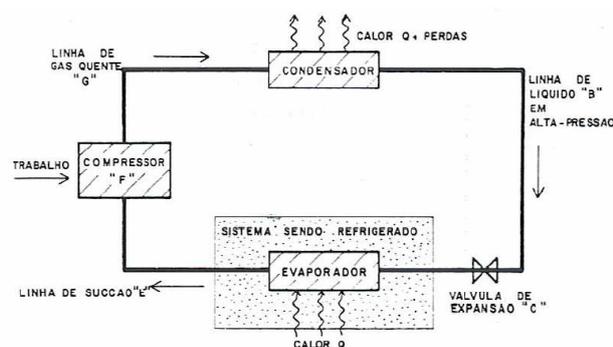


Figura 4 – Ciclo de refrigeração a compressão do vapor

Fonte: Creder (2006, p. 49).

Uma descrição do sistema mencionado acima é feita a seguir, ressaltando-se que a descrição está baseada no que Flores (2009) ponderou, iniciando pelo compressor.

O compressor é um dos elementos mais importantes do sistema, isso porque o ciclo só funciona e é interrompido pela atuação do compressor. Ele é responsável por sugar o gás refrigerante à baixa pressão e baixa temperatura do evaporador e, então, comprimi-lo até a pressão de descarga necessária a operação do sistema. A temperatura do fluido também aumenta no compressor.

O fluido refrigerante, nas condições descritas anteriormente, é enviado ao condensador, onde ocorrerá a troca de calor, tanto sensível quanto latente, com o ar do ambiente externo. Essa etapa visa a rejeição do calor absorvido do ambiente a ser climatizado para o ambiente externo. A troca de calor ocorre até que todo o gás refrigerante tenha se tornado líquido, de modo que apenas líquido esteja presente na entrada do dispositivo de expansão.

O fluido refrigerante, no estado líquido, na saída do condensador, é enviado para a válvula de expansão. Esse dispositivo tem por finalidade reduzir a pressão e a temperatura do fluido refrigerante. Isso ocorre por meio da evaporação de parte do fluido, a qual absorve calor da parte líquida restante, resfriando-a, de maneira a ajustar a temperatura do fluido com a pressão do evaporador. Assim, a temperatura do evaporador fica mais baixa que o ar do ambiente a ser climatizado.

O processo de refrigeração é concluído no evaporador. O fluido no evaporador é parte líquido e parte vapor, sendo que esse se encontra em uma temperatura inferior a temperatura do ar ambiente a ser climatizado. O calor do ambiente interno é absorvido pelo fluido, fazendo com que a transformação para vapor ocorra de maneira completa, reiniciando o ciclo e climatizando o ambiente.

O modelamento de uma máquina operando sob o ciclo de compressão foi feito somente para o evaporador, segundo Wylen, Sonntag e Borgnakke (2003). A figura 5 apresenta o diagrama esquemático.

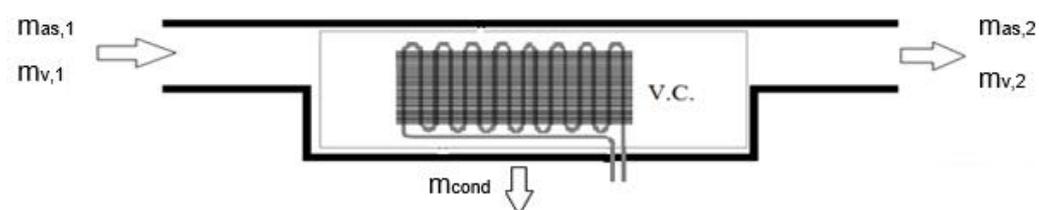


Figura 5 – Evaporador de um ar condicionado tradicional.

Aplicando a equação de energia para o volume de controle obtém-se:

$$\dot{Q}_{VC} + \Sigma \dot{m}_e \cdot (h_e) = \Sigma \dot{m}_s \cdot (h_s)$$

Onde:

- $\dot{Q}_{VC}$  = Quantidade de calor no volume de controle;
- $\dot{m}_e$  = Vazão mássica na entrada do volume de controle;
- $\dot{m}_s$  = Vazão mássica na saída do volume de controle;
- $h_e$  = Entalpia na entrada do volume de controle;
- $h_s$  = Entalpia na saída do volume de controle.

Aplicando continuidade à equação de energia, a mesma pode ser escrita em função das quantidades de entalpia referente a suas massas parciais:

$$\dot{Q}_{VC} + \dot{m}_{as} \cdot h_{as,1} + \dot{m}_{v,1} \cdot h_{v,1} = \dot{m}_{as} \cdot h_{as,2} + \dot{m}_{v,2} \cdot h_{v,2} + \dot{m}_{cond} \cdot h_L$$

Onde:

- $\dot{Q}_{VC}$  = Quantidade de calor no volume de controle;
- $\dot{m}_{as}$  = Vazão mássica de ar seco no volume de controle;
- $\dot{m}_{v,1}$  = Vazão mássica de vapor de água na entrada do volume de controle;
- $\dot{m}_{v,2}$  = Vazão mássica de vapor de água na saída do volume de controle;
- $\dot{m}_{cond}$  = Vazão mássica de água condensada para o volume de controle;
- $h_{as,1}$  = Entalpia de ar seco na entrada do volume de controle;
- $h_{as,2}$  = Entalpia de ar seco na saída do volume de controle;
- $h_{v,1}$  = Entalpia de vapor de água na entrada do volume de controle;
- $h_{v,2}$  = Entalpia de vapor de água na saída do volume de controle;
- $h_L$  = Entalpia da água líquida.

Dividindo a equação acima pela vazão de ar seco, exprime-se a equação de energia em função das umidades absolutas à entrada e à saída do trocador:

$$\frac{\dot{Q}_{VC}}{\dot{m}_{as}} = [h_{as,2} - h_{as,1}] + [\omega_2 \cdot h_{v,2} - \omega_1 \cdot h_{v,1} + (\omega_1 - \omega_2) \cdot h_L]$$

Onde:

- $\omega_1$  = Umidade absoluta na entrada do volume de controle;
- $\omega_2$  = Umidade absoluta na saída do volume de controle;

Tem-se que a primeira parcela do lado direito da igualdade refere-se ao calor sensível e a segunda refere-se à parcela de calor latente. Sendo assim:

$$q_{sens} = (h_{as,2} - h_{as,1})$$

$$q_{lat} = [(\omega_2 \cdot h_{v,2} - \omega_1 \cdot h_{v,1}) + (\omega_1 - \omega_2) \cdot h_L]$$

Onde:

$q_{sens}$  = Calor sensível no volume de controle;

$q_{lat}$  = Calor latente no volume de controle.

Para o fluido refrigerante no evaporador:

$$q_f = \frac{\dot{Q}_{V.C}}{\dot{m}_{as}}$$

$q_f$  = Calor do fluido no volume de controle.

A medida do desempenho de um ciclo de refrigeração pode ser obtida por meio do Coeficiente de Performance (COP). O COP é uma grandeza adimensional que relaciona a taxa de transferência de calor no evaporador e a potência de compressão, de maneira a avaliar a eficácia do ciclo. O COP é dado por:

$$COP = \frac{\dot{Q}_E}{\dot{W}_C}$$

Onde:

COP = Coeficiente de performance;

$\dot{Q}_E$  = Taxa de refrigeração

$\dot{W}_C$  = Potência de compressão.

### 2.1.5 Sistemas de Condicionamento Híbrido

O desenvolvimento sustentável é uma preocupação geral nos dias atuais. Impactos ambientais relacionados a alta e crescente demanda por energia elétrica são cada vez maiores e importantes. Sendo assim, soluções que visem a redução ou a desaceleração do crescimento dessa demanda, bem como uma maior eficiência energética, são alternativas ambientalmente mais corretas. No Brasil, tanto em ambientes residenciais quanto comerciais, boa parte da energia elétrica consumida é utilizada na operação de equipamentos de ar condicionado (VIANNA; BAUCHPIESS, 2013).

Tendo em vista a afirmação acima, é possível observar que há um campo de atuação relacionado à melhoria dos sistemas voltados a climatização. Sistemas convencionais de condicionamento de ar consomem uma grande quantidade de energia elétrica, além de afetar negativamente o meio ambiente. Sendo assim, o desenvolvimento de tecnologias inovadoras é de grande importância nessa área. Sistemas híbridos de climatização combinam duas ou mais tecnologias de maneira a aproveitar as características intrínsecas de cada uma dessas tecnologias, além de melhorar o aproveitamento das condições climáticas regionais em favor do processo de promoção do conforto térmico humano.

Existem vários tipos de sistemas híbridos de climatização, nos quais diversas tecnologias são empregadas no método de funcionamento. Estudos demonstram a utilização de sistemas convencionais de climatização em operação conjunta com diferentes outros sistemas, tais como o resfriamento evaporativo direto e indireto, sólidos e líquidos dissecantes, entre outros. Há também uma grande variedade de configurações que utilizam as mesmas tecnologias, mas de maneiras diferentes. Esse fato confirma que o desenvolvimento e a utilização de sistemas híbridos de climatização possuem grande relevância no meio científico e tecnológico.

Um estudo realizado na Universidade de Brasília implementou um sistema híbrido de climatização para promoção do conforto térmico humano, em um laboratório, utilizando, de modo acoplado, uma unidade convencional de condicionamento e uma unidade de resfriamento evaporativo. O sistema é apresentado na figura 6. Nesse estudo, foi obtida uma economia de energia elétrica de aproximadamente 67% quando se compara o sistema híbrido ao convencional. Dentre as vantagens associadas ao sistema híbrido, listadas no estudo estão a eficiência na promoção do conforto térmico, melhor qualidade do ar, melhor nível de umidade, ar mais limpo, utilização de compressores menores e menor quantidade de fluido refrigerante, entre outras. O estudo afirma que instalações residenciais, comerciais e industriais devem fazer uso de sistemas híbridos visando a eficiência energética (FLORES, 2009).



Figura 6 – Sistema híbrido de climatização laboratório Lavsi da UnB  
Fonte: Flores (2009, p. 36).

Outro estudo realizado na Universidade de Brasília usa as ferramentas de identificação de sistemas para projetar controladores que operem, baseados na eficiência energética, em um sistema híbrido de climatização que utiliza uma unidade convencional de condicionamento de ar e outra de resfriamento evaporativo. (VIANNA; BAUCHPIESS, 2013). A figura 7 demonstra o sistema híbrido projetado.

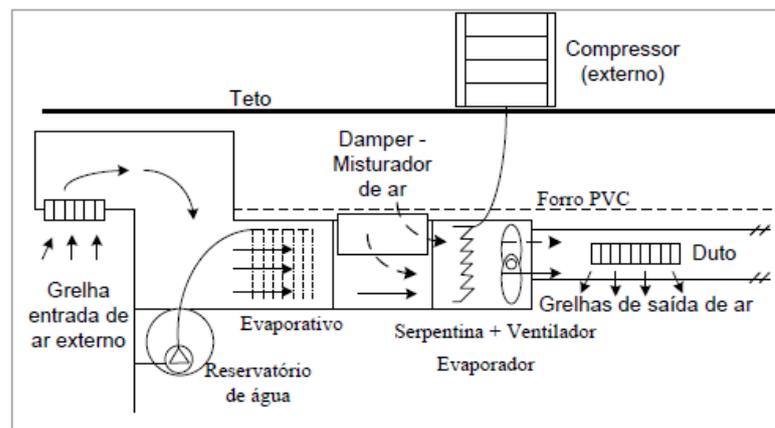


Figura 7 – Exemplo de sistema híbrido  
Fonte: Vianna e Bauchpiess (2013).

Com base na bibliografia estudada, é possível observar a plena utilização de sistemas híbridos para promover o conforto térmico com um bom desempenho. Vários sistemas apresentam certa similaridade com o projeto desenvolvido neste trabalho; fato que demonstra a viabilidade do estudo realizado. A utilização da automação e do controle para auxiliar o funcionamento de sistemas híbridos de maneira a proporcionar

os benefícios descritos é parte integrante do trabalho. Sendo assim, estudos sobre controle de processos também foram efetuados.

## 2.2 Fundamentos de Controle e Automação

### 2.2.1 Sistema de Controle

O controle automático possui um papel importante na história do avanço da sociedade moderna. Com a melhoria das técnicas de controle automático, podem ser vistos progressos relacionados aos processos industriais, além da otimização de processos dinâmicos, a melhora da produtividade e a diminuição dos trabalhos árduos e repetitivos. Nesse contexto, o conhecimento nessa área é de grande importância para engenheiros e cientistas (OGATA, 2003).

Controlar um processo nada mais é que manter as variáveis de interesse dentro de uma faixa de operação aceitável, possibilitando a operação conveniente da planta a ser controlada. A busca por valores ótimos de operação também está relacionada ao controle, sendo esse valor ótimo conhecido como *setpoint*. Além disso, o controle de processos visa evitar condições instáveis e exibir e armazenar dados do processo (BEGA, 2006)

Um sistema de controle é a junção de diversos componentes que agem em combinação, de maneira a garantir o alcance de objetivos ou resultados predeterminados. Esses resultados estão relacionados com o controle de plantas e processos. Isso significa que um sistema de controle visa atingir a operação ótima de uma planta, bem como garantir a execução de ações necessárias a um processo para que os objetivos possam ser alcançados. Tais processos e plantas estão submetidos a distúrbios. Esses sinais afetam a variável de saída de forma negativa, podendo se tratar de distúrbios internos ou externos; logo, cabe ao sistema de controle lidar com tais adversidades para manutenção do controle (OGATA, 2003).

Alguns termos estão relacionados a qualquer tipo de processo/planta, sendo esses: variável controlada, variável manipulada, *setpoint* e erro. Ogata (2003) define a variável controlada como aquela que corresponde à saída de um sistema, sendo essa a condição que deve ser medida e controlada. Já a variável manipulada é definida como a grandeza capaz de afetar a variável controlada em determinado processo, sendo essa a grandeza que tem interação direta com o controlador. Bega (2006), por sua vez, demonstra que valor desejado (*setpoint*) é um valor ótimo de referência que deve ser mantido para as variáveis em um sistema. Por fim, o erro é a diferença entre o valor atual da variável a ser controlada e o valor desejado. Com base

nessas definições, controlar um processo ou planta consiste em um conjunto de ações que englobam: a mensuração da variável controlada para obtenção de seu valor atual, a definição de possíveis desvios (erros) dessa variável em relação ao valor desejado (*setpoint*) e a correção desses desvios por meio da atuação na variável manipulada (OGATA, 2003).

Nessa medida, um sistema que utilize a estratégia de controle descrita acima é conhecido como sistema de controle de malha fechada ou sistema de controle com realimentação. Bega (2006) afirma que o controle por realimentação é o mais comum e apresenta uma grande aplicação prática, uma vez que esse tipo de controle possibilita o não conhecimento dos distúrbios que afetam o processo, bem como os efeitos causados por esses. O controle em malha fechada utiliza a diferença (erro) entre a variável controlada (PV) e o valor desejado (SP), obtida por meio de um comparador, para efetuar as ações de controle necessárias no processo. Nesse caso, o sinal de erro atuante é, então, realimentado no controlador de modo a garantir a adequação da variável controlada com o valor ótimo desejado. Sendo assim, esse tipo de controle implica na utilização de realimentação para eliminação do erro do sistema. Como dito anteriormente, uma das principais vantagens desse tipo de sistema é que a realimentação garante que a resposta do sistema seja insensível a possíveis perturbações, tanto internas como externas, que possam afetar o processo ou planta a ser controlada (OGATA, 2003). A figura 8 ilustra uma representação esquemática de um sistema de controle em malha fechada com seus componentes.

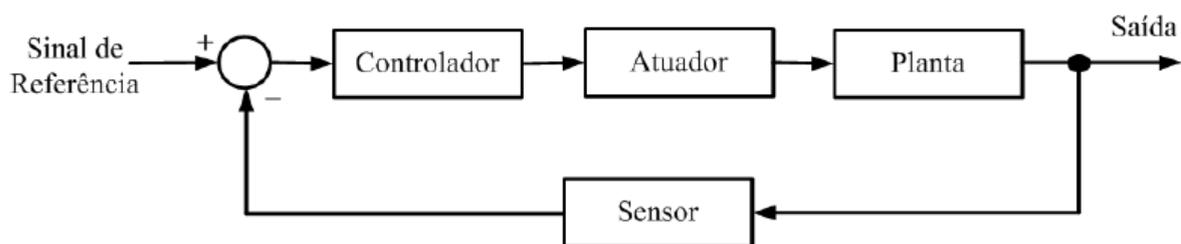


Figura 8 – Diagrama de um sistema de controle com realimentação  
Fonte: Araújo et al. (2012).

Na prática, um sistema de controle em malha fechada é constituído por uma série de dispositivos que garantem a realimentação do erro visando o controle. Primeiramente, sensores medem a variável de processo. Vários tipos de sensores podem ser utilizados, dependendo da variável a ser medida. A seguir, o sinal obtido é enviado ao controlador por meio de transmissores. O controlador, então, compara o valor da variável controlada com o valor desejado, obtendo, assim, o sinal de erro

atuante. Nessa medida, o controlador é o elemento mais importante da malha de controle, uma vez que é responsável pela tomada de decisões para corrigir a variável controlada a partir do erro atuante obtido. O elemento final de controle é responsável pela atuação no processo. Isto ocorre pela atuação na variável manipulada do processo, geralmente, por meio de uma válvula de atuação (BEGA, 2006). Logo, o controle em malha fechada é uma das melhores estratégias de controle para uma planta, sendo, por isso, a estratégia escolhida para a implementação do sistema híbrido de climatização para controle de temperatura e de umidade.

### **2.2.2 Ações de Controle**

Como definido na seção anterior, todo processo possui algumas informações associadas ao controle do mesmo, sendo elas: a variável de processo ou controlada (PV), a variável manipulada (MV) e o valor desejado para a variável a ser controlada (SP). O sinal relativo a PV é enviado ao controlador, onde é comparado com o SP, de maneira a obter o valor do erro do estado da variável. Com relação a esse erro, o controlador executa as ações para a correção. Essas ações de controle podem ser dadas de diversas maneiras, com base em algoritmos definidos.

Ressalta-se, ainda, que há, no mercado, uma variedade de controladores disponíveis, cada um apresentando vantagens e desvantagens em relação à função a ser desempenhada. Nesses controladores, o processamento do erro é feito de maneira diferente, por meio de algoritmos que determinam as ações de controle, os quais, por sua vez, determinam os efeitos corretivos executados na planta ou no processo a ser controlado. Ademais, existem alguns tipos básicos de controle, sendo que esses podem ser usados de maneira individual ou em conjunto (BAYER; ARAÚJO, 2010). Essas ações de controle serão melhor delineadas na sequência.

#### **Controle *on-off***

Esse tipo de controle também é conhecido como controle liga-desliga ou controle de duas posições. Essa denominação se deve ao fato de que o elemento apresenta apenas duas posições fixas, sendo elas ligado e desligado, resultando em um controlador de grande simplicidade. Nessa ação, o sinal relacionado à variável controlada (PV) é comparado com o sinal de referência (SP), obtendo-se, assim, o

erro por meio do qual a ação de controle é baseada. Se o erro é negativo, ou seja, a saída é maior que o valor desejado, o atuador é desligado. Já no caso oposto, quando o sinal de saída é menor que o valor de referência solicitado, o atuador é então ligado para corrigir o erro. Essa lógica também pode ser reversa (BEGA, 2006; BAYER; ARAÚJO, 2010). A figura 9 demonstra o funcionamento de um controle liga-desliga.

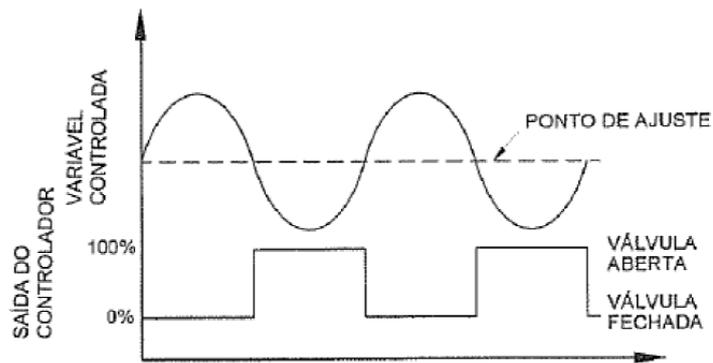


Figura 9 – Ação de controle liga-desliga  
Fonte: Bega (2006, p. 461).

Uma melhor configuração para o controlador *on-off* é a implementação de uma zona morta de controle, conhecida como zona diferencial ou zona de histerese. Como o controlador liga-desliga possui apenas dois estados, o número de partidas do elemento final de controle é muito grande, podendo causar o seu desgaste. Desse modo, a definição dessa zona de histerese aumenta o intervalo de valores aceitáveis em torno do valor desejado (SP). Com o aumento dessa faixa, a frequência de oscilação do processo diminui e as intervenções realizadas pelo elemento final de controle também, aumentando a vida útil do sistema (BAYER; ARAÚJO, 2010). Demonstra-se, na figura 10, o funcionamento de um controlador liga-desliga com histerese.

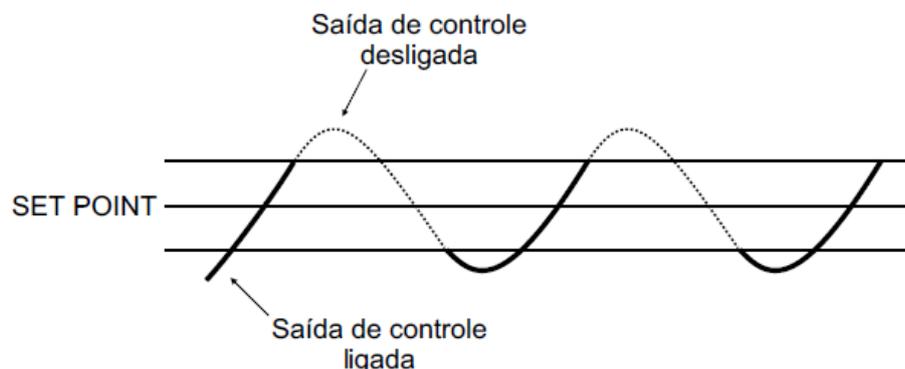


Figura 10 – Funcionamento controlador liga-desliga com histerese  
Fonte: Therma (2007, p. 6).

As principais vantagens de um controlador que opera sob esse tipo de ação de controle são a simplicidade de implementação e operação, bem como o baixo custo associado a ele. Já como desvantagem, considera-se: a oscilação constante da saída dentro dos limites de atuação que, além de não garantir um controle preciso, ainda pode vir a desgastar os elementos finais de controle e, até mesmo, o controlador, haja vista o grande número de intervenções necessárias para que o controle seja realizado (BAYER; ARAÚJO, 2010).

Em vista das vantagens e das desvantagens antes assinaladas, o controlador liga-desliga possui grande aplicação na indústria, isso porque em processos nos quais um controle fino da variável de processo não é tão importante, sendo certas oscilações permitidas, é possível usufruir dos benefícios de um controle *on-off*. Por exemplo, sistemas de segurança e sistemas de proteção de equipamentos são exemplos de sistemas industriais que operam baseados na ação de controle *on-off*. Dentre os principais controladores para esse tipo de aplicação, destacam-se os termostatos, os pressostatos e as chaves de nível (BEGA, 2006).

### **Controle Proporcional**

A ação de controle proporcional pode ser entendida como uma melhoria implementada ao controlador liga-desliga. Esse modo de controle também opera com base no erro do sistema, ou seja, na diferença entre o *set point* (SP) e o valor da variável controlada (PV). Entretanto, diferentemente do controle *on-off*, o controle proporcional não apresenta somente dois estados, já que uma saída contínua é gerada de maneira proporcional ao erro atual do sistema. Sendo assim, é visto que o controlador somente atuará no sistema quando existir um erro, e essa atuação será dada em uma relação de proporcionalidade com o valor atual do erro. Em outros termos: se o erro é nulo, nenhuma ação de controle será tomada (BAYER; ARAÚJO, 2010).

Como dito anteriormente, a saída de um controlador proporcional é baseada no erro de modo proporcional, sendo essa ação representada pela equação abaixo.

$$m(t) = K_c \cdot e(t)$$

Sendo:

$m(t)$  = sinal de saída dado pelo controlador;

$K_c$  = ganho proporcional;

$e(t)$  = erro dado pela diferença entre SP e PV atuais.

Pela equação acima, é possível observar que nenhum componente dinâmico está presente na ação de controle proporcional. Isso faz com que o controlador proporcional seja dependente apenas do sinal atual do erro, não sendo importante nem a velocidade nem a duração desse erro. Sendo assim, o sinal de saída gerado por esse tipo de controlador apresenta um comportamento constante quando o erro é fixo em um valor. Logo, a saída só varia com a variação do sinal de erro recebido do sistema (BEGA, 2006).

Salienta-se, ainda, que o parâmetro utilizado na configuração de um controlador proporcional é o ganho proporcional ( $K_c$ ). O  $K_c$  nada mais é do que o valor da relação entre o erro e a variável de saída gerada pelo controlador, sendo o  $K_c$  limitado por uma relação de proporcionalidade com as saídas máximas e mínimas do controlador (BAYER; ARAÚJO, 2010). Na indústria, o mais comum é a utilização de banda proporcional ( $B_p$ ) ao invés do ganho. A  $B_p$  é definida como o erro necessário para provocar uma variação de 100% na saída do controlador e é representada pela divisão de 100% pelo  $K_c$  (CAMPOS; TEXEIRA, 2006). A figura 11 demonstra a curva de resposta de um controlador proporcional utilizando diferentes valores de  $K_c$ .

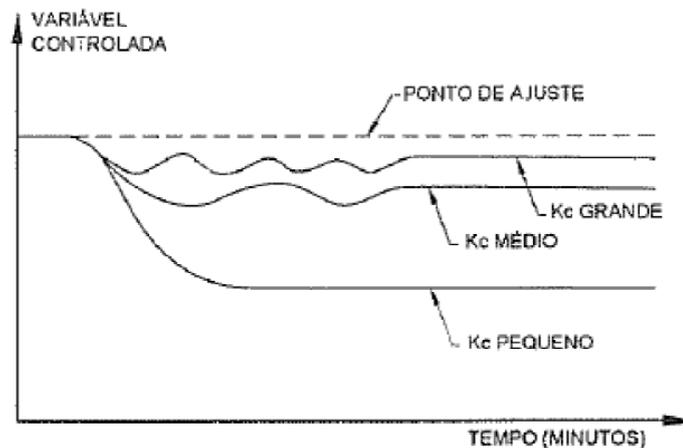


Figura 11 – Resposta do controlador proporcional para diferentes  $K_c$ 's  
Fonte: Bega (2006, p. 465).

Pode ser visto na figura 9 que, com o aumento do ganho do controlador proporcional ( $K_c$  grande), ocorre uma diminuição do erro do sistema em relação aos  $K_c$  menores, ou seja, há uma maior aproximação do estado da variável controlada e o valor desejado. Entretanto, quanto maior o  $K_c$ , maior são as oscilações da variável

e do tempo para estabilização. Sendo assim, um  $K_c$  muito alto pode instabilizar o processo que está sendo controlado.

Sobre isso, Bega (2006) afirma que a ação de controle proporcional não apresenta êxito na eliminação do erro da variável no processo de controle, visto que a variável sempre estabiliza em um ponto diferente do set point, fazendo com que sempre exista um erro. Esse erro é chamado de offset ou erro de regime permanente. Para eliminação total desse erro, outras ações de controle devem ser utilizadas. Essa característica afeta a precisão da ação de controle proporcional, todavia, esse tipo de controlador ainda é muito utilizado em processos nos quais são aceitáveis certas oscilações e erros de regime permanente. Logo, a principal vantagem desse controlador consiste na eliminação das oscilações que seriam provocadas por um controlador liga-desliga atuando no mesmo processo. Esse controlador também é largamente utilizado devido à simplicidade e ao baixo custo de implantação.

### **Controle Proporcional-Integral (PI)**

A ação integral é normalmente empregada de forma conjunta com a ação de controle proporcional. Ela não pode ser entendida como uma ação de controle isolada, uma vez que deve ser diretamente associada a ação de controle proporcional. Se essa ação pudesse ser aplicada de maneira isolada, apresentaria uma velocidade de resposta muito pequena, fato que faria com que o tempo para estabilização da variável controlada fosse muito longo (BAYER; ARAÚJO, 2010).

A atuação da ação de controle integral no processo tem duração igual ao período de persistência do erro, ou seja, quanto mais tempo o erro permanecer no processo, maior será a saída do controlador. Diferente da ação proporcional, que apresenta uma ação de controle para a correção do erro de forma instantânea, o sinal para correção do erro fornecido pela ação integral age lentamente de maneira a eliminar o erro de *off-set* completamente (BAYER; ARAÚJO, 2010).

Sobre isso, Bega (2006) afirma que a ação de controle proporcional-integral fornece um novo recurso ao controle proporcional, o qual é capaz de eliminar o erro de maneira automática, isso porque a saída da ação integral é função da integral do erro, o que significa que a velocidade de correção é proporcional ao erro. A Seguir, apresenta-se a equação que representa a ação de controle PI. Nela é possível

observar que o termo da ação integral foi adicionado à ação de controle proporcional demonstrada anteriormente.

$$m(t) = K_c e(t) + \frac{K_c}{T_i} \int_0^t e(t) dt$$

Onde:

$m(t)$  = sinal de saída do controlador;

$e(t)$  = erro;

$K_c$  = ganho proporcional;

$T_i$  = tempo integral.

O tempo integral é o intervalo de atuação da ação integral, ou seja, a variável manipulada é corrigida em intervalos regulares iguais ao tempo integral. O tempo integral também pode ser expresso em função do ganho integral. Visto que, ganho integral e tempo integral apresentam uma relação inversamente proporcional.

$$T_i = \frac{1}{K_i}$$

Onde:

$K_i$  = ganho integral.

Com base nessa relação, é visto que o aumento do ganho integral leva a uma diminuição no tempo de atuação no controle do processo. Já a diminuição do  $K_i$  ocasiona uma atuação mais demorada no controle (BAYER; ARAÚJO, 2010). A figura 12 apresenta a resposta de um controlador proporcional-integral para diferentes valores de tempo integral.

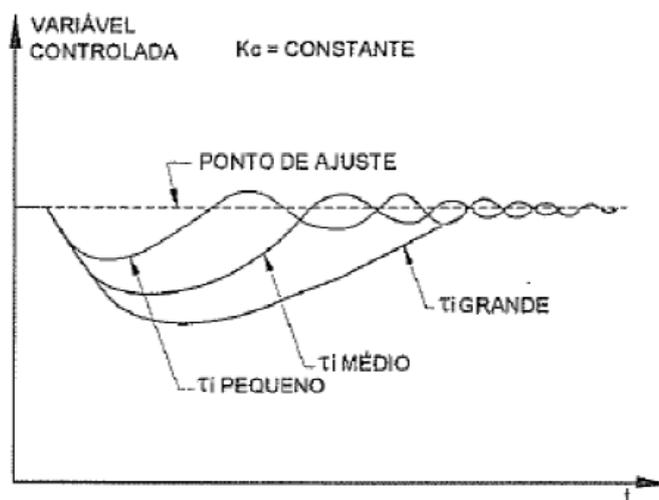


Figura 12 – Resposta do controlador PI para diferentes valores de  $T_i$ .  
Fonte: Bega (2006, p. 468).

O principal objetivo da ação de controle integral é a eliminação do erro de *offset* em regime permanente. Para isso, um tempo integral deve ser determinado. Contudo, um  $T_i$  muito longo pode levar o processo à instabilidade, enquanto que um  $T_i$  muito pequeno atrasa muito a estabilização da variável controlada. Outro ponto importante é que grandes erros, em curto espaço de tempo, não são corrigidos pela ação integral: um erro grande gera uma velocidade maior de correção, entretanto, como a ação é dependente do tempo, a resposta do controlador será lenta em relação ao erro. Nessa medida, a presença da ação integral faz com que a estabilidade da malha diminua (BAYER; ARAÚJO, 2010). Salienta-se ainda que a ação de controle proporcional-integral é a mais utilizada em controle de processos, principalmente no controle de nível, de vazão, de pressão e de outras variáveis que não apresentam grandes atrasos (BEGA, 2006).

### **Controle Proporcional-Derivativo (PD)**

Como a ação integral, a ação derivativa não pode ser usada de maneira isolada. Essa ação de controle sempre é associada a ação proporcional para definição da ação controle proporcional-derivativa (PD). A ação derivativa tem atuação na variável manipulada de maneira proporcional à velocidade da variação do erro. O seu principal objetivo é reduzir a velocidade das variações da variável controlada, de modo a evitar a existência de mudanças bruscas no estado dessa variável (BAYER; ARAÚJO, 2010). Como na ação de controle PI, um termo relativo à ação derivativa é adicionado à equação que representa a ação derivativa. A equação para um controlador PD é demonstrada a seguir:

$$m(t) = K_c e(t) + K_c T_d \frac{de(t)}{dt}$$

Onde:

$m(t)$  = sinal de saída do controlador;

$e(t)$  = erro;

$K_c$  = ganho proporcional;

$T_d$  = tempo derivativo.

A ação derivativa soma à variável manipulada a variação do desvio do processo em certos intervalos regulares. A intensidade da ação pode ser ajustada por meio da variação desses intervalos. Esses intervalos são conhecidos como tempo derivativo ( $T_d$ ). Logo, quando o  $T_d$  aumenta, a velocidade de variação da variável controlada diminui. Na figura 13 ilustra-se o comportamento de um controlados PD para diferentes valores de  $T_d$  (BAYER; ARAÚJO, 2010). Tem-se, conforme a figura, que um  $T_d$  grande diminui a velocidade de resposta, melhorando a estabilidade do processo; enquanto que um  $T_d$  pequeno proporciona uma maior velocidade de resposta, mas compromete a estabilidade, já que aumenta as oscilações (BEGA, 2006).

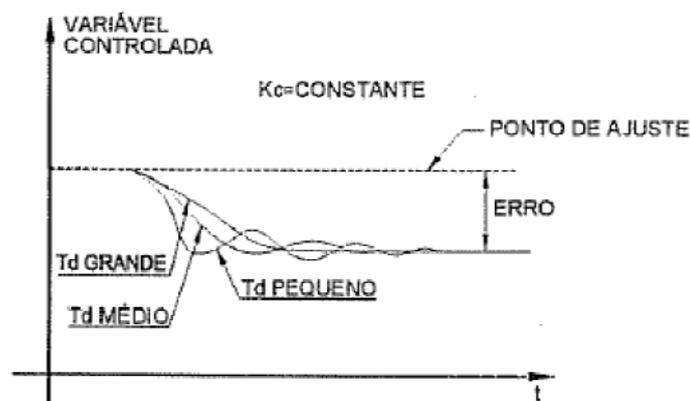


Figura 13 – Resposta do controlador PD para diferentes valores de  $T_d$ .  
Fonte: Bega (2006, p. 468).

Com base no descrito acima, é visto que a ação derivativa melhora a estabilidade do processo, sendo a sua principal função melhorar a performance do processo durante o regime transitório, ou seja, sempre que ocorra oscilações na variável controlada. Sendo assim, essa ação é adequada para processos lentos, com grandes constantes de tempo, entretanto, é muito sensível a ruídos e a variações no processo, o que dificulta a sua sintonia. Além disso, a ação derivativa não elimina o erro, sendo a existência de erro de offset evidenciada (BEGA, 2006).

### **Controle Proporcional-Integral-Derivativo (PID)**

A junção das ações de controle proporcional, integral e derivativo gera apenas um sinal de controle, o qual é conhecido controlador PID. O principal objetivo desse controlador é tirar proveito das características intrínsecas de cada umas das ações de

controle, visando a melhoria do processo controlado, tanto no regime transitório quanto permanente (BAYER; ARAÚJO, 2010). Esse controlador combina as características de estabilidade proporcionadas pelos controladores PD com a eliminação de erro em regime permanente oferecidas pelo controlador PI (BEGA, 2006). A seguir é demonstrada a equação relativa ao controlador PID:

$$m(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt$$

$m(t)$  = sinal de saída do controlador;

$e(t)$  = erro;

$K_c$  = ganho proporcional;

$T_i$  = tempo integral;

$T_d$  = tempo derivativo.

Cada um dos parâmetros demonstrados a seguir tem um peso no sinal de controle gerado. O quadro abaixo demonstra a influência de cada um desses parâmetros:

Quadro 1 – Efeito das ações de controle na resposta

| Efeito das ações de controle na resposta |                 |                  |                        |                             |
|--|-----------------|------------------|------------------------|-----------------------------|
| Resposta Controle                        | Tempo de subida | <i>Overshoot</i> | Tempo de estabilização | Erro no regime estacionário |
| P  | Diminui         | Aumenta          | Não altera             | Diminui                     |
| I  | Diminui         | Aumenta          | Aumenta                | Elimina                     |
| D  | Não altera      | Diminui          | Diminui                | Não altera                  |

Fonte: Bayer e Araújo (2010, p. 55).

A figura 14, por sua vez, demonstra a representação das curvas de resposta para as ações de controle P, PI e PID em malha fechada a partir de um sistema em regime permanente com erro zero. Nessa figura, é possível observar que o controlador PID produz maiores oscilações no sistema sob controle, entretanto diminui o tempo para a estabilização da variável e elimina o erro de regime estacionário.

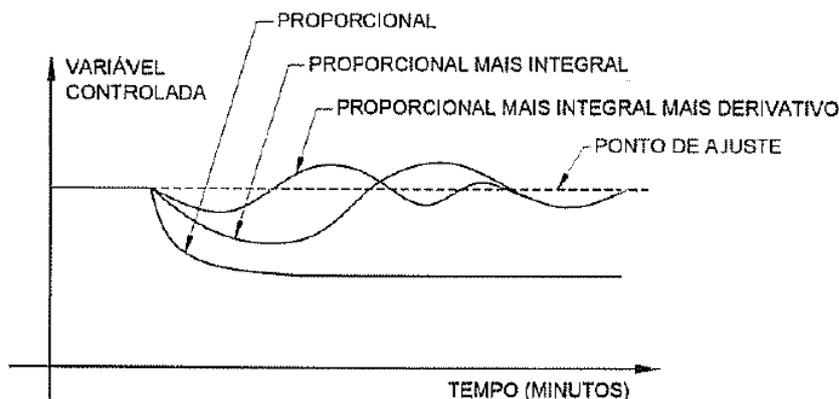


Figura 14 – Resposta para os controladores P, PI e PID  
 Fonte: Bega (2006, p. 472).

As propriedades descritas acima fazem com que controladores PID sejam largamente utilizados na indústria. Esses controladores são capazes de resolver a maioria dos desafios de controle presenciados em ambientes industriais com relativa eficiência. Além disso, a facilidade de implementação, o baixo custo e a versatilidade em estabilizar os regimes transitórios e permanentes de um processo a ser controlado garantem a expressiva utilização desse tipo de controlador nas indústrias atuais (BAYER; ARAÚJO, 2010).

Entretanto, o ajuste do controlador PID é mais complexo que o evidenciado nas suas variáveis PI e PD, uma vez que é necessário o ajuste de três parâmetros de controle. Na teoria, o PID é uma alternativa de controle relativamente melhor, porém, na prática, a utilização conjunta das ações proporcional, integral e derivativa nem sempre é a melhor opção, sendo que a escolha da ação a ser utilizada ocorre em função de diversos fatores do processo. Logo, a escolha das ações de controle é crítica, sendo que aspectos como a qualidade do controle, os custos e a facilidade de implementação e operação devem ser levados em conta (BEGA, 2006).

### 2.2.3 Sensores e Atuadores

Praticamente todo o sistema de automação existente é composto por controladores que interagem com o ambiente por meio da leitura de sinais fornecidos por sensores e do controle de atuadores que modificam as condições do ambiente (BARCELLOS, 2005). Em todos os ramos de atuação da automação, é necessário determinar as condições dos sistemas para poder modificá-los. Os principais

elementos responsáveis por essa tarefa são os sensores e os atuadores, uma vez que esses verificam e interferem no ambiente (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2011).

Os atuadores executam as ações determinadas pelo sistema de controle. Eles são elementos de campo capazes de interagir e de modificar o ambiente através da execução das instruções de controle. Os atuadores modificam a variável controlada de um sistema, geralmente trabalhando com potência elevada. Normalmente, as limitações para a aplicação dos atuadores são a tensão de saída e as características do controlador (BARCELLOS, 2005; THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2011). São exemplos de atuadores: Válvulas; Relés; Cilindros; Motores e Solenoides.

Já os sensores são dispositivos sensíveis a alguma forma de energia presente no ambiente com a qual relaciona informações sobre a grandeza que precisa ser medida. Os sensores são elementos de campo que agem como captadores de dados para o controlador. Normalmente, são sensíveis a grandezas como temperatura, umidade, pressão, entre outras. Através dessa sensibilidade, eles enviam sinais, geralmente elétricos, para o controlador. Os sensores podem ser tanto analógicos quanto digitais (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2011). Ressalta-se, ainda, que algumas vezes, é necessário o uso de transdutores para condicionar os sinais fornecidos por um sensor em sinais elétrico padronizados. Um sensor pode conter um ou mais transdutores transmitindo sinais analógicos ou digitais para o controlador de maneira a fornecer as condições do ambiente (BARCELLOS, 2005).

#### **2.2.4 Microcontrolador**

O desenvolvimento de processadores potentes e de pequeno porte, juntamente com a acessibilidade a linguagens de programação e custos flexíveis acabaram por impulsionar o uso de sistemas microcontrolados nas últimas décadas. Atualmente, microcontroladores estão presentes em uma gama de equipamentos eletrônicos proporcionando redução dos custos, compactação de equipamentos, robustez e substituição de um grande número de componentes nos projetos de sistemas (MARTINS, 2005; MOREIRA; PORTELA; SILVA, 2013)

Um microcontrolador é um componente eletrônico que comporta todo o sistema de um microprocessador e seus periféricos integrados em uma só plataforma. Sistemas microcontrolados são dotados de inteligência programável, uma vez que contém todos os componentes de um computador de forma mais simplificada, sendo

eles: Unidade lógica e aritmética, unidade central de processamento, memória de programas, memórias de dados e entradas e saídas de periféricos (PRATES, 2009).

Nessa medida, sistemas microcontrolados podem ser utilizados no controle lógico de processos, uma vez que as ações lógicas executadas durante a sua operação são baseadas na interpretação dos estados de seus periféricos como: LED's, resistências, válvulas, relés, sensores e vários outros. Sendo assim, microcontroladores proporcionam facilidade no desenvolvimento de projetos, tanto em software quanto em hardware, pois há uma integração entre o processamento e os periféricos de uma maneira mais intuitiva e simples, dando espaço para a criatividade e imaginação do projetista (MARTINS, 2005; PRATES, 2009).

Dos controladores atuais, o Arduino é bastante utilizado. A plataforma de prototipagem Arduino é baseada nos microcontroladores Atmega, os quais são muito versáteis. Isso possibilita a utilização da placa em aplicações de instrumentação embarcada e automação de sistemas. O Arduino possui *software* e *hardware* livres (*Open Source*), fato que possibilita o uso gratuito e a contribuição de toda a sociedade para o desenvolvimento da tecnologia. A placa apresenta características de computação física que proporcionam a interação com o meio ambiente por meio de sistemas digitais que se relacionam com sensores e os atuadores para realizar medições de variáveis no ambiente, processar dados e tomar decisões de controle de modo a atingir os objetivos definidos (SOUZA et al.,2011; ARAÚJO et al.,2012).

A plataforma possui diversos modelos que apresentam diferentes configurações. Entretanto, a maioria dos modelos conta com entradas e saídas digitais, entradas analógicas, saídas analógicas - *Pulse Width Modulation* (PWM), protocolos de comunicação, comunicação serial, entre outros recursos. O Arduino possui uma camada de software (*bootloader*) implementada na placa, que dispensa o uso de programadores para o chip, facilitando a sua utilização. Já no ambiente de desenvolvimento, A *Integrated Development Environment* (IDE) do Arduino utiliza uma linguagem de programação baseada em C/C++ por meio de uma interface intuitiva e simples instalada no computador (SOUZA et al.,2011; ARAÚJO et al.,2012).

Nesse contexto, é possível observar muitas vantagens na utilização da placa de prototipagem Arduino. São elas: capacidade de controlar e comunicar diferentes hardwares no ambiente, receber e tratar dados, realizar cálculos e tomar decisões, além de possibilitar a fácil alteração tanto dos componentes quanto da programação utilizada durante a execução dos projetos. Sendo assim, ela permite o projeto e

construção de soluções completas para a aplicação em qualquer área e qualquer nível de atuação (SOUZA et al.,2011; ARAÚJO et al.,2012).

### **2.2.5 Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados**

A utilização de sistemas de automação de grande complexidade gera a necessidade de um maior controle das informações e dos dispositivos presentes no sistema. Esse controle é alcançado por meio da utilização de interfaces homem – máquina. Essa necessidade motiva a criação de sistemas de supervisão e aquisição de dados, os quais são utilizados para rastrear e monitorar dados referentes a um processo. Isso é feito por meio da monitoração de variáveis importantes, bem como das ações a serem tomadas pelo operador e pelo sistema automático (BARCELLOS, 2005).

Sistemas de supervisão e aquisição de dados relacionam os atuadores, os sensores, os controladores e as redes de comunicação. Por meio desses, o sistema recebe sinais vindos dos dispositivos de controle em campo, normalmente um controlador, e envia sinais de saída para que o mesmo possa atuar no ambiente por meio dos atuadores instalados na planta. Tudo isso é realizado por meio da utilização de recursos da computação e de comunicação, os quais possibilitam um melhor controle do processo, usando recursos gráficos e multimídia apresentados de forma amigável para o operador (BARCELLOS, 2005).

Sendo assim, as principais funções de um sistema de supervisão e aquisição de dados são: monitorar as variáveis de controle relevantes, supervisionar as ações de controle, tanto automáticas quanto realizadas pelo operador, armazenar e demonstrar dados relativos ao processo, de maneira historiadora e em tempo real e proporcionar forma de interpretar e avaliar o desempenho geral do sistema.

O sistema de supervisão desenvolvido nesse trabalho foi concebido na plataforma da *Microsoft* para criação de interfaces e aplicativos para o *Windows - Windows Forms Application*. Essa *graphical interface user (GUI)* é baseada na tecnologia *.NET Framework* e fornece um ambiente de programação orientada a objetos propício para o desenvolvimento de aplicações bem elaboradas para sistemas *Windows*. Com relação a programação do software de supervisão, é necessário um ambiente integrado de desenvolvimento (IDE). A IDE utilizada no projeto foi o

Microsoft Visual Studio Community 2015 sendo programada na linguagem C Sharp (C#). O software desenvolvido é apresentado na seção seguinte.

### **3 METODOLOGIA**

Em vista do exposto, apresenta-se, agora, a descrição metodológica dos caminhos de pesquisa trilhados para a realização do presente projeto, o qual objetiva controlar a temperatura e a umidade do ar utilizando um sistema de condicionamento híbrido. Nessa medida, descrever-se-á a planta a ser utilizada no controle, bem como os métodos e as estratégias de controle a serem empregadas no desenvolvimento do projeto.

Primeiramente, um estudo sobre sistemas de resfriamento híbrido foi realizado, a partir do qual foi possível elaborar uma revisão teórica sobre os fundamentos de climatização e automação necessários para o desenvolvimento do projeto idealizado. Esse estudo foi demonstrado na seção anterior. Em seguida, tendo em vista a definição do sistema a ser desenvolvido, com o auxílio do orientador desta pesquisa, foi escolhido o protótipo baseado no submetido ao INPI, conforme dito anteriormente. O sistema desenvolvido é descrito a seguir.

#### **3.1 Descritivo do Sistema**

O sistema desenvolvido caracteriza-se por apresentar propriedades híbridas de climatização de ar, combinando o resfriamento evaporativo com a refrigeração fundamentada no ciclo de compressão do vapor. Baseado nisso, essa configuração de máquina possui três modos de operação distintos: resfriamento com umidificação, resfriamento com secagem e ventilação. Os principais elementos da unidade de condicionamento de ar são demonstrados a seguir, sendo que a figura 15 demonstra um fluxograma do sistema desenvolvido. Os elementos do sistema híbrido de climatização são:

1. Elemento cerâmico poroso de troca de calor e massa;
2. Ventilador;
3. Unidade refrigeradora de água;
4. Bomba hidráulica;

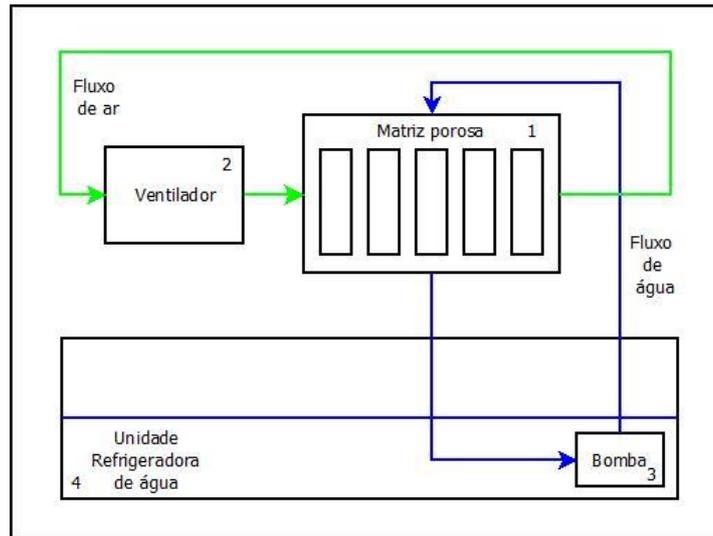


Figura 15 – Representação do sistema de climatização.

Os processos de resfriamento do ar, tanto com secagem quanto com umidificação, ocorrem no elemento cerâmico poroso, o qual funciona como meio de troca de calor e massa entre o ar e a água. O processo de troca ocorre naturalmente, contanto que exista um fluxo de ar e que a matriz cerâmica esteja úmida.

A umidade presente no elemento cerâmico poroso é fornecida por meio de um fluxo constante de água proporcionado por uma bomba hidráulica. O bombeamento ocorre a partir do reservatório presente na unidade de refrigeração de água, sendo esta levada até a parte superior da matriz porosa, onde, por efeito higroscópico e por ação da gravidade, os poros são saturados. O restante de água goteja espontaneamente, seguindo novamente para o reservatório.

O ventilador é responsável por forçar o ar através do trocador cerâmico, onde o ar será resfriado conforme as características necessárias. Já a unidade refrigeradora de água é constituída pelos elementos de máquina descritos na seção refrigeração baseada no ciclo de compressão do vapor. Sendo eles: compressor, condensador, evaporador e duto de expansão. Essa unidade é responsável por resfriar a água até a temperatura necessária para a operação do sistema de condicionamento com secagem.

A temperatura do trocador cerâmico poroso é a mesma da água presente no reservatório, uma vez que ambos estão em equilíbrio. Nessa medida, se a temperatura da água no reservatório for menor que a temperatura de orvalho do ar de entrada, o processo de resfriamento com secagem ocorre. Se a temperatura da água no reservatório for mantida igual, ou superior, a temperatura do bulbo úmido do ar de

entrada, o processo de resfriamento com umidificação ocorre. Sendo assim, o controle da temperatura e da umidade, bem como os modos de operação são baseados no controle da temperatura da água no reservatório.

Logo, a automação entra nesse ponto, coletando informações do ar de entrada, definindo os parâmetros de temperatura e de umidade necessários, interpretando os dados, definindo as ações de controle e, por fim, atuando no ambiente para a realização dos objetivos de controle de umidade e temperatura. Isso é feito por meio do sistema de controle e automação desenvolvido.

Esse sistema conta com elementos sensores para medir a temperatura e a umidade relativa do ar, tanto de entrada quanto de saída, e para aferir a temperatura da água presente no reservatório. Quanto aos atuadores, o equipamento possui três, sendo dois deles com ações de controle *on-off*: bomba hidráulica e unidade refrigeradora de água; e um ventilador com estratégia de controle PID. O microcontrolador Arduino, juntamente com os sensores e atuadores são responsáveis por estabelecer o controle em malha fechada necessário ao sistema.

A próxima seção descreve o projeto do controlador baseado na plataforma Arduino para o alcance dos objetivos previstos.

### **3.2 Desenvolvimento do Controlador**

Para o projeto do controlador utilizado pelo sistema de climatização híbrido foi empregado o ambiente integrado de desenvolvimento Arduino IDE 1.6.8 fornecido pela organização de mesmo nome. A linguagem de programação utilizada é baseada em C++, facilitando a criação de rotinas, funções e loops que realizam todas as tarefas necessárias ao funcionamento do controlador. Além disso, a IDE oferece algumas bibliotecas de programação pré-desenvolvidas para a realização de algumas tarefas, como a leitura de sensor e estabelecimento de controle PID. O desenvolvimento do controlador é apresentado abaixo.

Os programas desenvolvidos no IDE do Arduino possuem duas funções principais: *setup* e *loop*. O *setup* é a parte do código que é executada apenas uma vez e é responsável pela definição e inicialização das variáveis, configuração do hardware e definição das bibliotecas. Já o *loop* é a parte do programa que é repetida em ciclos com intervalos definidos de tempo. Nessa função são criadas as tarefas que

determinam o funcionamento contínuo do controlador. Além das funções principais, é possível a criação de funções auxiliares para facilitar o funcionamento do controlador.

Dentre as principais tarefas a serem realizadas pelo controlador desenvolvido estão: a inicialização do sistema, o estabelecimento de comunicação, a aquisição de dados, a tomada de decisões e a atuação. A figura 16 apresenta o fluxograma do funcionamento do controlador, demonstrando as principais tarefas a serem executadas, as quais são descritas detalhadamente a seguir.

A inicialização do controlador é efetuada na função `setup`. Nessa função são adicionadas as bibliotecas: `dht.h` – leitura do sensor de umidade relativa do ar; `dallastemperature.h` – leitura dos sensores de temperatura; `onewire.h` – comunicação por um fio; `pid.h` – utilizada para estabelecimento do controle `pid`. Além disso é efetuada a definição e inicialização de todas as variáveis necessárias, bem como a configuração dos pinos utilizados na placa. A configuração da comunicação serial também é realizada nessa função. Feito isso, o programa do controlador está inicializado e o modo `loop` pode ser iniciado.

A seguir é estabelecida a comunicação serial do controlador com o software de supervisão e aquisição de dados. Todas as tarefas a serem executadas no `loop` do controlador só são iniciadas após o estabelecimento da comunicação entre os dois. Isso é feito por meio de uma função no Arduino que identifica se a comunicação serial está disponível e pronta para ser executada. A comunicação do PC e da placa Arduino se dá por meio de um cabo USB, sendo o mesmo cabo utilizado para a gravação do programa no microcontrolador. Toda a comunicação desenvolvida entre os dois componentes está baseada em *strings*, que são vetores que contém uma cadeia de caracteres. O controlador recebe uma *string* vinda do sistema de supervisão que contém os valores de *setpoint* para temperatura e umidade relativa do ar, separadas por um delimitador. Essa *string* é então quebrada no delimitador para obtenção das variáveis SPT (setpoint de temperatura do ar) e SPU (setpoint de umidade relativa do ar), que em seguida são convertidas para valores inteiros para que possam ser usadas pelo controlador. O mesmo ocorre no sentido inverso da comunicação. Visto que quinze variáveis são enviadas do controlador para o sistema de monitoramento em cadeias de caracteres, sendo essas processadas no sistema receptor. Essas variáveis auxiliam no controle e possibilitam a monitoração do sistema de climatização híbrida. Destaca-se ainda que o sistema de climatização é desligado quando a comunicação entre o PC e o Arduino é interrompida.

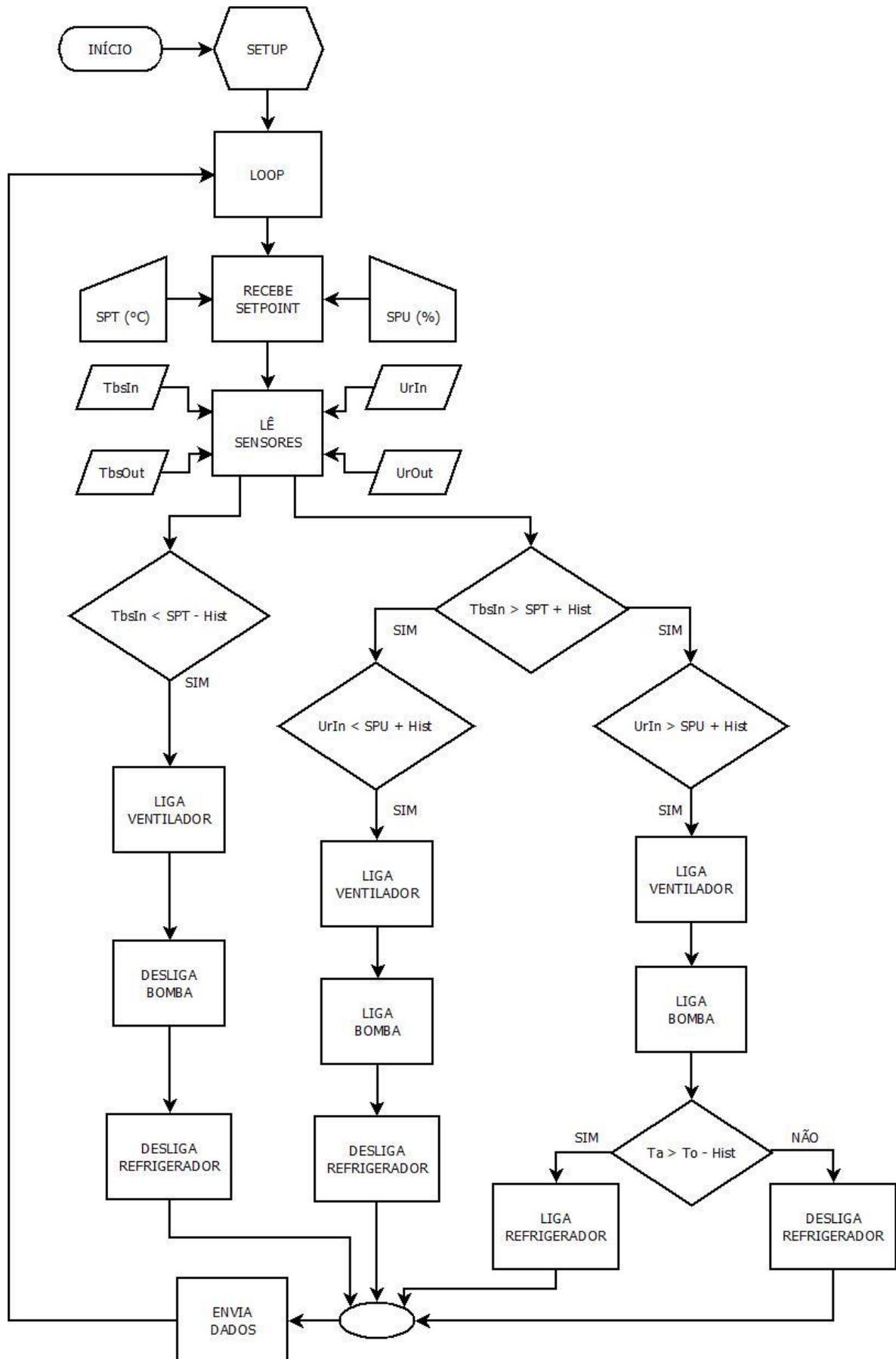


Figura 16 – Fluxograma de funcionamento do controlador

A aquisição de dados é a próxima etapa a ser executada pelo controlador. Nessa etapa são lidos os sensores, bem como o estado de alguns pinos da placa de prototipagem. Ao todo, quinze variáveis são obtidas nessa fase, sendo resultante da leitura direta dos sensores ou da aplicação de funções específicas desenvolvidas para a manipulação dos dados obtidos. Temperatura de bulbo seco, umidade relativa do ar e temperatura da água são obtidas diretamente pela leitura do sensor, já a temperatura de bulbo úmido, ponto de orvalho, umidade absoluta e os estados dos pinos são obtidos por funções desenvolvidas. Essa leitura é executada todas as vezes que o *loop* do controlador é solicitado. Sendo assim, essa parte do controlador tem por função captar os dados do campo necessários para a operação do sistema de condicionamento híbrido durante todo o período de funcionamento.

Baseado nos dados recebidos, é feita a tomada de decisão sobre o modo de operação do sistema de climatização pelo controlador. Essa etapa é apresentada no fluxograma da figura 16, sendo representada pelos losangos. O controlador é fundamentado em cinco decisões que envolvem a temperatura de bulbo seco do ar, a umidade relativa do ar e a temperatura da água no reservatório, respectivamente. Essas decisões caracterizam os modos de operação ventilação, resfriamento com secagem e resfriamento com umidificação, sendo avaliadas cada vez que o *loop* é executado. A partir dessa decisão, são tomadas as ações de controle para a modificação do ambiente conforme necessário.

O último passo a ser efetuado pelo controlador é a execução das ações de controle necessárias. Para isso, foram criadas funções específicas para cada um dos modos de operações apresentados. As funções são responsáveis por controlar o funcionamento dos atuadores, como o acionamento ou desligamento da bomba hidráulica. O controle dos atuadores é feito por meio do nível lógico enviados aos relativos pinos na placa de prototipagem Arduino, sendo o controle da bomba hidráulica e da unidade refrigeradora de ar do tipo *on-off* e o dos ventiladores é um controle Proporcional-Integral ajustado de maneira experimental. Todos os estados são atualizados a cada vez que o *loop* do controlador é executado.

Feito isso, o projeto do controlador utilizado no sistema híbrido de climatização foi concluído, sendo a próxima etapa o desenvolvimento do software de supervisão e aquisição de dados, o qual é apresentado na etapa seguinte.

### 3.3 Desenvolvimento do Software de Supervisão

O desenvolvimento da interface gráfica de supervisão do equipamento de condicionamento híbrido de ar foi efetuado no ambiente Microsoft Visual Studio Community 2015. A programação na IDE é bastante intuitiva, sendo disponibilizado um formulário do Windows onde são adicionados os elementos necessários ao desenvolvimento da GUI como botões, caixas de texto, gráficos, entre outros. Esses componentes recebem a programação específica, a qual descreve as tarefas a serem realizadas baseadas na ocorrência do evento e nas propriedades de cada componente. Como dito anteriormente, a linguagem C Sharp - C# - foi utilizada para a programação da GUI. A figura 17 apresenta uma das telas da interface gráfica desenvolvida, em operação, com todos os seus componentes.

Baseado nisso, a interface gráfica foi construída em grupos de objetos semelhantes. Os blocos criados foram: comunicação, variáveis, modo de operação, atuadores e setpoint, os quais são descritos abaixo.

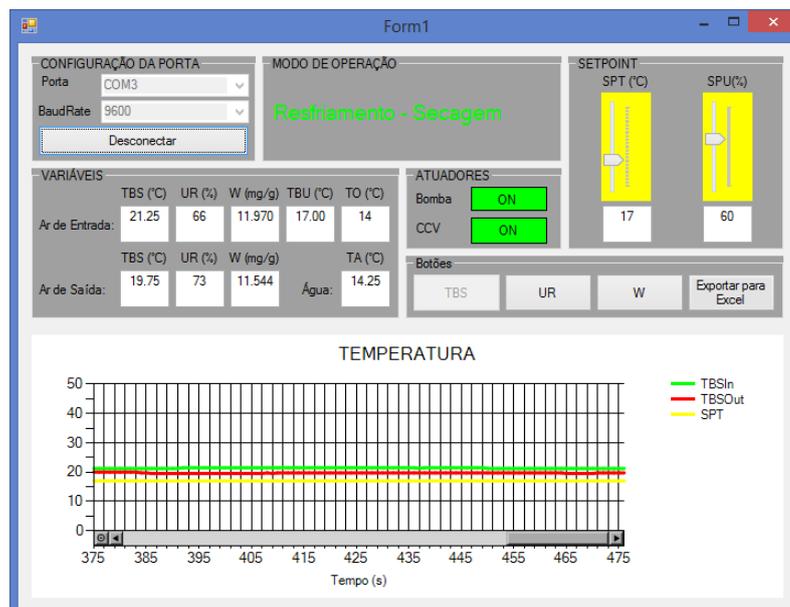


Figura 17 – Sistema de supervisão.

No grupo comunicação foram adicionadas dois combobox ou caixas de combinação e um botão. O primeiro combobox apresenta as opções de portas COM disponíveis para a conexão. O segundo disponibiliza as opções de *baudrate*, ou seja, a taxa de transmissão dados em que a comunicação será efetuada. Já o botão é utilizado para conectar e desconectar o sistema de supervisão com o microcontrolador. Para estabelecer a comunicação entre o controlador e sistema,

foram necessários dois componentes específicos que não aparecem na interface gráfica: um *timer* e um *SerialPort*. O *SerialPort* define os parâmetros necessários a comunicação serial, enquanto o *timer* define o intervalo de tempo em que o sistema de supervisão envia dados ao controlador.

O bloco variáveis apresenta as variáveis recebidas do controlador por meio da comunicação serial. São apresentadas as variáveis do ar de entrada e do ar de saída. Temperatura de bulbo seco, umidade relativa, umidade absoluta, temperatura de bulbo úmido, temperatura de orvalho são apresentadas para o ar de entrada. Já para o ar de saída são demonstradas a temperatura de bulbo seco, de bulbo úmido e umidade absoluta. Além disso, a temperatura da água no reservatório é apresentada.

O bloco modo de operação apresenta como está funcionando o equipamento dentro dos modos operacionais definidos. São eles: Resfriamento com umidificação, resfriamento com secagem e ventilação. Enquanto o bloco atuadores demonstra o estado dos atuadores em cada modo de atuação específico.

A definição dos valores desejados para as variáveis de interesse é feita no bloco *setpoint*. Nesse bloco foram adicionados dois *sliders* onde é possível parametrizar os valores de temperatura e umidade relativa almejados.

O último grupo de componentes na interface exhibe os gráficos de controle de temperatura, umidade relativa e absoluta do ar. No gráfico de temperatura são demonstrados o *setpoint*, a temperatura do ar entrada e de saída. O mesmo acontece para a umidade relativa do ar, onde são expostos o *setpoint*, a umidade relativa do ar de entrada e de saída. Já para a umidade absoluta, não existe um *setpoint* definido.

Com relação a manipulação de dados, ao iniciar a operação do sistema, a interface cria uma tabela onde são armazenados todos os dados recebidos do controlador. Esses dados são dispostos em uma estrutura fixa de colunas com incrementação de linhas com o decorrer do tempo. A taxa de atualização é de 1 segundo. Um evento foi criado em um botão e é utilizado para a exportação dessa tabela no formato csv, o qual pode ser lido pelo software Microsoft Excel. Isso facilita a análise e manipulação dos dados obtidos durante o experimento.

A seção seguinte trata da implementação do sistema híbrido de climatização automatizado, descrevendo os principais componentes utilizados.

### 3.4 Implementação do Sistema

A implementação do sistema foi dividida entre o equipamento híbrido de climatização e o sistema de controle e automação. Estas etapas são apresentadas a seguir.

#### Equipamento híbrido de climatização

Como dito no descritivo do sistema, o aparato híbrido de climatização conta com quatro elementos principais. Sendo eles: elemento cerâmico de troca de calor e massa, ventiladores, unidade refrigeradora de água e bomba hidráulica. A seguir, é apresentada uma descrição mais detalhada de cada um deles.

O elemento de troca de calor e massa é o componente mais importante do sistema de climatização. Todo processo de resfriamento, com secagem ou com umidificação, é realizado nesse dispositivo. Esse elemento é construído a partir de cerâmica porosa, fornecendo um excelente meio de troca de calor para a climatização. As dimensões da matriz são: 27 cm x 31 cm x 15 cm.

Quanto ao posicionamento, o trocador cerâmico foi disposto no centro do gabinete de acrílico que envelopa o sistema de condicionamento, ficando diretamente exposto tanto ao fluxo de ar quanto ao fluxo de água provenientes de outros dispositivos do sistema de climatização. Sendo assim, é possível afirmar que a climatização é dependente da qualidade da matriz cerâmica utilizada. O elemento cerâmico utilizado no projeto é apresentado na figura 18.



Figura 18 – Elemento cerâmico poroso de troca de calor e massa.

Com relação ao fornecimento de ar, são utilizados dois ventiladores NMB Boxer, 24V de tensão contínua, 5W de potência e 0,3A de corrente máxima. Eles são posicionados na parte traseira do gabinete, proporcionando um fluxo de ar que incide diretamente na matriz cerâmica. Ventiladores de tensão contínua foram escolhidos devido a facilidade para a implantação do controle de velocidade e pelo baixo nível de ruído produzido por eles. A figura 19 apresenta o ventilador utilizado.



Figura 19 – Ventilador NMB

A unidade refrigeradora de água utilizada no projeto foi adaptada a partir de um bebedouro da marca Libell, sendo utilizado apenas o sistema de refrigeração da máquina. Esse sistema é constituído de condensador, evaporador, compressor, duto de expansão, além do reservatório de água, conforme apresentado na figura 20. O equipamento de refrigeração apresenta um consumo médio de aproximadamente 5,5kW/h com uma potência de resfriamento de 154W, segundo o fabricante.



Figura 20 – Unidade refrigeradora de água.

O último componente presente no sistema de climatização é a bomba hidráulica. Foi utilizada uma moto bomba modelo Sarlo 300 para a recirculação de água em todo o sistema de climatização. Esse modelo apresenta operação em 110V

ou 220V, potência de 7W e uma vazão máxima de 280l/h. A moto bomba foi posicionada no interior do reservatório de água da unidade de refrigeração e garante a circulação de água desse reservatório para o gabinete de climatização. Uma tubulação de retorno para a água do gabinete para o reservatório foi implementada, visto que o retorno se dá por meio da ação da gravidade, apresentando uma vazão semelhante a alcançada pela Sarlo 300, a qual pode ser ajustada através de uma válvula manual implantada. A bomba hidráulica utilizada é apresentada na figura 21.



Figura 21 – bomba hidráulica.

Nessa medida, com a junção dos componentes apresentados acima, foi implementado o sistema de climatização híbrido incorporando o resfriamento evaporativo e sistemas convencionais de refrigeração visando o controle da temperatura e umidade no resfriamento do ar, conforme definido nos objetivos. A figura 22 apresenta o sistema de climatização implementado, em sua totalidade.



Figura 22 – Sistema híbrido de climatização implementado.

## Controle e automação

Como descrito anteriormente, o sistema de controle e automação utiliza um controlador e periféricos, como sensores e atuadores, para proporcionar o funcionamento autônomo do sistema. Nessa medida, essa seção apresenta os principais componentes necessários para a implementação do controle automático projetado.

Como integrante principal tem-se o microcontrolador Arduino Mega 2560, o qual tem por objetivo o estabelecimento de um controle com realimentação de umidade e temperatura do ar. Para isso, ele proporciona a integração dos sensores e atuadores presentes no sistema de climatização. A descrição sobre a ferramenta Arduino foi abordada no referencial teórico, entretanto, uma apresentação de características relevantes da placa Mega 2560 é feita a seguir. A figura 23 apresenta o microcontrolador utilizado.

- Microcontrolador: ATmega 2560;
- Tensão de operação: 5V;
- Entradas e saídas digitais: 54;
- Saídas PWM: 15;
- Entradas analógicas: 16;
- Memória flash: 256KB;
- Clock: 16MHz;
- Uart: 4;

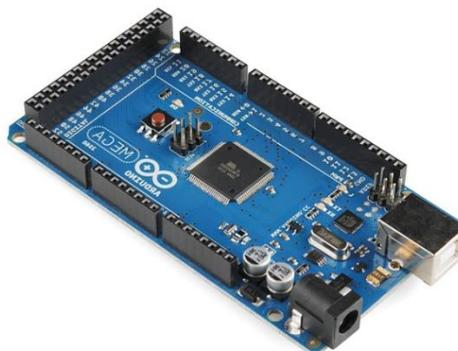


Figura 23 – Microcontrolador Arduino Mega 2560.

Quanto aos sensores, foram necessários dispositivos capazes de aferir as grandezas temperatura e umidade relativa do ar. Nessa medida, foram utilizados dois tipos de sensores, os quais são apresentados a seguir.

Levando em consideração a temperatura, o controlador necessita conhecer a temperatura do ar, tanto na entrada quanto na saída do equipamento de condicionamento. Além disso, a temperatura da água armazenada no reservatório da unidade de refrigeração também deve ser conhecida. Para isso foram utilizados três sensores de temperatura DS18B20.

Esse sensor possui uma interface de comunicação a um fio que possibilita a conexão de todos os sensores a um barramento comum. Esse barramento é então conectado a uma porta digital do controlador, fato que facilita a montagem do circuito. A leitura é realizada por meio do endereço físico de cada sensor, sendo necessária a utilização de duas bibliotecas específicas no controlador, sendo elas: `Dallastemperature.h` (leitura do sensor) e `Onewire.h` (comunicação via um fio). Outras especificações do sensor são apresentadas abaixo. A figura 24 apresenta o dispositivo utilizado.

- Sensor de temperatura: DS18B20;
- Tensão de operação: 3-5.5VDC;
- Faixa de medição: -55°C a 125°C;
- Precisão:  $\pm 0,5$  entre -10°C e 85°C;
- A prova d'água;
- Ponte de aço inoxidável;
- Interface 1 fio;



Figura 24 – Sensor de temperatura DS18B20.

Já para a medição da umidade relativa do ar, foram utilizados sensores DHT11. Esse dispositivo é um termohigrômetro digital que utiliza um termistor NTC para aferição da temperatura e um HR202 para identificação da umidade relativa, entretanto, nesse projeto, o DHT11 foi utilizado apenas para a aferição da umidade relativa do ar, tanto na entrada quanto na saída do aparato de climatização. Para a leitura desse sensor é necessária a implementação de uma biblioteca específica no

microcontrolador, DHT.h. Feito isso, o circuito interno presente no DHT11 faz a leitura dos elementos sensores e interage com o controlador por meio de uma porta de entrada analógica utilizando um sinal serial de uma via, disponibilizando assim os dados medidos. Especificações do DHT11 são apresentadas a baixo, sendo este exibido na figura 25.

- Sensor de umidade e temperatura: DHT11;
- Tensão de operação: 3-5VDC;
- Faixa de medição de umidade: 20 a 90% UR;
- Faixa de medição de temperatura: 0°C a 50°C;
- Precisão de medição de umidade:  $\pm 5\%$  UR;
- Precisão de medição de temperatura:  $\pm 2^\circ\text{C}$ ;

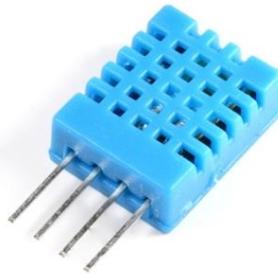


Figura 25 – Sensor de umidade relativa DHT11.

Apresentados os sensores, o foco volta-se para os atuadores. Entretanto, esses foram apresentados como partes constituintes do sistema de climatização. Sendo assim não serão abordados nessa seção. Todavia, os periféricos necessários para a atuação dos elementos finais de controle serão expostos como partes integrantes do sistema de controle e automação. Nessa medida, foram utilizados dois periféricos utilizados para o acionamento da bomba, da unidade refrigeradora de água e dos ventiladores. Esses periféricos são apresentados abaixo.

Como dito anteriormente, a bomba hidráulica e a unidade refrigeradora de água são acionadas por ações de controle *on-off* e ambas operam com tensão de 110VAC. Sendo assim, fez-se necessário o interfaceamento entre o circuito de controle, vindo do microcontrolador, e o circuito de potência fornecida pela rede elétrica. Para isso foi utilizado um módulo relé. O módulo escolhido foi SRD-05VDC-SL-C com quatro canais, o que possibilita o acionamento das duas cargas com um só periférico. O módulo relé permite o acionamento de cargas até 30VDC ou 250VAC proporcionando

o isolamento necessário entre os circuitos de controle e potência. A figura 26 apresenta o módulo relé utilizado. Outras especificações são apresentadas a seguir.

- Módulo relé SRD-05VDC-SL-C;
- Tensão de operação: 5VDC;
- Corrente de operação: 15 – 20mA;
- Tensão de saída: 30VDC a 10A e 250VAC a 10A;
- Pinos: NA, NF e Comum;
- LED indicador de status;
- Tempo de resposta: 5-10ms;



Figura 26 – Módulo Relé.

Já os ventiladores trabalham com tensão contínua na faixa de 0 a 24V e são controlados por ações de controle também contínuas. Nessa medida, foi utilizado um driver para realizar a interface entre o circuito de controle e o circuito de potência. Essa interface é feita de maneira proporcional. Ou seja, o driver mantém a relação tensão de saída/tensão de operação na mesma proporção que o sinal PWM – Pulse Width Modulation – recebido no circuito de controle. Com isso, um controle contínuo de tensão é obtido na saída do driver. O driver utilizado é do tipo ponte H baseado no chip ST L298N e possibilita o controle de velocidade de até dois motores de corrente contínua de maneira independente. No projeto desenvolvido, o driver é alimentado com uma fonte de corrente contínua de 24V, sendo esta a sua tensão de operação. As especificações do dispositivo são apresentadas a seguir, sendo que a figura 27 exhibe o driver utilizado.

- Driver motor ponte H;
- Chip: ST L298N;
- Tensão de operação: 4 – 35VDC;
- Corrente de operação: 4A;
- Tensão lógica de operação: 5VDC;
- Potência: 25W;



Figura 27 – Ponte H L298n.

A integração de todos os componentes descritos dá origem ao sistema de controle e automação implementado para o equipamento híbrido de condicionamento de ar. A seção seguinte trata dos modos de operação disponíveis no aparato de climatização desenvolvido.

### 3.5 Modos de Operação

Como ressaltado previamente, o sistema híbrido de climatização de ar desenvolvido conta com 3 modos de operação, sendo eles:

#### 3.5.1 Modo Resfriamento com Umidificação – UMID

É o modo de operação do sistema híbrido baseado no resfriamento evaporativo. Sendo assim, trabalha de maneira a alcançar o resfriamento do ar de maneira simultânea com a sua umidificação. É utilizado em situações onde a temperatura do ar é maior que a temperatura desejada e a umidade do ar é menor que a umidade de SP. Nessas condições, os estados dos atuadores são:

- Ventilador – Habilitado;
- Bomba de água – Habilitado;
- Unidade refrigeradora de água (CCV) – Desligado;

#### 3.5.2 Modo Resfriamento com Secagem – SEC

É o modo de operação do sistema híbrido que incorpora duas tecnologias de resfriamento, resfriamento evaporativo e compressão do vapor. Ou seja, esse modo

representa o resfriamento híbrido propriamente dito. O modo SEC opera buscando o resfriamento do ar juntamente com a secagem do mesmo. É utilizado em situações onde a tanto a temperatura quanto a umidade do ar são maiores que seus respectivos *setpoint*. Nessas condições, os estados dos atuadores são:

- Ventilador – Habilitado;
- Bomba de água – Habilitado;
- Unidade refrigeradora de água (CCV) – Habilitado;

### 3.5.3 Modo Ventilação – VENT

Nesse modo, a ventilação forçada proporcionada pelo ventilador é utilizada como meio de circulação do ar ambiente. É empregado em situações onde o valor desejado de temperatura já foi atingido. Nessas condições, os estados dos periféricos são:

- Ventilador – Habilitado;
- Bomba de água – Desligado;
- Unidade refrigeradora de água (CCV) – Desligado;

O quadro abaixo apresenta uma síntese dos modos de operação do sistema híbrido quanto aos estados dos elementos finais de controle disponíveis.

Quadro 2 – Modos de Operação do Sistema Híbrido

| <b>Modo de Operação</b> | <b>Estado dos Atuadores</b> |                      |            |
|-------------------------|-----------------------------|----------------------|------------|
|                         | <b>Ventilador</b>           | <b>Bomba de água</b> | <b>CCV</b> |
| UMID                    | Habilitado                  | Habilitado           | Desligado  |
| SEC                     | Habilitado                  | Habilitado           | Habilitado |
| VENT                    | Habilitado                  | Desligado            | Desligado  |

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os testes foram realizados durante um período de aproximadamente 15 horas entre os dias 30/05/2016 e 20/06/2016. Durante esses dias, houve uma variação climática, que proporcionou a utilização da bancada híbrida de climatização em diferentes condições de umidade e temperatura, possibilitando a avaliação da eficiência do sistema no controle das variáveis relativas ao condicionamento do ar. Os resultados dessa avaliação são apresentados no decorrer desta seção.

### 4.1 Sistema de Controle e Automação

Com relação ao sistema de controle e automação desenvolvido, foi visto que o controlador se mostrou eficiente na aquisição de dados a partir dos elementos sensores montados em campo, na tomada de decisões e no gerenciamento das ações executadas pelos elementos finais de controle. A interface gráfica com o usuário funcionou de maneira simples e intuitiva, facilitando assim a supervisão do processo de condicionamento de ar em tempo real, englobando variáveis como a temperatura, umidade relativa e absoluta do ar, entretanto, foram constatados alguns problemas esporádicos na comunicação entre o controlador e o computador. Fato que gerou pequenos atrasos na coleta e apresentação desses dados por meio do software de supervisão, mas nada que comprometesse o bom desempenho do sistema.

Outro ponto importante foi o controle da velocidade dos ventiladores. Foi visto que não seria possível realizar o controle de velocidade dos ventiladores por meio do algoritmo PID, baseando-se na temperatura de bulbo seco do ar da sala. De praxe, o controle de um equipamento de climatização é baseado no ar de entrada, sendo que essa prática também foi adotada nesse projeto. Como a temperatura do ar, na entrada no equipamento de condicionamento permaneceu praticamente constante, o erro do processo, ou seja, a diferença entre a temperatura de entrada e o *setpoint*, permaneceu constante. Esse comportamento do erro faz com que o controlador, trabalhando sobre o algoritmo PID, gere sinais de saída cada vez mais altos, até atingir o seu valor máximo, conforme apresentado no gráfico 1.

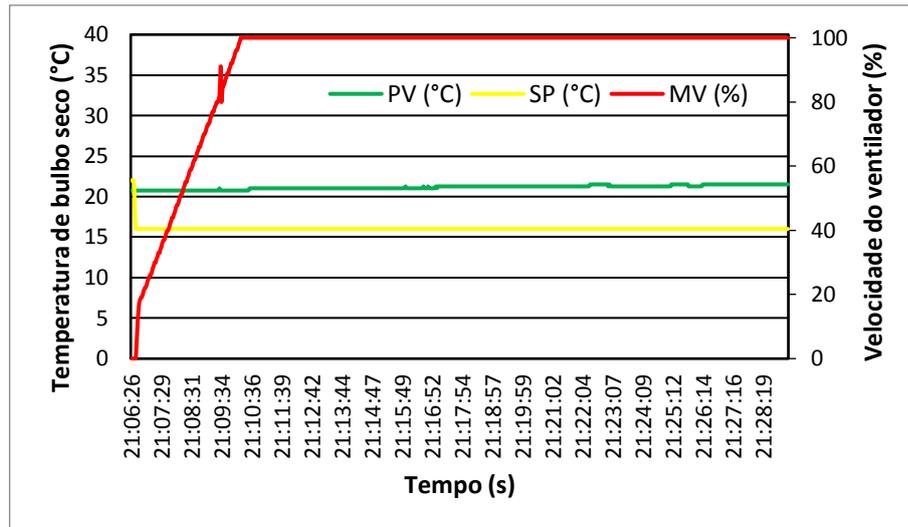


Gráfico 1 – Controle de velocidade dos ventiladores.

Esse desempenho do controlador faz com que a velocidade do fluxo de ar através do equipamento de climatização seja muito alta, fato que influencia na eficiência da bancada, uma vez que a matriz de troca de calor e massa apresenta um melhor funcionamento para baixas velocidades do ar.

Baseando-se nisso, os ventiladores de tensão contínua foram substituídos por um ventilador com motor monofásico, o qual teve sua rotação ajustada de maneira manual para que proporcionasse uma velocidade do fluxo de ar de aproximadamente 1m/s, garantindo assim uma melhor eficiência para o sistema de climatização híbrida. O software de supervisão e controlador também foram alterados para contornar esse problema. Porém, apesar do citado acima, pode-se afirmar que o sistema de automação, controle e supervisão desenvolvido alcançou o objetivo de proporcionar o controle da umidade e temperatura do ar de maneira automática e supervisionada.

A estratégia implementada para o sistema de climatização de ar no controle da temperatura e umidade do ar foi a Liga/Desliga com histerese. Sendo assim, os valores de temperatura e umidade relativa do ar são comparados com o valor de *setpoint* em conjunto com a histerese definida. Como dito nas seções anteriores, os valores de *setpoint* para temperatura e umidade relativa são inicializados em 22°C e 60%, entretanto, esses valores podem ser modificados através do sistema supervisorio, durante o funcionamento do equipamento, caso seja necessário. Já os valores de histerese definidos foram 0,5°C e 1%. A figura 28 apresenta a bancada híbrida operando sob a estratégia de controle implementada.

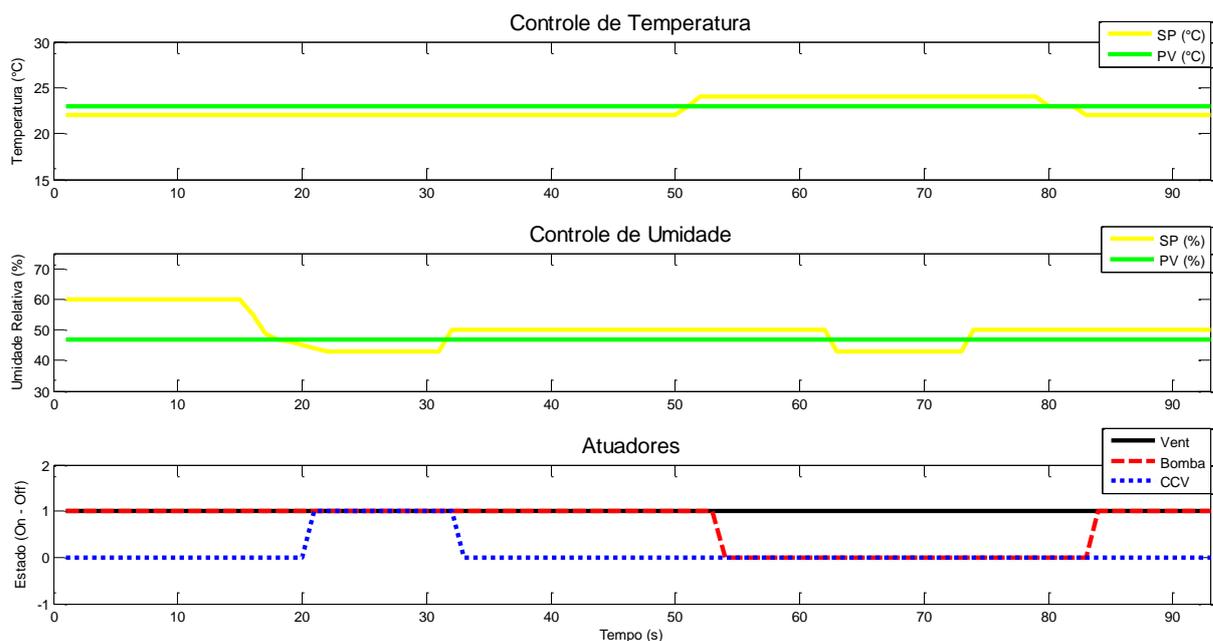


Figura 28 – Estratégia de controle implementada.

No teste apresentado acima, é possível observar o estado dos atuadores em relação as características do ar e os valores de SP definidos. Nota-se que se fez necessário ajustes no SP para obter variações no estado dos atuadores, visto que as condições do ar não se alteraram durante o teste. É sabido que o ventilador é habilitado em todos os modos de operação, fato apresentado pela curva preta no gráfico relativo aos atuadores na figura 28. Os outros elementos finais de controle apresentam comportamento baseado no modo de operação em execução.

Nos primeiros 20s do teste apresentado, o sistema operou no modo resfriamento com umidificação, posto que a temperatura do ar de entrada era maior que o SP (°C) e a umidade relativa era menor que o SP (%), ambos acrescidos das respectivas histereses. Sendo assim, ventilador e bomba hidráulica permaneceram ativados durante esse tempo.

Em seguida, o SP (%) foi reduzido de maneira gradual até que a umidade relativa do ar fosse maior que o conjunto SP (%) mais histerese. Nesse momento o modo resfriamento com secagem foi ativado, sendo evidenciado o acionamento da unidade refrigeradora de água, a qual tem o seu estado representado pela curva azul pontilhada na figura 28.

Aproximadamente no instante 33, o modo resfriamento com umidificação foi novamente habilitado, visto que a unidade refrigeradora de água foi desligada. Isso

ocorreu no momento em que a umidade relativa foi menor que o SP (%) menos a histerese.

A ação de controle seguinte foi relacionada ao controle de temperatura. Quando a temperatura do ar foi menor que o SP (°C) menos a histerese, o modo ventilação foi ativado, sendo a bomba hidráulica então desabilitada. Nessa configuração, nenhuma condição do erro relativo à umidade tem influência no funcionamento do sistema híbrido de climatização, como pode ser visto na figura 28. O modo VENT permanece ativado enquanto a temperatura do ar for menor que o SP (°C) mais histerese. Fato confirmado no gráfico “Atuadores”, onde no instante 83, o modo resfriamento com umidificação foi novamente executado, habilitando a bomba hidráulica.

Com base no descrito acima, é possível notar que a alternância entre os modos UMID e SEC é fundamentada no erro entre a umidade relativa na entrada do equipamento e o SP (%), desde que a temperatura do ar seja maior que o SP (°C). Isso ocorre devido ao fato do sistema condicionador de ar desenvolvido trabalhar apenas com resfriamento. Sendo assim, quando a temperatura do ambiente já é menor que o valor desejado, não há necessidade de climatização adicional. Nessa situação o modo VENT é ativado, garantindo apenas a circulação do ar no ambiente.

Sendo assim, pode se afirmar que valores positivos do erro, no controle de temperatura, garantem a climatização do ar em um dos modos de operação, os quais são dependentes da característica do erro no controle de umidade (erro positivo – resfriamento com umidificação, erro negativo – resfriamento com secagem). Já valores negativos do erro no controle de temperatura levam ao modo ventilação, não ocorrendo o controle da umidade do ar.

A lógica de controle descrita acima demonstrou um bom desempenho no gerenciamento dos elementos finais de controle, tendo em vista as condições de temperatura e umidade do ambiente. As ações executadas estão de acordo com o esperado para se garantir o controle da temperatura e da umidade do ar. Portanto, é possível afirmar que a estratégia de controle utilizada atendeu os requisitos projetados, sendo isso demonstrado nos resultados obtidos na avaliação do sistema híbrido.

## **4.2 Bancada Híbrida de Climatização**

Conforme enfatizado anteriormente, a montagem da bancada híbrida de climatização, como idealizado nos objetivos do projeto, foi efetuada. Sendo que essa incorporou sistemas de resfriamento evaporativo e refrigeração por compressão do vapor aplicadas no controle da umidade e temperatura no condicionamento do ar.

Para se realizar a avaliação concreta do desempenho da bancada de climatização, foram realizados dois ensaios para cada modo de operação, sendo eles: UMID, SEC e VENT. Com base nesses ensaios, foram gerados relatórios a partir do sistema de supervisão, os quais apresentam o período de realização do ensaio, os parâmetros de controle utilizados e as variáveis psicrométricas relevantes para realização da avaliação em cada um dos ensaios, sendo essas: temperatura, umidade relativa e umidade absoluta. Gráficos referentes a essas variáveis também foram desenvolvidos de maneira a apresentar o comportamento do ar durante todo o período de execução do ensaio. Os resultados dessa etapa, bem como a discussão dos mesmos, são apresentados abaixo.

### **4.2.1 Modo Resfriamento com Umidificação – UMID**

Nesse modo de operação, o ventilador é habilitado juntamente com a bomba hidráulica, enquanto a unidade de refrigeração de água permanece desabilitada. O modo UMID é ativado quando a temperatura de bulbo seco na entrada do equipamento ( $T_{bsIn}$ ) é maior que o SP ( $^{\circ}C$ ) e a umidade relativa na entrada ( $U_{rIn}$ ) é menor que o SP (%), ambos SP acrescidos de suas respectivas histereses. Nesse contexto, foram realizados dois ensaios para o modo de resfriamento com umidificação, sendo os resultados de cada ensaio apresentados por meio de um relatório de supervisão e gráficos referentes às variáveis temperatura, umidade relativa e umidade absoluta, os quais são apresentados a seguir.

Do relatório de supervisão apresentado no quadro 3, é possível observar que o sistema híbrido de climatização, operando sob as condições apresentadas, foi capaz de realizar o controle relativo a temperatura e umidade do ar conforme demonstrado pelos resultados obtidos para as variáveis relativas ao ar de saída do equipamento.

Quadro 3 – Relatório de supervisão – modo UMID – ensaio 1.

| <b>Relatório de Supervisão</b>   |            |                |                             |                 |        |
|----------------------------------|------------|----------------|-----------------------------|-----------------|--------|
| <b>Período</b>                   |            |                |                             |                 |        |
| <b>Data</b>                      | 08/06/2016 | <b>Duração</b> | 00:45:14                    |                 |        |
| <b>Início</b>                    | 19:37:49   | <b>Fim</b>     | 20:23:03                    |                 |        |
| <b>Parâmetros</b>                |            |                |                             |                 |        |
| <b>Temperatura (°C)</b>          |            |                | <b>Umidade Relativa (%)</b> |                 |        |
| Setpoint                         | 20,00      | Setpoint       | 60                          |                 |        |
| Histerese                        | 0,50       | Histerese      | 1                           |                 |        |
| <b>Ar de entrada</b>             |            |                |                             |                 |        |
| <b>Temperatura (°C)</b>          |            | <b>UR (%)</b>  |                             | <b>W (mg/g)</b> |        |
| Mín                              | 21,50      | Mín            | 50                          | Mín             | 9,714  |
| Máx                              | 22,25      | Máx            | 56                          | Máx             | 10,612 |
| Méd                              | 21,87      | Méd            | 54                          | Méd             | 10,154 |
| <b>Ar de Saída</b>               |            |                |                             |                 |        |
| <b>Temperatura (°C)</b>          |            | <b>UR (%)</b>  |                             | <b>W (mg/g)</b> |        |
| Mín                              | 19,00      | Mín            | 60                          | Mín             | 10,178 |
| Máx                              | 20,75      | Máx            | 65                          | Máx             | 10,954 |
| Méd                              | 20,05      | Méd            | 65                          | Méd             | 10,712 |
| <b>Diferença Saída - Entrada</b> |            |                |                             |                 |        |
| <b>Temperatura (°C)</b>          |            | <b>UR (%)</b>  |                             | <b>W (mg/g)</b> |        |
| Mín                              | -1,25      | Mín            | 7                           | Mín             | -0,173 |
| Máx                              | -3,00      | Máx            | 15                          | Máx             | 1,240  |
| Méd                              | -1,83      | Méd            | 11                          | Méd             | 0,558  |

Foi observada uma redução máxima na temperatura do ar em 3°C, sendo apresentado um resfriamento médio de 1,83°C para esse ensaio. Já para a umidade relativa, foi alcançada uma umidificação máxima de 15%, sendo que a média para o ensaio foi de 11%. A umidade absoluta do ar também aumentou, apresentando um máximo de 1,24mg/g e um valor médio de aproximadamente 0,56 mg/g. Isso significa que cada grama de ar seco climatizado possui, em média, 0,56mg de água a mais que o ar na entrada da bancada híbrida de condicionamento. Sendo assim, pode-se dizer que o sistema híbrido foi capaz de climatizar o ar dentro das condições esperadas, demonstrando assim a eficiência do modo de operação resfriamento com umidificação. Os gráficos 2, 3 e 4 apresentam o comportamento do ar durante o período de avaliação.

Nota-se no gráfico 2 que a TbsIn se manteve praticamente constante durante o ensaio. Sendo evidenciada uma temperatura média de 21,87°C. Porém, a temperatura do ar de saída (TbsOut) apresentou um comportamento decrescente, caracterizando assim o resfriamento. A média de TbsOut para o ensaio foi de 20,05°C,

valor dentro do esperado, considerando o SP definido e a histerese do controlador de temperatura. Sendo assim, pode-se dizer então que o sistema híbrido foi capaz de controlar a temperatura do ar, alcançando os valores desejados.

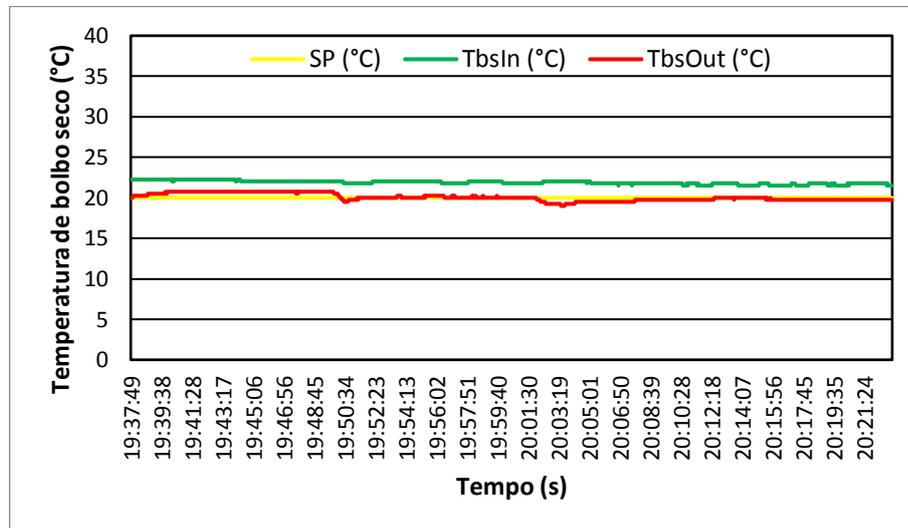


Gráfico 2 – Temperatura de bulbo seco – modo UMID – ensaio 1.

A análise da umidade presente no ar foi feita utilizando tanto a umidade relativa, quanto a umidade absoluta. É possível notar no gráfico 3 que a umidade relativa na saída (UrOut) foi maior que UrIn durante todo o período de realização do ensaio. Um comportamento semelhante foi observado na umidade absoluta do ar, onde a Wout também foi maior que Win durante o período avaliado, conforme apresentado no gráfico 4. Isso confirma o bom desempenho da bancada híbrida de climatização no processo de umidificação do ar.

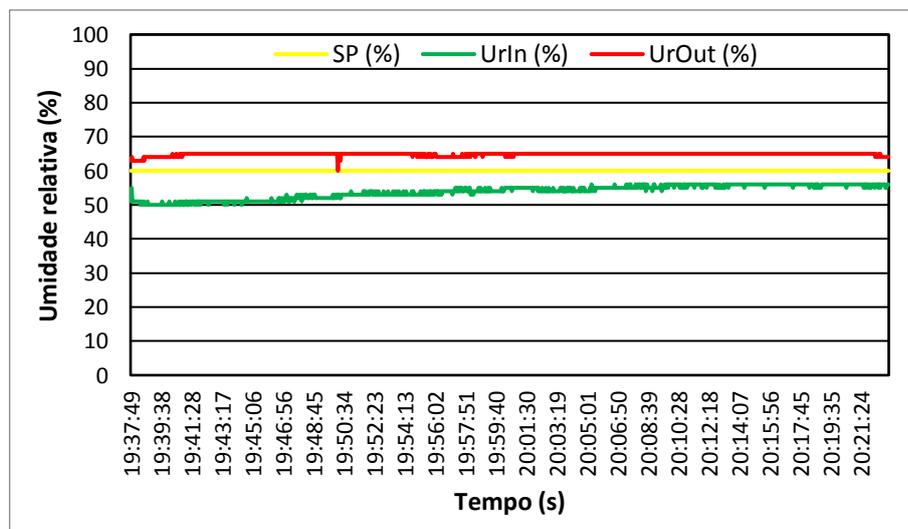


Gráfico 3 – Umidade relativa – modo UMID – ensaio 1.

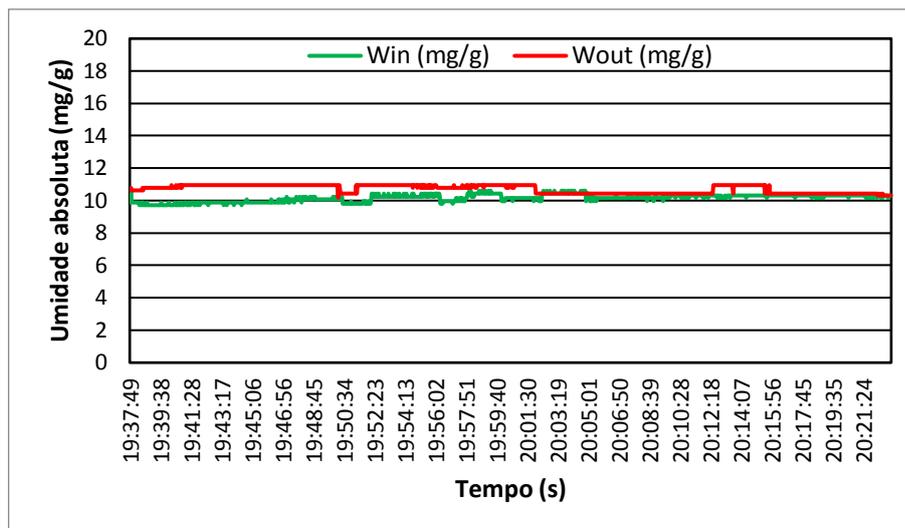


Gráfico 4 – Umidade absoluta – modo UMID – ensaio 1.

Conclui-se então que o sistema híbrido de climatização, operando sob o modo de resfriamento com umidificação (UMID), durante o ensaio 1, alcançou os objetivos de climatização propostos, para temperatura e umidade do ar.

Os parâmetros relativos ao ensaio 2 para o modo resfriamento com umidificação são apresentados no quadro 4, bem como os resultados obtidos nesse ensaio.

Os resultados alcançados nesse ensaio foram semelhantes aos obtidos no ensaio anterior. Foi visto um resfriamento médio de 1,39°C e um aumento médio de 10% na umidade relativa. Também foi evidenciado um aumento médio de 1,2mg/g na umidade absoluta, sendo atingidos valores máximos de até 2,15mg/g, aproximadamente 23% a mais de água por grama de ar seco.

Em relação ao ensaio 1, os valores médios obtidos para temperatura e umidade foram similares, porém o resfriamento máximo alcançado foi inferior, não passando de 1,75°C. Isso ocorreu devido as condições do ar no dia da realização do teste, visto que este esteve mais frio. Todavia, pode-se afirmar que o modo resfriamento com umidificação do sistema híbrido de climatização foi eficiente também no ensaio 2.

O gráfico 5 apresenta o comportamento da temperatura do ar, tanto de entrada quanto de saída, em relação ao valor desejado (SP). Como apresentado no relatório de supervisão, foi visto uma redução média em TbsOut de 1,39°C, quando comparada com TbsIn. Esse processo pode ser acompanhado na figura, onde o comportamento decrescente de TbsOut é apresentado.

Quadro 4 – Relatório de supervisão – modo UMID – ensaio 2.

| <b>Relatório de Supervisão</b>   |            |                |                             |                 |        |
|----------------------------------|------------|----------------|-----------------------------|-----------------|--------|
| <b>Período</b>                   |            |                |                             |                 |        |
| <b>Data</b>                      | 13/06/2016 | <b>Duração</b> | 00:24:07                    |                 |        |
| <b>Início</b>                    | 20:56:18   | <b>Fim</b>     | 21:20:25                    |                 |        |
| <b>Parâmetros</b>                |            |                |                             |                 |        |
| <b>Temperatura (°C)</b>          |            |                | <b>Umidade Relativa (%)</b> |                 |        |
| Setpoint                         | 20,00      | Setpoint       | 60                          |                 |        |
| Histerese                        | 0,50       | Histerese      | 1                           |                 |        |
| <b>Ar de entrada</b>             |            |                |                             |                 |        |
| <b>Temperatura (°C)</b>          |            | <b>UR (%)</b>  |                             | <b>W (mg/g)</b> |        |
| Mín                              | 20,25      | Mín            | 48                          | Mín             | 8,187  |
| Máx                              | 20,50      | Máx            | 48                          | Máx             | 8,187  |
| Méd                              | 20,48      | Méd            | 48                          | Méd             | 8,187  |
| <b>Ar de Saída</b>               |            |                |                             |                 |        |
| <b>Temperatura (°C)</b>          |            | <b>UR (%)</b>  |                             | <b>W (mg/g)</b> |        |
| Mín                              | 18,75      | Mín            | 49                          | Mín             | 8,107  |
| Máx                              | 20,00      | Máx            | 62                          | Máx             | 10,332 |
| Méd                              | 19,08      | Méd            | 58                          | Méd             | 9,390  |
| <b>Diferença Saída - Entrada</b> |            |                |                             |                 |        |
| <b>Temperatura (°C)</b>          |            | <b>UR (%)</b>  |                             | <b>W (mg/g)</b> |        |
| Mín                              | -0,50      | Mín            | 1                           | Mín             | -0,080 |
| Máx                              | -1,75      | Máx            | 14                          | Máx             | 2,145  |
| Méd                              | -1,39      | Méd            | 10                          | Méd             | 1,203  |

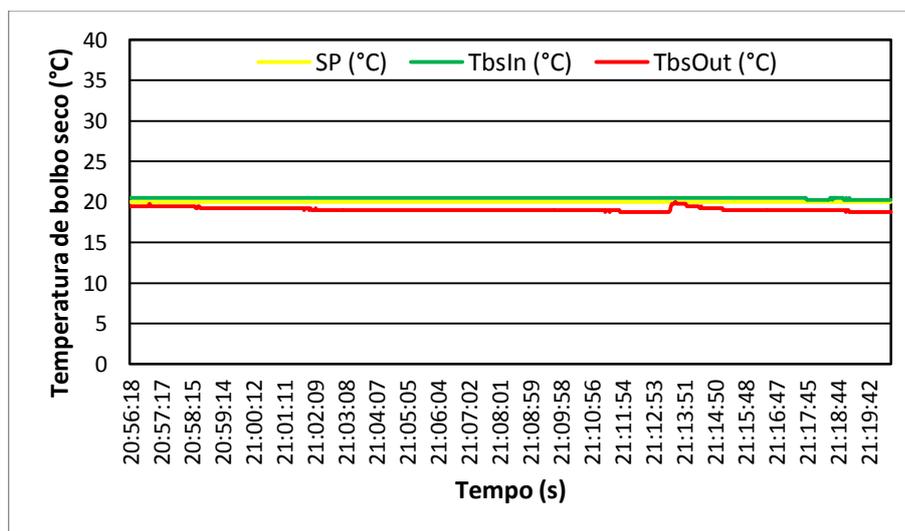


Gráfico 5 – Temperatura de bulbo seco – modo UMID – ensaio 2.

A umidificação do ar foi também alcançada ensaio 2. É possível observar no gráfico 6 que a umidade relativa do ar climatizado (UrOut) alcançou o valor SP (%)

definido. Foi visto um aumento máximo na umidade relativa de 14%, de acordo com o relatório de supervisão.

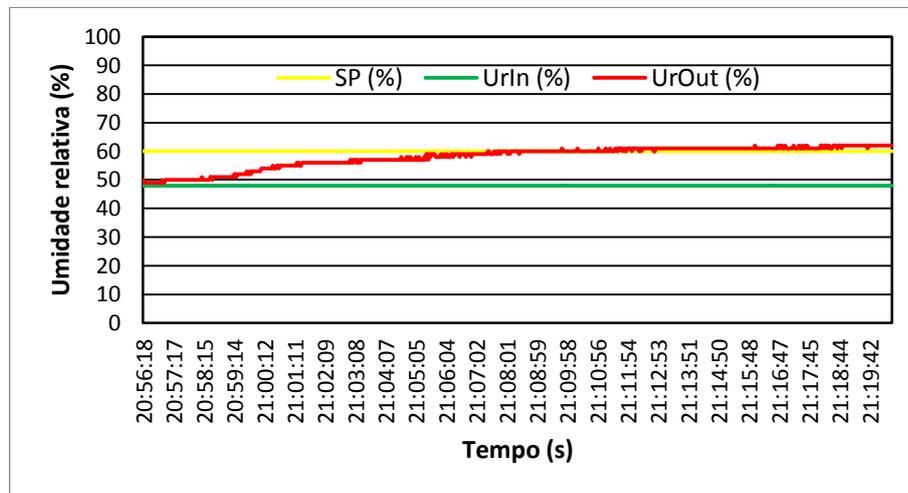


Gráfico 6 – Umidade relativa – modo UMID – ensaio 2.

Já o gráfico 7 apresenta o comportamento crescente da umidade absoluta, sendo obtido um aumento médio de 1,2mg/g entre o ar de saída e de entrada. Portanto, pode-se afirmar que o modo umidificação também se mostrou eficiente no ensaio 2.

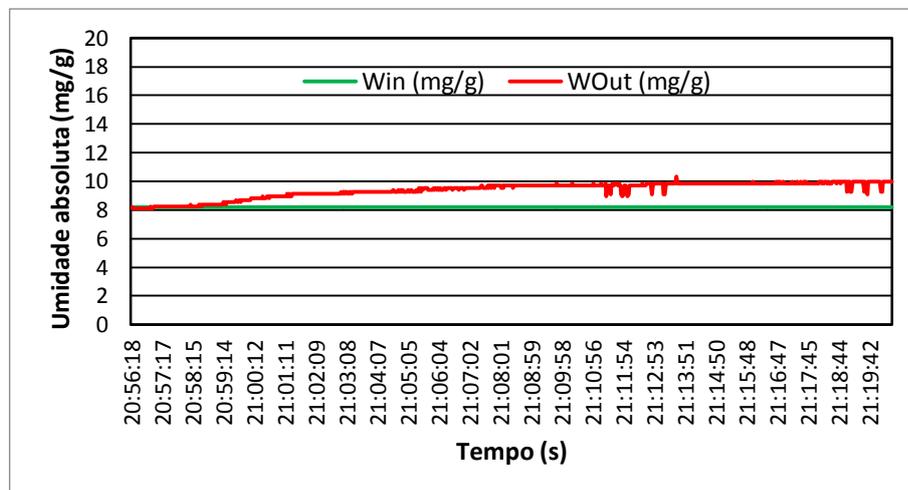


Gráfico 7 – Umidade absoluta – modo UMID – ensaio 2.

Em vista do exposto, a bancada híbrida de climatização, no ensaio 2, apresentou desempenho semelhante ao ensaio anterior, levando as condições do ar de saída da bancada até os parâmetros definidos como ideais para temperatura e umidade.

De posse dos resultados obtidos nos dois ensaios relativos a bancada híbrida de climatização operando sob o modo de resfriamento com umidificação, é possível afirmar que o protótipo desenvolvido possui a capacidade de climatizar o ar nas condições definidas, atingindo os objetivos de controle estabelecidos. O sistema se mostrou apto a condicionar o ar dentro dos parâmetros requeridos no modo UMID, visto que conseguiu fornecer ar resfriado e umidificado na saída do equipamento.

Em ambos os ensaios realizados, o sistema foi capaz de resfriar o ar em aproximadamente 10%, alcançando assim o valor desejado indicado para cada ensaio em relação ao ar climatizado. Bons resultados também foram evidenciados quanto a umidificação, onde o protótipo aumentou a quantidade de água presente no ar de maneira considerável, chegando a valores até 22% maiores que os apresentados no ar de entrada. Sendo assim, foi visto que os valores desejados, tanto para temperatura quanto para umidade, foram obtidos. Portanto, com base no descrito acima, é possível concluir que o modo resfriamento com umidificação do sistema híbrido de climatização desenvolvido apresenta um desempenho dentro do esperado, sendo capaz de condicionar o ar, dentro das características necessárias de umidade e temperatura.

#### **4.2.2 Modo Resfriamento com Secagem – SEC**

Nesse modo de operação, todos os atuadores presentes na bancada de climatização híbrida são habilitados, sendo eles: o ventilador, a bomba hidráulica e a unidade de refrigeração de água. O modo SEC é ativado quando a  $T_{bsIn}$  é maior que o SP (°C) e a  $U_{rIn}$  é maior que o SP (%), ambos *setpoint* acrescidos da histerese. Nesse contexto foram realizados dois ensaios para o modo de resfriamento com secagem, sendo os resultados de cada ensaio apresentados por meio do relatório de supervisão e gráficos referentes às variáveis temperatura, umidade relativa e umidade absoluta, os quais são apresentados a seguir.

O quadro 5 apresenta o relatório de supervisão para o primeiro ensaio do modo de operação resfriamento com secagem (SEC). Pode-se notar que houve uma mudança em relação ao valor do *setpoint* de umidade relativa. Isso ocorreu para garantir que o modo SEC fosse utilizado durante todo o período avaliado.

Quadro 5 – Relatório de supervisão – modo SEC – ensaio 1.

| <b>Relatório de Supervisão</b>   |            |                |                             |                 |        |
|----------------------------------|------------|----------------|-----------------------------|-----------------|--------|
| <b>Período</b>                   |            |                |                             |                 |        |
| <b>Data</b>                      | 07/06/2016 | <b>Duração</b> | 00:52:10                    |                 |        |
| <b>Início</b>                    | 19:25:50   | <b>Fim</b>     | 20:18:00                    |                 |        |
| <b>Parâmetros</b>                |            |                |                             |                 |        |
| <b>Temperatura (°C)</b>          |            |                | <b>Umidade Relativa (%)</b> |                 |        |
| Setpoint                         | 20         | Setpoint       | 55                          |                 |        |
| Histerese                        | 0,5        | Histerese      | 1                           |                 |        |
| <b>Ar de entrada</b>             |            |                |                             |                 |        |
| <b>Temperatura (°C)</b>          |            | <b>UR (%)</b>  |                             | <b>W (mg/g)</b> |        |
| Mín                              | 23,00      | Mín            | 60                          | Mín             | 12,445 |
| Máx                              | 24,00      | Máx            | 62                          | Máx             | 13,204 |
| Méd                              | 23,46      | Méd            | 61                          | Méd             | 12,666 |
| <b>Ar de Saída</b>               |            |                |                             |                 |        |
| <b>Temperatura (°C)</b>          |            | <b>UR (%)</b>  |                             | <b>W (mg/g)</b> |        |
| Mín                              | 20,50      | Mín            | 65                          | Mín             | 11,112 |
| Máx                              | 23,00      | Máx            | 70                          | Máx             | 13,842 |
| Méd                              | 21,57      | Méd            | 68                          | Méd             | 12,371 |
| <b>Diferença Saída – Entrada</b> |            |                |                             |                 |        |
| <b>Temperatura (°C)</b>          |            | <b>UR (%)</b>  |                             | <b>W (mg/g)</b> |        |
| Mín                              | 0,00       | Mín            | 4                           | Mín             | -2,092 |
| Máx                              | -3,25      | Máx            | 9                           | Máx             | 1,053  |
| Méd                              | -1,90      | Méd            | 7                           | Méd             | -0,295 |

É possível observar que o sistema híbrido, operando sob esse modo, obteve êxito no resfriamento e na secagem do ar conforme indicado no relatório de supervisão. Nota-se que a TbsOut foi, em média, 1,9°C menor que TbsIn. O mesmo foi observado para a umidade absoluta do ar de saída (WOut), a qual foi, em média, 0,295mg/mg menor que a umidade absoluta do ar de entrada (WIn). Entretanto o comportamento decrescente não foi evidenciado na umidade relativa. Os gráficos a seguir demonstram o comportamento do ar durante o ensaio.

O gráfico 8 demonstra a relação entre a temperatura do ar de entrada e saída com o valor desejado. Nota-se que a temperatura ambiente ficou praticamente constante em aproximadamente 23,50°C. Entretanto, um resfriamento do ar na saída do equipamento foi evidenciado, chegando a temperatura mínima de 20,5°C, com um resfriamento médio de aproximadamente 2°C. Isso mostra que o sistema híbrido de climatização está apto a resfriar o ar quando operando sob o modo resfriamento com secagem.

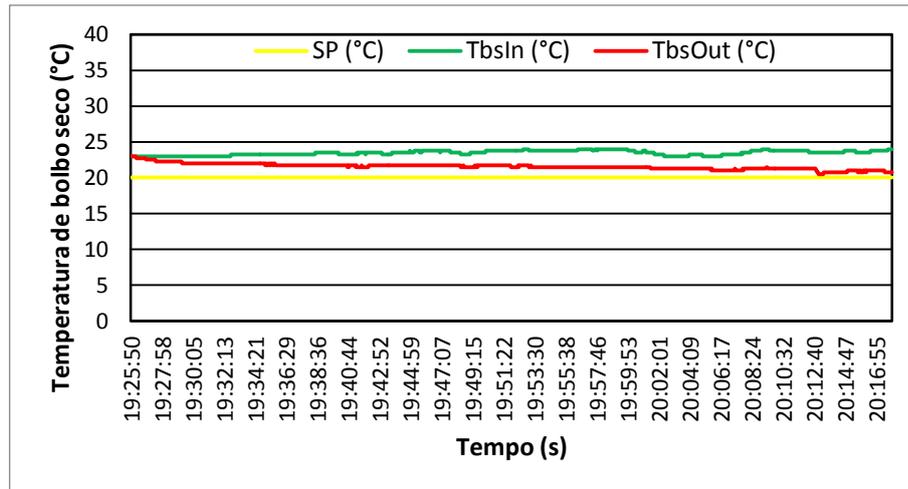


Gráfico 8 – Temperatura de bulbo seco – modo SEC – ensaio 1.

Já a análise relativa a umidade presente no ar é um pouco mais complexa. Como pode ser visto no gráfico 9, a umidade relativa do ar de entrada (UrIn) permaneceu estável em um valor de 61%. O mesmo não foi visto com a umidade relativa do ar na saída do equipamento de climatização, sendo que essa variou entre 70% e 65%, apresentando um comportamento decrescente durante a realização do ensaio. Todavia, mesmo com esse caráter decrescente, os valores obtidos foram expressivamente maiores que o valor desejado para o ensaio e maiores até que o valor da umidade relativa para o ar de entrada. Logo, não é possível analisar o modo resfriamento com secagem utilizando-se a umidade relativa. Umidade relativa define a proporção entre a quantidade de água existente no ar e a quantidade máxima que poderia existir, não apresentando, de fato, se houve ou não uma variação na quantidade de água presente no ar.

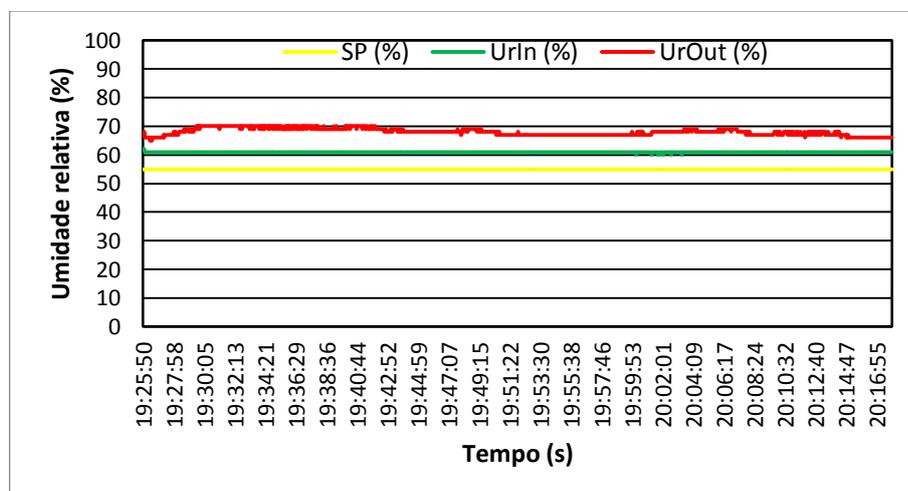


Gráfico 9 – Umidade relativa – modo SEC – ensaio 1.

Sendo assim, a avaliação da secagem do ar deve ser baseada na umidade absoluta, conceito que determina a quantidade de água presente em cada grama de ar seco. É possível notar no gráfico 10 que o sistema conseguiu realizar uma redução considerável na umidade absoluta do ar de saída quando comparado com o ar de entrada. A secagem máxima obtida foi de aproximadamente 2mg/g, sendo apresentada uma média de aproximadamente 0,3mg/g durante toda a realização do ensaio. Portanto, é possível concluir que o sistema híbrido apresentou um bom desempenho para a secagem do ar, apresentando valores até 15% mais secos.

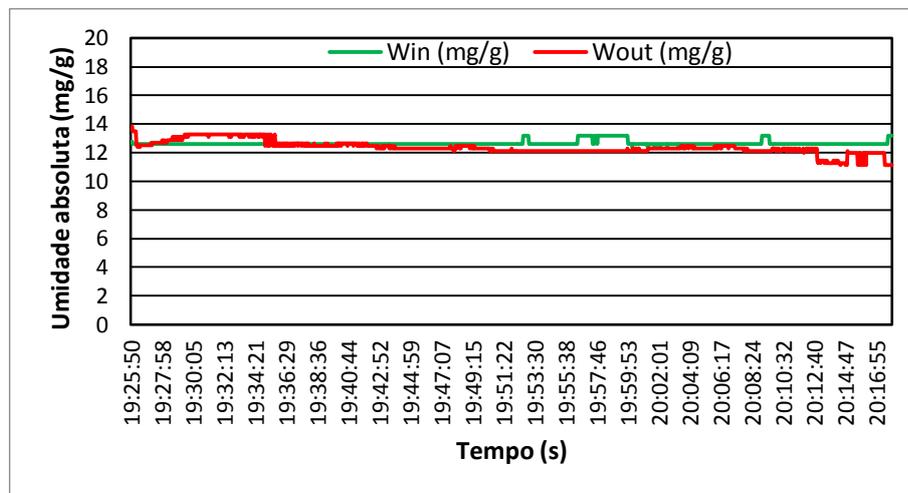


Gráfico 10 – Umidade absoluta – modo SEC – ensaio 1.

Baseado nos resultados apresentados, pode-se concluir que o sistema híbrido de climatização, operando sob o modo SEC, durante o ensaio 1, apresentou desempenho satisfatório, tanto no resfriamento quanto na secagem do ar.

Os dados obtidos no ensaio 2, realizado sob o modo de resfriamento com secagem, são apresentados no quadro 6. Os resultados encontrados foram equivalentes aos encontrados no ensaio 1, sendo que novamente o sistema de climatização híbrida demonstrou um bom desempenho no resfriamento e na secagem do ar.

Quadro 6 – Relatório de supervisão – modo SEC – ensaio 2.

| Relatório de Supervisão   |            |        |                      |          |        |
|---------------------------|------------|--------|----------------------|----------|--------|
| Período                   |            |        |                      |          |        |
| Data                      | 13/06/2016 |        | Duração              | 00:51:52 |        |
| Início                    | 21:24:51   |        | Fim                  | 22:16:43 |        |
| Parâmetros                |            |        |                      |          |        |
| Temperatura (°C)          |            |        | Umidade Relativa (%) |          |        |
| Setpoint                  | 19         |        | Setpoint             | 45       |        |
| Histerese                 | 0,5        |        | Histerese            | 1        |        |
| Ar de entrada             |            |        |                      |          |        |
| Temperatura (°C)          |            | UR (%) |                      | W (mg/g) |        |
| Mín                       | 20,25      | Mín    | 48                   | Mín      | 8,187  |
| Máx                       | 21,50      | Máx    | 49                   | Máx      | 8,928  |
| Méd                       | 20,70      | Méd    | 48                   | Méd      | 8,408  |
| Ar de Saída               |            |        |                      |          |        |
| Temperatura (°C)          |            | UR (%) |                      | W (mg/g) |        |
| Mín                       | 17,00      | Mín    | 58                   | Mín      | 8,265  |
| Máx                       | 18,50      | Máx    | 63                   | Máx      | 9,395  |
| Méd                       | 17,77      | Méd    | 60                   | Méd      | 8,737  |
| Diferença Saída – Entrada |            |        |                      |          |        |
| Temperatura (°C)          |            | UR (%) |                      | W (mg/g) |        |
| Mín                       | -1,75      | Mín    | 10                   | Mín      | -0,525 |
| Máx                       | -4,25      | Máx    | 14                   | Máx      | 1,063  |
| Méd                       | -2,94      | Méd    | 12                   | Méd      | 0,329  |

No gráfico 11 nota-se que o sistema de condicionamento foi capaz de resfriar o ar durante a realização do ensaio, atingindo uma redução de até 4,25°C em relação ao ar de entrada. Também é possível notar que temperaturas inferiores ao valor de *setpoint* foram alcançadas pelo ar de saída. Logo, o modo resfriamento com secagem se mostrou eficiente na redução da temperatura do ar.

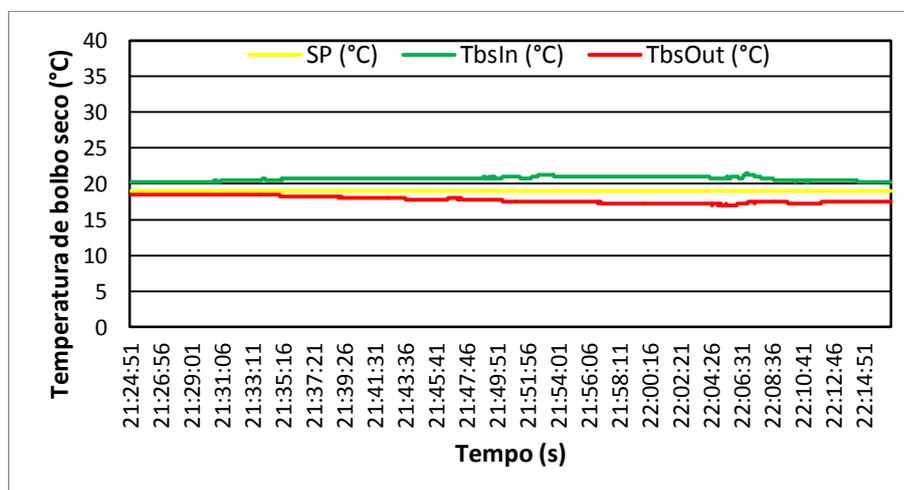


Gráfico 11 – Temperatura de bulbo seco – modo SEC – ensaio 2.

Como dito no ensaio anterior, a avaliação da secagem do ar pelo equipamento deve ser realizada por meio da umidade absoluta do ar de saída em comparação com a entrada. Novamente, os resultados obtidos foram similares ao ensaio anterior. Pode ser visto no gráfico 12 que a umidade relativa na saída (UrOut) do equipamento de condicionamento foi superior ao setpoint e a UrIn. Entretanto o comportamento decrescente da umidade absoluta na saída do equipamento fica evidenciado no gráfico 13.

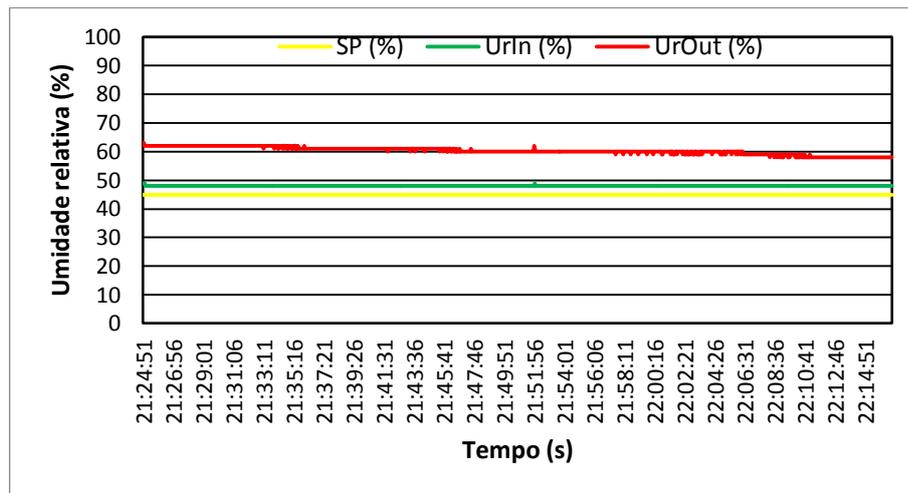


Gráfico 12 – Umidade relativa – modo SEC – ensaio 2.

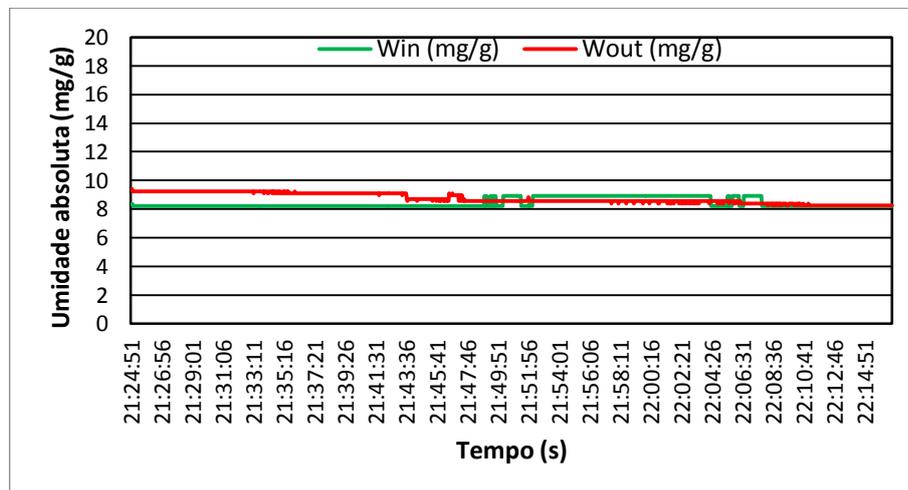


Gráfico 13 – Umidade absoluta – modo SEC – ensaio 2.

Os resultados de secagem nesse ensaio não foram tão expressivos quanto o ensaio anterior, sendo encontrados valores médios até mais úmidos que o ar de entrada. Apesar disso, o sistema conseguiu proporcionar um ar mais seco em até 7% quando comparado com a média de umidade absoluta do ar ambiente. Logo, pode-se

afirmar que o sistema é capaz de alcançar a secagem do ar, desde que opere por um período maior, possibilitando assim um maior resfriamento da matriz de troca de calor e massa, resultando numa maior taxa de condensação da água presente no ar.

Baseado nos resultados dos dois ensaios realizados para o modo de resfriamento com secagem, pode-se afirmar que o sistema híbrido de condicionamento foi capaz de realizar o resfriamento e a secagem relativos ao modo de operação. Com relação a temperatura, foi visto que o sistema está apto a atingir os valores desejados, uma vez que resfriamentos de até 20% foram alcançados. Já sobre a umidade, o equipamento não conseguiu levar a umidade relativa até os valores desejados especificados, todavia, a secagem foi confirmada através da redução na umidade absoluta. Portanto, com base no apresentado, conclui-se que o modo de resfriamento com secagem possui um desempenho que pode proporcionar tanto a redução da temperatura, quanto da umidade presente no ar, cumprindo assim os objetivos definidos para o modo.

#### **4.2.3 Modo Ventilação – VENT**

O modo de operação ventilação é o modo mais simples do protótipo desenvolvido, tendo como principal função a circulação do ar. Ele é acionado quando a temperatura do ar de entrada no equipamento de climatização é menor que o valor de temperatura ajustado no software de supervisão. Nessa configuração, apenas o ventilador é ativado, sendo que a bomba hidráulica e a unidade refrigeradora de água permanecem desabilitados. Novamente foram realizados 2 ensaios para o respectivo modo de operação.

Pode-se notar através do relatório de supervisão apresentado no quadro 7, que as temperaturas encontradas em TbsIn são, em média, inferiores ao SP ajustado (22°C). Portanto, o modo de operação VENT é acionado. O mesmo pode ser visto no gráfico abaixo, onde ambos, TbsIn e TbsOut, apresentam valores de temperatura menores que o SP. Além disso, é possível observar que mesmo no modo ventilação ocorreu certo resfriamento do ar. Foi evidenciado um resfriamento médio de 1°C entre saída e entrada. Isso acontece devido ao caráter da matriz porosa utilizada no resfriamento, que mesmo sem a utilização de modos de resfriamento é capaz de resfriar o ar por um certo período.

Quadro 7 – Relatório de supervisão – modo VENT – ensaio 1.

| <b>Relatório de Supervisão</b>   |            |                |                             |                 |        |
|----------------------------------|------------|----------------|-----------------------------|-----------------|--------|
| <b>Período</b>                   |            |                |                             |                 |        |
| <b>Data</b>                      | 13/06/2016 | <b>Duração</b> | 00:22:47                    |                 |        |
| <b>Início</b>                    | 20:33:29   | <b>Fim</b>     | 20:56:16                    |                 |        |
| <b>Parâmetros</b>                |            |                |                             |                 |        |
| <b>Temperatura (°C)</b>          |            |                | <b>Umidade Relativa (%)</b> |                 |        |
| Setpoint                         | 22         | Setpoint       | 60                          |                 |        |
| Histerese                        | 0,5        | Histerese      | 1                           |                 |        |
| <b>Ar de entrada</b>             |            |                |                             |                 |        |
| <b>Temperatura (°C)</b>          |            | <b>UR (%)</b>  |                             | <b>W (mg/g)</b> |        |
| Mín                              | 20,50      | Mín            | 48                          | Mín             | 8,187  |
| Máx                              | 20,50      | Máx            | 49                          | Máx             | 8,351  |
| Méd                              | 20,50      | Méd            | 48                          | Méd             | 8,187  |
| <b>Ar de Saída</b>               |            |                |                             |                 |        |
| <b>Temperatura (°C)</b>          |            | <b>UR (%)</b>  |                             | <b>W (mg/g)</b> |        |
| Mín                              | 19,25      | Mín            | 49                          | Mín             | 8,107  |
| Máx                              | 19,50      | Máx            | 54                          | Máx             | 8,821  |
| Méd                              | 19,43      | Méd            | 50                          | Méd             | 8,249  |
| <b>Diferença Saída - Entrada</b> |            |                |                             |                 |        |
| <b>Temperatura (°C)</b>          |            | <b>UR (%)</b>  |                             | <b>W (mg/g)</b> |        |
| Mín                              | -1,00      | Mín            | 1                           | Mín             | -0,080 |
| Máx                              | -1,25      | Máx            | 5                           | Máx             | 0,470  |
| Méd                              | -1,07      | Méd            | 2                           | Méd             | 0,062  |

O gráfico 14 demonstra a não adequação da temperatura com o SP definido. O protótipo é baseado no resfriamento. Sendo assim, quando a temperatura do ar se encontra abaixo do valor desejado, não existem atuadores ou ações de controle que possibilitem o aquecimento do ar para a correção desse erro. Logo, foram encontrados erros de regime permanente de 1,5°C, em média, para o ensaio 1.

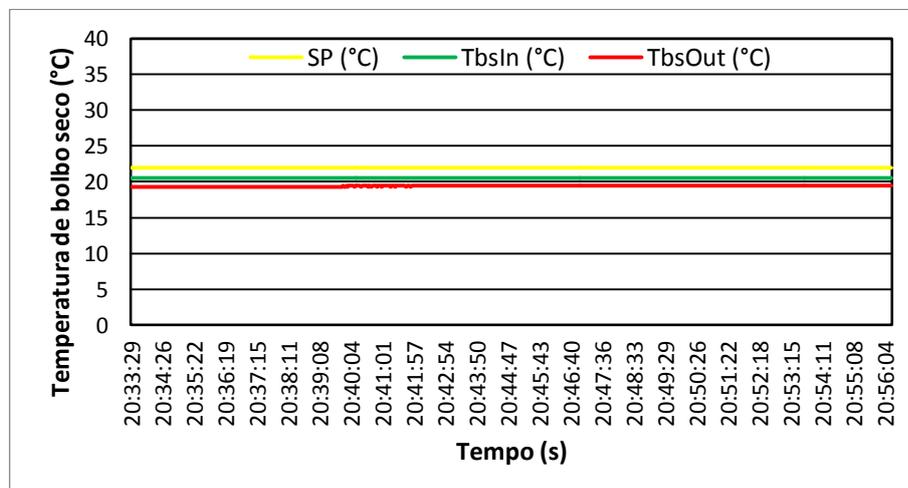


Gráfico 14 – Temperatura de bulbo seco – modo VENT – ensaio 1.

Essa característica do protótipo também tem grande influência no controle da umidade do ar. Como o sistema trabalha com base no resfriamento, ao atingir temperaturas inferiores ao SP, o modo ventilação é habilitado e todas as ações controle da temperatura são interrompidas. Isso faz com que o controle da umidade também seja subitamente suspenso. Sendo assim, como pode ser observado nos gráficos 15 e 16, ambas, umidade relativa e absoluta, permaneceram constantes durante a realização do ensaio 1. Isso foi confirmado tanto no ar de entrada, quanto na saída do aparato de climatização híbrida, demonstrando que não houve nem umidificação, nem secagem pelo sistema.

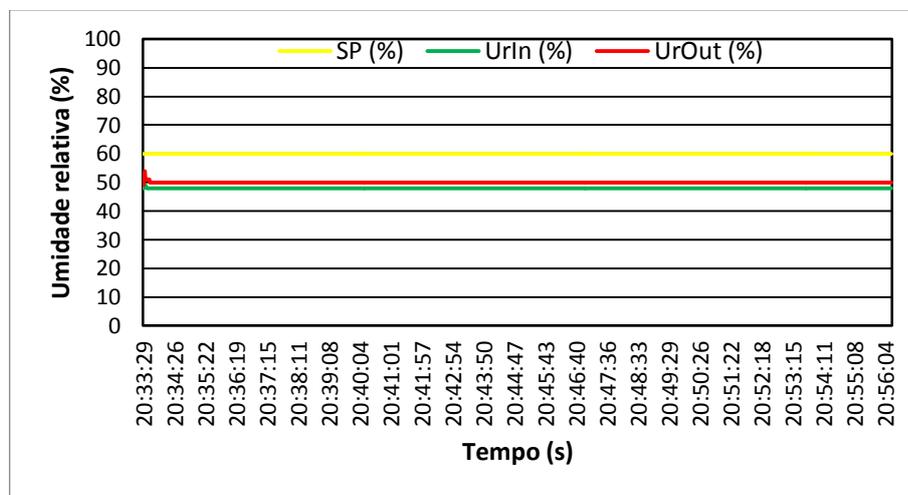


Gráfico 15 – Umidade relativa – modo VENT – ensaio 1.

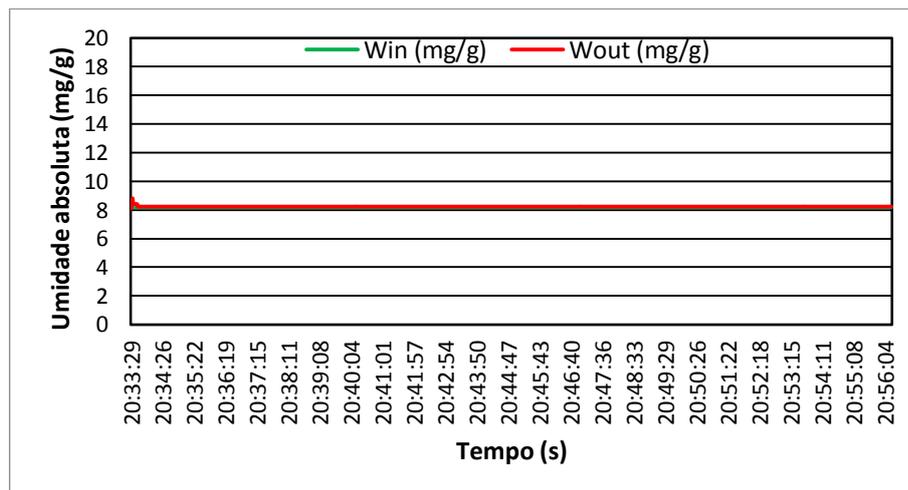


Gráfico 16 – Umidade absoluta – modo VENT – ensaio 1.

Baseado no exposto, pode-se afirmar que o modo de operação ventilação apresentou resultados dentro do esperado, visto que a função principal desse modo é a circulação de ar dentro do ambiente a ser climatizado.

Como feito nos outros modos de operação, foi realizado um segundo ensaio para validação dos resultados encontrados. Implicações semelhantes foram obtidas no ensaio 2, que só reforçam o apresentado para o primeiro ensaio, demonstrando o bom desempenho do sistema no modo em questão.

O quadro 8 apresenta o relatório de supervisão para o ensaio 2 do modo VENT. Nele é possível notar que a média de TbsIn é inferior ao SP (°C) definido, fato que justifica a ativação do modo ventilação. O gráfico 17 também expõe esse resultado.

Quadro 8 – Relatório de supervisão – modo VENT – ensaio 2.

| <b>Relatório de Supervisão</b>   |            |                |                             |                 |        |
|----------------------------------|------------|----------------|-----------------------------|-----------------|--------|
| <b>Período</b>                   |            |                |                             |                 |        |
| <b>Data</b>                      | 20/06/2016 | <b>Duração</b> | 00:29:58                    |                 |        |
| <b>Início</b>                    | 21:30:04   | <b>Fim</b>     | 22:00:02                    |                 |        |
| <b>Parâmetros</b>                |            |                |                             |                 |        |
| <b>Temperatura (°C)</b>          |            |                | <b>Umidade Relativa (%)</b> |                 |        |
| Setpoint                         | 22         | Setpoint       | 60                          |                 |        |
| Histerese                        | 0,5        | Histerese      | 1                           |                 |        |
| <b>Ar de entrada</b>             |            |                |                             |                 |        |
| <b>Temperatura (°C)</b>          |            | <b>UR (%)</b>  |                             | <b>W (mg/g)</b> |        |
| Mín                              | 20,75      | Mín            | 42                          | Mín             | 7,539  |
| Máx                              | 21,75      | Máx            | 45                          | Máx             | 8,422  |
| Méd                              | 21,21      | Méd            | 44                          | Méd             | 8,192  |
| <b>Ar de Saída</b>               |            |                |                             |                 |        |
| <b>Temperatura (°C)</b>          |            | <b>UR (%)</b>  |                             | <b>W (mg/g)</b> |        |
| Mín                              | 21,50      | Mín            | 43                          | Mín             | 8,089  |
| Máx                              | 22,25      | Máx            | 45                          | Máx             | 8,613  |
| Méd                              | 21,79      | Méd            | 45                          | Méd             | 8,413  |
| <b>Diferença Saída - Entrada</b> |            |                |                             |                 |        |
| <b>Temperatura (°C)</b>          |            | <b>UR (%)</b>  |                             | <b>W (mg/g)</b> |        |
| Mín                              | 1,00       | Mín            | -1                          | Mín             | -0,167 |
| Máx                              | 0,25       | Máx            | 2                           | Máx             | 0,883  |
| Méd                              | 0,58       | Méd            | 1                           | Méd             | 0,221  |

Como dito anteriormente, o controle de umidade não é realizado quando o modo ventilação é ativado devido a características intrínsecas do protótipo. Isso justifica o comportamento estável da umidade, tanto para o ar de entrada quanto para o ar de saída, demonstrado nos gráficos 18 e 19.

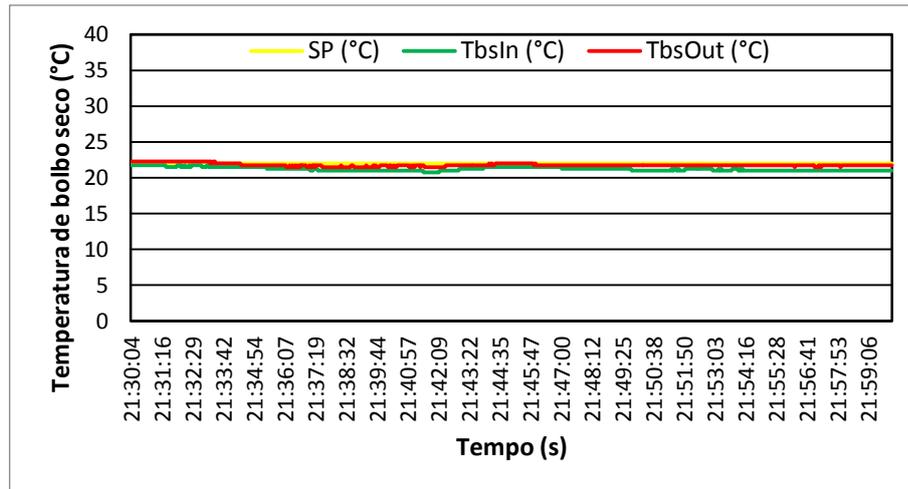


Gráfico 17 – Temperatura de bulbo seco – modo VENT – ensaio 2.

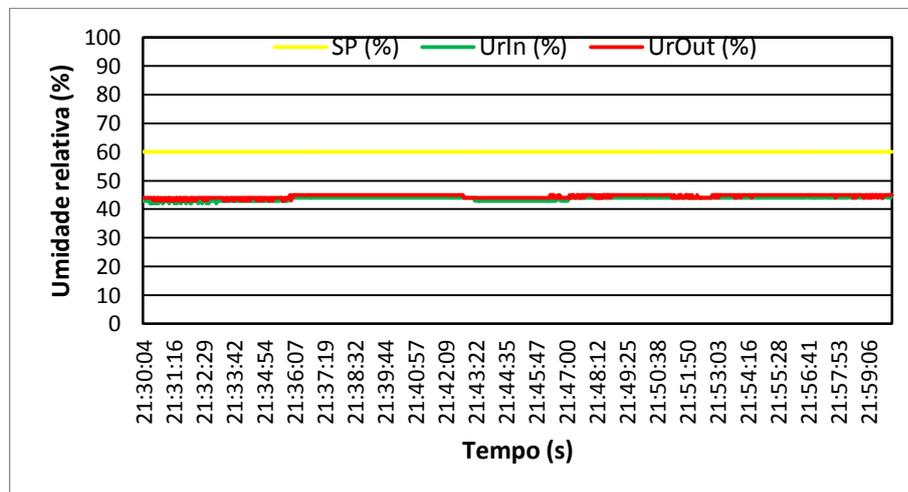


Gráfico 18 – Umidade relativa – modo VENT – ensaio 2.

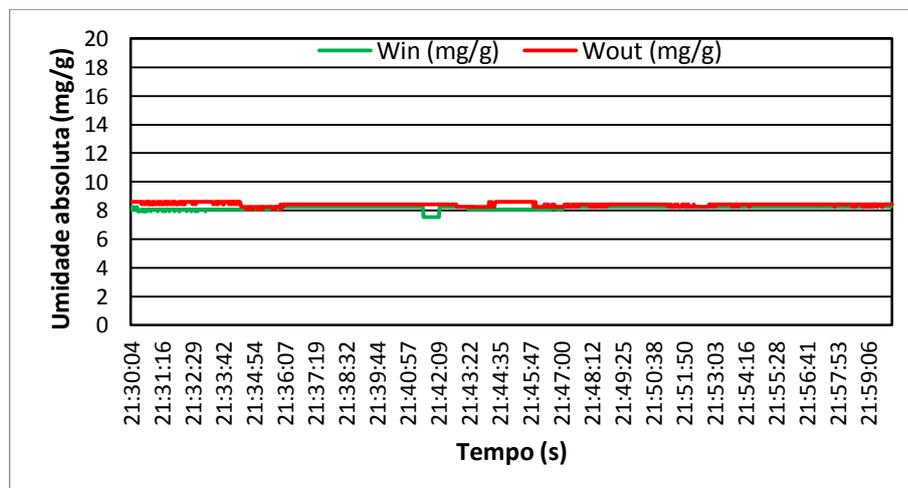


Gráfico 19 – Umidade absoluta – modo VENT – ensaio 2.

Os resultados encontrados nos ensaios realizados a partir do modo de operação ventilação confirmaram o desempenho do protótipo conforme o esperado. O sistema se mostrou capaz de realizar a principal função desse modo operacional, sendo essa: garantir a circulação do ar quando os valores desejados de temperatura são alcançados.

Como foi ressaltado anteriormente, o modo VENT é ativado quando temperaturas inferiores ao SP ( $^{\circ}\text{C}$ ) são atingidas, não sendo realizado controle de umidade após essa habilitação. Sendo assim, é possível que apenas o controle da temperatura seja obtido. Isso é justificado uma vez que o sistema de climatização híbrida opera com base no resfriamento do ar. Conclui-se então que o protótipo desenvolvido, operando sob o modo ventilação, apresenta desempenho dentro do esperado, realizando a circulação do ar dentro do ambiente climatizado, cumprindo assim a sua função.

### **4.3 Qualificação do Protótipo Desenvolvido**

A bancada híbrida de climatização em caráter experimental apresentou um bom desempenho quando analisados os resultados encontrados nos ensaios de avaliação do funcionamento. Foi evidenciado um bom condicionamento do ar na saída do aparato de climatização, o qual trabalhou de forma autônoma e supervisionada

No geral, foi visto que o protótipo desenvolvido apresentou boa capacidade de resfriamento nos modos pertinentes, demonstrando melhores resultados no modo SEC, uma vez que a matriz cerâmica de troca de calor e massa estava exposta a temperaturas menores, conseguindo assim um maior resfriamento do ar.

Quanto ao controle de temperatura, foi evidenciado um melhor desempenho no modo UMID. Isso ocorre devido a características intrínsecas ao resfriamento evaporativo, processo que acontece naturalmente na presença de ar e uma superfície de água. Já o modo SEC apresenta certa desvantagem na operação, visto que a temperatura da água deve ser mantida em valores inferiores ao ponto de orvalho do ar, valores esses que ficaram em  $11^{\circ}\text{C}$ , em média. Foi visto que a unidade refrigeradora foi capaz de atingir esses valores, entretanto, isso não ocorria durante todo o período de avaliação. Contudo, mesmo em desvantagem, o modo SEC apresentou desempenho considerável no controle da umidade do ar.

O sistema de controle, automação e supervisão desenvolvido demonstrou um comportamento adequado, apesar de algumas pequenas falhas encontradas durante a execução dos experimentos. O sistema foi capaz de ler sensores em campo, interpretar esses sinais, tomar as respectivas ações de controle, apresentar dados em tempo real e armazenar esses dados para futuras análises. Logo, é possível afirmar que o desempenho desse sistema foi dentro do esperado

Sobre os avanços esperados da abordagem experimental a partir da bancada híbrida de climatização, pode-se dizer que foram alcançados. O sistema de climatização híbrida foi capaz de realizar a secagem do ar utilizando uma técnica inovadora, uma vez que utiliza água, em contato direto com o ar, na realização desse processo. Sendo assim, a comprovação da funcionalidade dessa técnica pode ser interpretada como um avanço científico.

A junção do controle e automação com a bancada híbrida de climatização apresentou um equipamento capaz de proporcionar economia de energia. O sistema desenvolvido utiliza o clima como aliado, identificando o momento ideal para o uso de cada modo de operação. Esse comportamento garante a eficiência energética, uma vez que os modos mais econômicos serão utilizados sempre que as condições do ar permitirem. Sendo assim, a bancada híbrida tira proveito das características climáticas locais na climatização de modo a proporcionar a redução do consumo de energia.

Além disso, a bancada híbrida é capaz de produzir um ar de melhor qualidade. O processo de climatização do ar através da matriz cerâmica porosa de troca de calor e massa proporciona uma lavagem do ar, visto que a matriz retém a sujeira e poeira presente no mesmo. Isso garante um fornecimento de ar, além de climatizado, mais limpo, podendo assim melhorar qualidade de vida das pessoas que usufruem desse ar.

Por fim, o projeto contribuiu para o avanço tecnológico da área de estudo. Os resultados obtidos demonstraram a viabilidade da utilização das técnicas de resfriamento evaporativo e compressão do vapor em um só equipamento para se obter a climatização do ar. Sendo assim, o protótipo implementado nesse trabalho serviu como auxílio para o desenvolvimento de um equipamento, pelo orientador dessa pesquisa, com capacidade de mercado.

Com base no apresentado acima, é possível afirmar que o protótipo desenvolvido atendeu as expectativas, tanto de climatização, quanto de controle e automação, além dos avanços citados.

## 5 CONCLUSÕES

O controle da temperatura e da umidade do ar, conforme idealizado na hipótese que fundamentou esse trabalho, foi alcançado. Foram obtidas reduções na temperatura de até 4,25°C, demonstrando a capacidade de resfriamento do sistema desenvolvido. Já para umidade, foi demonstrado o bom desempenho do sistema nos modos umidificação e secagem, sendo obtidos valores até 22% mais úmidos no modo UMID e 20% mais secos no modo SEC, sobre a umidade absoluta. Portanto, ficou claro a eficiência da bancada híbrida desenvolvida na climatização do ar com relação a temperatura e umidade.

O sistema de automação e controle desenvolvido para gerenciar as atividades realizadas pelo aparato de climatização híbrida apresentou bom desempenho, sendo capaz de realizar as ações necessárias de maneira eficiente, tanto no ponto de vista do controlador, quanto do software de supervisão.

A estratégia de controle escolhida, controle Liga/Desliga com histerese, demonstrou-se apta em gerenciar as ações finais de controle realizadas pelos atuadores, sendo de grande importância nos testes realizados. Uma deficiência encontrada foi o controle de velocidade do ventilador baseado no algoritmo PID. Posto que essa estratégia foi retirada do sistema devido a problemas com a eficiência do sistema de climatização, sendo substituída pela estratégia utilizada pelos outros atuadores.

Com relação aos modos de operação, esse se mostraram eficazes no que foi proposto para cada um deles, conseguindo levar o ar de entrada do equipamento até condições próximas às necessárias para o conforto térmico, dentro dos parâmetros definidos para cada modo.

Sendo assim, com base no afirmado acima, pode-se considerar que todos os objetivos definidos para o trabalho foram atingidos, visto que a bancada híbrida de climatização gerenciada por um sistema de controle e automação foi capaz de condicionar o ar, em relação às variáveis pertinentes, temperatura e umidade.

Como possíveis melhorias no sistema e sugestões para trabalhos futuros, destaca-se a utilização do controle de velocidade do ar já proposto, entretanto, utilizando sensores de velocidade para dar maior estabilidade ao controle e possibilitar uma maior eficiência ao sistema de climatização.

O trabalho realizado se mostrou uma grande oportunidade para aplicação dos conhecimentos obtidos no curso de engenharia de automação industrial, apresentando um caráter abrangente, visto que englobou diversas áreas de atuação do engenheiro, como: controle, automação, instrumentação, termodinâmica, climatização e computação. Por fim, conclui-se então que o trabalho realizado, obteve sucesso dentro das condições especificadas para o mesmo, apresentando resultados satisfatórios de desempenho tanto na climatização, quanto no controle e automação.

## REFERÊNCIAS

ALVAREZ, A. L. M. **Uso racional e inteligente de energia elétrica: metodologia para determinação dos potenciais de conservação dos usos finais em instalações de ensino e similares.** 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

ARAÚJO, I. B. Q. et al. **Desenvolvimento de um protótipo de automação predial/residencial utilizando a plataforma de prototipagem eletrônica Arduino.** Belém: Cobenge, 2012.

BARCELLOS, F. P. **Sistema didático para controle de nível e temperatura.** 2005. Trabalho de Conclusão de Curso (Automação Industrial), Centro Federal de Educação Tecnológica de Pelotas, Pelotas, 2005.

BAYER, F. M.; ARAÚJO, O. C. B. **Controle Automático de Processos.** 2ª ed. Santa Maria: Universidade Federal Santa Maria: Colégio Técnico Industrial, 2010.

BEGA, E. A. **Instrumentação Industrial.** 2ª ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2006.

BOURASA, N. J.; HAVES, P.; HUANG, Y. J. A Computer simulation appraisal of nonresidential low energy cooling systems in California. **High Performance Commercial Building Systems**, Califórnia, agosto 2002.

CAMARGO, J. R. Resfriamento evaporativo: poupando energia e o meio ambiente. **Revista Ciências Exatas**, Taubaté, v.9/10, n.1-2, p. 69-75, 2004.

CAMARGO, J. R.; CARDOSO, S.; TRAVELHO, J. S. **Utilização do resfriamento evaporativo para conforto térmico humano em diversas cidades brasileiras.** Natal: Conem, 2000.

CAMPOS, M. C. M. M.; TEIXEIRA, H. C. G. **Controles Típicos de Equipamentos e Processos Industriais.** São Paulo: Editora Blucher, 2006.

CREDER, H. **Instalações de ar condicionado.** 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC editora, 2004.

DAI, Y. J. et al. Use of liquid desiccant cooling to improve the performance of vapor compression air conditioning. **Applied thermal engineering**, China, n.21, p. 1185-1202, 2001.

DORF, R.; BISHOP, R. **Sistemas de Controle Moderno.** 8ª ed. Rio de Janeiro: LTC editora, 1998.

FANGER, P. O. Conditions for thermal comfort: a review. In **Proceedings of CIB commission W 45 symposium**, [S.I.], 1972 apud VILLANI, E. **Abordagem híbrida para modelagem de sistemas de ar condicionado em edifícios inteligentes.** 2000.

Dissertação (Mestrado em Engenharia) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

FERREIRA, F. S.; ALMEIDA, F. S. D.; MAFRA, H. T. **Análise do desempenho de um sistema de resfriamento evaporativo e sua utilização integrada a um sistema de resfriamento convencional**. 2006. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica), Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

FLORES, J. L. O. **Sistema híbrido de climatização visando conforto térmico e eficiência energética**. 2009. Dissertação (Mestrado Engenharia), Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual do conforto térmico: arquitetura, urbanismo**. 7ª ed. São Paulo: Studio Nobel, 2006.

GHALI, K. Energy savings potential of a hybrid desiccant dehumidification air conditioning system in Beirut. **Energy conservation and management**. Beirute, Líbano, 2008.

MAHESHWARI, G. P.; AL-RAGOM, F.; SURI, R. K. Energy-saving potential of an indirect evaporative cooler. **Applied energy**, Kuwait, v. 69, p. 69-76, 2001.

MARTINS, N. A. **Sistemas microcontrolados**. 1ª ed. [S.I]: Novatec, 2005.

MATUCHAKI, G. **Projeto de um sistema de climatização de aviário**. 2011. Trabalho de conclusão de curso (Tecnologia em Manutenção Industrial), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2011.

MONTEBELLER, S. J. **Estudo sobre o emprego de dispositivos sem fios – wireless na automação do ar condicionado e de outros sistemas prediais**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

MOREIRA, A. S.; PORTELA, A. M.; SILVA, R. Uso da plataforma Arduino no desenvolvimento de soluções tecnológicas para pesquisas de dados atmosféricos na Amazônia. **Perspectiva amazônica**, Santarém, v. 5, p.119 – 126, 2013.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 4ª ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2003.

OLIVEIRA, A. M. **Climatização por Resfriamento Evaporativo: estudo teórico e experimental de protótipos**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

OLIVEIRA, A. M.; FRANCA, G. A. C.; KOURY, R. N. N. **Experimental investigation of heat and mass transfer in an evaporative cooler made of porous ceramic**. Brasília: Cobem, 2007.

PINTO, J. R. **Uso racional de energia elétrica em instalações comerciais empregando sistemas de automação**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

PRATES, M. O. **Controle da temperatura e velocidade do ar de secagem em um secador de plantas medicinais**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

SHERIFF, S. A. Overview of Psychometrics. **ASHRAE Jornal**, Flórida, p. 33-39, julho 2002.

SILVA, J. S. S. **Secagem e Armazenagem de produtos agrícolas**. Viçosa: Aprenda Fácil, 2000.

SILVA, J. Introdução à tecnologia de refrigeração e da climatização. 1ª ed. São Paulo: Artliber, 2004 apud FLORES, J. L. O. **Sistema híbrido de climatização visando conforto térmico e eficiência energética**. 2009. 95f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

SOUZA, A. R. et al. A placa Arduino: uma opção de baixo custo para experiências de física assistidas pelo PC. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Brasil, v.33, n.1, 2011.

THERMA. **Controladores Digitais: manual de operação**. Santo Amaro: Therma, 2007.

THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. **Sensores Industriais: fundamentos e aplicações**. 8ª ed. São Paulo: Érica, 2011.

VIANNA, P. I. E.; BAUCHIPIESS, A. Identificação de um sistema de climatização híbrido com foco no processo evaporativo. In: XI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE, Fortaleza. **Anais. . .** [S.l.: s.n.], 2013. Disponível em: <<http://www.sbai2013.ufc.br/pdfs/6057.pdf>>. Acesso em: 15 set. 2015.

VILLANI, E. **Abordagem híbrida para modelagem de sistemas de ar condicionado em edifícios inteligentes**. 2000. 154f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

WYLEN, G. V.;SONNTAG, R.;BORGNAKKE, C. **Fundamentos da termodinâmica clássica**. 4ª ed. [S.l]: Edgar Blucher Ltda, 2003.