

JOSÉ VITOR NICACIO

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CONTROLE
AUTOMÁTICO PARA CONDICIONAMENTO DE AR DE
SECAGEM**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do
Programa de Pós Graduação em
Engenharia Agrícola, para
obtenção do título de *Magister
Scientiae*

**VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2010**

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV

T

N582
2010

Nicacio, José Vitor, 1978-
Desenvolvimento de um sistema de controle automático
para condicionamento de ar de secagem / José Vitor Nicacio.
- Viçosa, MG, 2010.
xiv, 73f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Evandro de Castro Melo.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f. 72-73

1. Equipamento agrícola. 2. Sistemas de controle
inteligente. 3. Bomba de calor. 4. Circuitos eletrônicos. 5.
Equipamento de secagem - Automação. 6. Grãos - Aeração.
7. Café - Secagem. 8. Software - Desenvolvimento.
I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

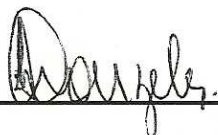
CDD 22. ed. 631.3

JOSÉ VITOR NICACIO


**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CONTROLE
AUTOMÁTICO PARA CONDICIONAMENTO DE AR DE
SECAGEM**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do
Programa de Pós Graduação em
Engenharia Agrícola, para obtenção
do título de *Magister Scientiae*

APROVADA: 27 de julho de 2010.



Prof. Sérgio Maurício Lopes Donzeles



Prof. Denilson Eduardo Rodrigues

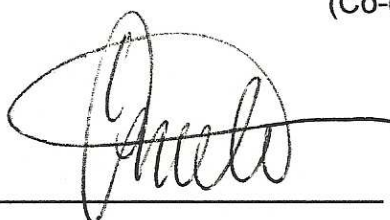


Prof. Paulo Marcos de Barros Monteiro



Prof. Tarcísio de Assunção Pizziolo

(Co-orientador)



Prof. Evandro de Castro Melo

(Orientador)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer aos meus pais Silvano Nicacio e Maria Aparecida pelo incentivo aos meus estudos desde o primeiro dia de aula do pré-primário até o dia da conclusão deste trabalho.

Agradeço aos meus irmãos Laísse, Silvano e Luciana pelo companheirismo, amizade e apoio incondicional em minhas decisões.

Ao meu orientador e amigo professor Evandro de Castro Melo, que me acolheu como orientado e me deu a oportunidade para que este trabalho fosse realizado. Agradeço também por sempre apoiar minhas decisões e pela confiança em mim depositada.

Agradecimento especial faço também ao Professor Adílio pelas inúmeras e preciosas sugestões sobre o trabalho e também pelo grande suporte material e financeiro que tornaram viável a realização deste trabalho.

Ao meu amigo Cristiano Lúcio agradeço pelo software para aquisição dos dados via 1-wire e pelas sugestões para a melhoria do trabalho, sempre disposto a ajudar.

Ao meu amigo Mauro Prates por me permitir participar do seu experimento e tomar gosto pelo assunto, tornando-se desta forma um dos responsáveis diretos pela realização do presente trabalho.

Ao meu amigo e companheiro de sala Roni Rocha pelas boas conversas sobre o trabalho, temas afins e outros nem tanto.

Aos meus amigos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica pelos bons tempos que passei por lá como aluno e pelo curto e precioso tempo como professor.

Aos meus co-orientadores Tarcísio Pizziolo e José Helvécio Martins pela disposição em sempre me receber e dedicar parte de seu precioso tempo para me ajudar sempre que se fez necessário.

A todos aqueles que realizaram estudos anteriores sobre o tema aqui abordado e deixaram a base firme para a sustentação deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos, que a sua maneira, contribuíram para que este trabalho fosse concluído e também a aqueles que darão continuidade a ele.

A todos, meu muito obrigado!

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	x
ABREVIATURAS	xi
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 <i>Objetivos</i>	3
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1 – <i>Secadores com bomba de calor</i>	4
2.1.1 – <i>Classificação dos secadores com bomba de calor</i>	4
2.1.2 – <i>Fundamentos dos secadores com bomba de calor</i>	4
2.2 – <i>Sistema de controle em secadores</i>	10
2.2.1 – <i>Variáveis controladas em um sistema de secagem</i>	10
2.2.1 – <i>Variáveis manipuladas em um sistema de secagem</i>	12
2.3 – <i>Sistema de controle digital baseado em microcontroladores</i>	12
2.4 – <i>Sensores utilizados em sistemas de controle digitais</i>	17
2.4.1 – <i>Sensores de temperatura</i>	19
2.4.2 – <i>Sensores de umidade relativa</i>	20
2.5 – <i>Ação de controle PID</i>	22
2.5.1 – <i>Controlador proporcional</i>	23
2.5.2 – <i>Controlador proporcional-integral</i>	23
2.5.3 – <i>Controlador proporcional-integral-derivativo</i>	24
2.5.4 – <i>A escolha do controlador correto</i>	24
2.5.5 – <i>Regras de sintonia para controladores PID</i>	26
2.6 – <i>Inversores de frequência</i>	29
2.7 – <i>Uso de sinal PWM para obtenção de saída analógica</i>	31
2.8 – <i>Aquisição de dados através de dispositivos 1-Wire</i>	34
2.9 – <i>GRAPSI</i>	35
3 - MATERIAIS E MÉTODOS	37
4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1 – <i>Ensaio preliminares</i>	52

4.2 – <i>Análise da resposta transitória</i>	58
4.3 – <i>Análise da operação em regime permanente</i>	63
5 – CONCLUSÕES	71
6 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	71
7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema generalizado de classificação para secadores com bomba de calor. (Fonte: CHEN e MUJUMDAR, 2008)	5
Figura 2 - Diagrama esquemático do ciclo de funcionamento ideal de uma bomba de calor ideal (Fonte: CHEN e MUJUMDAR, 2008).....	6
Figura 3 - Diagrama P – h do ciclo de funcionamento da bomba de calor ideal (Fonte: CHEN e MUJUMDAR, 2008)	6
Figura 4 - Diferenças entre a temperatura do ar ambiente e na saída da bomba de calor observadas por Monte (2008)	9
Figura 5 - Diferenças entre umidade relativa do ar ambiente e na saída da bomba de calor observadas por Monte (2008)	9
Figura 6 - Sistema de malha aberta.....	13
Figura 7 - Sistema de malha fechada.	14
Figura 8 - Sistema de controle digital.....	15
Figura 9 - Diagrama de blocos de um sistema de controle digital.....	16
Figura 10 - Outra forma de um sistema de controle digital.	16
Figura 11 - Microcontrolador PIC 18F4550 (Fonte: MICROCHIP, 2003).....	17
Figura 12 - Sensor de temperatura LM35 (a) Representação (b) Encapsulamento	19
Figura 13 - Sensor de umidade relativa HIH 4000-004.....	21
Figura 14 - Tensão de saída do sensor HIH 4000 versus umidade relativa (%)	21
Figura 15 - Região de operação do sensor de umidade HIH 4000-004.....	22
Figura 16 - Fluxograma para seleção do sistema de controle	25

Figura 17 - Resposta de uma planta ao degrau unitário (fonte: OGATA, 1997).....	27
Figura 18 - Curva de resposta em formato de S (fonte: OGATA, 1997)	27
Figura 19 - Sistema de malha fechada com controlador proporcional	28
Figura 20 - Oscilação sustentada com período P_{cr}	28
Figura 21 - Ligação do inversor de frequência.....	29
Figura 22 - Forma de onda PWM típica	31
Figura 23 - Espectro de frequência de um sinal PWM.....	32
Figura 24 - Resposta de um filtro passa-baixa.....	32
Figura 25 - Filtro RC conectado ao PWM1 do PIC 18F4550	33
Figura 26 - Conexão de dispositivos 1-wire. (a) conexão com 3 fios (Alimentação, dados e terra) (b) conexão com alimentação parasita (dois fios).....	35
Figura 27 - Diagrama da bomba de calor experimental	37
Figura 28 - Trajetória do ar e suas modificações ao passar pela bomba de calor.....	37
Figura 29 - Representação da ação de controle PID discreta	39
Figura 30 - Filtro ativo passa-baixa.....	40
Figura 31 - Diagrama de Bode do filtro ativo passa-baixa	41
Figura 32 - Filtro ativo passa-baixa com ganho igual a dois	41
Figura 33 - Moto bomba Famac de $\frac{1}{2}$ HP	42
Figura 34 - Bicos borrifadores de água.....	42

Figura 35 - Válvula para acionamento da vazão de água nos bicos borrifadores.....	42
Figura 36 - Sistema de borrifamento de água instalado na entrada de ar da bomba de calor	43
Figura 37 - Diagrama completo do sistema de controle para bomba de calor	44
Figura 38 - Parte frontal do sistema de controle para bomba de calor	46
Figura 39 - Parte traseira do sistema de controle para bomba de calor	47
Figura 40 - Sensores de temperatura e umidade relativa instalados na saída da bomba de calor	47
Figura 41 – Protótipo do sistema de controle e sistema de borrifamento de água acoplados à bomba de calor	48
Figura 42 - Circuito de aquisição de dados 1-wire	49
Figura 43 - Sistema de aquisição de dados 1-wire para um par de sensores	50
Figura 44 - Sistema de aquisição de dados 1-wire para dois pares de sensores	51
Figura 45 - Entrada em degrau aplicada no ventilador da bomba de calor..	52
Figura 46 - Variação da temperatura do ar na saída da bomba de calor em resposta à aplicação da entrada em degrau no ventilador	53
Figura 47 - Variação da umidade relativa do ar na saída da bomba de calor em resposta à aplicação da entrada em degrau no ventilador	53
Figura 48 - Entrada em degrau aplicada no compressor da bomba de calor	54
Figura 49 - Variação da temperatura do ar na saída da bomba de calor em resposta à aplicação da entrada em degrau compressor	54

Figura 50 - Variação da umidade relativa do ar na saída da bomba de calor em resposta à aplicação da entrada em degrau no compressor	55
Figura 51 - Resposta transitória da temperatura do ar na saída da bomba de calor devida à aplicação do degrau positivo.	58
Figura 52 - Resposta transitória da umidade relativa devida à aplicação do degrau positivo.....	59
Figura 53 - Resposta transitória da temperatura do ar na saída da bomba de calor devida à aplicação do degrau negativo no set-point.	60
Figura 54 - Resposta transitória da umidade relativa à aplicação do degrau positivo na referência de temperatura.....	61
Figura 55 - Relação Temperatura x Umidade relativa para manter o café com teor de água de 13% B.S.....	62
Figura 56 - Resposta transitória de temperatura no processo de aeração ..	63
Figura 57 - Resposta transitória da umidade relativa no processo de aeração	63
Figura 58 - Resposta transitória da umidade de equilíbrio no processo de aeração.....	63
Figura 59 - Resposta de temperatura em regime permanente e temperatura ambiente	65
Figura 60 - Resposta de umidade em regime permanente e umidade ambiente	66
Figura 61 - Temperatura do ar ambiente	67
Figura 62 - Umidade relativa do ar ambiente.....	67
Figura 63 - Umidade de equilíbrio do ar ambiente	68
Figura 64 - Temperatura, umidade relativa e umidade de equilíbrio do ar na saída da bomba de calor	69

Figura 65 - Temperatura, umidade relativa e umidade de equilíbrio do ar na saída da bomba de calor 69

Figura 66 - Temperatura, umidade relativa e umidade de equilíbrio do ar na saída da bomba de calor 70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Constantes a, b e c para o cálculo do teor de água dos grãos, de acordo com a Equação 8.	12
Tabela 2 - Regra de sintonia de Ziegler-Nichols baseada na resposta ao degrau da planta (Método da resposta ao degrau)	28
Tabela 3 – Regra de sintonia de Ziegler-Nichols baseada no ganho crítico K_{cr} e no período crítico P_{cr} (Método do período crítico)	29
Tabela 4 – Constantes dos controladores PID.....	57

ABREVIATURAS

A/D	Analógico/Digital
CI	Circuito Integrado
COP	Coeficiente de rendimento, do inglês <i>Coefficient of performance</i>
D/A	Digital/Analógico
EEPROM	Memória somente leitura programável e apagada eletricamente, do inglês <i>Electrically-Erasable Programmable Real-Only Memory</i>
k_p	Ganho do controlador proporcional
LCD	Display de cristal líquido, do inglês <i>Liquid Crystal Display</i>
MIMO	Múltiplas entradas e múltiplas saídas, do inglês <i>Multiple-inputs Multiple-outputs</i>
P	Controlador Proporcional
PI	Controlador Proporcional-Integral
PIC	Controlador de Interface Periférica, do inglês <i>Peripheral Interface Controller</i>
PID	Controlador Proporcional-Integral-Derivativo
PWM	Modulação por largura de pulso, do inglês <i>Pulse Width Modulation</i>
RAM	Memória de acesso aleatório, do inglês <i>Random Access Memory</i>
SISO	Única entrada e única saída, do inglês <i>Single-input Single-output</i>
T_d	Tempo derivativo
T_i	Tempo de integração
U_e	Umidade de equilíbrio
V/F	Relação tensão frequência
VC	Variável controlada
VM	Variável Manipulada

RESUMO

NICACIO, José Vítor, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho, 2010.
Desenvolvimento de um sistema de controle automático para condicionamento de ar de secagem. Orientador: Evandro de Castro Melo. Co-orientadores: Adílio Flauzínio de Lacerda Filho, Tarcísio de Assunção Pizziolo e José Helvécio Martins.

A secagem dos produtos agrícolas é o processo mais utilizado para assegurar sua qualidade e estabilidade. Neste trabalho foi desenvolvido um sistema automático para realizar o controle sobre o ciclo de funcionamento de uma bomba de calor de forma a permitir que a mesma seja usada tanto para secagem quanto para aeração de grãos. Quando utilizada no processo de secagem, o sistema de controle é capaz de manter o ar de secagem com temperatura constante e umidade relativa dentro dos parâmetros definidos pelo usuário. Quando utilizada no processo de aeração, o sistema de controle é capaz de manter o ar de saída com valores de temperatura e umidade relativa tais que mantenham a relação de umidade de equilíbrio constante, em resposta às variações ocorridas no ar ambiente. Para o desenvolvimento deste sistema de controle foi utilizado um microcontrolador PIC 18F4550 da microchip, sensores de temperatura LM35 da National Semiconductor e sensores de umidade relativa HIH 4000-004 da Honeywell. Para realizar a ação de controle foi implementado uma estratégia de controle PID em linguagem C para microcontroladores, que de posse dos valores de temperatura e umidade relativa do ar ambiente, do ar na saída da bomba de calor e do ar na saída do silo secador, calcula os erros entre os valores medidos e os desejados. De posse dos valores destes erros, a estratégia de controle PID tende a minimizá-los atuando nos inversores de frequência que controlam o funcionamento do compressor e do ventilador da bomba de calor. Para o caso em que a umidade relativa do ar ambiente estivesse abaixo do valor mínimo para manter a umidade de equilíbrio durante o processo de aeração, foi desenvolvido um sistema borrifador que quando acionado pelo sistema de controle libera água em forma de névoa na entrada da bomba de calor, elevando-se assim a umidade relativa do ar a

ser processado. Em todos os testes realizados para a validação do sistema de controle o mesmo foi capaz de manter os valores de temperatura e umidade relativa de acordo com os valores escolhidos, dentro da faixa de operação da bomba de calor utilizada, respondendo de forma satisfatória às variações ocorridas no ar ambiente.

ABSTRACT

NICACIO, José Vitor, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2010.

Development of an automatic control system to condition drying air.

Adviser: Evandro de Castro Melo. Co-advisers: Adílio Flauzínio de Lacerda Filho, Tarcísio de Assunção Pizziolo and José Helvécio Martins.

The drying of agricultural products is the most used process to make certain its quality and stability. In this work was developed an automatic system to control the operation cycle of a heat pump with the purpose of to be used both in drier and in aeration of grains. When the heat pump is used in drier process, the control system is able to maintain the dryer air with constant temperature and humidity according to the parameters defined by the user. When used in the aeration process, the control system is able to maintain the air with values of temperature and humidity in such a way which keep moisture content of the grains constant, irrespective of environment changes. In the development of the control system a microcontroller PIC 18F4550, temperature sensors LM35 by National Semiconductors and Humidity sensors HIH 4000-004 by Honeywell was used. To produce the control action a PID control strategy was implemented in language C for microcontrollers, where reading the temperature and humidity sensors disposed at the environment, at the air exit of the heat pump and at the air exit of the grain store, the errors between the desired and the reads values is calculated. With the values of these errors, the PID control strategy try to keep it at the minimum value acting in the frequency inverters which control the compressor and the fan speed of the heat pump. To the case which the environment air humidity is below of the minimum value to maintain moisture contents of the grains in the aeration process, a spray system was purpose-built to produce a mist, when the system is turned on, in the air at the heat pump entrance, adding humidity to the air. After several tests to validate the performance of the control system developed in this work, was possible verify that the system is able to keep temperature and humidity of the air according with the values of set-point defined by user, respecting the operation range of the heat pump, independent of the environment changes.

1. INTRODUÇÃO

A secagem é operação unitária que mais consome energia no beneficiamento de grãos. Segundo Lacerda Filho (1998) esta é responsável por cerca de 60% da energia consumida no processo produtivo básico de grãos. Como energia é um produto caro e escasso, faz-se necessário que seja utilizada de forma mais eficiente possível.

Além da preocupação com o uso eficiente da energia durante a secagem é necessário ater-se à qualidade final do produto submetido ao processo, visto que os grãos são entidades biológicas sensíveis à ação do calor e da temperatura, que podem, quando excessivos, causar danos importantes nas características que definem a sua qualidade.

Existem diversas técnicas de secagem que podem ser aplicadas para secar diferentes produtos. As de aplicação prática sempre utilizam o ar como meio secante, ainda que existam outras formas de realizar a secagem. O ar é usado, na maior parte dos sistemas de secagem, como elemento que entrega calor aos grãos ao mesmo tempo em que extrai a umidade. Assim sendo, as diferentes estratégias diferem apenas na forma como o ar e a energia transitam pelo sistema de secagem (GROFF, 2002).

O processo de secagem é teoricamente um processo inerentemente auto-regulado, o que significa que se o secador não for submetido a mudanças do ambiente (distúrbios), então o processo irá permanecer em estado permanente. Isto mostra que, aparentemente, um sistema automático de controle pode não ser necessário, mas, conforme observado por Monte (2008), distúrbios ocorrem no processo real de secagem, o que faz com que seja necessário um sistema automático de controle.

Avanços recentes e aplicações em controle de qualidade estatístico têm enfatizado a importância do controle de processo para a manutenção da qualidade do produto submetido ao processo de secagem (CHEN e MUJUMDAR, 2008).

Diante deste cenário, onde se busca um processo de secagem com alta eficiência energética e que possa ser facilmente controlado, tecnologias de secadores que utilizam bomba de calor têm emergido como uma opção atrativa e viável.

Os secadores com bomba de calor extraem o calor latente de vaporização do ar ambiente através da condensação do vapor, quando o ar é forçado a passar pelo evaporador e devolvem a energia retirada neste processo como calor sensível ao ar de secagem, quando este é forçado a passar através do condensador (CHEN e MUJUMDAR, 2008).

Diversos estudos experimentais têm sido conduzidos por pesquisadores sobre sistemas de secagem com bomba de calor com a finalidade de se alcançar melhor qualidade dos produtos, maior eficiência energética e otimização de componentes e projetos destes sistemas.

Santos (2007) realizou um experimento onde foram avaliados o consumo específico de energia, os custos operacionais e a qualidade final do produto secado em dois sistemas de secagem, sendo que um destes era composto por um secador tendo como condicionadora do ar de secagem uma bomba de calor e o outro tendo como fonte de aquecimento para o ar de secagem um gerador de calor a gás.

Monte (2008) avaliou a atuação de um inversor de frequência no compressor da bomba de calor no condicionamento de ar a ser utilizado em atividades agrícolas, analisou também a taxa de retirada de água do ar ambiente de acordo com a velocidade do compressor da bomba de calor e a taxa de aquecimento ou resfriamento do ar ambiente de acordo com a velocidade do compressor da bomba de calor.

Tanto os resultados obtidos por Santos (2007) quanto por Monte (2008) foram satisfatórios o suficiente para encorajar o desenvolvimento deste novo trabalho.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho foi desenvolver um sistema de controle automático baseado em microcontrolador para condicionamento ar de secagem utilizando secador com bomba de calor.

Teve-se como objetivos específicos:

- Implementar uma ação de controle PID para que o secador seja capaz de manter a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem de acordo com os valores definidos pelo usuário;
- Implementar uma ação de controle PID para que o secador seja capaz de uniformizar teor de água dos grãos de acordo com o valor definido pelo usuário.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 – Secadores com bomba de calor

2.1.1 – Classificação dos secadores com bomba de calor

Existem diferentes tipos de bombas de calor que podem ser utilizadas no processo de secagem de grãos. Quando devidamente projetadas, as bombas de calor podem ser anexadas a quase todo tipo de secador convencional que usa convecção como modo primário de entrada de calor. Além do mais, as estratégias de controle e o projeto do secador com bomba de calor podem ser modificados para que se obtenham condições de secagem ótimas para diversos produtos (CHEN e MUJUMDAR, 2008).

Um esquema generalizado de classificação de secadores com bomba de calor é ilustrado na Figura 1.

2.1.2 – Fundamentos dos secadores com bomba de calor

As bombas de calor são baseadas nos ciclos de refrigeração. Diferentemente dos refrigeradores, o objetivo da bomba de calor é propiciar aquecimento. Todavia, esta pode ser utilizada tanto para aquecimento quanto para resfriamento, e isso a torna uma poderosa ferramenta a ser utilizada no pré-processamento e na conservação de produtos agrícolas.

Os componentes principais de uma bomba de calor são: compressor, condensador, válvula de expansão e evaporador. O fluido de trabalho usado no ciclo é chamado de refrigerante. O líquido refrigerante, em baixa pressão, evapora no evaporador através da absorção do calor latente de vaporização do fluido da vizinhança, geralmente o ar, produzindo o efeito de resfriamento. O vapor refrigerante resultante é comprimido até a pressão de condensação pelo compressor, que geralmente consome energia elétrica. No condensador, o refrigerante sob alta pressão, é condensado e o calor resultante é liberado para o fluido da vizinhança. O fluido refrigerante condensado é finalmente expandido para a pressão de evaporação através da válvula de expansão e continua o ciclo.

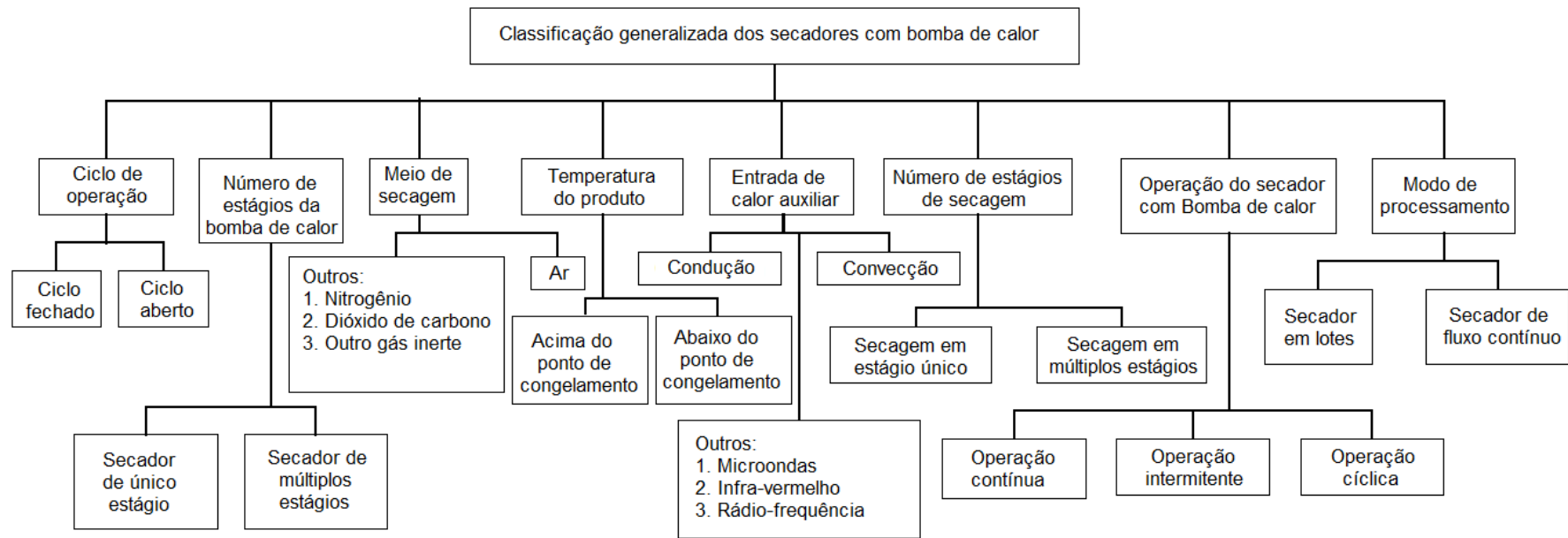


Figura 1 – Esquema generalizado de classificação para secadores com bomba de calor. (Fonte: CHEN e MUJUMDAR, 2008)

A Figura 2 ilustra o diagrama esquemático do ciclo de funcionamento de uma bomba de calor ideal.

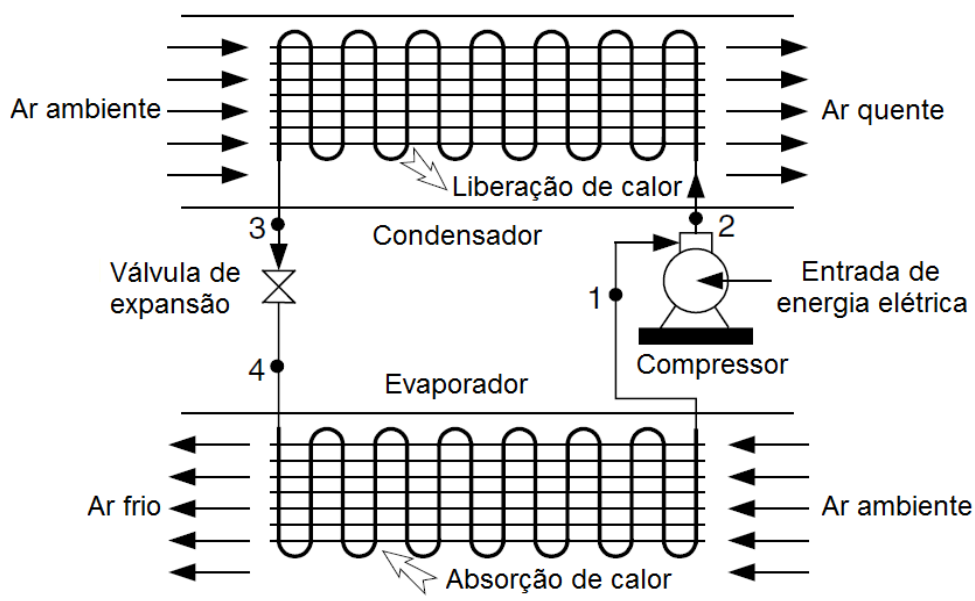


Figura 2 - Diagrama esquemático do ciclo de funcionamento de uma bomba de calor ideal (Fonte: CHEN e MUJUMDAR, 2008)

As variações de pressão e entalpia nos diferentes estágios do processo são ilustradas na Figura 3.

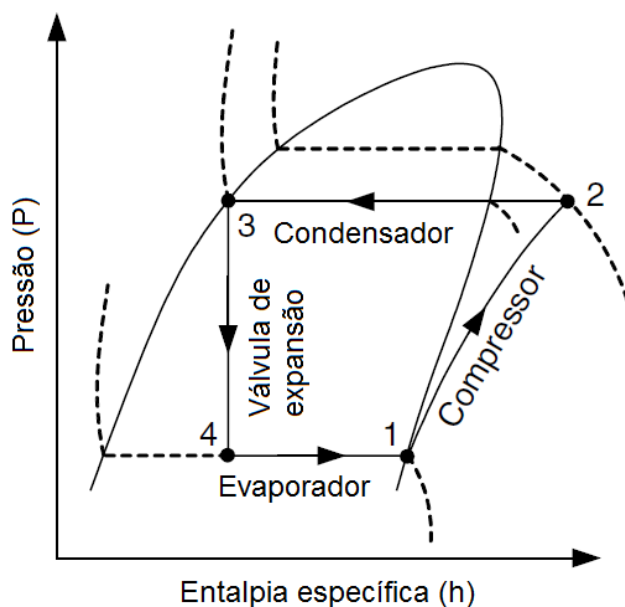


Figura 3 - Diagrama P – h do ciclo de funcionamento da bomba de calor ideal (Fonte: CHEN e MUJUMDAR, 2008)

O rendimento dos refrigeradores e das bombas de calor é expresso em termos do coeficiente de rendimento ou COP (do inglês Coefficient Of Performance), que é definido de acordo com as Equações 1 e 2.

$$COP_{Refrigerador} = \frac{Saída\ desejada}{Entrada\ requerida} = \frac{Efeito\ de\ resfriamento}{Entrada\ de\ trabalho} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (1)$$

$$COP_{Bomba\ de\ calor} = \frac{Saída\ desejada}{Entrada\ requerida} = \frac{Efeito\ de\ aquecimento}{Entrada\ de\ trabalho} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} \quad (2)$$

Como a expansão do refrigerante na válvula de expansão é um processo de fluxo e entalpia constantes, na linha vertical no diagrama P – h da Figura 3 observa-se que $h_3 = h_4$.

Combinando as equações 1 e 2 temos a relação entre o coeficiente de rendimento da bomba de calor e do refrigerador dada pela Equação 3.

$$COP_{Bomba\ de\ calor} = COP_{Refrigerador} + 1 \quad (3)$$

Na Figura 3 verifica-se que o efeito de aquecimento ($h_2 - h_3$) da bomba de calor é igual à soma da energia elétrica consumida pelo compressor ($h_2 - h_1$) e a energia absorvida no evaporador ($h_1 - h_4$). Bombas de calor usadas em processos de secagem geralmente possuem coeficiente de rendimento entre 4 e 7. Isto significa que é possível alcançar de 4 a 7 vezes mais energia sob forma de calor em relação à energia elétrica consumida pelo compressor.

Durante o processo de secagem, a temperatura e a umidade relativa do meio, que geralmente é o ar, necessitam ser mantidas em valores apropriados para que se alcancem condições ótimas de secagem.

Monte (2008) realizou um experimento com bomba de calor com objetivo de verificar a sua viabilidade de utilização em processos agrícolas. Neste experimento foi avaliada a atuação de um inversor de frequência no acionamento do motor do compressor e sua influencia no condicionamento do ar usado nas atividades agrícolas, a taxa de retirada de água do ar ambiente de acordo com a velocidade do motor do compressor da bomba de calor e a taxa de aquecimento ou resfriamento do ar ambiente de acordo com a velocidade do compressor da bomba de calor.

Este procedimento permitiu medições de temperatura e umidade relativa do ar na saída da bomba de calor para frequências da saída do inversor de frequência entre 10 e 65 Hz, de 5 em 5 Hz. Para cada valor de frequência ajustado, registraram-se os dados da diferença entre os valores de temperatura e umidade relativa do ar ambiente e na saída da bomba de calor.

Em um de seus experimentos, realizados em horário vespertino, Monte (2008) obteve a relação para a diferença entre a temperatura do ar ambiente e a temperatura do ar na saída da bomba de calor com um coeficiente de determinação, R^2 , de 0,9964, conforme a Equação 4.

$$\Delta T_1 = -0,003f^2 + 0,605f + 7,819 \quad (4)$$

em que:

ΔT é a diferença entre a temperatura do ar na saída da bomba de calor e o ambiente em °C; e

f é a frequência em Hz.

A relação para a diferença entre a umidade relativa do ar ambiente e a umidade relativa do ar na saída da bomba de calor foi obtida com R^2 de 0,9962, conforme Equação 5.

$$\Delta \varphi_1 = -0,0143f^2 + 2,1764f - 19,0333 \quad (5)$$

em que:

$\Delta \varphi$ é a diferença entre a umidade relativa do ar na saída da bomba de calor e o ambiente em %

Já em outro experimento, realizado em horário matutino, as relações encontradas foram diferentes, conforme as Equações 6 e 7, sendo a Equação 6 com R^2 de 0,990 e a Equação 7 com R^2 de 0,8658.

$$\Delta T_2 = -0,002f^2 + 0,465f + 3,812 \quad (6)$$

$$\Delta \varphi_2 = -0,0168f^2 + 1,9114f - 1,9509 \quad (7)$$

Tais observações deixam claro que existe relação entre as características psicrométricas do ar na saída da bomba de calor e a frequência de rotação do motor do compressor. Porém, como pode ser visto nas Figuras 4 e 5, para um mesmo valor de frequência podem ocorrer diferentes valores de ΔT e $\Delta \phi$ dependendo das condições ambientes no momento em que o experimento foi realizado. Logo, para manter as características psicrométricas do ar de saída da bomba de calor conforme desejado deve-se atuar no inversor de frequência, levando em consideração as variações ocorridas nas características do ar ambiente.

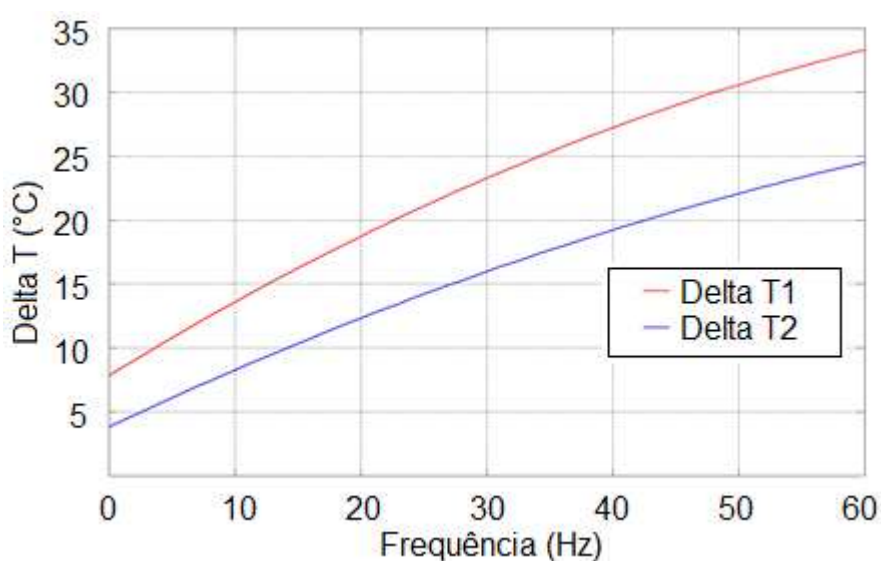


Figura 4 - Diferenças entre a temperatura do ar ambiente e na saída da bomba de calor observadas por Monte (2008)

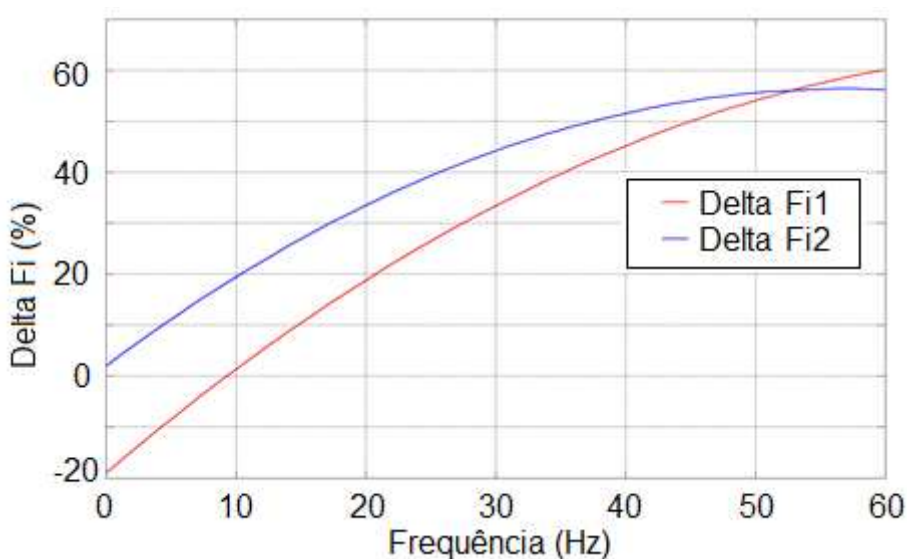


Figura 5 - Diferenças entre umidade relativa do ar ambiente e na saída da bomba de calor observadas por Monte (2008)

2.2 – Sistema de controle em secadores

As características potenciais e objetivadas em um sistema controlado de secagem são:

- 1 – Segurança: redução do perigo de fogo ou explosão e emissão de partículas;
- 2 – Garantia da qualidade do produto e propriedades desejadas: manutenção dos valores desejados da qualidade dos produtos e suas propriedades, como sabor e cor;
- 3 – Processamento ou rendimento: maximização do rendimento;
- 4 – Economia de energia: minimizar o custo e melhorar a eficiência;
- 5 – Atenuação dos distúrbios: minimizar a influência sobre a quantidade e qualidade do produto;
- 6 – Estabilidade do processo de secagem: responder às oscilações decorrentes do processo de secagem do produto e
- 7 – Robustez: garantir a operação normal do sistema para uma ampla faixa de pontos de operação e distúrbios.

Prates (2009) desenvolveu um sistema de controle automático de temperatura e velocidade do ar de secagem em um secador de plantas medicinais. Neste trabalho verificou-se que além de um ganho significativo na qualidade do produto submetido à secagem no sistema controlado, houve uma redução de até 63% do consumo de energia elétrica no motor do ventilador.

2.2.1 – Variáveis controladas em um sistema de secagem

As variáveis de saída, também chamadas de variáveis do processo ou variáveis controladas (VC) são as saídas do processo de secagem e representam a resposta do processo a alterações nos valores de referência (ou alterações nas variáveis manipuladas (VM)) ou a distúrbios que afetem o processo, tais como as variações no ambiente.

Segundo Chen e Mujumdar (2008) as variáveis controladas de maior importância em um sistema de secagem controlado são:

1. Qualidade do produto, tais como sabor e cor;
2. Teor de água final do produto;
3. Temperatura do ar de secagem e
4. Umidade relativa do ar de secagem.

Monitorar a qualidade do produto durante o processo de secagem pode ser difícil e caro. Devido a estes fatos, a qualidade do produto geralmente é inferida com base na experiência do operador do processo.

O teor de água do produto pode, teoricamente, ser medido durante o processo em alguns casos, mas este tipo de medida não é feito na maioria das vezes devido ao alto custo e à imprecisão dos sensores. Todavia, o teor de água do produto pode ser inferido com base na temperatura e umidade relativa do ar na vizinhança do produto. Existe baixa correlação entre a temperatura do ar na saída do secador e o teor de água do produto, logo, o controle indireto pode resultar em um controle pobre do secador, especialmente se a umidade do ar não for incluída no esquema de controle. Todavia, quando se faz controle indireto considerando-se a temperatura e a umidade relativa do ar de saída do secador, podem-se conseguir medidas indiretas bastante precisas do teor de água dos grãos.

Silva (2008) sugere a equação 8 para o cálculo do teor de água de alguns grãos, aqui denominada de umidade de equilíbrio, com base na temperatura e umidade relativa de equilíbrio do ar na vizinhança do produto:

$$U_e = a - b\{\ln[-(T + c) \ln UR]\} \quad (8)$$

em que a, b e c são constantes que dependem do produto (Tabela 1),

T = Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$);

UR = Umidade relativa (decimal) e

U_e = Umidade de equilíbrio (decimal, b.s.).

Tabela 1 - Constantes a, b e c para o cálculo do teor de água dos grãos, de acordo com a Equação 8.

Produto	a	b	c
Café	0,350	0,058	50,555
Milho	0,339	0,059	30,205
Arroz sem casca	0,294	0,046	35,703
Soja	0,416	0,072	100,288
Trigo (duro)	0,356	0,057	50,998

2.2.1 – Variáveis manipuladas em um sistema de secagem

As variáveis manipuladas podem ser escolhidas em um processo de secagem dependendo do tipo do secador. As variáveis manipuladas (VM) representam as variáveis no processo que podem ter seus valores alterados com a finalidade de manter as variáveis controladas de acordo com os valores de referência.

As variáveis manipuladas mais comuns em um processo de secagem são:

1. O fluxo de ar;
2. O fluxo de grãos;
3. A alimentação dos sistemas de aquecimento do ar;
4. A velocidade de rotação (no caso de secadores rotacionais) e
5. O ciclo de funcionamento do compressor (no caso de secadores com bomba de calor).

A escolha das variáveis controladas e das variáveis manipuladas depende do tipo de secador em questão. (CHEN e MUJUMDAR, 2008)

2.3 – Sistema de controle digital baseado em microcontroladores

Computadores atualmente têm formado uma parte integrante de muitos sistemas de controle em tempo real. Com o advento dos microprocessadores e microcontroladores nas últimas décadas, o uso de computadores em aplicações de controle tem crescido exponencialmente. Microcontroladores são computadores embutidos em um chip e que podem ser utilizados, entre outras coisas, em sistemas de controle de tempo real. Estes dispositivos são de baixo custo, são construídos em um único chip e

são de fácil programação. Os microcontroladores são programados tradicionalmente utilizando linguagem Assembly. Atualmente é possível programar estes dispositivos usando linguagens de programação de alto nível como BASIC, PASCAL ou C. Como resultado disso, algoritmos de controle muito complexos podem ser desenvolvidos e implementados em microcontroladores.

A engenharia de controle é voltada para o controle de um sistema dinâmico ou uma planta. Um sistema dinâmico pode ser um sistema mecânico, um sistema elétrico, um sistema pneumático, um sistema térmico ou a combinação de dois ou mais tipos de sistema. A natureza do sistema dinâmico é descrita através de equações diferenciais. Dado o modelo (equações diferenciais), a entrada e as condições iniciais, é possível calcular a saída do sistema.

Uma planta pode ter uma ou mais entradas e uma ou mais saídas. Geralmente a planta é um sistema de tempo contínuo onde as entradas e as saídas também são contínuas no tempo.

Uma planta é um sistema de malha aberta onde entradas são aplicadas para alterar as saídas. Em um sistema de malha aberta não se conhece a saída do sistema. Em uma planta também podem ocorrer distúrbios que afetem sua natureza e em um sistema de malha aberta não há como se conhecer ou minimizar estes distúrbios. Na Figura 6 observa-se um sistema de malha aberta onde um sinal de entrada é aplicado de forma a alterar o sinal de saída. Este sistema é de única entrada e única saída, ou SISO (do inglês single-input single-output), visto que existem apenas uma entrada e uma saída disponíveis.

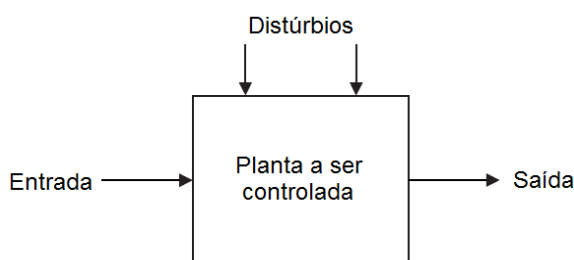


Figura 6 - Sistema de malha aberta.

Geralmente, sistemas de controle podem ter múltiplas entradas e múltiplas saídas, ou MIMO (do inglês Multiple inputs and multiple outputs). Devido ao fato de não se ter conhecimento do estado da saída e dos efeitos das influências externas, os sistemas de malha aberta não são atrativos quando se opera em processos térmicos. Existe uma maneira melhor de se controlar este sistema, e isto é feito usando-se um sensor para medir o estado das variáveis na saída da planta e então comparar esta saída com o valor de saída desejado. A diferença entre a saída desejada e o valor atual da saída é chamada de sinal de erro. O sinal de erro é usado para forçar a saída do sistema a atingir o valor desejado. Este tipo de sistema é chamado de sistema de controle de malha fechada ou controle por retroalimentação. Na Figura 7 está representado um sistema típico de malha fechada. Uma das vantagens dos sistemas de controle de malha fechada é a capacidade de responder aos distúrbios e corrigir a saída na incidência destes. Um controlador (ou um compensador) é usualmente empregado para ler o sinal de erro e comandar a planta de forma a fazer com que o erro tenda à zero (IBRAHIM, 2006).

Sistemas de malha fechada possuem a vantagem de ter maior exatidão que os sistemas de malha aberta. Estes também são menos sensíveis a distúrbios e mudanças no ambiente. Por outro lado, podem se tornar instáveis se não forem devidamente projetados e sintonizados.

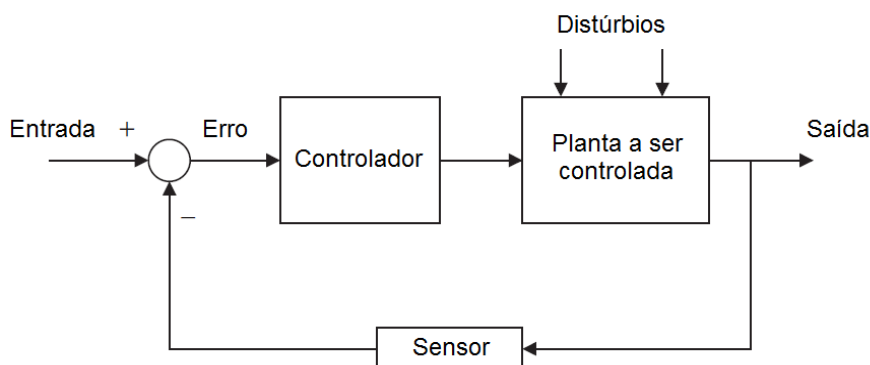


Figura 7 - Sistema de malha fechada.

Com o advento do computador digital e o baixo custo dos elementos de processamento microcontrolados tornou-se viável o uso destes dispositivos em sistemas de controle. Um computador digital pode monitorar

vários sinais em um sistema e tomar decisões inteligentes na implementação de um sistema de controle (IBRAHIM, 2006).

Diversas aplicações de controle nos dias atuais são baseadas em computadores, onde computadores digitais ou microcontroladores são utilizados como controladores do sistema. A Figura 8 representa um sistema típico controlado por computador

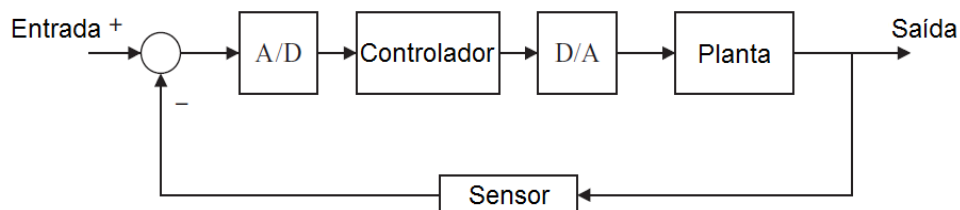


Figura 8 - Sistema de controle digital.

Neste sistema o sinal de erro é analógico e o conversor analógico/digital (A/D) é usado para converter o sinal para o formato digital para que possa ser lido pelo computador ou microcontrolador. O conversor A/D faz amostragens periódicas do sinal e então converte estes valores amostrados em formato digital adequado para o processamento em um computador digital. O computador roda o algoritmo para implementar as ações de controle necessárias para fazer com que a saída da planta seja como desejado. A saída de um computador digital é um sinal digital, e este é normalmente convertido para a forma analógica com o uso de um conversor digital/analógico (D/A). Existem microcontroladores que já possuem circuitos conversores A/D e D/A embutidos. Estes microcontroladores podem ser conectados diretamente aos sinais analógicos de entrada e à planta.

Na Figura 8 a entrada de referência, a saída do sensor e a saída e entrada da planta são todos assumidos como sendo sinais analógicos. A Figura 9 ilustra o diagrama de bloco do sistema da Figura 8 onde o conversor A/D é representado como um amostrador.

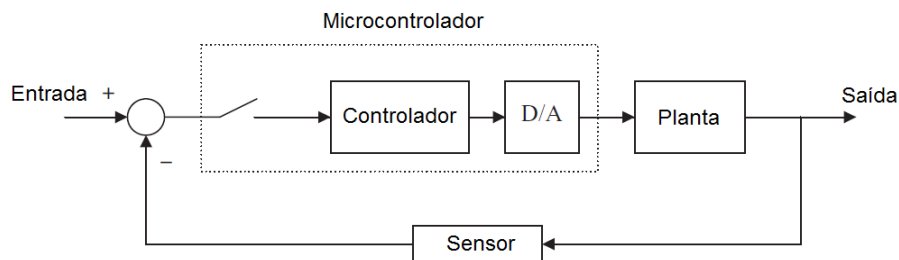


Figura 9 - Diagrama de blocos de um sistema de controle digital.

Existem outras variações dos sistemas de controle básico. Na Figura 10 outro tipo de sistema de controle digital é ilustrado, onde o valor de referência ou set-point é lido através de um teclado ou outra forma de entrada digital pelo algoritmo de controle.

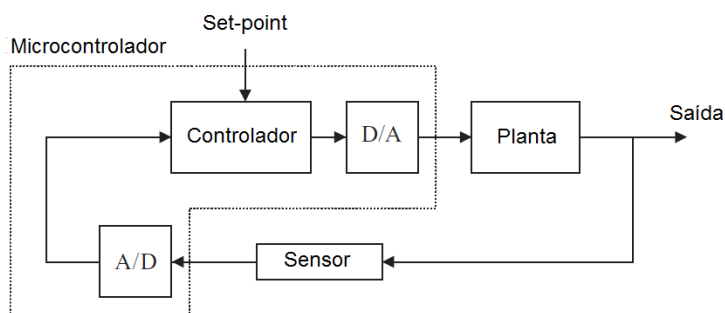


Figura 10 - Outra forma de um sistema de controle digital.

O interesse em sistemas de controle digitais tem crescido rapidamente nas últimas décadas desde a introdução dos microcontroladores. Um microcontrolador é um computador construído em um único chip, incluindo muitas das funcionalidades de um computador, porém, com tamanho reduzido. Hoje em dia existem milhares de diferentes tipos de microcontroladores no mercado, que vão dos dispositivos de 8 a 40 pinos, ou em alguns casos dispositivos de 64 pinos ou mais. Como exemplo, o microcontrolador PIC 18F4550 é um microcontrolador de 8 bits, 40 pinos e com as seguintes características:

- Operação em até 48 MHz sem o uso de multiplicador de frequência;
- 32 K de memória de programa Flash;
- 2048 bytes de memória RAM;
- 256 bytes de memória EEPROM;
- 15 tipos de interrupção;

- 35 bits de capacidade de I/O paralelas;
- 4 timers;
- Compatível com USB 2.0;
- Conversor A/D de 13 canais e 10 bits;
- 2 comparadores analógicos;
- Programável em assembly ou em linguagens de alto nível;

A Figura 11 representa um microcontrolador PIC 18F4550

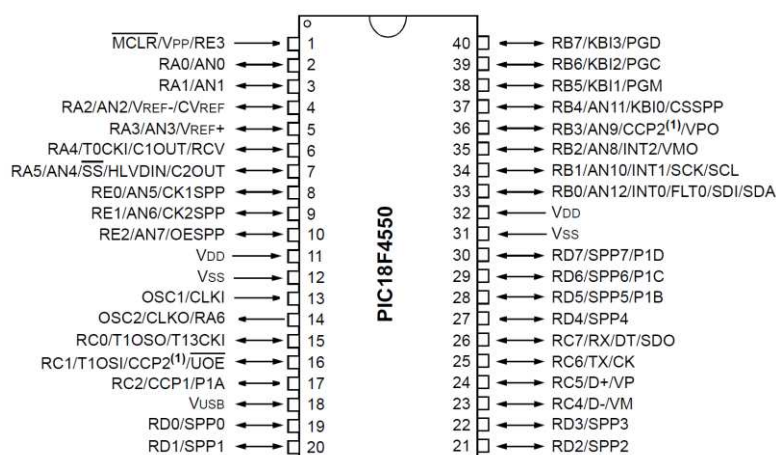


Figura 11 - Microcontrolador PIC 18F4550 (Fonte: MICROCHIP, 2003)

A memória flash é não volátil e é usada para armazenar o programa do microcontrolador. Esta memória pode ser apagada e reprogramada eletricamente. A memória EEPROM é usada para armazenar dados não voláteis do programa e pode ser escrita e apagada através de rotinas executadas pelo mesmo. O microcontrolador PIC 18F4550 possui 32 Kbytes de memória de programa, que é uma quantidade razoável para aplicações baseadas em controle. Adicionalmente, a memória RAM é de 2048 bytes, que é quantidade suficiente para tais aplicações.

2.4 – Sensores utilizados em sistemas de controle digitais

Sensores são partes importantes dos sistemas de controle de malha fechada. Um sensor é um dispositivo que fornece como saída um sinal que é relacionado com a medição de uma quantidade física assim como temperatura, velocidade, força, pressão, deslocamento, aceleração, torque, fluxo, umidade, luminosidade etc. Os sensores são utilizados em sistemas

de controle de malha fechada nos loops de retroalimentação, e estes fornecem informações sobre a saída atual da planta.

Sensores podem ser classificados como analógicos ou digitais. Os sensores analógicos são amplamente disponíveis no mercado e suas saídas geralmente são sinais de tensão analógica. Por exemplo, a saída de um sensor de temperatura analógico pode ser uma tensão proporcional à temperatura medida. Sensores analógicos somente podem ser conectados em um computador com o uso de um conversor A/D. Sensores digitais não são muito comuns. Estes possuem um nível lógico de saída que permite que o mesmo seja conectado diretamente a porta de entrada do computador.

A escolha de um sensor para uma aplicação particular depende de muitos fatores, tais como custo, confiabilidade, exatidão, resolução, repetibilidade, faixa de operação e linearidade. Alguns fatores importantes são descritos abaixo (IBRAHIM, 2006).

Faixa de operação: A faixa de operação (ou range, do inglês) especifica os limites superior e inferior da variável medida para que a medição possa ser realizada. Por exemplo, se a faixa de operação de temperatura de um sensor especificada for 10 a 60 °C, então o sensor somente pode ser utilizado para medir temperaturas que estão dentro desta faixa.

Resolução: A resolução de um sensor é especificada como a menor variação no valor da variável medida capaz de causar variação na saída do sensor.

Repetibilidade: A repetibilidade de um sensor é a variação nos valores de saída que pode ser esperada quando o sensor mede a mesma quantidade física por um longo período de tempo.

Linearidade: Considera-se que um sensor ideal possua a saída exatamente proporcional ao valor medido. Todavia, na prática todos os sensores exibem algum tipo de não linearidade, dependente de sua construção e das condições em que a medida é realizada.

2.4.1 – Sensores de temperatura

Temperatura é uma das variáveis físicas fundamentais em muitas aplicações químicas e processos de controle. Medições exatas e confiáveis de temperatura são importantes em todas as aplicações de sistema de controle.

Sensores de temperatura podem ser analógicos ou digitais. Alguns dos sensores de temperatura analógicos mais comumente usados são termopares, resistor detector de temperatura (TDRs) e termistores. Sensores digitais são encontrados na forma de circuitos integrados (CI). A escolha do sensor a ser utilizado depende da exatidão, da faixa de temperatura, da velocidade da resposta, do ambiente (químico, elétrico ou físico) e do custo.

Sensores de temperatura em circuito integrado podem ter saída em tensão ou em corrente. Sensores com saída de tensão geram em sua saída uma tensão que é diretamente proporcional à temperatura medida. Similarmente, sensores com saída de corrente funcionam como fonte de corrente de alta impedância, fornecendo em sua saída uma corrente que é proporcional a temperatura medida.

Um sensor de temperatura de saída analógica muito popular é o LM35 fabricado pela National Semiconductors Inc. ilustrado na Figura 12. Este sensor é capaz de operar na faixa de -55 a 150 °C e fornece como saída uma tensão que varia de forma linear com o valor da temperatura com fator de escala de 10 mV/°C (NATIONAL SEMICONDUCTORS, 2000).

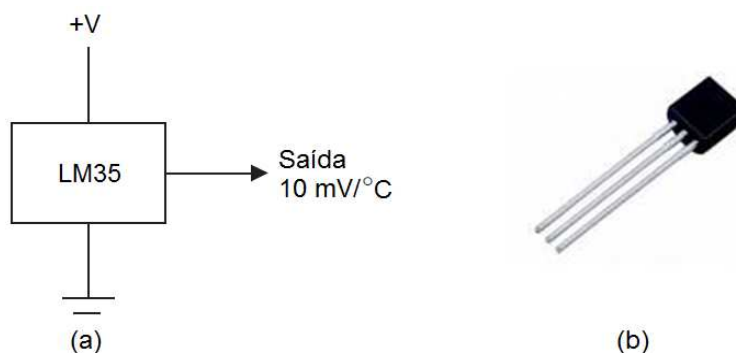


Figura 12 - Sensor de temperatura LM35 (a) Representação (b) Encapsulamento

Características do sensor LM35:

- Calibrado diretamente em °C (centígrados);
- Fator de escala linear de + 10,0 mV/ °C;
- Exatidão de 0,5 °C (a + 25 °C);
- Faixa de operação de -55 a 150 °C;
- Não linearidade típica de apenas ¼ °C.

2.4.2 – Sensores de umidade relativa

A umidade relativa do ar é outra das variáveis físicas fundamentais em muitas aplicações e processos de controle. Em diversos processos agrícolas, da indústria de alimentos ou aplicações que envolvem o índice de conforto térmico ambiental, medições exatas e confiáveis da umidade relativa do ar são muito importantes.

Existem diversos métodos para a medição da umidade relativa do ar. Alguns métodos de medição de umidade relativa mais comumente utilizados são a medição mecânica da umidade, a medição psicrométrica da umidade, a medição da umidade por eletrodos, higrômetro de espelho de ponto de orvalho e sensores eletrônicos de umidade.

Sensores de umidade eletrônicos geralmente são analógicos e podem ter saída em tensão ou em corrente.

A série de sensores de umidade HIH 4000-004 fabricados pela Honeywell é especialmente desenvolvida para sistemas de controle (Figura 13). A conexão direta deste sensor com o sistema de controle ou outro dispositivo é possível devido à sua saída linear de tensão (HONEYWELL, 2008).



Figura 13 - Sensor de umidade relativa HIH 4000-004

A relação da tensão de saída do sensor HIH 4000-004 com a umidade relativa é ilustrada na Figura 14.

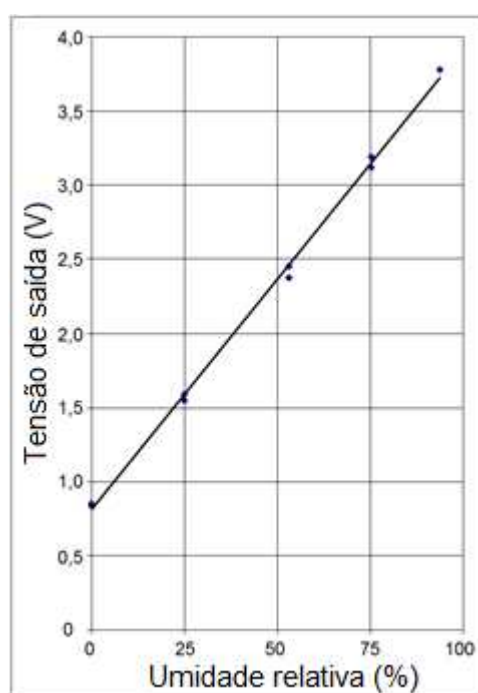


Figura 14 - Tensão de saída do sensor HIH 4000 versus umidade relativa (%)

Na Figura 15 pode-se observar a região de operação do sensor de umidade HIH 4000-004.

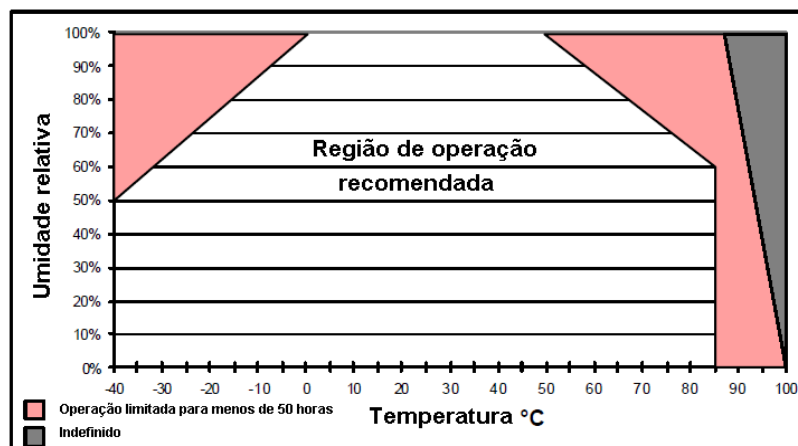


Figura 15 - Região de operação do sensor de umidade HIH 4000-004

2.5 – Ação de controle PID

A combinação das ações proporcional, integral e derivativa usadas para gerar um só sinal de controle, dá origem ao controlador proporcional-integral-derivativo ou simplesmente PID. O objetivo é aproveitar as características particulares de cada uma destas ações a fim de se obter uma melhora significativa do comportamento transitório e em regime permanente do sistema controlado. O sinal de controle gerado pelo controlador PID ($u(t)$) é dado genericamente de acordo com a Equação 9 (ASTRÖM e HÄGGLUND, 1995):

$$u(t) = k \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (9)$$

Onde e é o erro ou desvio entre a saída medida e o valor de referência.

Desta forma têm-se três parâmetros de sintonia no controlador:

1. O ganho proporcional k (ação proporcional);
2. O tempo de integração T_i (ação integral);
3. O tempo derivativo T_d (ação derivativa).

Apesar da disponibilidade das três ações básicas, dependendo da aplicação não será necessária a utilização de uma ou mais destas ações.

Desta forma temos as seguintes configurações mais utilizadas:

1. Proporcional (P);
2. Proporcional-integral (PI);
3. Proporcional-integral-derivativo (PID).

2.5.1 – Controlador proporcional

Diversos processos simples podem ser controlados facilmente somente com o ganho proporcional. Neste caso o sinal de controle é dado pela Equação 10:

$$u(t) = k[e(t)] + b \quad (10)$$

Onde b é o bias (do inglês) ou a saída do controlador quando o erro é igual a zero.

Em geral, a ação de controle proporcional provê uma resposta rápida quando comparado com outros controladores, porém, um erro estacionário sempre ocorre neste sistema. Este erro estacionário é chamado de offset e é indesejável em muitos casos. Todavia, é possível eliminar o offset através da combinação do controle proporcional com um dos outros modos de controle básicos.

2.5.2 – Controlador proporcional-integral

O controlador proporcional-integral possui resposta mais lenta quando comparado com o controlador proporcional. Tipicamente o tempo de resposta do controlador PI é aproximadamente 50% maior do que o do controlador proporcional. Para o controlador PI a equação de controle é dada pela Equação 11:

$$u(t) = k \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \right] \quad (11)$$

O ganho do controlador PI tem efeito não apenas no erro, mas também na ação integral. Quando se compara a equação do controlador PI (Equação 11) com a equação do controlador P (Equação 10) vemos que o termo de bias do controlador P é substituído pelo termo integral no controlador PI. Então, o termo de bias do controlador PI é dado pela Equação 12:

$$b = k_c \cdot \frac{1}{T_i} \int_0^{\tau} e(\tau) d\tau \quad (12)$$

Logo, a ação integral ajusta automaticamente o valor do bias do sinal para eliminar qualquer erro.

2.5.3 – Controlador proporcional-integral-derivativo

O objetivo principal de um controlador proporcional-integral-derivativo é proporcionar uma resposta tão rápida quanto o controlador proporcional, porém sem a presença do erro estacionário. A ação derivativa (D) é responsável por adicionar a velocidade necessária na resposta do controlador PI para que isso ocorra.

A saída do processo apresenta um tempo de atraso com relação às modificações na variável de entrada. Este tempo de atraso explica-se pela dinâmica do processo, que faz com que uma mudança na variável de controle provoque uma mudança considerável na saída da planta somente após um intervalo de tempo. Este fato é responsável por transitórios com grande amplitude e período de oscilação, podendo, em um caso extremo, gerar respostas instáveis.

A ação derivativa quando combinada com a ação PI tem justamente a função de antecipar a ação de controle a fim de que o processo reaja mais rápido. Neste caso, o sinal de controle a ser aplicado é proporcional a uma predição da saída do processo. Devido a esta característica, a ação de controle D não deve ser utilizada em sistema onde haja a presença de ruídos no sinal de saída.

2.5.4 – A escolha do controlador correto

De posse das três ações básicas de controle e das combinações que podem ocorrer através do agrupamento destas, é necessário que se escolha um controle particular para um processo específico. A Figura 16 representa um processo para a seleção de um modo de controle.

Partindo do topo do fluxograma, a primeira questão é: Admite-se erro estacionário na resposta do sistema? Se a resposta for sim, com controlador

proporcional pode ser utilizado. Se a resposta for não seguimos para o próximo bloco que questiona: Existe ruído no sistema? Se existe ruído no sistema, então um controlador PI deve ser utilizado. Se não existir ruídos no sistema seguimos para próxima questão: O tempo de atraso é excessivo? Se o produto do tempo de atraso do sistema pela constante de tempo do mesmo for maior que 0,5, pode-se considerar que o tempo de atraso é dominante na resposta e logo o controlador PI deve ser utilizado. Se o processo não possui tempo de atraso excessivo, então se segue para o próximo bloco que pergunta: A capacitância do sistema é pequena? Se a resposta for sim, então um controlador PI pode ser utilizado. Um processo com um tempo de atraso curto e pequena capacitância não necessita de ação derivativa para aumentar a resposta do sistema, visto que esta já é rápida o suficiente. Finalmente, se a capacitância do processo for grande, um controlador PID pode ser usado com eficiência (CHEN e MUJUMDAR, 2008).

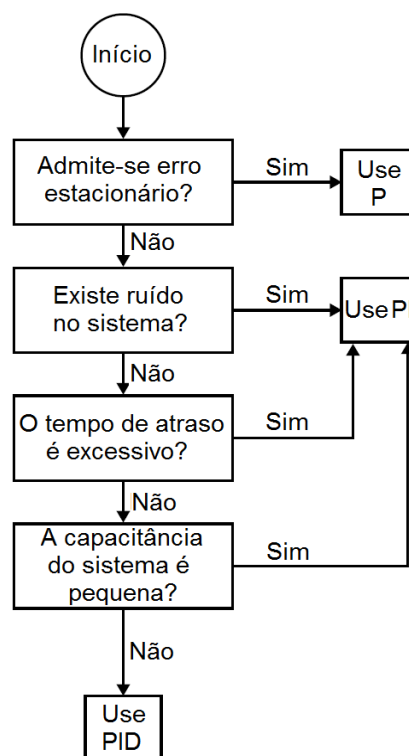


Figura 16 - Fluxograma para seleção do sistema de controle

Segundo Chen e Mujumdar (2008) o controlador PI é o controlador mais comum encontrado em plantas. Analisando o fluxograma pode-se

perceber o porquê. Existem três caminhos possíveis para o controlador PI, enquanto existem quatro blocos de decisões até se chegar ao controlador PID.

2.5.5 – Regras de sintonia para controladores PID

Quando o modelo matemático de uma planta pode ser obtido é possível aplicar várias técnicas de projeto na determinação dos parâmetros do controlador, parâmetros estes que vão impor as especificações do regime transitório e do regime permanente do sistema de malha fechada. Porém, quando o modelo matemático de uma planta não pode ser facilmente obtido, a abordagem analítica do projeto do controlador PID não é possível, fazendo-se assim necessário recorrer a outros métodos para a sintonia do controlador (OGATA, 1997).

O processo de selecionar parâmetros do controlador que garantam uma dada especificação de desempenho é conhecido como sintonia do controlador. Ziegler e Nichols, citados por Ogata (1997), sugeriram regras para a sintonia de controladores PID baseados na resposta experimental ao degrau ou no valor de k_p que resulta em uma estabilidade marginal, quando somente uma ação proporcional é utilizada. As regras de Ziegler-Nichols são úteis quando os modelos matemáticos da planta são desconhecidos. Elas sugerem um conjunto de valores de k_p , T_i e T_d que vão proporcionar uma operação estável do sistema. Contudo, o sistema resultante pode exibir um máximo sobre-sinal elevado devido a resposta do degrau, o que é inaceitável. Nesse caso, precisa-se fazer uma série de sintonias finas até que um resultado aceitável seja obtido. De fato, as regras de sintonia de Ziegler-Nichols fornecem estimativas dos valores dos parâmetros e proporcionam um ponto de partida na sintonia fina, e não os valores definitivos de k_p , T_i e T_d logo na primeira tentativa.

2.5.5.1 – Regras de Ziegler-Nichols para sintonia de controladores PID

Ziegler e Nichols, citados por Ogata (1997), propuseram regras para a determinação de valores do ganho proporcional k_p , do tempo integral T_i e do tempo derivativo T_d baseadas na característica da resposta temporal de uma

dada planta. Essa determinação dos parâmetros dos controladores PID pode ser feita por engenheiros de campo, por meio de experimentos com a planta.

Existem dois métodos denominados regras de sintonia de Ziegler-Nichols: O método da resposta ao degrau e o método do período crítico.

Método da resposta ao degrau: Neste método, obtêm-se experimentalmente a resposta da planta a uma entrada em degrau unitário, como ilustrado na Figura 17.

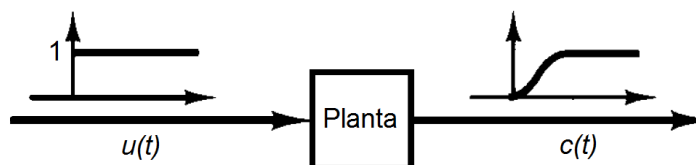


Figura 17 - Resposta de uma planta ao degrau unitário (fonte: OGATA, 1997)

Se a planta não possuir integradores nem polos complexos conjugados dominantes, então essa curva de resposta ao degrau pode ter o aspecto de um S, como ilustrado na Figura 18. Esse método se aplica se a curva de resposta ao degrau de entrada tiver o aspecto de um S. Essa curva de resposta ao degrau pode ser gerada experimentalmente ou a partir de uma simulação dinâmica da planta.

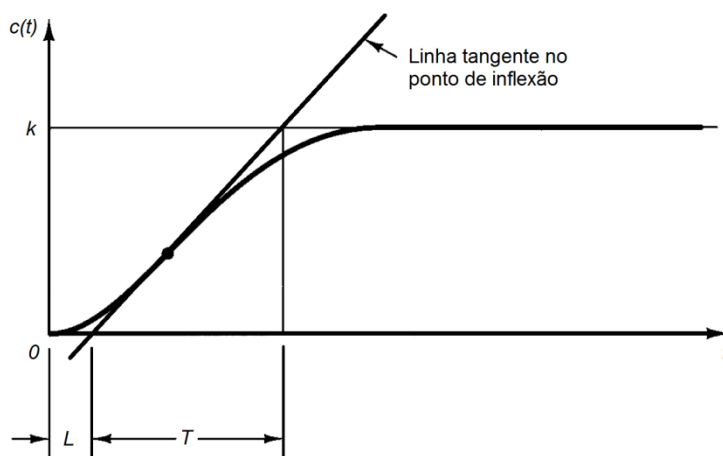


Figura 18 - Curva de resposta em formato de S (fonte: OGATA, 1997)

A curva em formato de S pode ser caracterizada por duas constantes, o atraso L e a constante de tempo T . O atraso e a constante de tempo são determinados desenhando-se uma linha tangente no ponto de inflexão da

curva com o formato em S e determinando-se a intersecção da linha tangente com o eixo dos tempos e a linha $c(t) = k$, como ilustrado na Figura 18.

Ziegler e Nichols sugeriram escolher os valores de k_p , T_i e T_d de acordo com as fórmulas apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Regra de sintonia de Ziegler-Nichols baseada na resposta ao degrau da planta (Método da resposta ao degrau)

Tipo de Controlador	k_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0,9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
PID	$1,2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0,5L$

Método do período crítico: Neste método de sintonia define-se primeiro $T_i = \infty$ e $T_d = 0$. Utilizando somente a ação de controle proporcional (Figura 19), aumenta-se o valor de k_p de 0 até o valor crítico k_{cr} , no qual a saída exibe uma oscilação sustentada pela primeira vez. Portanto, o ganho crítico k_{cr} e o correspondente período P_{cr} são determinados experimentalmente como ilustrado na Figura 20.

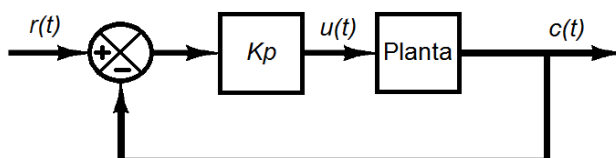


Figura 19 - Sistema de malha fechada com controlador proporcional

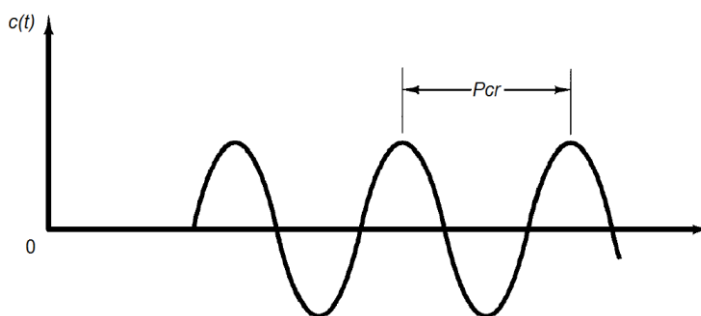


Figura 20 - Oscilação sustentada com período P_{cr}

Ziegler e Nichols sugeriram escolher os valores de k_p , T_i e T_d de acordo com as fórmulas apresentadas na tabela 3.

Tabela 3 – Regra de sintonia de Ziegler-Nichols baseada no ganho crítico K_{cr} e no período crítico P_{cr} (Método do período crítico)

Tipo de Controlador	k_p	T_i	T_d
P	$0,5k_{cr}$	∞	0
PI	$0,45k_{cr}$	$\frac{1}{1,2}P_{cr}$	0
PID	$0,6k_{cr}$	$0,5P_{cr}$	$0,125P_{cr}$

2.6 – Inversores de frequência

Uma forma de controlar, com precisão, o torque e a velocidade de um motor trifásico, quer seja a partir de uma entrada de alimentação monofásica, quer seja a partir de uma entrada de alimentação trifásica é através de um inversor de frequência.

Os inversores de frequência possuem uma entrada ligada à rede de energia comum de alimentação e uma saída que é aplicada ao dispositivo que deve ser alimentado, no caso um motor trifásico, conforme ilustrado na Figura 21.

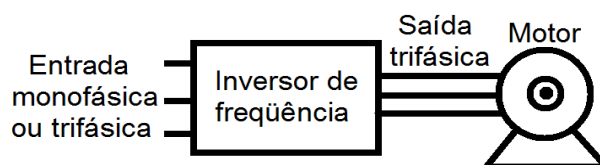


Figura 21 - Ligação do inversor de frequência

Como o controle é feito variando-se a frequência e a tensão, circuitos com características especiais devem ser usados. Esses circuitos se baseiam em configurações complexas formadas por dispositivos semicondutores de potência, dispositivos lógicos de controle, sistema de proteção e de monitoramento do funcionamento.

Um inversor de frequência possibilita o controle da velocidade de um motor trifásico através da frequência da tensão gerada. A frequência de operação de um inversor está normalmente entre 0,5 e 400 Hz, dependendo

do modelo e da marca. Entretanto, deve-se notar que quando a velocidade de um motor é alterada pela variação da frequência, seu torque também será modificado. Para manter o torque constante basta fazer com que a relação tensão/frequência ou V/F seja constante.

Antes de utilizar o inversor de frequência em qualquer operação é necessário realizar a parametrização do mesmo. Parametrizar um inversor é programá-lo para uma determinada modalidade de operação. O número de parâmetros a serem programados depende da marca e tipo, sendo os mais comuns no mercado brasileiro os da Siemens, ABB, WEG, Yaskawa, Allen Bradley e Metaltex. Para a programação normalmente faz-se o uso de teclas numa sequência que é determinada pelo fabricante.

Os principais parâmetros encontrados nos inversores são:

1. Programação da tensão nominal do motor;
2. Programação da corrente nominal do motor. Esse valor será usado pelo sistema de proteção contra sobrecarga;
3. Programação da frequência mínima de saída, variando tipicamente entre 0 e 650 Hz;
4. Programação da frequência máxima de saída, que também pode variar entre 0 e 650 Hz;
5. Programação da seleção do set-point de frequência. O set-point de frequência geralmente pode ser através de teclas ou entrada analógica de tensão ou corrente. Pode-se também trabalhar com frequência fixa;
6. Programação da rampa de aceleração, ou seja, o tempo que o motor leva para atingir a velocidade máxima e
7. Programação do tempo de parada.

Uma vez corretamente parametrizado o inversor de frequência está apto a entrar em operação (WEG, 2008).

2.7 – Uso de sinal PWM para obtenção de saída analógica

A modulação por largura de pulso ou PWM, do inglês Pulse Width Modulation, produz basicamente uma forma de onda digital, que pode ser utilizada como um conversor digital/analógico (D/A) simples para algumas aplicações externas. Existem diversas aplicações de microcontroladores que necessitam de uma saída analógica, porém, não requerem conversores D/A de alta resolução. Para estas aplicações, as saídas PWM podem ser convertidas em saídas analógicas.

A conversão da forma de onda PWM em sinais analógicos envolve o uso de filtros passa-baixa analógicos.

Em um sinal PWM típico, a frequência fundamental é fixa, mas a largura do pulso é variável. A largura do pulso é diretamente proporcional a amplitude do sinal original não modulado. Em outras palavras, em um sinal PWM, a frequência do sinal é constante enquanto o ciclo ativo varia (de 0 a 100%) de acordo com a amplitude do sinal original. Um sinal PWM típico é ilustrado na Figura 22.

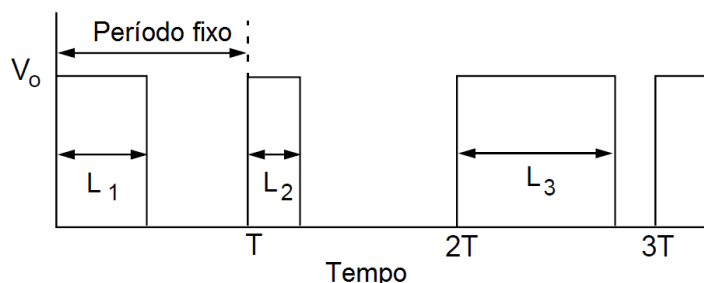


Figura 22 - Forma de onda PWM típica

Uma análise de Fourier de um sinal PWM típico mostra que existe um forte pico na frequência $F_n = 1/T$. Outros fortes harmônicos também existem em $F = K/T$, onde K é um inteiro. Estes picos representam ruídos indesejáveis e precisam ser eliminados. Isto requer que o sinal PWM seja filtrado por um filtro passa-baixa, para assim eliminar estes componentes de ruídos inerentes como ilustrado na Figura 23.

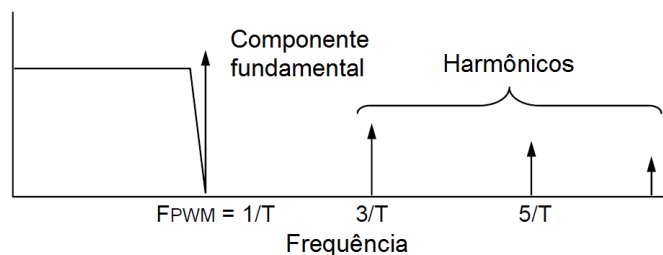


Figura 23 - Espectro de frequência de um sinal PWM

Para que as componentes harmônicas de ordem elevada sejam eliminadas do sinal, é necessário que a banda de passagem do filtro seja menor ou igual à frequência fundamental do sinal PWM, de acordo com a Equação 13.

$$F_{bp} < (F_{PWM} = 1/T) \quad (13)$$

A resposta desejada de um filtro passa-baixa para este propósito é ilustrado na Figura 24.

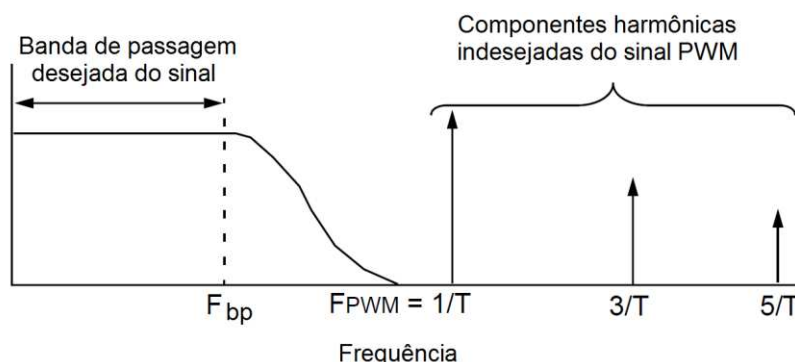


Figura 24 - Resposta de um filtro passa-baixa

Isto significa que $F_{pb} \ll F_{PWM}$ ou $F_{PWM} \gg F_{BP}$. Então, para que esta condição ocorra, deve-se satisfazer a Equação 14.

$$F_{PWM} = K \cdot F_{bp} \quad (14)$$

Onde K é uma constante inteira e deve ser maior 1. O valor de K deve ser escolhido em função do número de dB das componentes dos ruídos inerentes do sinal PWM que se deseja eliminar.

Um filtro passa-baixa RC simples pode ser utilizado para ser obter saída analógica a partir do sinal PWM de um microcontrolador. Em uma

aplicação onde se deseja um filtro passa-baixa com banda de passagem de 4 kHz e escolhendo-se K igual a 5 tem-se:

$$F_{PWM} = 5 \cdot 4 \text{ kHz} = 20 \text{ kHz}$$

A Figura 25 ilustra o uso de um filtro passa-baixa para geração de sinal analógico a partir da saída PWM de um microcontrolador PIC 18F4550.

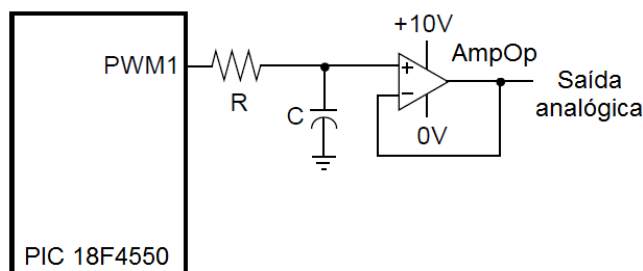


Figura 25 - Filtro RC conectado ao PWM1 do PIC 18F4550

Escolhendo a frequência de corte (f_c), ou seja, o ponto onde a atenuação do filtro é igual a -3 dB como 4 kHz e usando a equação 15:

$$RC = 1/(2 \cdot \pi \cdot f_c) \quad (15)$$

para $C = 0,01 \mu\text{F}$, temos $R = 4 \text{ k}\Omega$.

Se a frequência do PWM for definida como 20 kHz, o pico de ruído fundamental a ser filtrado é em 20 kHz. Calculando com a Equação 16 em quantos dBs a componente fundamental será atenuada temos:

$$(dB) 20 \text{ kHz} = -10 \cdot \log[1 + (2 \cdot \pi \cdot F_{PWM}) \cdot 2] = -14 \text{ dB} \quad (16)$$

Para muitas aplicações, esta atenuação de 14 dB pode não ser satisfatória. Logo, ao invés de um filtro passa-baixa RC simples, um filtro ativo passa-baixa de ordem superior pode ser necessário. Por outro lado, se o microcontrolador utilizado for capaz de realizar a modulação do sinal PWM em alta frequência, a atenuação da componente fundamental será aumentada. Por exemplo, um microcontrolador PIC 18F4550 utilizando resolução de 8 bits pode gerar um sinal PWM com frequência de 62,5 kHz. Nesta frequência a atenuação da componente fundamental do sinal PWM é dada pela Equação 17:

$$(dB) 62,5 \text{ kHz} = -10 \cdot \log[1 + (2 \cdot \pi \cdot 62,5 \text{ kHz}) \cdot 2] = -24 \text{ dB} \quad (17)$$

A alta frequência do sinal de saída de PWM do microcontrolador PIC 18F4550 torna fácil a geração de saída de sinal analógico (MICROCHIP, 1997).

2.8 – Aquisição de dados através de dispositivos 1-Wire

O protocolo 1-wire (1 fio) foi desenvolvido pela Dallas Semiconductor (atualmente pertencente à Maxim) para permitir a construção de dispositivos periféricos para microcontroladores e microprocessadores com um uso mínimo de recursos tanto de hardware como de software (PEREIRA, 2007).

Existe uma grande diversidade de dispositivos compatíveis com o protocolo, tais como: chips de identificação, memórias EPROM e EEPROM seriais, relógios de tempo real, sensores de temperatura, conversores A/D, etc.

A estrutura do protocolo é baseada numa arquitetura mestre-escravo, utilizando um barramento de apenas um fio em modo half-duplex (Figura 26a).

O protocolo em si é do tipo assíncrono e utiliza uma arquitetura *time-slots* ou fatias de tempo, para permitir a comunicação bidirecional half-duplex. A velocidade máxima de comunicação é de 16kbps para o modo normal e 143kbps para o modo overdrive, o que é mais que suficiente para as pequenas tarefas de aquisição de dados e controle geral.

Como características principais do protocolo, pode-se citar:

1. Alimentação entre 3 e 5,5 Volts;
2. Possibilidade de alimentação do dispositivo a partir da própria linha do barramento (modo de alimentação parasita). Neste caso, a quantidade de fios para comunicação resume-se a apenas dois: comunicação e terra (Figura 26b);
3. Número de identificação único de 64 bits para cada dispositivo. Este código de 64 bits é composto de 8 bits para CRC, 48 bits com o

número serial do dispositivo e mais 8 bits para identificação da família do dispositivo.

A aquisição de dados através de dispositivos 1-wire pode ser realizada através da interface destes dispositivos com um microcontrolador ou um microcomputador dotado de um programa para realizar a comunicação e armazenamento dos dados (FRANCHI et al, 2008).

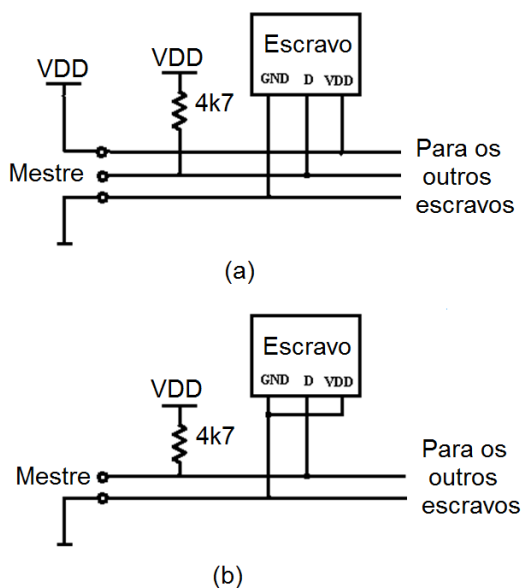


Figura 26 - Conexão de dispositivos 1-wire. (a) conexão com 3 fios (Alimentação, dados e terra) (b) conexão com alimentação parasita (dois fios).

2.9 - GRAPSI

O programa computacional GRAPSI é capaz de calcular as condições psicrométricas do ar, a partir de parâmetros conhecidos e simular os processos de aquecimento e resfriamento, umidificação adiabática e mistura de dois fluxos de ar (MELO et al, 2004).

Para se simular um processo de aquecimento ou resfriamento, tais como ocorrem em um secador ou em uma bomba de calor, utilizando o GRAPSI faz-se necessário conhecer três variáveis envolvidas no processo, sendo estas:

1. Temperatura do ar no estado 1;
2. Umidade relativa do ar no estado 1 e
3. Temperatura no estado 2.

Devido à sua interface simples e a possibilidade de combinar alguns poucos parâmetros psicrométricos do ar para obter os demais, fato que evita a necessidade de manipulação de equações geralmente complexas, o GRAPSI se torna uma ferramenta indispensável no trabalho de desenvolvimento de equipamentos de secagem.

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Processamento Pós Colheita do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa.

Para a realização deste experimento foi utilizada a bomba de calor experimental descrita e utilizada por Monte (2008). A Figura 27 ilustra o diagrama do equipamento.

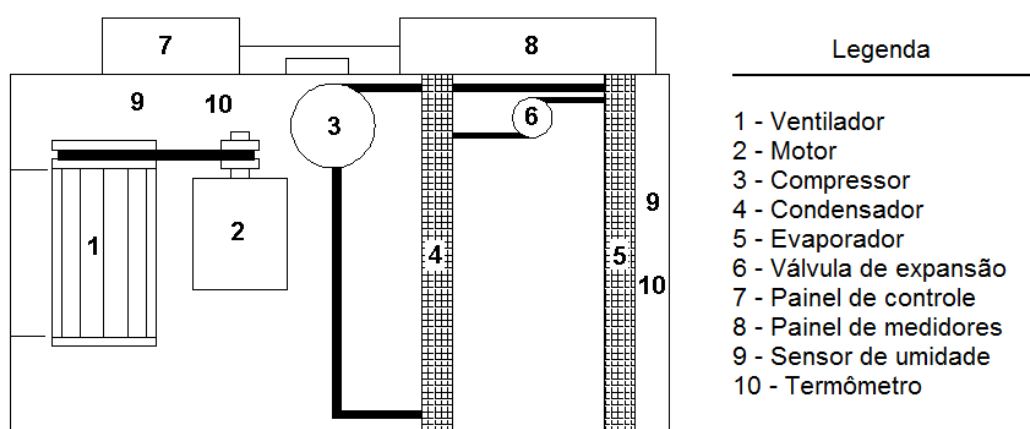


Figura 27 - Diagrama da bomba de calor experimental

A trajetória do ar e as modificações a que ele é submetido ao percorrer o circuito completo da bomba de calor são ilustrados na Figura 28 e descritas em seguida.

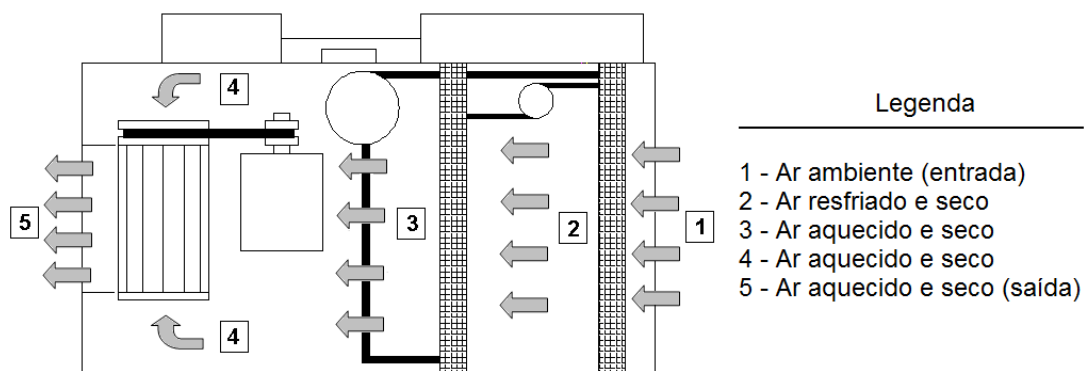


Figura 28 - Trajetória do ar e suas modificações ao passar pela bomba de calor.

1. O ar ambiente entra na bomba de calor por sucção pela ação do ventilador.

2. Uma vez dentro da bomba de calor, o ar ambiente atravessa o evaporador e é refrigerado. Devido ao processo de refrigeração ocorrerá a condensação de parte da água presente no ar, resultando então num ar resfriado e seco.
3. Nesta etapa do processamento, o ar resfriado e seco passa pelo condensador da bomba de calor onde é aquecido. Neste ponto temos um ar aquecido e seco.
4. Dentro da bomba de calor, imediatamente após passar pelo condensador, o ar passa por uma câmara onde estão localizados o motor do ventilador e o compressor. Como estes dois elementos dissipam calor, ocorre então um ligeiro aquecimento no ar devido à convecção com a superfície de tais elementos.
5. Neste ponto, o ar aquecido e seco é ejetado da bomba de calor pela ação do ventilador. Mais uma vez o ar sofre um ligeiro incremento em sua temperatura devido à ação do ventilador.

O ar ao deixar a bomba de calor será insuflado para dentro do silo para a secagem ou aeração dos grãos.

Tanto o ventilador quanto o compressor da bomba de calor são acionados através de inversores de frequência, fato que permite que se atue tanto na velocidade do ventilador quanto no ciclo de funcionamento do compressor. Para o controle de velocidade do ventilador foi utilizado um inversor de frequência Sinamics G110 da Siemens e para controle do compressor foi utilizado um inversor CFW08 da WEG. Ambos os inversores de frequência foram programados para usar como referência de frequência a entrada analógica de tensão de 0 a 10 volts. O inversor responsável pelo acionamento do ventilador foi programado para trabalhar com a frequência mínima de 30 Hz e a máxima de 60 Hz, já o do compressor foi programado para a mínima de zero e a máxima de 66 Hz. A definição da frequência mínima de operação de 30 Hz para o inversor de acionamento do ventilador foi para garantir um fluxo mínimo de ar na bomba de calor e evitar danos causados por sobreaquecimento no caso do compressor estar acionado.

No sistema de secagem com bomba de calor têm-se duas variáveis de interesse controladas que são: a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem. Estas variáveis controladas podem ter seus valores modificados através da atuação em duas variáveis manipuladas que são: a velocidade do ventilador e a velocidade do motor do compressor.

Para se verificar a relação entre as variáveis manipuladas e as variáveis controladas, foram realizados dois testes de entrada em degrau no sistema com malha aberta, sendo que no primeiro teste o degrau foi aplicado ao motor do ventilador e no segundo ao compressor.

Para o controle automático da temperatura e da umidade relativa do ar de secagem foi desenvolvido um sistema eletrônico baseado no microcontrolador PIC 18F4550 da microchip. Neste sistema é permitido ao usuário, além de escolher entre os processos de aeração e secagem, definir os valores de temperatura e umidade relativa do ar de secagem e o teor de água final do grão submetido ao processo. De posse dos valores de referência fornecidos pelo usuário e dos valores de temperatura e umidade relativa do ar ambiente, do ar na saída da bomba de calor e do ar na saída do silo, o sistema atua no ciclo de funcionamento da bomba de calor através de ação de controle PID discreta conforme ilustrado na Figura 29.

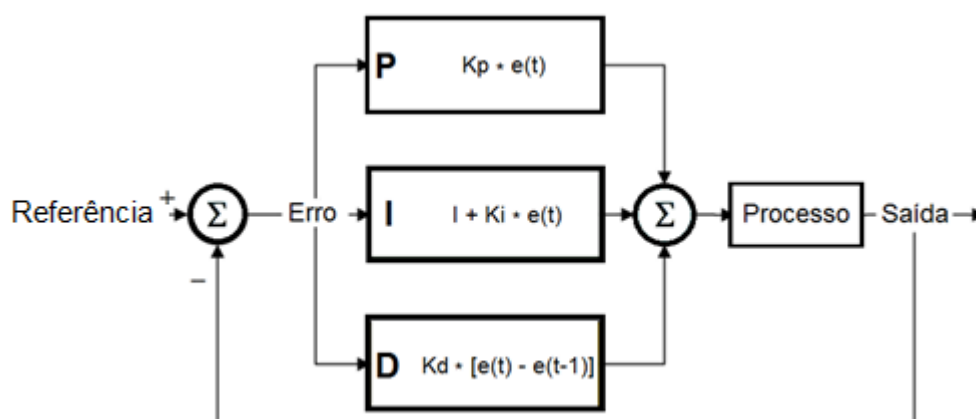


Figura 29 - Representação da ação de controle PID discreta

A sintonia do controle PID foi feito com base na resposta ao degrau aplicado no ventilador e na resposta ao degrau aplicado no compressor. Utilizou-se o Método de Resposta ao Degrau de Ziegler e Nichols para se

obter uma estimativa dos valores das constantes do controlador PID e a sintonia fina foi feita por meio do método de tentativa e erro.

Para realizar as medições de temperatura foram utilizados sensores eletrônicos LM 35 e para medições de umidade relativa foram utilizados sensores HIH 4000-004. Testes realizados com estes sensores revelaram a presença de ruídos de alta frequência no sinal de saída, ruídos estes provenientes da rede elétrica devido aos harmônicos gerados pelos inversores de frequência. Para eliminar tais ruídos e evitar que estes causassem instabilidade no sistema de controle foram construídos filtros passa-baixa ativos com o uso de amplificadores operacionais LM 324. A Figura 30 ilustra o filtro.

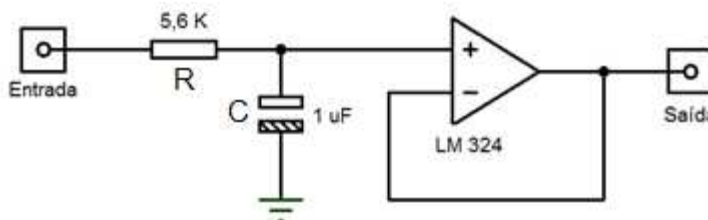


Figura 30 - Filtro ativo passa-baixa

Calculando a frequência de corte (f_c) para o filtro da Figura 30 com a Equação 18 temos:

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \quad (18)$$

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot (5,6 \cdot 10^3) \cdot (1 \cdot 10^{-6})}$$

$$f_c = 56,82 \text{ Hz}$$

Como a frequência da tensão de alimentação do sistema é de 60 Hz, todos os ruídos provocados por harmônicos de ordem superior pelo chaveamento dos inversores de frequência que estavam presentes no sinal de saída dos sensores foram suprimidos pelo filtro. A Figura 31 ilustra o diagrama de Bode do filtro passa-baixa desenvolvido.

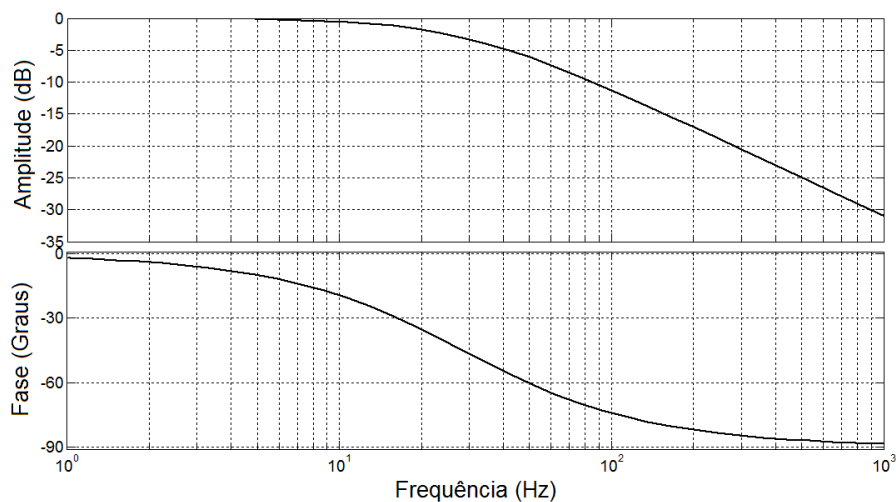


Figura 31 - Diagrama de Bode do filtro ativo passa-baixa

Para gerar a tensão analógica para atuar como referência nos inversores de frequência foram utilizadas as saídas PWM do microcontrolador PIC 18F4550. Para converter o sinais PWM provenientes do microcontrolador em tensão contínua foram construídos filtros passa-baixa com ganho igual a dois. A necessidade deste ganho se deve ao fato de que quando o sinal PWM do microcontrolador está com ciclo ativo mínimo, este gera uma tensão de zero volts e cinco volts no ciclo ativo máximo, enquanto para que o inversor de frequência variar entre a frequência mínima e máxima é necessário que a entrada de tensão varie entre zero e 10 volts. A Figura 32 ilustra o filtro passa-baixa com ganho igual a dois.

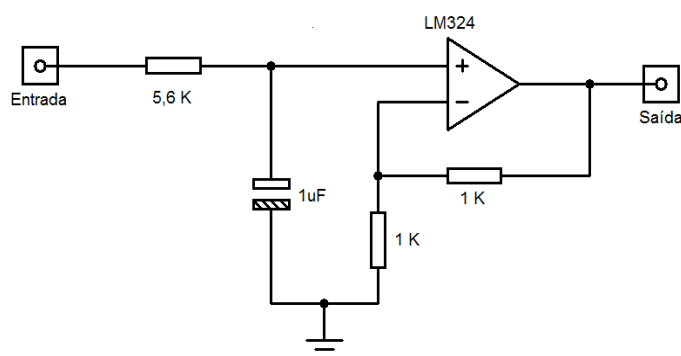


Figura 32 - Filtro ativo passa-baixa com ganho igual a dois

Foi verificado na prática que ocorrem situações durante o processo em que a umidade relativa do ar ambiente atinge valores abaixo do mínimo

necessário para manter o teor de água dos grãos de acordo com os valores definidos pelo usuário. Este problema foi solucionado com a construção de um sistema de umedecimento do ar ambiente através de borrifamento de água. Para desenvolver este sistema foi utilizada uma moto-bomba de ½ HP da Famac ilustrada na Figura 33. A finalidade da moto-bomba é de fornecer água em alta pressão para os bicos borrifadores. Neste experimento foram utilizados bicos borrifadores de sistemas de climatização de estufas. A Figura 34 ilustra os bicos utilizados. O acoplamento dos bicos borrifadores com a moto-bomba foi feito através da adaptação com uma válvula do tipo utilizado em máquinas de lavar roupas. Uma segunda válvula foi utilizada com a finalidade de manter o fluxo de água através da moto-bomba quando a válvula de acionamento dos bicos estivesse fechada. Este procedimento foi adotado para impedir que a bomba funcione sem fluxo de água, evitando-se assim aquecimento excessivo. A Figura 35 ilustra a válvula utilizada.



Figura 33 - Moto bomba Famac de ½ HP



Figura 34 - Bicos borrifadores de água



Figura 35 - Válvula para acionamento da vazão de água nos bicos borrifadores

Como reservatório de água para o sistema de borrifamento foi utilizado uma caixa plástica com a capacidade de 20 litros. Uma vez construído, o sistema de borrifamento foi instalado próximo a entrada de ar da bomba de calor. A escolha deste local foi feita devido ao fato de que se houver umedecimento excessivo do ar pelo sistema de borrifamento, este excesso pode ser corrigido pela bomba no instante em que o ar passar através do evaporador. A Figura 36 ilustra a bomba de calor com o sistema de borrifamento instalado.

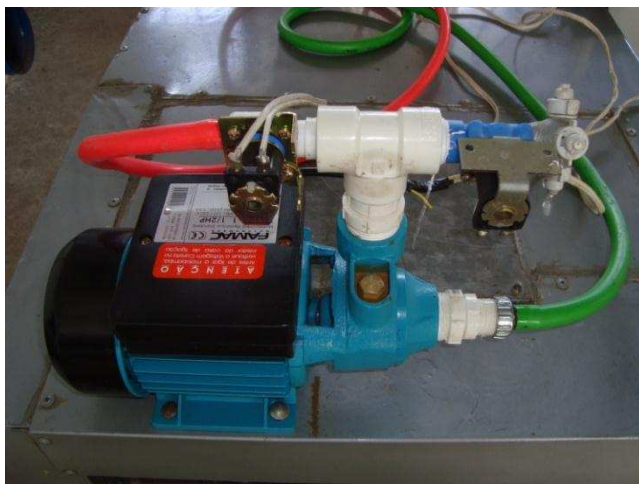


Figura 36 - Sistema de borrifamento de água instalado na entrada de ar da bomba de calor

A Figura 37 ilustra o diagrama do circuito desenvolvido para realizar o controle automático da bomba de calor.

O dispositivo principal e responsável por executar a ação de controle é o microcontrolador PIC 18F4550.

A interface entre o dispositivo e o operador é feita por três teclas de navegação tipo push-botton, através das quais é facultado ao operador escolher qual o processo desejado (secagem ou aeração), ajustar os valores de referência (temperatura e umidade do ar na saída da bomba de calor e o teor de água final dos grãos), iniciar ou parar o processo e alternar entre os modos de exibição do sistema supervisorio no display.

Para externar as informações do sistema para o operador foi utilizado um display de cristal líquido de 4 linhas e 16 colunas.

A partir do momento em que o operador define o processo, define os valores de referência e dá inicio ao processo, o microcontrolador passa a realizar a leitura dos sinais dos sensores, após estes serem devidamente filtrados dos ruídos, e atuar nas velocidades do ventilador e do compressor a fim de ajustar as características psicrométricas do ar de saída da bomba de calor de acordo com a referência.

A atuação na velocidade do compressor e do ventilador se dá através da variação da largura de pulso do sinal PWM. Uma vez realizada a leitura dos sensores, o microcontrolador compara este valor com o valor de referência e calcula a diferença entre eles. De posse da diferença, ou erro, aumenta-se ou diminui-se a largura de pulso do sinal PWM e conseqüentemente a velocidade do compressor e/ou do ventilador de forma a tornar o erro nulo.

Através da leitura dos sensores de temperatura e umidade relativa responsáveis por monitorar o ar ambiente o microcontrolador aciona, quando necessário, a bomba e a válvula do sistema borrifador através de relés. O acionamento dos relés é feito através do chaveamento por transistores TIP 122. Os pinos do microcontrolador responsáveis por acionar a bomba e as válvulas são conectados à base dos transistores. Uma vez colocado o pino em nível lógico 1, o transistor entra em condução e aciona o relé.

O sistema completo então consta de 3 pares de sensores de temperatura LM35 e sensores de umidade HIH4000-004 responsáveis por monitorar o ar ambiente, o ar na saída da bomba de calor e o ar na saída do silo, dois filtros para converter sinal PWM em sinal analógico e atuar nos inversores de frequência do ventilador e do compressor, um display e três teclas para realizar a interface homem-máquina e os relés para acionar a bomba e as válvulas do sistema borrifador.

Uma vez projetado o sistema foi construído e montado em uma caixa própria para circuitos. A parte frontal do dispositivo pode ser vista na Figura 38.



Figura 38 - Parte frontal do sistema de controle para bomba de calor

Na figura 38 os dois tubos brancos (a) são compartimentos dos sensores de temperatura e umidade relativa do ar ambiente. A tomada (b) é onde se conecta a bomba do borrifador.

As conexões dos demais sensores, a saída de sinal analógico para atuar nos inversores e as tomadas para acionar as válvulas do borrifador foram montadas na parte traseira da caixa como pode ser visto na Figura 39.

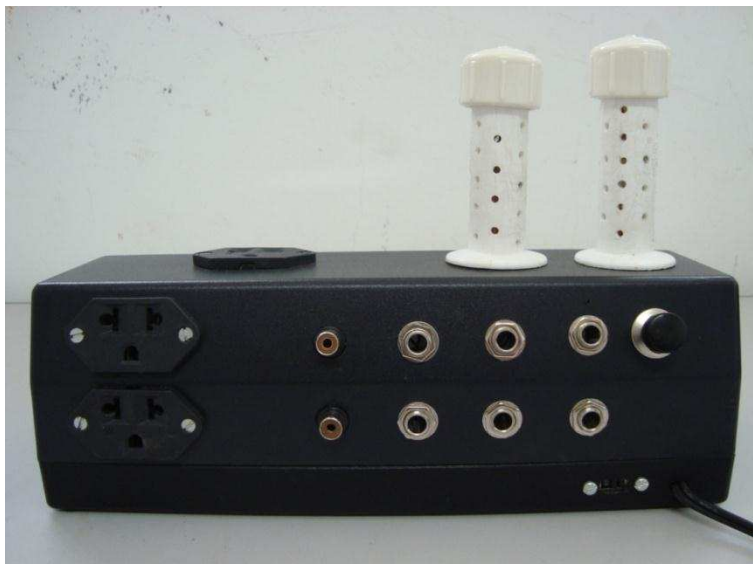


Figura 39 - Parte traseira do sistema de controle para bomba de calor

Os sensores responsáveis pelas leituras na saída da bomba de calor foram alojados em uma caixa plástica apropriada para tal e esta caixa foi fixada na saída da bomba de calor conforme ilustra a Figura 40. Procedimento análogo foi adotado para os sensores responsáveis por realizar as medições na saída do silo.



Figura 40 - Sensores de temperatura e umidade relativa instalados na saída da bomba de calor

A Figura 41 ilustra o sistema de controle acoplado à bomba de calor.



Figura 41 – Protótipo do sistema de controle e sistema de borrifamento de água acoplados à bomba de calor

O algoritmo de controle utilizado pelo microcontrolador foi implementado como um programa que roda em loop e é executado a partir do momento em que o sistema é ligado. Dentro deste loop, o valor atual das características do ar na saída da bomba de calor é medido e a diferença entre estes valores e os desejados é calculada. Isto gera um sinal de erro. O algoritmo de controle então calcula a alteração que deve acontecer no sinal de saída, que neste caso é o sinal PWM. Este novo valor do sinal de saída é então enviado para o conversor D/A que gera uma saída analógica equivalente a ação de controle desejada. Este sinal analógico é então enviado aos atuadores, que no caso são os inversores de frequência, de forma a ajustar os valores de temperatura e umidade relativa do ar na saída da bomba de calor conforme o desejado.

Devido à complexidade do algoritmo implementado para realizar a ação de controle, optou-se por utilizar a linguagem de programação em C para microcontroladores.

Para a que o sistema pudesse atuar na bomba de calor no processo de aerção, foi implementada uma rotina com base na Equação 8, onde de posse do valor do teor de água final do produto definido pelo usuário, o sistema ajusta os valores de temperatura e umidade relativa do ar na saída

da bomba de calor, para que a equação convirja para o valor desejado. No caso crítico onde a umidade do ar de entrada estiver abaixo do valor mínimo necessário para satisfazer a Equação 8 o sistema de borrifamento é acionado, elevando-se assim a umidade relativa do ar permitindo a continuidade da operação. Utilizou-se neste experimento as constantes a, b e c do café na Equação 8 (Tabela1).

A aquisição dos dados de temperatura e umidade relativa necessários para a avaliação do sistema de controle foi realizada através de dispositivos 1-wire. O dispositivo DS2438 foi utilizado para endereçar o sensor de umidade relativa HIH4000, medir a temperatura e enviar os dados para o computador responsável pelo armazenamento destes. A Figura 42 ilustra o circuito utilizado na aquisição dos dados.

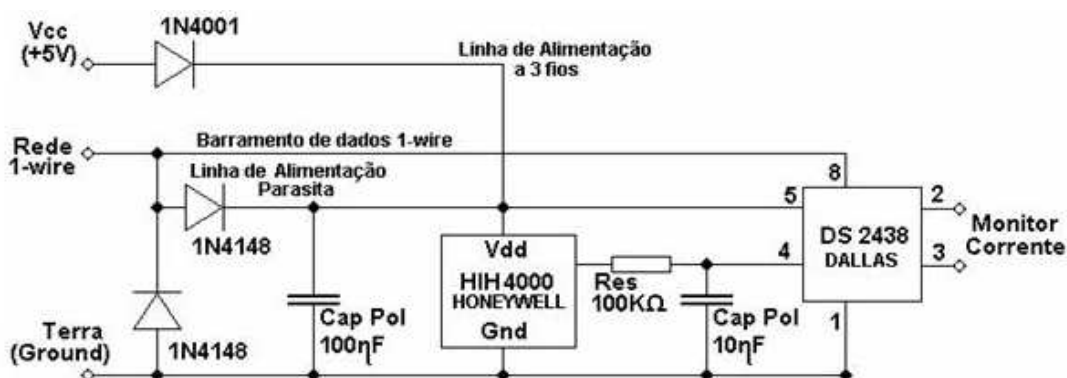


Figura 42 - Circuito de aquisição de dados 1-wire

A coleta dos dados para análise do sistema de controle desenvolvido para a bomba de calor aconteceu em duas etapas.

A primeira etapa teve como finalidade coletar os dados referentes ao regime transitório da bomba de calor, ou seja, as variações de temperatura e umidade relativa ocorridas na saída da bomba de calor do início do processo até atingir o regime permanente de operação. Para realizar tal tarefa foi utilizado um programa desenvolvido em linguagem de programação Delphi para este propósito. O período de amostragem foi de 5 segundos entre cada medição e os dados foram armazenados em forma de planilha eletrônica para posterior análise. A Figura 43 ilustra a tela do programa utilizado.



Figura 43 - Sistema de aquisição de dados 1-wire para um par de sensores

A segunda etapa teve como finalidade coletar os dados referentes ao regime permanente de operação da bomba de calor. O intervalo médio de aquisição dos dados foi de 10 horas para cada teste. Neste caso o período de amostragem foi de 60 segundos entre cada medição. Nesta etapa, além de se tomar os dados psicrométricos do ar na saída da bomba de calor, tomou-se também os dados do ar ambiente com a finalidade de se verificar as variações ocorridas durante o tempo de monitoramento e analisar a resposta do sistema de controle a estes distúrbios. Nesta etapa foi instalado um circuito de aquisição de dados na saída da bomba de calor e outro no ambiente, afastado o suficiente para não sofrer influência do fluxo de ar de saída da bomba de calor. Para realizar a coleta dos dados foi utilizada uma versão modificada do programa usado na etapa anterior para que se pudesse realizar a leitura de dois pares de sensor. Assim como na primeira etapa os dados foram armazenados em forma de planilha eletrônica para posterior análise. A Figura 44 ilustra a tela do programa utilizado.



Figura 44 - Sistema de aquisição de dados 1-wire para dois pares de sensores

4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – Ensaios preliminares

Para se verificar a relação entre as variáveis manipuladas e as variáveis controladas, foram realizados dois testes de entrada em degrau no sistema com malha aberta.

No primeiro teste o motor do ventilador foi acionado com o inversor de frequência em 30 Hz e o compressor foi acionado com o inversor em 60 Hz. Após o sistema entrar em regime permanente de operação aplicou-se uma entrada em degrau no valor de 30 Hz no inversor do ventilador. A Figura 45 ilustra o degrau aplicado.

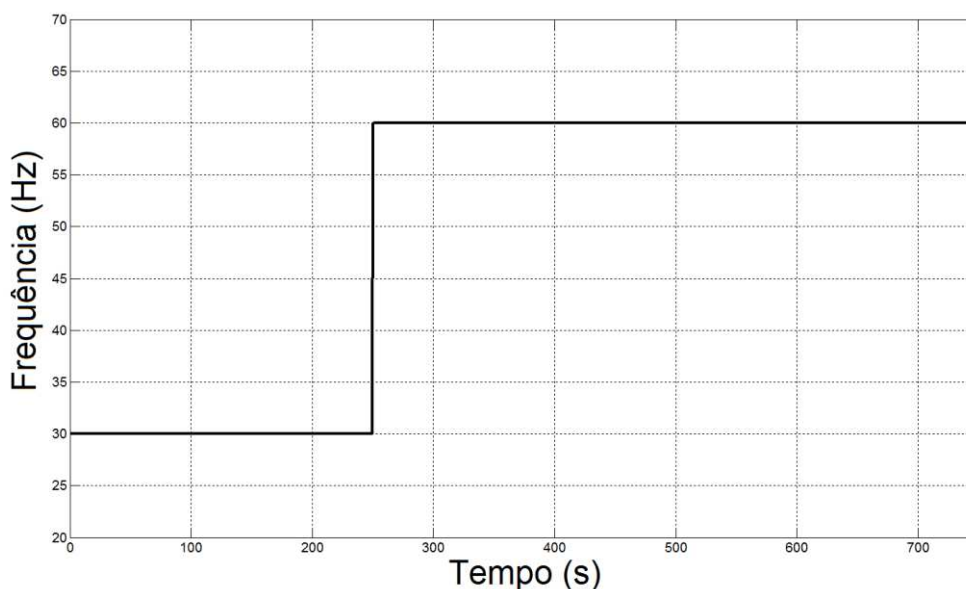


Figura 45 - Entrada em degrau aplicada no ventilador da bomba de calor

As variações de temperatura e umidade relativa do ar na saída da bomba de calor causadas pela aplicação da entrada em degrau no inversor de acionamento do ventilador são ilustradas nas Figuras 46 e 47 respectivamente.

Como o ciclo de funcionamento do compressor permaneceu constante durante a aplicação do degrau no ventilador, a quantidade de calor retirada do ar durante a passagem pelo evaporador se manteve constante, assim como a quantidade de calor fornecida ao ar quando o

mesmo fez a passagem através do condensador. Por outro lado o fluxo de ar aumentou, resultando desta forma em uma diminuição da temperatura do ar na saída da bomba de calor e um aumento em sua umidade relativa.

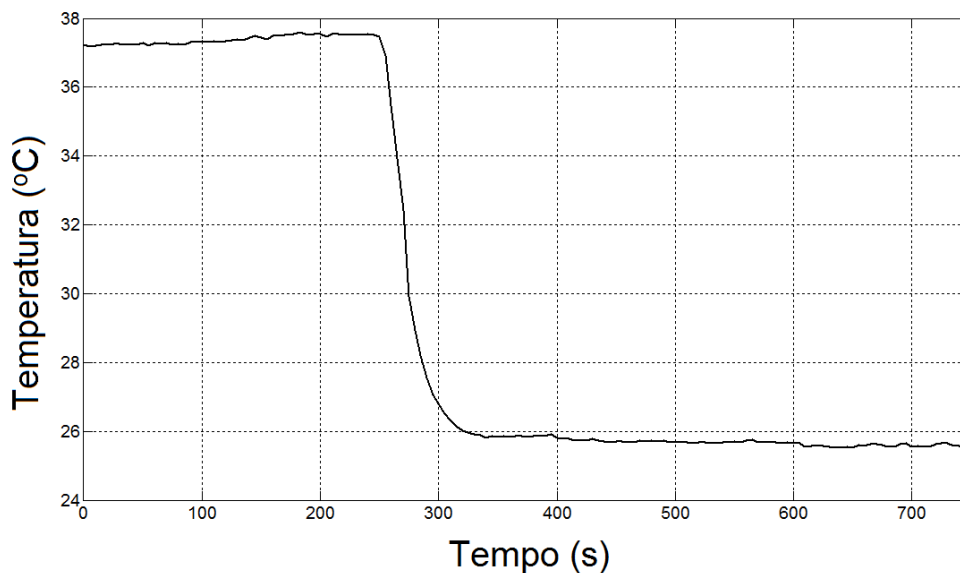


Figura 46 - Variação da temperatura do ar na saída da bomba de calor em resposta à aplicação da entrada em degrau no ventilador

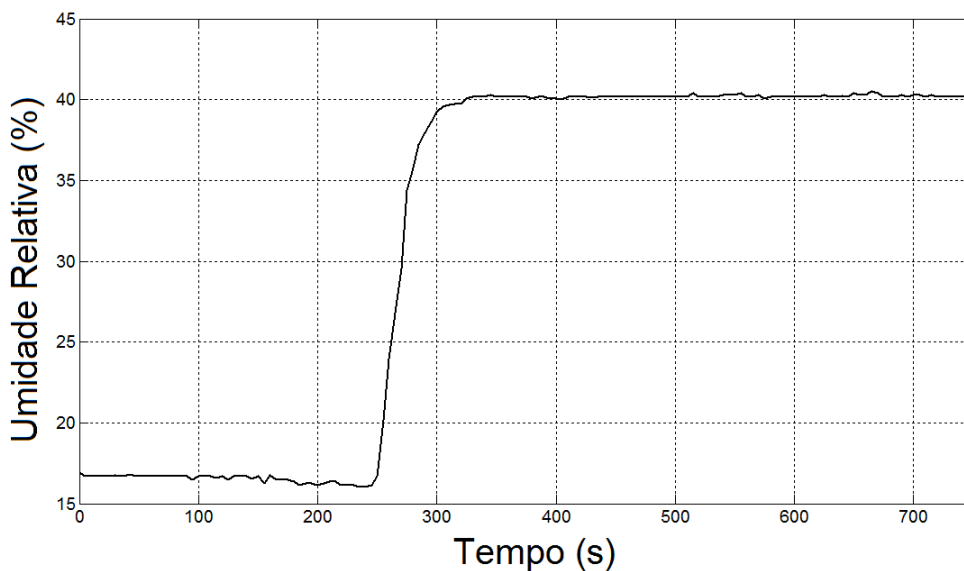


Figura 47 - Variação da umidade relativa do ar na saída da bomba de calor em resposta à aplicação da entrada em degrau no ventilador

No segundo teste de entrada em degrau no sistema, o motor do compressor foi acionado com o inversor de frequência em 20 Hz e o ventilador foi acionado com o inversor em 60 Hz. Após o sistema entrar em

regime permanente de operação aplicou-se uma entrada em degrau no valor de 40 Hz no inversor do compressor. A Figura 48 ilustra o degrau aplicado.

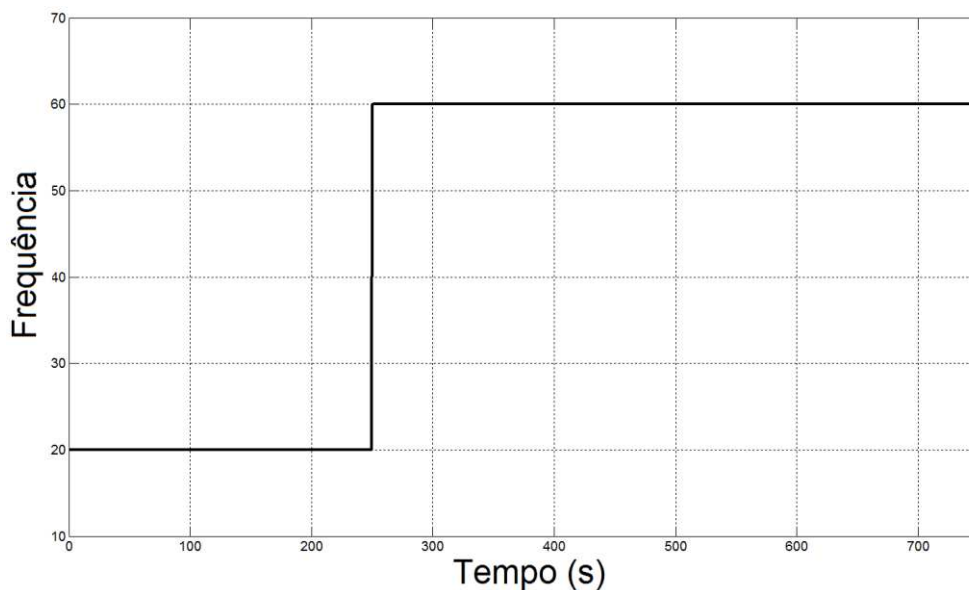


Figura 48 - Entrada em degrau aplicada no compressor da bomba de calor

As variações de temperatura e umidade relativa do ar na saída da bomba de calor causadas pela aplicação da entrada em degrau no inversor de acionamento do compressor são ilustrados nas Figuras 49 e 50 respectivamente.

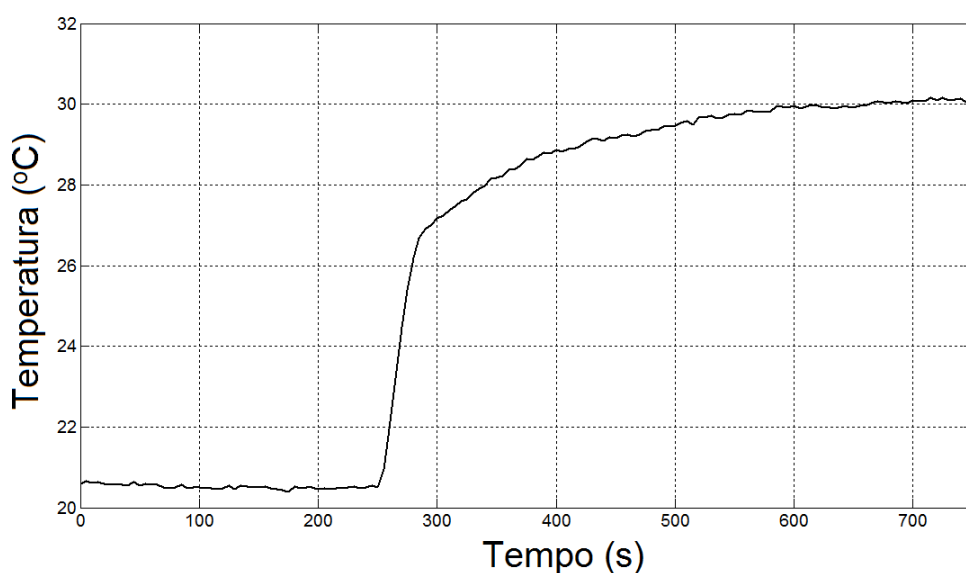


Figura 49 - Variação da temperatura do ar na saída da bomba de calor em resposta à aplicação da entrada em degrau compressor

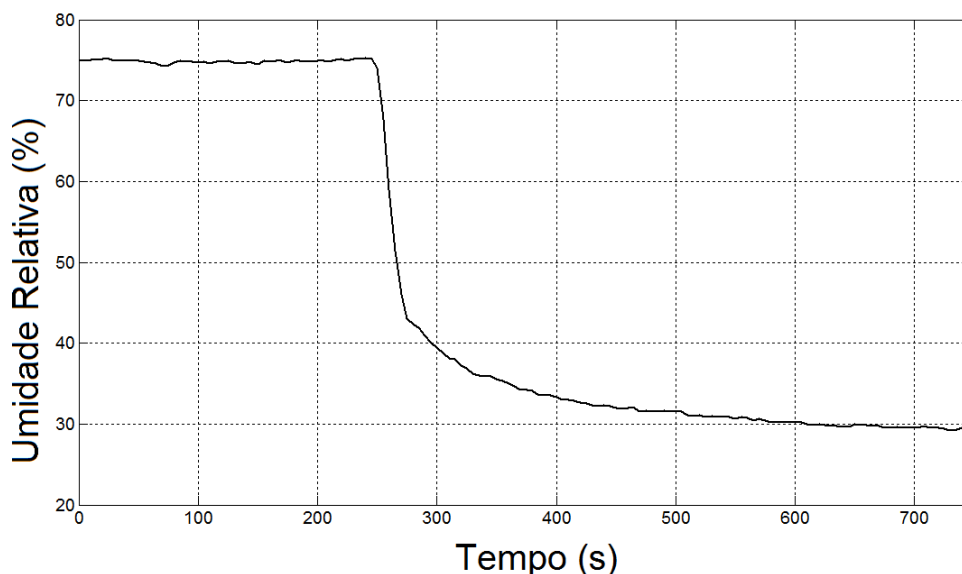


Figura 50 - Variação da umidade relativa do ar na saída da bomba de calor em resposta à aplicação da entrada em degrau no compressor

Neste caso, como não ocorreu alteração na velocidade de rotação do ventilador, o fluxo de ar através da bomba de calor permaneceu constante. Devido ao incremento na velocidade de operação do compressor, maior foi a taxa de absorção de calor latente no ar durante a passagem pelo evaporador e, conseqüentemente, maior o volume de água condensada, resultando desta forma na diminuição da umidade relativa do ar na saída da bomba de calor. O aumento da absorção do calor latente de vaporização do ar pelo evaporador implica em uma quantidade maior de calor cedida ao ar pelo condensador, causando desta forma aumento na temperatura do ar na saída da bomba de calor.

O que se observa nas curvas de resposta do sistema aos dois testes em degrau é que embora estas apresentem comportamento semelhante, algumas diferenças importantes devem ser ressaltadas. A primeira diferença que se nota é que o aumento da velocidade do ventilador causa diminuição da temperatura do ar na saída da bomba de calor e aumento na sua umidade relativa, já comportamento inverso é observado quando se aumenta a velocidade do compressor. Outra diferença que se deve observar é quanto ao tempo gasto para atingir o regime permanente de operação após a aplicação do degrau. Observa-se que o sistema quando submetido ao degrau no ventilador entra em regime permanente num intervalo de

tempo menor do que quando aplicado o degrau no compressor. Estas diferenças sugerem ações de controle distintas para as duas variáveis manipuladas.

Com o objetivo de se obter melhor eficiência do secador algumas condições foram impostas na implementação do algoritmo do sistema de controle.

Conforme se verifica nas Figuras 46, 47, 49 e 50, através da variação na velocidade do ventilador e do compressor, podem-se variar a temperatura e umidade relativa do ar na saída da bomba de calor e diferentes combinações de valores de velocidade do ventilador e velocidade do compressor podem resultar em diferentes combinações de valores de temperatura e umidade relativa do ar na saída da bomba de calor. Observa-se também a enorme correlação entre as variáveis controladas, ou seja, uma alteração no valor de qualquer uma das duas implica necessariamente alteração no valor da outra.

De posse de tais observações, a primeira conclusão que se tira é que, dado uma referência de temperatura e de umidade relativa, corre-se o risco de que o controlador ajuste a velocidade do compressor e do ventilador de forma a atingir os valores desejados, porém o valor de velocidade do ventilador neste ponto pode ser muito baixo e não ser suficiente para fornecer o fluxo de ar necessário no processo. Logo, a primeira condição imposta ao sistema foi de iniciar o processo com o ventilador na velocidade máxima e tentar ajustar os valores de saída do ar de acordo com a referência variando apenas a velocidade do compressor. Somente se a velocidade do compressor atingir o valor máximo e não se alcançar os valores desejados é que o sistema começa a diminuir a velocidade do ventilador.

A segunda condição foi imposta com base na correlação entre as variáveis controladas entre si e entre estas e as variáveis manipuladas. Observou-se durante o experimento a não possibilidade de manter as duas variáveis controladas simultaneamente de acordo com os valores definidos

como referência com o uso das variáveis manipuladas utilizadas devido limitações físicas da bomba de calor. A condição imposta neste caso então foi de que o sistema mantenha uma das variáveis controladas de acordo com o valor de referência e aproxime a outra o máximo possível do valor desejado. Desta forma, o sistema foi programado para manter o valor de temperatura de acordo com a referência e aproximar o valor da umidade relativa o máximo possível do valor desejado, desde que esta não assuma valores menores que a referência de umidade. Caso a umidade relativa atinja valores menores que o de referência, o sistema passa a atuar para mantê-la de acordo com este valor e a aproximar a temperatura da referência de temperatura.

A sintonia do controle PID foi feito com base na resposta ao degrau no ventilador ilustrada na figura 46 e na resposta ao degrau no ventilador ilustrada na figura 49. Foi utilizado o primeiro método de Ziegler e Nichols (Ogata, 1997) para se obter uma estimativa dos valores das constantes do controlador PID e a sintonia fina foi feita através do método de tentativa e erro. As constantes para o controladores do ventilador e do compressor estão listados na tabela 4.

Tabela 4 – Constantes dos controladores PID

Controlador	k_p	k_i	k_d
Ventilador	0,15	0,25	0,01
Compressor	0,45	0,75	0,05

Uma vez desenvolvidos o circuito e o programa para o sistema de controle automático da bomba de calor e feito a sintonia fina das constantes dos controladores PID, diversos testes foram realizados com o objetivo de analisar a resposta transitória e a operação em regime permanente do sistema. Em todos os testes os dados foram coletados através de dispositivos 1-wire. Para melhor visualização e entendimento do comportamento do sistema os dados foram convertidos para a forma gráfica.

4.2 – Análise da resposta transitória

O primeiro teste realizado teve como objetivo analisar a resposta do sistema a um degrau positivo no valor de referência de temperatura durante o processo de secagem. Neste teste a bomba de calor foi acionada com apenas o ventilador ligado e aguardou-se o tempo necessário para o sistema alcançar o regime permanente de operação. A referência de temperatura foi definida em 30 °C e a de umidade relativa em 30%. As Figuras 51 e 52 ilustram as respostas de temperatura e umidade relativa na saída da bomba de calor, respectivamente.

De acordo com Ogata (1997) um sistema de controle PID bem sintonizado não deve apresentar sobre-sinal superior a 25% do valor do degrau aplicado, assim como não deve apresentar mais que quatro períodos de oscilação (CHEN e MUJUMDAR, 2008).

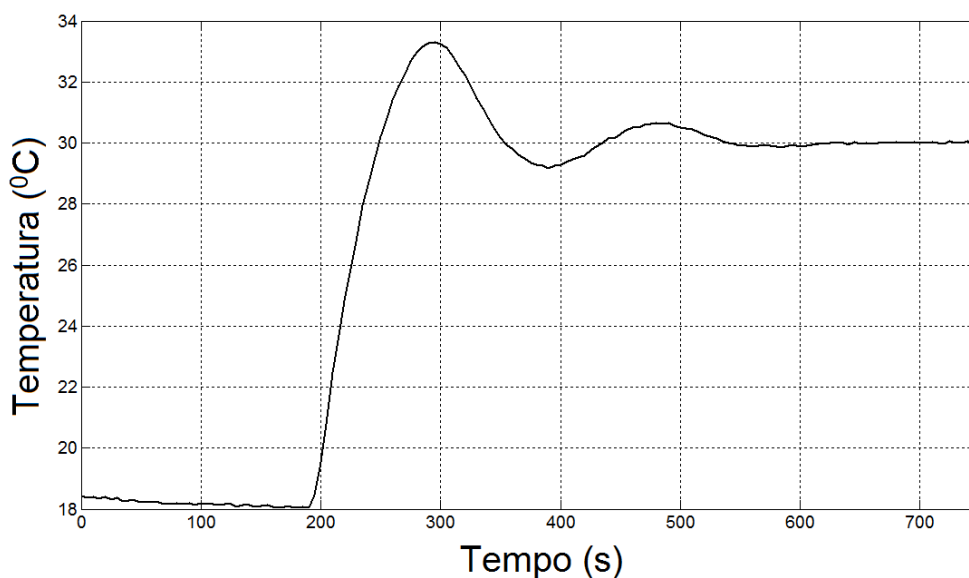


Figura 51 - Resposta transitória da temperatura do ar na saída da bomba de calor devida à aplicação do degrau positivo.

De acordo com a Figura 51, antes de se aplicar o degrau no valor de referência de temperatura, a temperatura do ar na saída do secador estava próxima a 18 °C. Logo, como o valor de referência foi ajustado em 30 °C, temos que o degrau aplicado foi de 12 °C. Observa-se pela figura 51 que o valor máximo de temperatura atingido foi de aproximadamente 33 °C, o que dá um sobre sinal de 3 °C, que corresponde a exatamente 25% do valor do

degrau aplicado. Observa-se também a presença de apenas dois períodos de oscilação.

Analisando o gráfico da Figura 52 verifica-se que antes de se acionar o sistema de controle a umidade relativa do ar estava com valores próximos a 88%. Como a referência de umidade relativa foi de 30%, foi aplicado um degrau de 58%. Observa-se pela Figura 52 que o valor mínimo de umidade relativa atingido durante o transitório foi em torno de 24%, o que dá um sobre-sinal de 6% de umidade relativa e equivale a 10,3% do valor do degrau aplicado. Neste caso também se observa que não há presença de mais de quatro períodos de oscilação. Observa-se também que embora o valor de referência tenha sido de 30%, devido ao sistema ter priorizado a referência de temperatura, a melhor aproximação que se conseguiu foi 33% de umidade relativa.

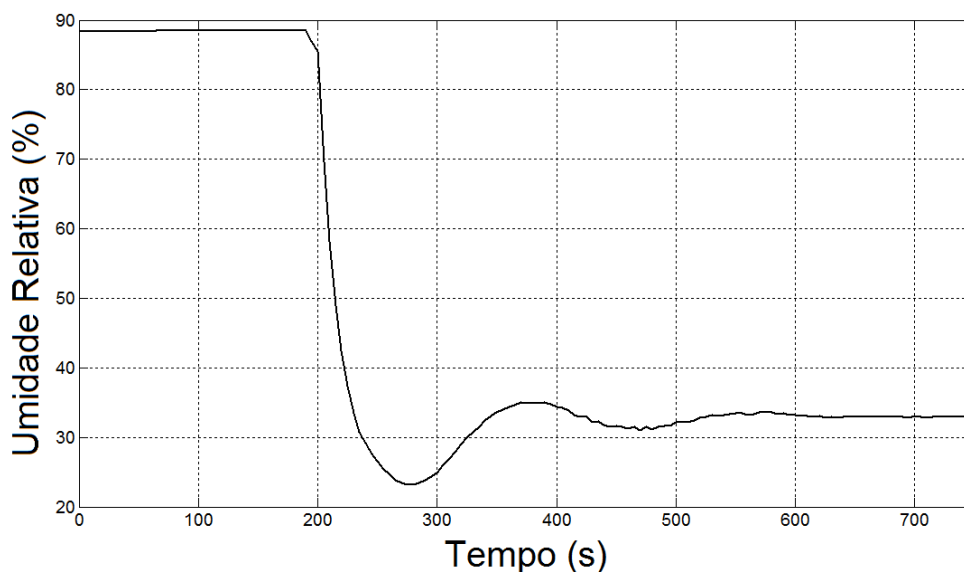


Figura 52 - Resposta transitória da umidade relativa devida à aplicação do degrau positivo.

O segundo teste realizado teve como objetivo analisar a resposta do sistema à aplicação de um degrau negativo na referência de temperatura. Neste teste, aproveitou-se a condição de regime permanente do teste anterior, ou seja, temperatura de 30 °C e umidade relativa de 33%, e alterou-se a referência de temperatura para 25% e manteve-se a de umidade relativa em 30%. A Figura 53 ilustra a resposta da temperatura do ar na saída da bomba de calor.

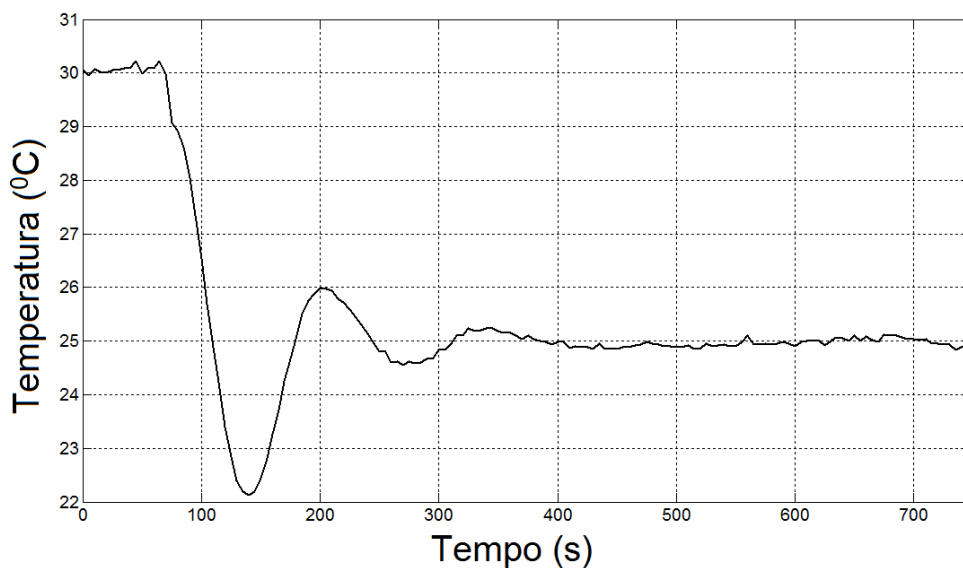


Figura 53 - Resposta transitória da temperatura do ar na saída da bomba de calor devida à aplicação do degrau negativo no set-point.

Neste caso temos que o degrau aplicado foi de 5°C e o valor mínimo atingido foi de $22,2^{\circ}\text{C}$, o que dá um sobre-sinal de $2,8^{\circ}\text{C}$ com relação à referência. Observa-se também um sobre-sinal de 58% do valor de referência. Embora o sobre-sinal tenha atingido valor superior aos 25% recomendados, este fato não gera complicações para o processo de secagem, visto que a grande preocupação é a de que a temperatura não atinja valores demasiadamente maiores que a referência. Outro fato que se observa na Figura 53 é que diferentemente da Figura 51 o sistema teve dificuldade em se manter totalmente estável no valor de set-point. Este fato se deve a que o valor de umidade relativa de set-point ter sido escolhido muito abaixo do que o valor que sistema pode atingir para o valor de temperatura de 25°C . A Figura 54 ilustra a resposta da umidade relativa à aplicação do degrau negativo na temperatura.

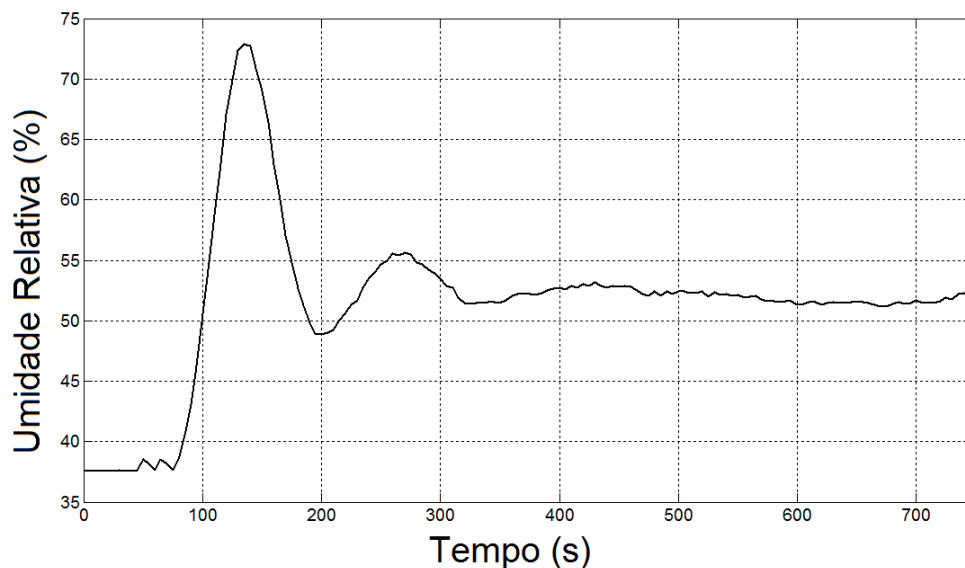


Figura 54 - Resposta transitória da umidade relativa à aplicação do degrau positivo na referência de temperatura.

Observa-se na Figura 54 que embora a referência de umidade relativa tenha sido de 30%, o valor mínimo que o sistema conseguiu atingir foi de 52% devido a limitações físicas da bomba de calor.

O terceiro teste realizado teve como objetivo analisar o comportamento em regime transitório e a capacidade do sistema de satisfazer a condição de umidade de equilíbrio para manter os grãos com o teor de água desejado no processo de aeração. Análogo aos testes anteriores aguardou-se que o sistema atingisse o regime permanente de operação e então se aplicou o valor de referência. Neste caso o valor aplicado foi para manter os grãos com teor de água de 13%. A Figura 55 ilustra a relação temperatura x umidade relativa do ar necessária para haver equilíbrio entre o ar de secagem e o café com 13% B.S.. O gráfico foi obtido com auxílio do software GRAPSI baseado na Equação 8 e os parâmetros da Tabela 1 para o café. Logo, para que haja equilíbrio higroscópico entre o ar na saída da bomba de calor e o teor de água desejado para os grãos, é necessário que o sistema seja capaz de convergir a relação temperatura x umidade para algum ponto sobre a curva ilustrada na figura 55.

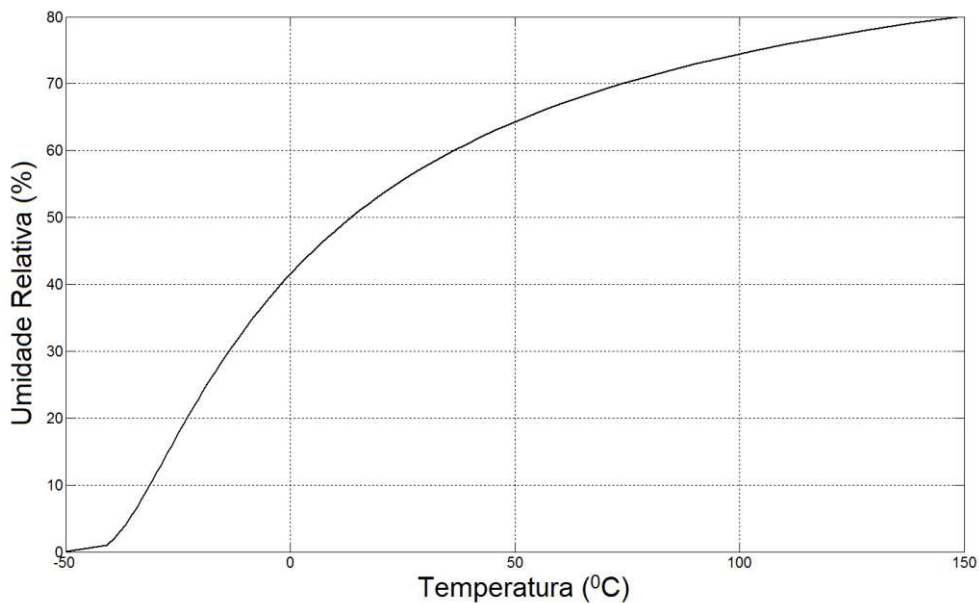


Figura 55 - Relação Temperatura x Umidade relativa para manter o café com teor de água de 13% B.S..

Como se observa nas figuras 56 e 57, a partir da determinação do teor de água desejado dos grãos, o sistema passa a atuar na bomba de calor até encontrar valores de temperatura e umidade do ar que satisfaçam a condição de equilíbrio (Equação 8). Observa-se também que embora ocorram variações na temperatura e umidade relativa, a condição de equilíbrio se mantém constante após o sistema atingir o regime permanente de operação conforme ilustrado na figura 58, ou seja, o sistema foi capaz de manter a relação temperatura x umidade relativa de acordo com a curva da Figura 55.

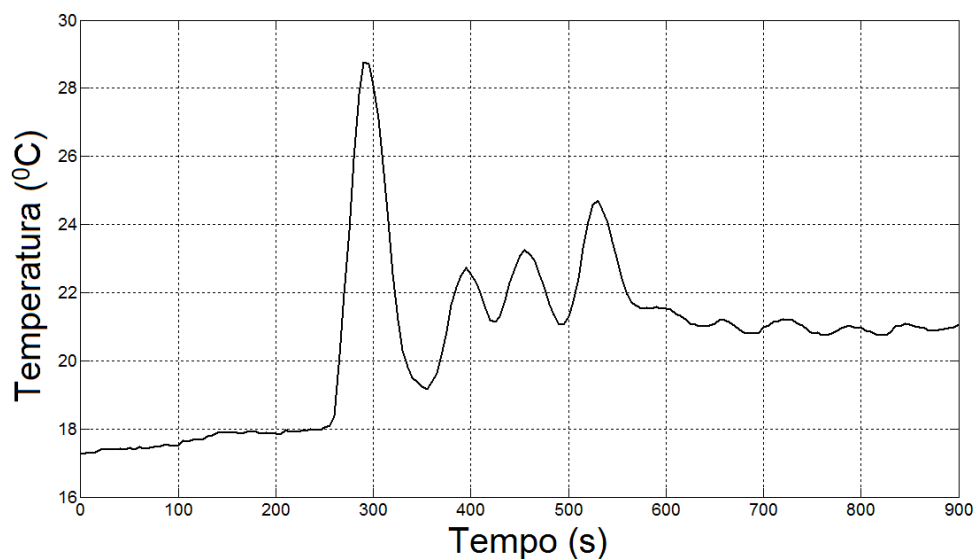


Figura 56 - Resposta transitória de temperatura no processo de aeração

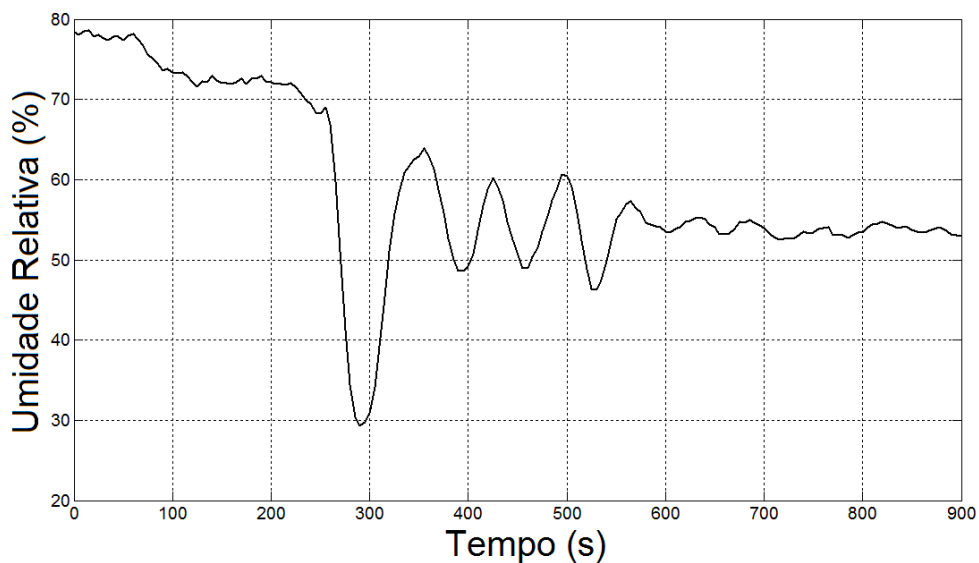


Figura 57 - Resposta transitória da umidade relativa no processo de aeração

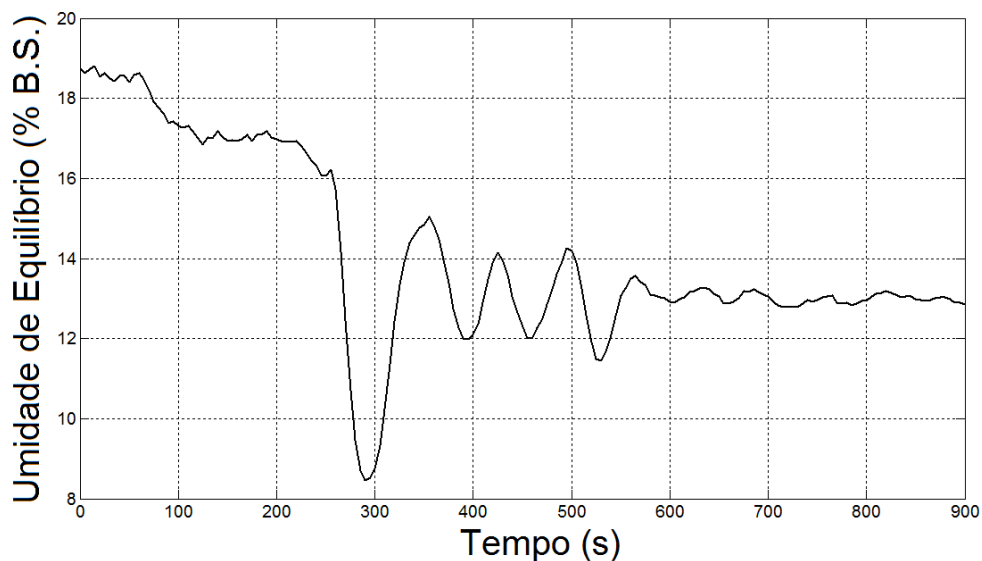


Figura 58 - Resposta transitória da umidade de equilíbrio no processo de aeração

4.3 – Análise da operação em regime permanente

Após diversos testes e análise do comportamento transitório do sistema automático de controle para condicionamento de ar de secagem utilizando bomba de calor, foram realizados testes para análise do regime

permanente de operação do sistema. Do ponto de vista prático, a capacidade do sistema em manter as variáveis controladas de acordo com os valores de referência durante o regime permanente de operação é de suma importância, já que, diferentemente do regime transitório onde as oscilações não duram tempo suficiente para causar qualquer alteração nas características dos grãos, oscilações de grande duração podem ocasionar secagem excessiva ou umedecimento dos grãos. Também devido a curta duração do regime transitório, este não está sujeito a fortes distúrbios referentes a variações nas condições ambientais, fato este que afeta fortemente o sistema operando em regime permanente e põe a prova sua capacidade de resposta a tais distúrbios.

O quarto teste realizado teve como objetivo analisar a capacidade do sistema de manter a temperatura e umidade relativa do ar de saída de acordo com o valor de referência durante um longo período de tempo. Assim como no primeiro teste realizado para análise do regime transitório, o sistema foi ajustado para manter a temperatura em 30 °C e 30% de umidade relativa. Nos testes de operação em regime permanente, além de se tomar os dados referentes às características psicrométricas do ar na saída da bomba de calor, tomou-se também os dados referentes ao ar ambiente, de forma a se verificar as variações ocorridas no decorrer do teste e a resposta do sistema a estes distúrbios. Os dados foram coletados no período de 07h50min às 18h20min. A Figura 57 ilustra a temperatura do ar de secagem na saída da bomba de calor e a variação da temperatura ambiente durante o teste.

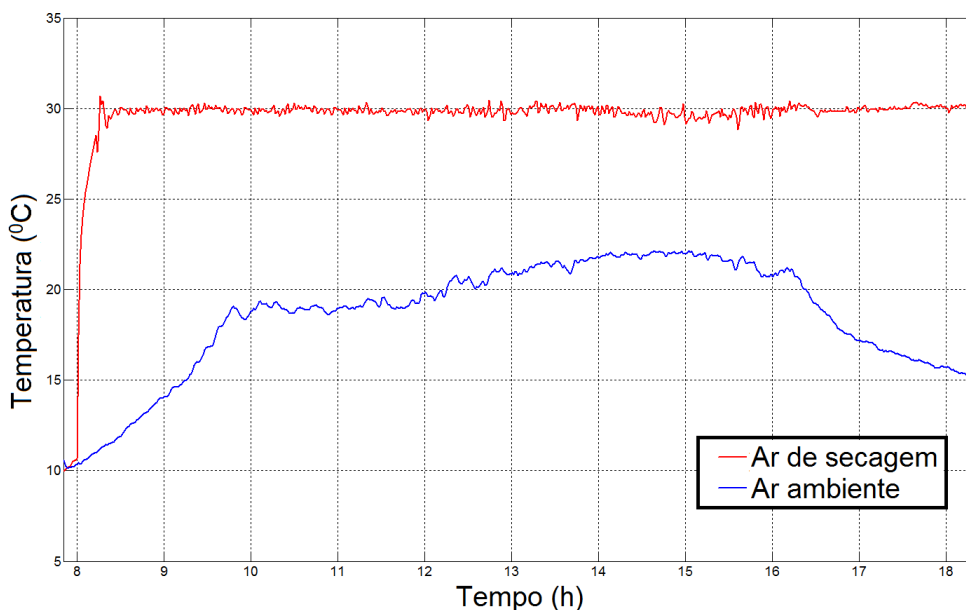


Figura 59 - Resposta de temperatura em regime permanente e temperatura ambiente

Conforme pode ser visto na Figura 57, mesmo a temperatura do ar ambiente variando entre patamares de 10 a 22 °C durante o experimento, o sistema de controle foi capaz de manter a temperatura do ar de saída da bomba de calor praticamente constante no valor de set-point (30 °C) durante todo o processo. Embora se perceba pequenas oscilações em torno do valor de referência, estas não representam grandes problemas para o processo de secagem, visto que a própria capacitância térmica do sistema é suficiente para suprimi-las.

Os comportamentos da umidade relativa do ar ambiente e da umidade do ar de secagem na saída da bomba de calor estão ilustrados na Figura 58.

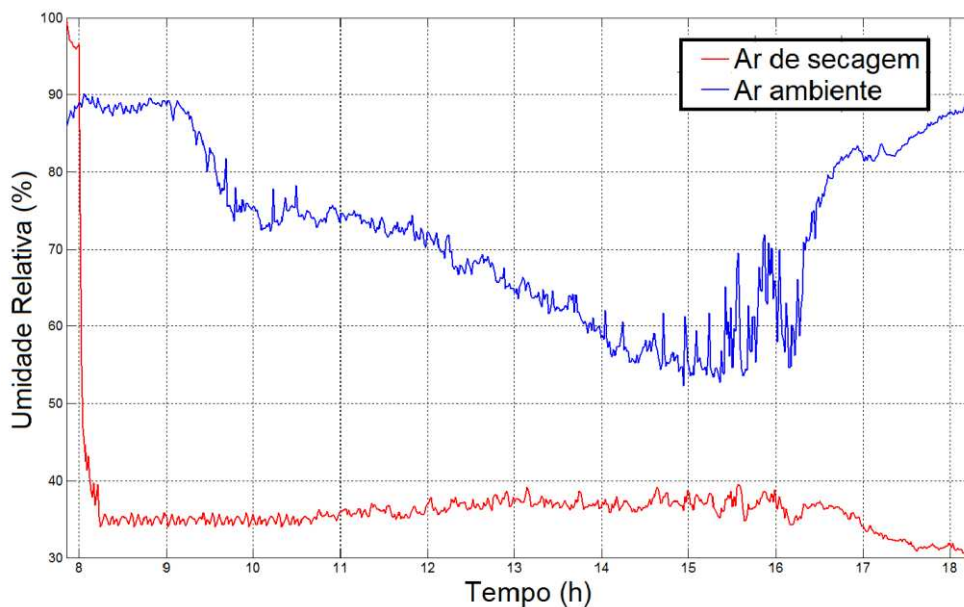


Figura 60 - Resposta de umidade em regime permanente e umidade ambiente

O que se observa na figura 58 é que, assim como no regime transitório, o sistema não foi capaz de manter a umidade relativa exatamente no valor de referência, porém, o manteve próximo o suficiente (em torno de 35%) e foi capaz de manter este valor praticamente constante durante todo o experimento mesmo as condições ambientais sofrendo fortes variações.

O quinto teste realizado teve como objetivo avaliar a capacidade do sistema em satisfazer as condições de equilíbrio para a manutenção do teor de água dos grãos constante. O valor de referência escolhido foi de 13% de teor de água. Assim como no teste anterior, neste também foram coletados os dados do ar ambiente para que se pudesse avaliar seu comportamento e a capacidade do sistema a responder a estes distúrbios. Diferente do teste anterior, onde o sistema apenas atuava na velocidade do ventilador e do compressor para ajustar as variáveis controladas de acordo com a referência, neste foi necessário que o sistema acionasse o sistema de borrifamento de água diversas vezes devido à umidade relativa ambiente atingir valores abaixo do mínimo necessário para satisfazer a Equação 8. As Figura 61, 62 e 63 ilustram as variações da temperatura e da umidade relativa e a relação de equilíbrio calculada com a Equação 8 para o ar ambiente, respectivamente.

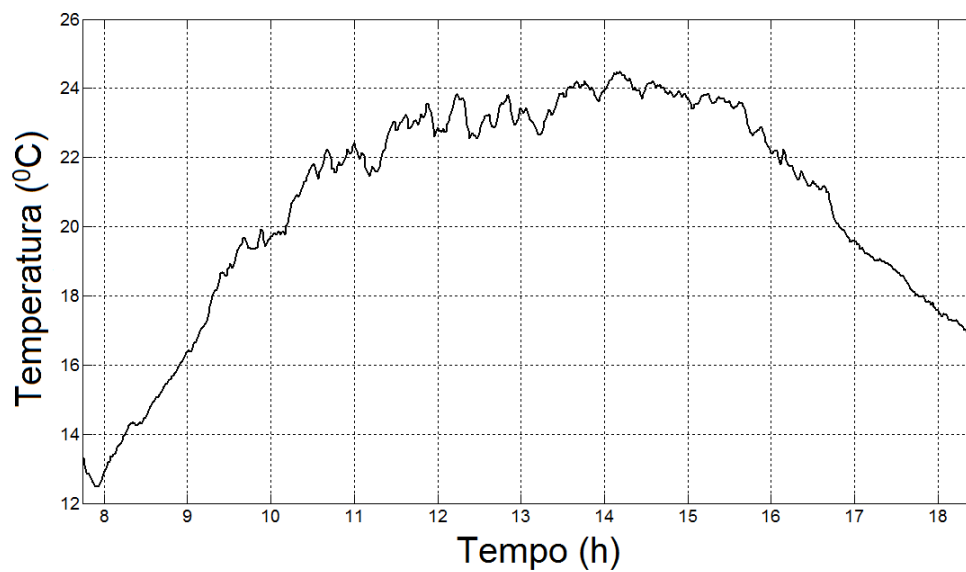


Figura 61 - Temperatura do ar ambiente

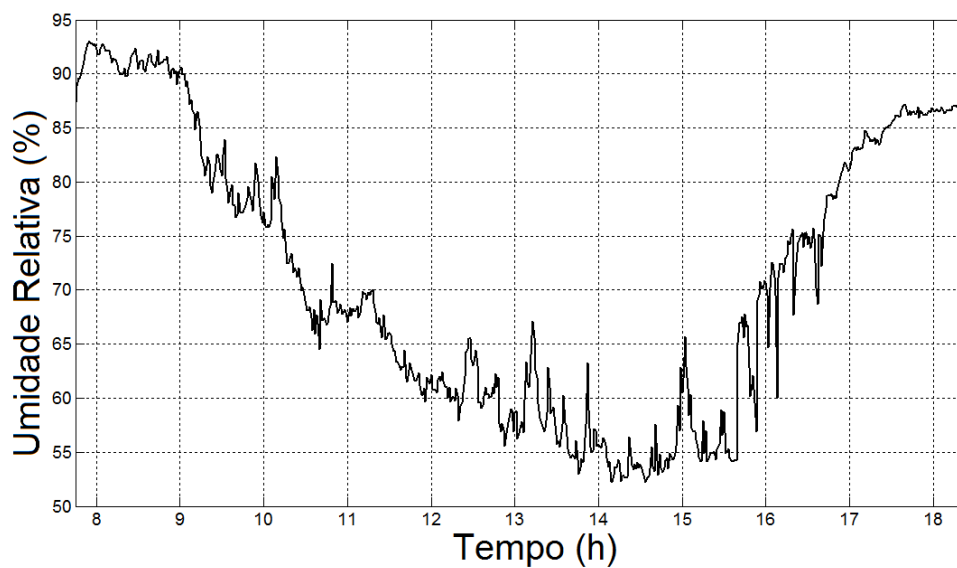


Figura 62 - Umidade relativa do ar ambiente

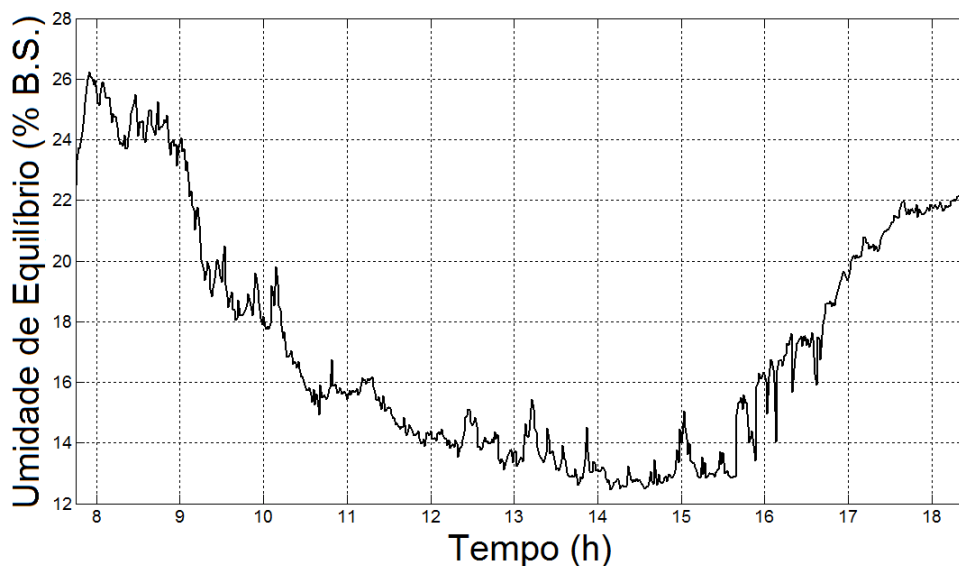


Figura 63 - Umidade de equilíbrio do ar ambiente

Analisando a Figura 63 pode-se ver que a umidade de equilíbrio do ar ambiente apresenta grande variação no decorrer do dia, fato este que impede que a aeração possa ser feita em determinados instantes. O uso de um sistema de aeração que não seja capaz de manter o ar de forma a satisfazer a equação de equilíbrio só poderia ser acionado, neste caso, no intervalo 13h30min até 15h30min, aproximadamente, sem que houvesse aumento no teor de água dos grãos submetidos ao processo.

As Figuras 64, 65 e 66 ilustram as características do ar na saída da bomba de calor. Pode-se verificar que, embora o ar ambiente tenha apresentado grandes variações no decorrer do dia, o sistema foi capaz de satisfazer a condição de umidade de equilíbrio durante todo o experimento, embora se perceba variações na temperatura e na umidade relativa. Observam-se na figura 65 muitas variações na umidade relativa do ar na saída da bomba de calor no intervalo de 13 até as 16 horas. Este comportamento se deve ao fato de que neste intervalo a umidade ambiente, em determinados instantes, atingiu valores inferiores ao mínimo necessário para satisfazer a condição de equilíbrio, forçando assim o acionamento do sistema de borrifamento.

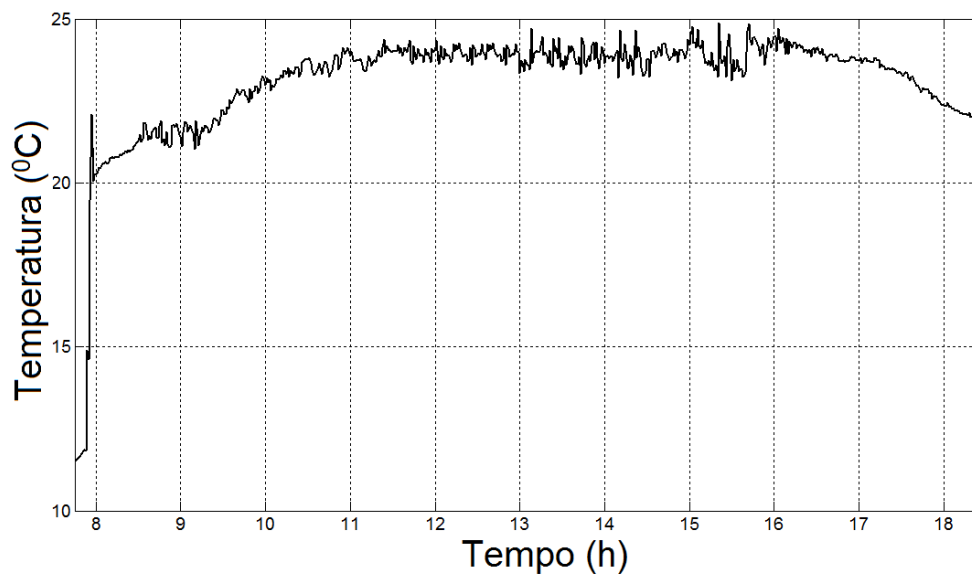


Figura 64 - Temperatura, umidade relativa e umidade de equilíbrio do ar na saída da bomba de calor.

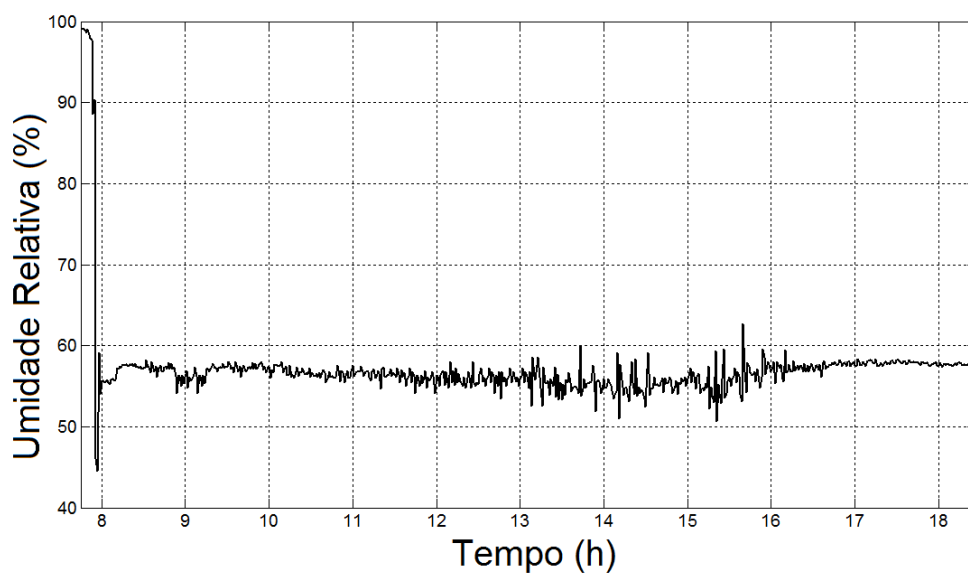


Figura 65 - Temperatura, umidade relativa e umidade de equilíbrio do ar na saída da bomba de calor.

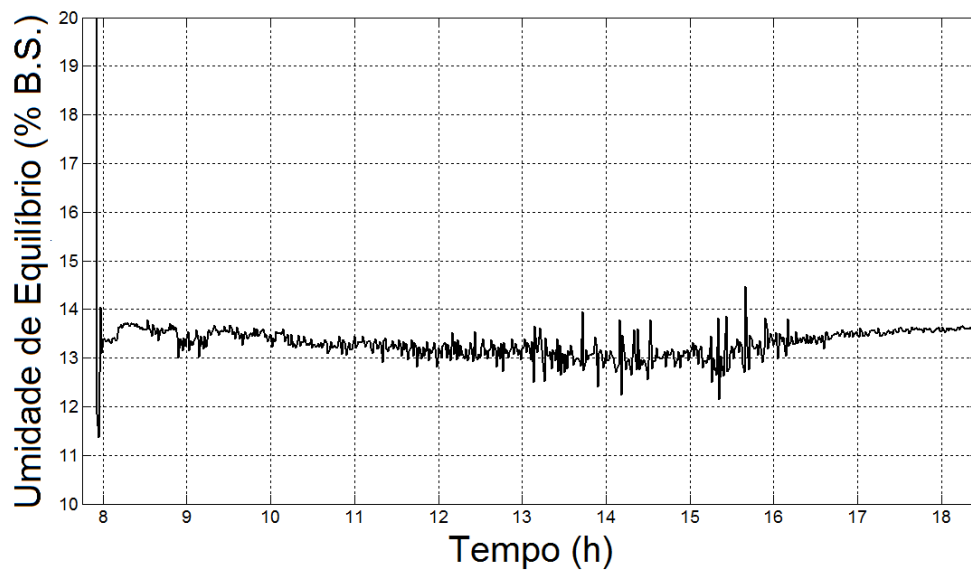


Figura 66 - Temperatura, umidade relativa e umidade de equilíbrio do ar na saída da bomba de calor.

5 – CONCLUSÕES

Em função dos testes realizados e dos resultados obtidos pode-se concluir que:

- a) O sistema de controle projetado se mostrou eficiente para controlar adequadamente as características psicrométricas do ar de secagem, tornando-se desta forma uma poderosa ferramenta para ser utilizada em processos onde se buscam alta eficiência e preservação das principais características do produto submetido à secagem.
- b) A capacidade do sistema em manter constante a relação de equilíbrio higroscópico entre o ar e o produto submetido à aeração torna possível que este processo seja realizado a qualquer instante e durante o tempo que for necessário, sem que para isso seja necessário se preocupar com as condições ambientais.

6 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

São propostas as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- i. Realizar a modelagem matemática do sistema.
- ii. Realizar simulações do modelo matemático do sistema.
- iii. Avaliar a possibilidade de se adicionar outras variáveis manipuladas ao processo de forma que se consiga manter os valores de temperatura e umidade relativa exatamente como o set-point.
- iv. Validar o sistema de controle em bombas de calor com a configuração diferente a utilizada neste experimento.
- v. Avaliar a utilização de sistema de controle em bombas de calor utilizadas em processos de refrigeração.
- vi. Avaliar a utilização de bombas de calor com sistema de controle em climatização de ambientes onde o controle de temperatura e umidade relativa seja de grande importância.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTRÖM, K.J. e HÄGGLUND, T. *PID Controllers: Theory, Design and Tuning*. 2ª Edição. Instrument Society of America, 1995.

CHEN, X. D.; MUJUMDAR, A. S. *Drying Technologies in Food Processing*. 1ª Edição. Singapura: Blackwell Publishing Ltd, 2008.

COLAK, N.; HEPBASLI, A. *a Review of heat-pump drying (HPD): Part 2 – Applications and performance assessments*. *Energy Conversion & Management*. 2009. n. 50. p. 2187-2199.

DORF, C. R.; BISHOP, R. H. *Sistemas de Controle Modernos*. 8ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

FRANCHI, C. M., RAVAGNANI, M. A. S. S., PEREIRA, J. R. D.; LIMA, O. C. M. *Desenvolvimento de um sistema de supervisão de dados aplicado a uma coluna de destilação didática*. *Educação & Tecnologia*. v. 13, n.1, p. 14-18. Belo Horizonte, 2008.

GROFF, R. *Secagem de grãos*. *SEED News*. v. 6, n. 2, p. 1-6. Pelotas, 2002.

HONEYWELL, 2008. *Data Sheet HIH 4000 Series – Humidity Sensors*. www.sensing.honeywell.com. Acesso em novembro de 2009.

IBRAHIM, D. *Microcontroller based applied digital control*. 1ª Edição. Chichester, 2006.

LACERDA FILHO, A. F. *Avaliação de unidades de beneficiamento de sementes*. Botucatu, SP. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de ciências agrônômicas da UNESP, 1998.

MAXIM-DALLAS, 2008. *Data Sheet DS 2438 – SMART BATTERY MONITOR*. www.datasheets.maxim-ic.com. Acesso em outubro de 2009.

MELO, E.C.; LOPES, D.C.; CORRÊA, P.C. *GRAPSI: Programa computacional para o cálculo das propriedades psicrométricas do ar*. *Engenharia na Agricultura*, v. 12, n. 2, p. 154-156. Viçosa, 2004.

MICROCHIP, 1997. *Using PWM to generate analog output*. www.microchip.com. Acesso em novembro de 2009.

MICROCHIP, 2003. *Data Sheet PIC 18F4550A*. www.microchip.com. Acesso em agosto de 2009.

MONTE, J. E. C. *Desenvolvimento e análise de um sistema de controle para bomba de calor utilizada em processos agrícolas*. Viçosa, MG. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 2008.

NATIONAL SEMICONDUCTOR, 2000. *Data Sheet LM 35 – Precision centigrade temperature sensors*. www.national.com. Acesso em novembro de 2009.

OGATA, K. *Engenharia de controle moderno*. 3ª Edição. São Paulo: Prentice Hall, 1997.

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

PEREIRA, F. *Microcontroladores PIC – Programação em C*. 7ª Edição. São Paulo: Érica, 2007.

SANTOS, R. R. *Análise de sistemas de secagem de café utilizando-se bomba de calor e gás liquefeito de petróleo*. Viçosa, MG. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 2007.

WEG, 2008. CFW-08 Inversores de frequência. www.weg.net. Acesso em outubro de 2009.