

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

IGOR RODRIGUES DE OLIVEIRA

**SINTONIA E SIMULAÇÃO DE UM CONTROLADOR PID PARA UMA
BOMBA DE CALOR**

VIÇOSA
2015

IGOR RODRIGUES DE OLIVEIRA

**SINTONIA E SIMULAÇÃO DE UM CONTROLADOR PID PARA UMA
BOMBA DE CALOR**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. DS Tarcísio de Assunção Pizziolo.

Co-orientador: Prof. DS José Vitor Nicacio.

VIÇOSA
2015

IGOR RODRIGUES DE OLIVEIRA

**SINTONIA E SIMULAÇÃO DE UM CONTROLADOR PID PARA UMA
BOMBA DE CALOR**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 08 de Julho de 2015.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. DS Tarcísio de Assunção Pizziolo - Orientador
Universidade Federal de Viçosa

Prof. DS José Vitor Nicacio - Coorientador
Universidade Federal de Viçosa

Prof. DS Denílson Eduardo Rodrigues - Membro
Universidade Federal de Viçosa

Eng. Diego Augusto Gonzaga - Membro
Universidade Federal de Viçosa

“O êxito da vida não se mede pelo caminho que você conquistou, mas sim pelas dificuldades que superou no caminho.”

(Abraham Lincoln)

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, aos meus pais, à minha família por todo carinho e confiança depositados em mim. Aos meus amigos por toda a ajuda durante os anos de graduação. E aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica pelos ensinamentos e lições de vida passados.

Agradecimentos

Agradeço ao meu pai José Custódio por todos os ensinamentos de vida que foram cruciais na formação de quem eu sou e todo o meu caráter, por toda confiança depositada em mim e os esforços empenhados durante os anos para que esse sonho se concretizasse. Obrigado também pelo carinho e dedicação e por ser um pai de que eu tenho orgulho de ser filho.

A minha mãe Maria Aparecida pelo carinho, amor e orações dedicadas a mim. Obrigado por ser essa mulher forte e de fibra que sempre erguia minha cabeça nos momentos mais difíceis dizendo que no final tudo ia dar certo. E não é que deu!

Agradeço também à minha irmã Agatha, pelo carinho, dedicação e disposição pra me ajudar nesses anos de graduação. Obrigado minha irmã sem sua ajuda nada disso teria sido possível.

A Vanessa pelo amor e carinho dedicados a mim, pela ajuda e pelo seu comprometimento, seja quando entendia as minhas ausências, ou mesmo quando merecia uns puxões de orelha na hora que a preguiça batia. Obrigado pela confiança e por sempre me apoiar.

Ao professor Evandro de Castro Melo e o seu orientado Diego Gonzaga por ter cedido o seu Laboratório para que esse trabalho pudesse ser feito.

Ao meu orientador e amigo Tarcísio Pizziolo por ter concordado em me orientar neste trabalho e por todo tempo dedicados a mim para que este trabalho pudesse ser concluído. Agradeço também pelo apoio nas decisões tomadas e pela confiança depositada em mim.

Agradeço ao meu co-orientador José Vitor Nicacio pela sugestão do tema, pelo envolvimento no trabalho sendo sempre solícito nos momentos em que eu precisei de ajuda e por todo material para o desenvolvimento e conclusão dos objetivos desta monografia.

A todos os amigos que fiz nessa grande família chamada ELÉTRICA, a república Barraka Armada por ter me acolhido nesse último ano, pela amizade, conversas e confraternizações realizadas em todos esses anos.

Enfim a todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para que este trabalho pudesse ser realizado.

A todos vocês aqui vai o meu mais sincero e profundo OBRIGADO!

Resumo

Os processos industriais necessitam de um controle de suas variáveis, sejam elas temperatura, pressão, vazão, nível e etc. Nos casos mais simples são utilizados controles *on-off*. Este trabalho propõe uma metodologia diferente e sofisticada para controlar um processo de secagem que utiliza uma bomba de calor. Uma bomba de calor é um dispositivo que aplica trabalho externo para extrair calor de um reservatório frio para entregar a outro quente, tendo sua fonte de calor o ar ambiente. No processo de secagem as grandezas temperatura e umidade relativa são as variáveis a serem controladas. Esse controle pode ser feito através de dois modos, um é por meio da variação na frequência do ciclo de trabalho de um compressor e ou outro por meio da variação da frequência de rotação de um ventilador, ambos existentes dentro da bomba de calor. Assim tem-se um sistema com duas entradas e duas saídas, ou seja, um sistema MIMO. O sistema de controle tem que ser capaz de manter a temperatura e umidade nos valores pré-estabelecidos pelo usuário. Foram utilizados os sensores de temperatura LM35 da *National Semiconductor* e os sensores de umidade relativa HIH 4000-004 da *Honeywell*. A ação de controle utilizada foi a estratégia de controle PID, que calcula a diferença entre o valor de referência com o valor de saída da bomba de calor, e atua nos inversores de frequência do compressor e do ventilador afim de minimizar esta diferença. Em todas as simulações e testes realizados conseguiu-se uma resposta satisfatória por parte do controlador, deixando os valores de saída iguais aos da referência ou bem próximos destes.

Abstract

Industrial processes require a control of its variables, whether temperature, pressure, flow, level and etc. In the simplest cases they are used on-off controls. This paper proposes a different methodology and sophisticated to control a drying process that uses a heat pump. A heat pump is a device that applies external work to extract heat from a cold reservoir to deliver the hot another, having a heat source ambient air. In the process of drying temperature and humidity relative quantities are the variables to be controlled. This control can be done by two methods, one is by varying the frequency of a compressor working cycle, either by varying the rotational frequency of a fan, both existing within the heat pump. Thus we have a system with two inputs and two outputs, namely a MIMO system. The control system must be able to maintain the temperature and humidity in the pre-established values by the user. The LM35 temperature sensors National Semiconductor and relative humidity sensors 4000-004 Honeywell HIH were used. The control action used was the PID control strategy, which calculates the difference between the reference value with the output value of the heat pump, and operates in the frequency inverter compressor and fan in order to minimize this difference. In all performed simulations and tests we achieved a satisfactory response from the controller, leaving the output values equal to the reference or very close to them.

Sumário

1	Introdução.....	17
1.1	Objetivos.....	19
2	Revisão de Literatura.....	20
2.1	Bomba de calor.....	20
2.1.1	Princípio de funcionamento de uma bomba de calor	21
2.1.2	Tipos de bombas de calor	22
2.1.3	Componentes de uma bomba de calor.....	22
2.1.3.1	Compressor.....	22
2.1.3.2	Condensador	22
2.1.3.3	Válvula de expansão.....	23
2.1.3.4	Evaporador	23
2.1.4	Fontes de calor.....	23
2.5	Secadores com bomba de calor	24
2.2	Sistemas de controle	25
2.2.1	Função de transferência (FT).....	25
2.2.2	Ação de controle proporcional-integral-derivativo	26
2.2.2.1	Regras de sintonia para controladores PID	27
2.2.2.2	Regras de Ziegler-Nichols para sintonia de controladores PID	27
2.2.3	Sistemas multivariáveis	30
2.3	Sensores	31
2.3.1	Sensores de temperatura	31
2.3.2	Sensores de Umidade Relativa	33
2.4	Aquisição de dados.....	34
2.4.1	Linguagem C#	34
2.4.2	Módulos I/O.....	35
3	Materiais e Métodos	36
4	Resultados e Discussão	43
4.1	Testes realizados.....	43
4.2	Modelagem do sistema	47
4.3	Simulação do sistema	48

5	Conclusão	52
6	Referências Bibliográficas	53

Lista de Figuras

Figura 1 - Interações entre as malhas de controle	18
Figura 2 - Segunda Lei da Termodinâmica (fonte: LOBO, 2004)	21
Figura 3 - Ciclo de funcionamento de uma bomba de calor (fonte: NICACIO, 2010).....	21
Figura 4 - Ação de controle PID.....	26
Figura 5 - Resposta de uma planta a um degrau unitario (fonte: OGATA, 2003)	28
Figura 6 - Curva de resposta em forma de S (fonte: OGATA, 2003)	28
Figura 7 - Ação proporcional em malha fechada (fonte: OGATA, 2003)	29
Figura 8 - Oscilação devido à ação proporcional (fonte: OGATA, 2003)	29
Figura 9 - Descrição de um sistema MIMO	30
Figura 10 - Encapsulamento do LM35	32
Figura 11 - Encapsulamento do sensor HIH 4000-004	33
Figura 12 - (a) Região de operação do sensor HIH 4000 (b) Relação tensão x umidade relativa (fonte: HORNEYWELL, 2008).....	34
Figura 13 - Módulo I/O 7018 (fonte: ICPDAS, 2003)	35
Figura 14 - Esquemático da bomba de calor (fonte: NICACIO, 2010).....	36
Figura 15 - Fluxo de calor no interior da bomba de calor (fonte: NICACIO, 2010)	37
Figura 16 - Tela do aplicativo de aquisição dos dados.....	38
Figura 17 - Caixa onde foram colocados os sensores.....	39
Figura 18 - Esquema de ligação dos módulos de aquisição de dados	39
Figura 19 - Sistema de aquisição dos dados	40
Figura 20 - Metodologia para identificar a dinâmica do sistema mediante excitações das variáveis de entrada e reações temporais das variáveis de saída	41
Figura 21 – Método gráfico para determinação dos parâmetros da função de transferência (Fonte: ÄSTRÖM & HÄGGLUND, 1995)	42
Figura 22 - Entrada degrau aplicada ao ventilador da bomba de calor	43

Figura 23 - Variação de temperatura do ar na saída da bomba de calor após o degrau no ventilador	44
Figura 24 - Variação da umidade relativa do ar na saída da bomba de calor após o degrau no ventilador	44
Figura 25 - Entrada degrau aplicada ao compressor da bomba de calor	45
Figura 26 - Variação da temperatura na saída da bomba de calor devido à entrada degrau no inversor do compressor	46
Figura 27 - Variação da umidade relativa do ar na saída da bomba de calor devido à entrada degrau no inversor do compressor	46
Figura 28- Simulação do sistema MIMO	49
Figura 29 - Resposta transitória da temperatura do ar de saída da bomba de calor	50
Figura 30 - Resposta transitória da umidade relativa do ar de saída da bomba de calor.....	51

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Regra de sintonia de Ziegler-Nichols baseada no método de resposta ao degrau unitário	29
Tabela 2 - Regras de sintonia de Ziegler-Nichols para o método do período crítico	30
Tabela 3 - Funções de transferência do sistema MIMO	48
Tabela 4 - Constantes do PID	48

Abreviaturas

COP	<i>Coefficient of performance</i>
D	Derivativo
FT	Função de Transferência
I	Integral
K_{cr}	Ganho proporcional crítico
K_p	Ganho proporcional
LIT	Linear Invariante no Tempo
MIMO	<i>Multiple Output Multiple Input</i>
P	Proporcional
P_{cr}	Período crítico
PD	Proporcional - Derivativo
PI	Proporcional - Integral
PID	Proporcional - Integral - Derivativo
Q_C	Quantidade de calor da fonte fria
Q_H	Quantidade de calor da fonte quente
T_d	Constante de tempo derivativo
T_i	Constante de tempo integral
SISO	<i>Single Output Single Input</i>
W	Trabalho

1 Introdução

A secagem é a operação unitária de transferência de massa e calor envolvendo a remoção de água ou outro solvente de um sistema sólido. A retirada da umidade ocorre por evaporação ou sublimação mediante a aplicação de calor sob condições controladas. Seu objetivo é reduzir o conteúdo de líquido residual até um valor desejado, mais baixo que o anterior.

Segundo LACERDA FILHO (1998), ela é responsável por cerca de 60% da energia consumida no processo produtivo básico de grãos. Como energia é um produto caro e escasso, é necessário que se tome bastante cuidado para evitar seu desperdício e usá-la de forma eficiente.

Em detrimento a isso, faz-se necessário um processo de secagem de fácil controle e com alta eficiência energética. Atualmente os secadores que utilizam bombas de calor vêm se tornando uma alternativa bastante viável.

A modelagem matemática de sistemas que utilizam bomba de calor nos permite analisar e determinar o seu comportamento dinâmico, procurando preservar as características naturais do produto, além de buscar uma alta eficiência durante a secagem.

Em um processo de secagem que utiliza bomba de calor as variáveis controladas mais importantes são a temperatura e umidade relativa do ar de saída da bomba. Logo, espera-se que este controle de maneira eficaz e simultânea essas variáveis.

Entretanto um controle multivariável, descrito como MIMO, é inerentemente mais complexo do que se controlar apenas uma variável, dito como SISO, devido às interações que ocorrem entre as variáveis controladas y e as variáveis manipuladas u . A ação de um distúrbio sobre as saídas e sobre as entradas apresentam um efeito direto e um efeito indireto devido à interação entre as malhas, o que gera duas ações de controle simultâneas que dificultam a sintonia dos controladores e que podem desestabilizar o sistema em malha fechada. Embora seja uma metodologia de projeto mais simples e menos poderosa, a abordagem frequentemente adotada consiste em ignorar a natureza multivariável do sistema e projetar

controladores SISO para cada par entrada-saída. Neste contexto é primordial uma seleção adequada dos pares u - y , uma vez que a escolha incorreta pode resultar em um desempenho pobre do sistema em malha fechada e na redução das margens de estabilidade. (SEBORG, 1989). Na Figura 1 está ilustrado um esquema dessas interações entre as malhas.

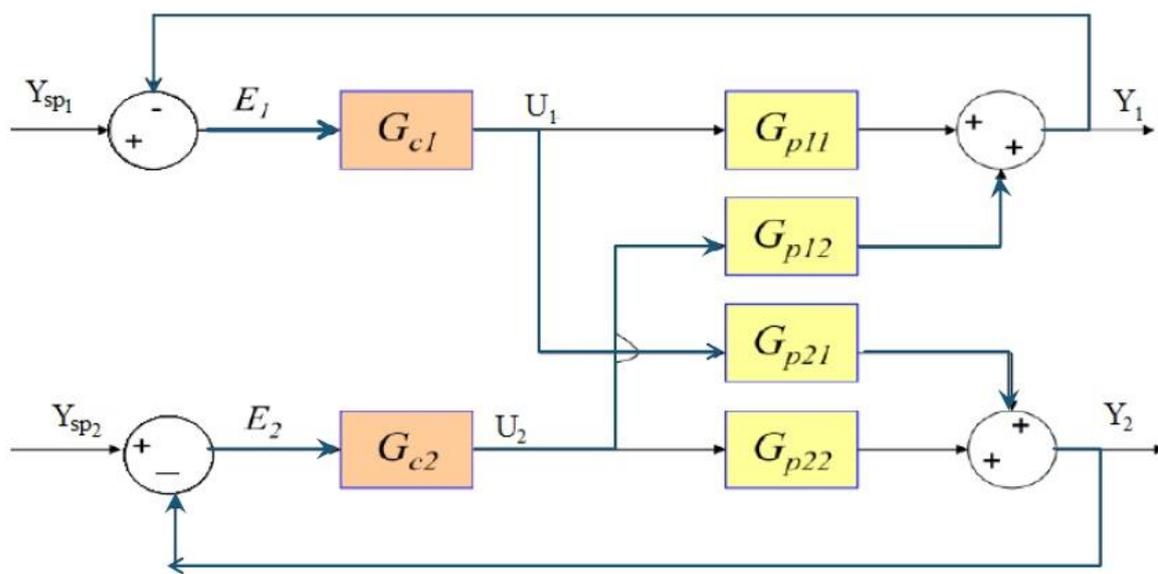


Figura 1 - Interações entre as malhas de controle

O desempenho energético de uma bomba de calor engloba a determinação dos valores de coeficiente de eficácia, potência consumida do compressor, taxas de troca de calor no condensador e evaporador, temperaturas de condensação e evaporação além do fluido refrigerante escolhido. Seu desempenho econômico leva em conta o custo inicial do equipamento, as taxas e o tempo de retorno deste investimento.

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema de controle de temperatura e de umidade de um processo de secagem, o qual utiliza um secador com bomba de calor.

Os objetivos específicos são:

- Criar um sistema de aquisição dos dados de temperatura e umidade relativa do ar de saída da bomba de calor;
- Modelar o sistema MIMO encontrando suas funções de transferência;
- Sintonizar um controlador PID a fim de se controlar a temperatura e umidade do ar de secagem conforme condições pré-estabelecidas pelo usuário;
- Validar o modelo sintonizado por simulação de todo o processo.

2 *Revisão de Literatura*

2.1 *Bomba de calor*

Segundo ASHRAE (2000), uma bomba de calor é um dispositivo que aplica trabalho externo para extrair uma quantidade do calor Q_C de um reservatório frio e entregar o calor Q_H a um reservatório quente. Uma bomba de calor está sujeita às mesmas limitações da segunda lei da termodinâmica como qualquer outro motor de calor, e conseqüentemente uma eficiência máxima pode ser calculada a partir do ciclo de Carnot.

As bombas de calor são caracterizadas geralmente por um coeficiente do desempenho (COP – *coefficient of performance*) que corresponde à quantidade de energia entregue ao reservatório quente em relação à quantidade de trabalho.

De acordo com a segunda lei da termodinâmica, o calor não pode espontaneamente fluir de uma posição mais fria para uma posição mais quente, é requerido trabalho para conseguir isto. As bombas de calor podem essencialmente ser pensadas como motores de calor que operam no reverso. Um motor de calor permite que a energia flua de uma fonte quente, como visto anteriormente, para uma fonte fria, extraíndo uma fração dela como trabalho no processo. Inversamente, uma bomba de calor requer trabalho para mover a energia térmica de uma fonte fria para um dissipador de calor mais quente. Isso está ilustrado na Figura 1.

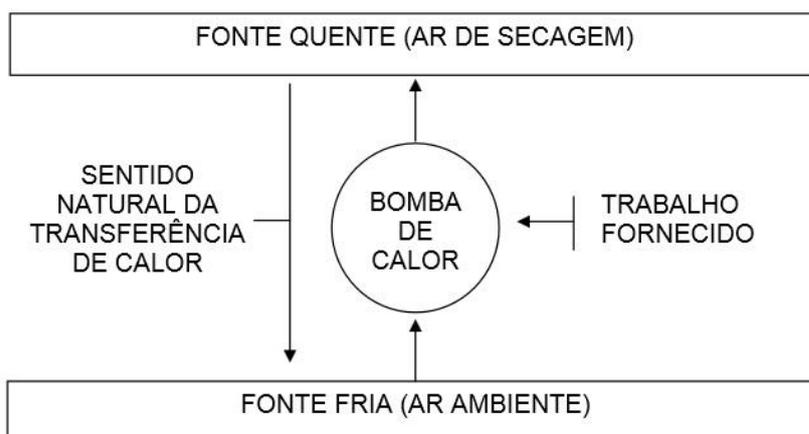


Figura 2 - Segunda Lei da Termodinâmica

2.1.1 Princípio de funcionamento de uma bomba de calor

As bombas de calor são baseadas nos ciclos de refrigeração. Embora os equipamentos sejam iguais, os objetivos são diferentes. A bomba de calor transfere energia do nível mais baixo de temperatura para o mais alto, sendo aproveitado o calor rejeitado do nível mais alto de temperatura. Para isto, o ciclo de refrigeração requer a ação de trabalho externo, mostrada na Figura 3.

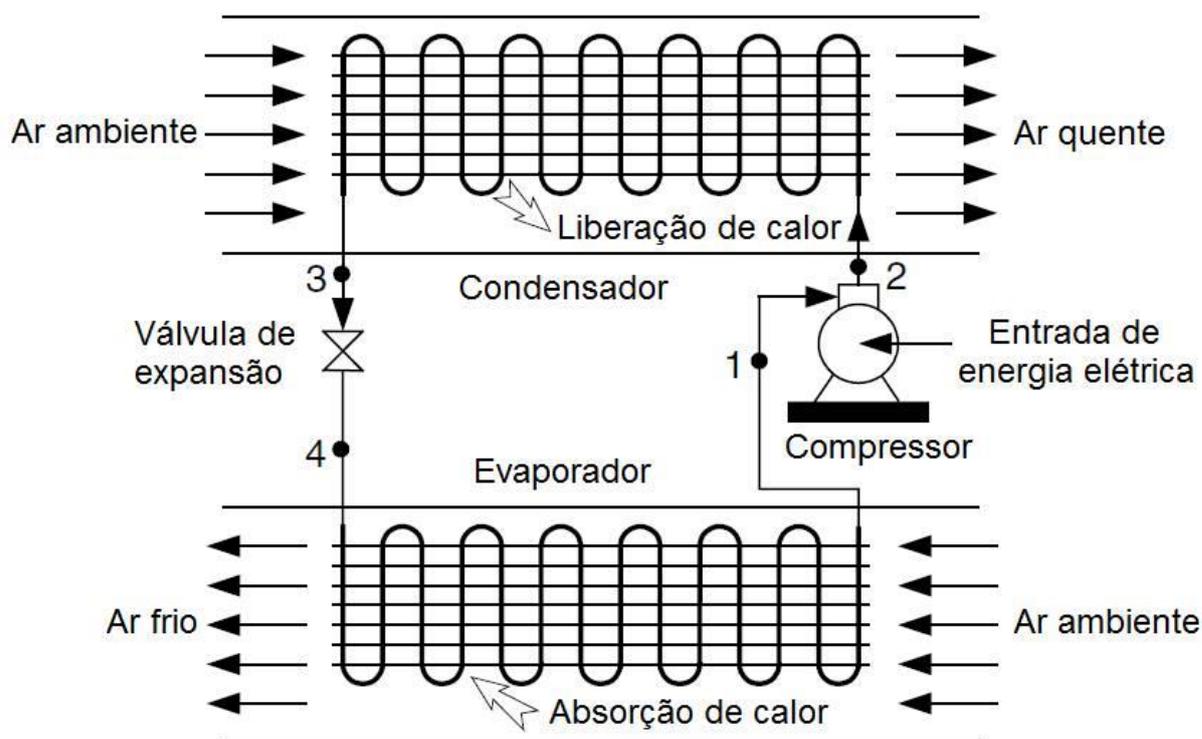


Figura 3 - Ciclo de funcionamento de uma bomba de calor ideal (fonte: NICACIO, 2010)

Os processos que ocorrem na Figura 3 podem ser descritos como:

- 1-2 Compressão adiabática
- 2-3 Rejeição isotérmica de calor que será aproveitado (condensação)
- 3-4 Expansão adiabática
- 4-1 Recebimento isotérmico de calor da fonte primária (evaporação)

Neste ciclo o vapor é comprimido, condensado, tendo posteriormente sua pressão diminuída de modo que o fluido refrigerante possa evaporar a baixa pressão.

2.1.2 Tipos de bombas de calor

Há dois tipos básicos de bombas de calor, baseadas em ciclo de compressão de vapor ou em um ciclo de absorção. A maioria das bombas de calor trabalha no princípio do ciclo de compressão de vapor (ASHRAE, 2000), cujos principais componentes são o compressor, a válvula de expansão e dois trocadores de calor chamados de evaporador e condensador.

As bombas por absorção são termicamente motorizadas, ou seja, ao invés de energia mecânica é utilizado calor para impulsionar o ciclo. Esses sistemas utilizam a habilidade de líquidos ou sais de absorverem o vapor do fluido de trabalho.

2.1.3 Componentes de uma bomba de calor

2.1.3.1 Compressor

O compressor faz circular o fluido refrigerante através do sistema num ciclo contínuo. O compressor descarrega o gás refrigerante quente e a alta pressão no condensador.

2.1.3.2 Condensador

O condensador é um trocador de calor que rejeita toda a energia do sistema em forma de calor, ou seja, o calor absorvido pelo evaporador mais o equivalente da energia que entra no compressor. O condensador dissipa o calor latente da condensação e o descarrega no ar que será aquecido, fazendo com que o refrigerante volte ao seu estado líquido e continue no ciclo na válvula de expansão.

2.1.3.3 Válvula de expansão

Na válvula de expansão ocorre um processo de estrangulamento adiabático irreversível sem realização de trabalho. Possui duas finalidades: reduzir a pressão do fluido refrigerante até a pressão de evaporação e regular a sua vazão que entra no evaporador.

2.1.3.4 Evaporador

É um trocador de calor responsável por evaporar o fluido refrigerante absorvendo calor do ar e transmitindo-o para o refrigerante.

2.1.4 Fontes de calor

O desempenho técnico e econômico de uma bomba de calor está intimamente relacionado com as características da fonte de calor empregada.

Segundo ASHRAE (2000), uma fonte de calor ideal para bombas de calor tem uma temperatura alta e estável, deve ser também disponível em abundância, não ser corrosiva ou poluída, ter propriedades termofísicas favoráveis e sua utilização necessitar de poucos investimentos e ter um custo de utilização baixo.

Os principais tipos de fontes de calor são:

- Ar ambiente – é de graça e amplamente disponível, constituindo na mais comum fonte de calor para bombas de calor;
- Ar de exaustão (ventilação) – é uma fonte de calor comum para bombas de calor em residências e prédios comerciais;
- Lençóis d'água – está disponível em temperaturas estáveis em muitas regiões;
- Solo – é usado para aplicações residenciais e comerciais e tem vantagens similares a dos sistemas que usam lençóis d'água como fonte de calor;
- Calor geotérmico (rochas) – pode ser utilizado em regiões sem ocorrência de lençóis d'água, ou onde essa ocorrência é muito pequena;

- Água de rios e lagos – é em princípio uma boa fonte de calor, mas tem a grande desvantagem de variar muito sua temperatura de acordo com as estações climáticas;
- Água do mar – é uma excelente fonte de calor sob certas condições, sendo utilizada para instalações medias e grandes de bombeamento de calor;
- Água proveniente de processos industriais e efluentes – é caracterizada por uma temperatura relativamente alta e constante durante todo o ano.

2.5 Secadores com bomba de calor

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 (Mujumdar e Chen, 2008).

Secadores com bomba de calor tem sido tema de pesquisa e desenvolvimento para diferentes aplicações, principalmente na área de aquecimento, arrefecimento e secagem. Para melhorar o desempenho do secador com bomba de calor, pesquisas sobre a modificação do sistema e da combinação com outros mecanismos auxiliares tem ganhado destaque. Secadores com bomba de calor são comprovadamente sistemas de secagem que garantem a qualidade do produto, especialmente alimentos e produtos agrícolas. Nestes secadores é possível controlar a temperatura de secagem, umidade relativa, teor de água do produto, velocidade do ar de secagem e tempo de secagem. Os fatores a serem considerados na melhoria de um secador com bomba de calor são o custo de instalação, o desempenho da secagem, tais como a velocidade do ar, a temperatura de secagem e de umidade relativa, o desempenho do componente híbrido de aquecimento (quando presente), potência necessária para operar o sistema e também período de retorno. Ao melhorar o desempenho do secador com bomba de calor garante-se o aumento da qualidade do produto e a redução do custo de operação da indústria de secagem (NICACIO, 2015).

2.2 Sistemas de controle

O controle automático desempenha um papel muito importante na engenharia produzindo estratégias para otimizar o desempenho dos sistemas dinâmicos, melhorar a produtividade diminuindo assim o trabalho árduo e pesado de várias rotinas de operações manuais repetitivas.

2.2.1 Função de transferência (FT)

A FT é definida como a relação entre a transformada de Laplace da saída e a transformada de Laplace da entrada, admitindo-se todas as condições iniciais nulas.

Considere o sistema LIT, definido pela seguinte equação diferencial:

$$a_0 y^n + a_1 y^{n-1} + \dots + a_{n-1} \dot{y} + a_n y = b_0 x^m + b_1 x^{m-1} + \dots + b_{m-1} \dot{x} + b_m y \quad (n \geq m), \quad (1)$$

onde y é a saída do sistema e x a entrada. A FT desse sistema é a relação entre as transformadas de Laplace da saída com a entrada, quando todas as condições iniciais são zero.

$$FT = G(s) = \mathcal{L} [saída] / \mathcal{L} [entrada] |_{\text{condições iniciais} = 0} \quad (2)$$

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_{m-1} s + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n} \quad (3)$$

Utilizando o conceito de FT, é possível representar a dinâmica de um sistema por meio de uma equação algébrica em s .

Segundo OGATA (2003), a FT de um sistema é um modelo matemático que constitui um método operacional para expressar a equação diferencial que relaciona a variável saída à variável entrada. É uma propriedade inerente ao sistema, independe da magnitude e da natureza da função de entrada ou excitação. Inclui as unidades necessárias para relacionar a entrada à saída, mas não fornece nenhuma informação relativa à estrutura física do sistema.

Se a FT de um sistema é conhecida, a saída ou resposta poderá ser estudada para várias maneiras de entrada, visando ao entendimento da natureza do sistema.

Se a FT de um sistema não for conhecida, ela pode ser determinada experimentalmente com o auxílio de entradas conhecidas e do estudo das respectivas respostas do sistema.

Todo processo possui características que determinam atraso na transferência de energia ou massa, o que conseqüentemente dificulta a ação de controle, visto que elas são inerentes aos processos. Quando, então, vai se definir o sistema mais adequado de controle, deve-se levar em consideração estas características e suas interações. São elas: tempo morto, capacitância e resistência.

Tempo morto: é o intervalo de tempo entre o instante em que o sistema sofre uma variação qualquer e o instante em que esta começa a ser detectada pelo elemento sensor. Também é chamado de atraso de transporte. Quanto maior o tempo morto no processo, maior é a dificuldade de seu controle.

2.2.2 Ação de controle proporcional-integral-derivativo

Este tipo de ação combina as vantagens das três ações de controle envolvidas. Sua ação de controle é descrita conforme a Equação 4.

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) \cdot dt + K_p \cdot T_d \cdot \frac{d}{dt} e(t) \quad (4)$$

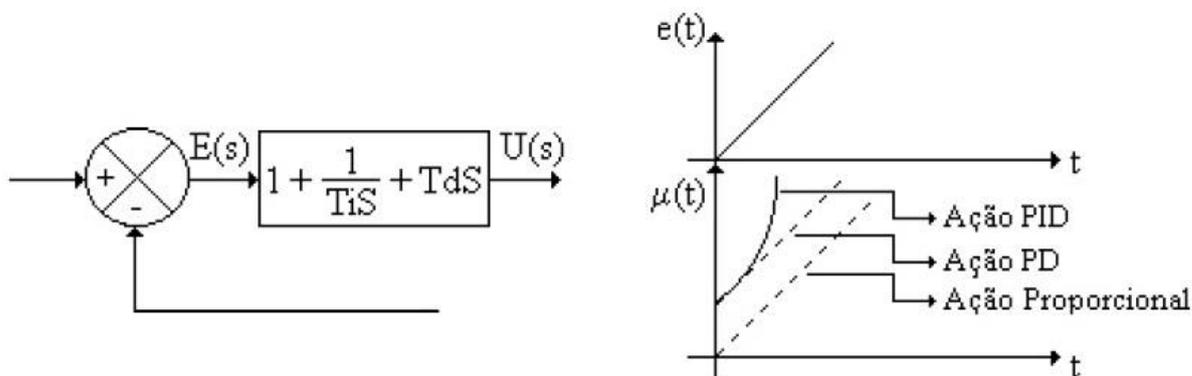


Figura 4 - Ação de controle PID

É utilizada para melhorar tanto a resposta transitória como a resposta de regime permanente adicionando ao sistema 2 zeros e um pólo.

2.2.2.1 Regras de sintonia para controladores PID

Se um modelo matemático da planta pode ser obtido, então é possível aplicar várias técnicas de projeto na determinação dos parâmetros do controlador que vão impor as especificações do regime transitório e do regime permanente do sistema de malha fechada. Entretanto, se a planta for muito complexa, a abordagem analítica do controlador PID não será possível, sendo necessário recorrer a outros métodos para a sintonia do controlador (OGATA, 2003).

Segundo OGATA (2003), o processo de selecionar parâmetros do controlador que garantam uma dada especificação de desempenho é conhecido como sintonia do controlador. Ziegler-Nichols sugeriram regras para a sintonia de controladores PID baseadas na resposta experimental ao degrau no valor 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.

2.2.2.2 Regras de Ziegler-Nichols para sintonia de controladores PID

Ziegler-Nichols 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 (OGATA, 2003).

Existem dois métodos de sintonia para controladores PID: o método de resposta ao degrau e o método do período crítico.

Método de resposta ao degrau: este método obtém uma resposta experimental da planta quando a esta se aplica como entrada um degrau unitário. O mesmo está descrito conforme a Figura 5.

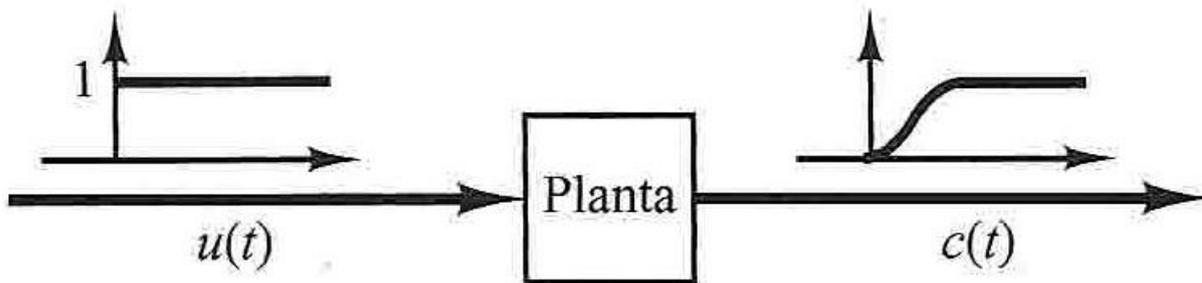


Figura 5 - Resposta de uma planta a um degrau unitario (fonte: OGATA, 2003)

Segundo OGATA (2003), se a planta não possui integradores nem pólos conjugados dominantes, a resposta ao degrau unitário tem o aspecto de uma curva em forma de S, como mostra a Figura 6.

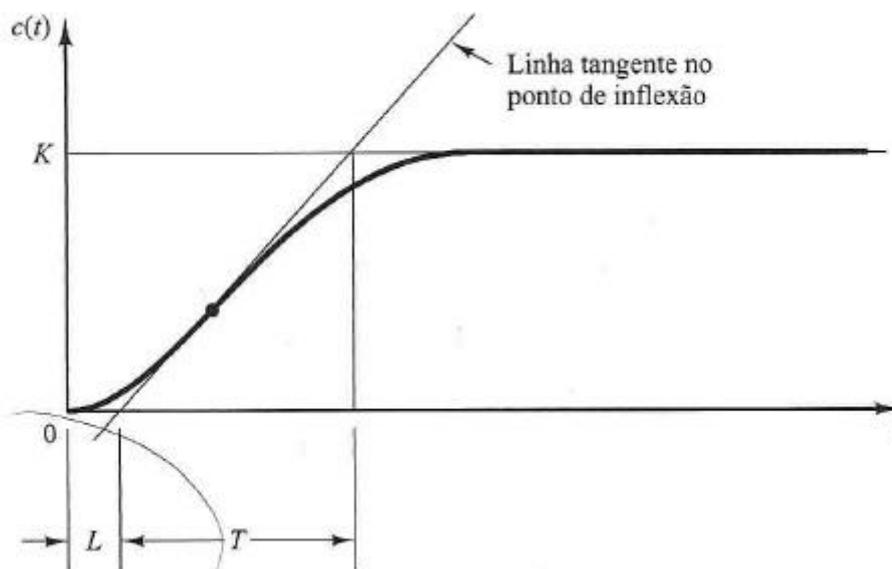


Figura 6 - Curva de resposta em forma de S (fonte: OGATA, 2003)

Essa curva é caracterizada por duas constantes, o atraso L e a constante de tempo T . Estas são determinadas desenhando-se uma reta tangente no ponto de inflexão da curva em forma de S e determinando a intersecção da reta tangente com o eixo dos tempos e a linha $c(t) = K$, como visto na Figura 6.

Ziegler-Nichols sugeriram escolher os valores de K_p , T_i e T_d de acordo com as fórmulas apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Regra de sintonia de Ziegler-Nichols baseada no método de resposta ao degrau unitário

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 primeiro $T_i = \infty$ e $T_d = 0$. Utilizando somente a ação proporcional, visto na Figura 7. Aumenta-se o valor de K_p de 0 até o valor crítico K_{cr} , no qual a saída exibe uma oscilação sustentada para qualquer valor que K_p possa assumir. Assim o ganho crítico K_{cr} e o correspondente período P_{cr} são determinados experimentalmente, como ilustrado na Figura 8.

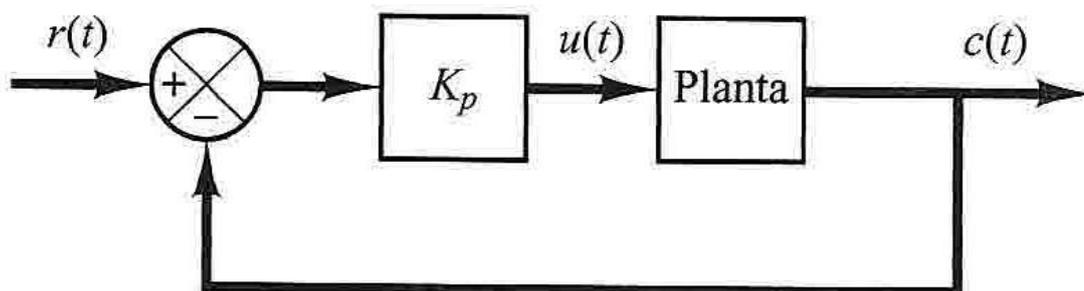


Figura 7 - Ação proporcional em malha fechada (fonte: OGATA, 2003)

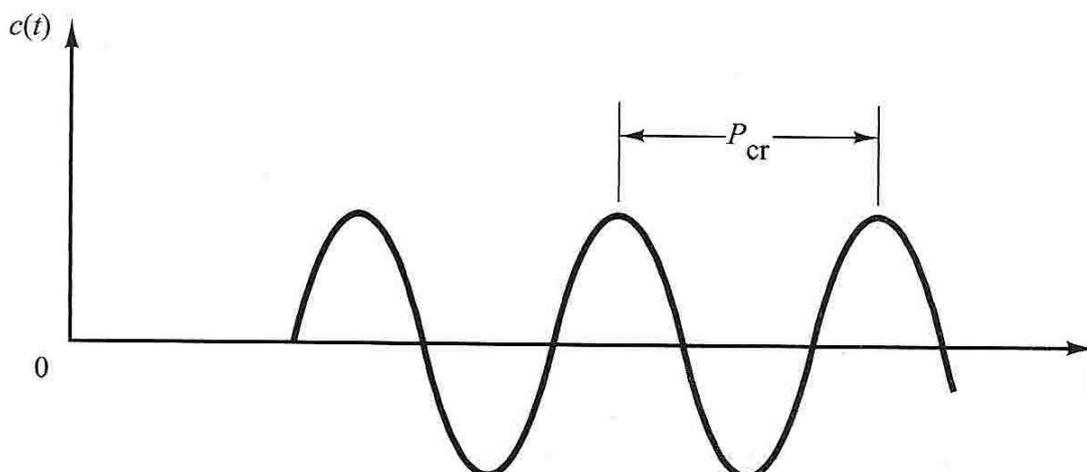


Figura 8 - Oscilação devido à ação proporcional (fonte: OGATA, 2003)

As regras de sintonia deste método propostas por Ziegler-Nichols encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2 - Regras de sintonia de Ziegler-Nichols para o 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	$0,6K_{cr}$	$0,5P_{cr}$	$0,125P_{cr}$

2.2.3 Sistemas multivariáveis

Sistemas LIT podem ser descritos pela representação de estados ou de forma equivalente pela sua FT.

No caso multivariável a FT é uma matriz que define a relação de cada entrada para cada saída do sistema. O mesmo pode ser visto na Figura 9.

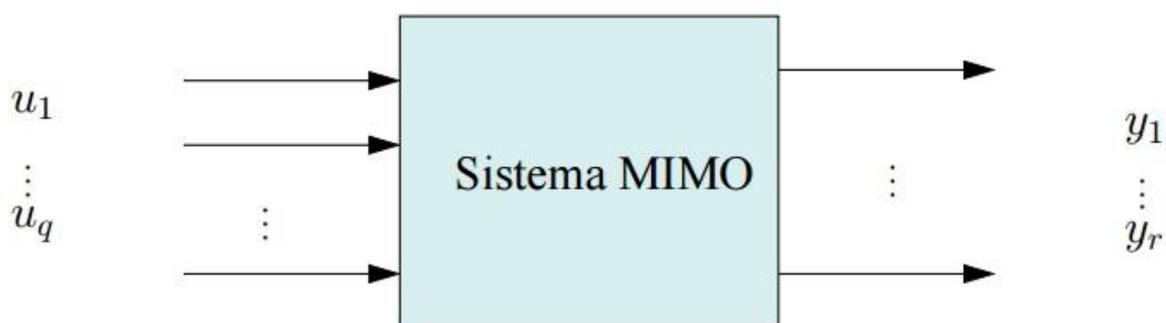


Figura 9 - Descrição de um sistema MIMO

Para obter a matriz de transferência aplica-se a transformada de Laplace nas equações que definem a dinâmica temporal do sistema considerando as condições iniciais nulas. Essa dinâmica pode ser vista conforme a Equação 6.

$$\mathcal{L}\{\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)\} \Rightarrow sX(s) = AX(s) + BU(s) \quad (6)$$

Portanto, a transformada dos estados:

$$X(s) = (sI - A)^{-1} \cdot BU(s) \quad (7)$$

Equação de saída, conforme descrita na Equação 8.

$$\mathcal{L}\{y(t) = Cx(t) + Du(t)\} \Rightarrow sY(s) = CX(s) + DU(s) \quad (8)$$

E a relação entrada-saida, dada pela Equação 9.

$$Y(s) = \underbrace{C(sI - A)^{-1}B + D}_{G(s)} \cdot U(s), \quad (9)$$

onde $G(s)$ é a matriz de transferência do sistema.

2.3 Sensores

São dispositivos que tem a propriedade de transformar em sinal elétrico a mudança de valor em uma grandeza física que está relacionada a uma ou mais propriedades o material de que é feito o sensor.

Existem diversos tipos de sensores, destacando-se entre eles os fotodiodos (conversão elétrico/luminosa), os microfones (conversão elétrico/sonora) e os termistores (conversão elétrico/térmica).

Os sensores são largamente utilizados em sistemas de controle de malha fechada, atuando na realimentação fornecendo informações da saída do sistema.

2.3.1 Sensores de temperatura

O objetivo de se medirem e controlarem as diversas variáveis físicas em processos industriais é obter produtos de alta qualidade, com melhores condições de rendimento e segurança, a custos compatíveis com as necessidades do mercado consumidor.

Nos diversos segmentos de mercado, seja químico, siderúrgico, petroquímico, alimentício ou outro, a monitoração da variável temperatura é fundamental para obtenção de um produto final específico e em condições para entrar no mercado.

2.3.2 Sensores de Umidade Relativa

A umidade relativa é também uma grandeza muito importante em processos industriais como em ambientes onde o ar é condicionado ou em processos agrícolas onde o teor de água em determinados alimentos deve ser controlado com alto grau de precisão. Devido a isso, existe uma infinidade de sensores que medem a umidade relativa do ar.

Um sensor muito utilizado é o HIH 4000 fabricado pela *Honeywell*, por possuir uma relação linear de tensão em sua saída ele é bastante empregado em sistemas de controle de umidade, o mesmo está ilustrado na Figura 11.

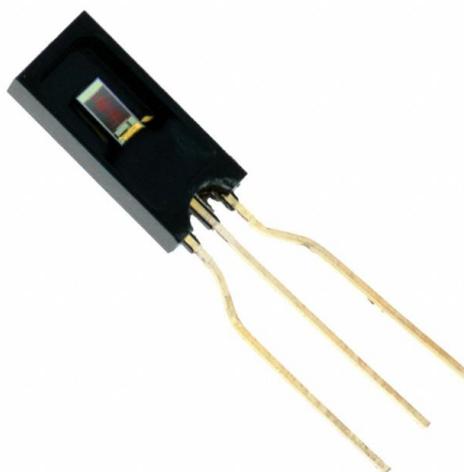


Figura 11 - Encapsulamento do sensor HIH 4000-004

Segundo *HONEYWELL* (2008), ele possui uma equação de conversão de sua tensão de saída pra valores de umidade relativa, sendo que esta equação varia conforme a série do sensor, na Equação 10 pode-se ver a fórmula de conversão da série HIH 4000-004.

$$UR(\%) = \frac{(V_{saída} - 0,0826)}{0,00315} \quad (10)$$

Sua relação da tensão com a umidade relativa, bem como sua região de operação estão descritas na Figura 12.

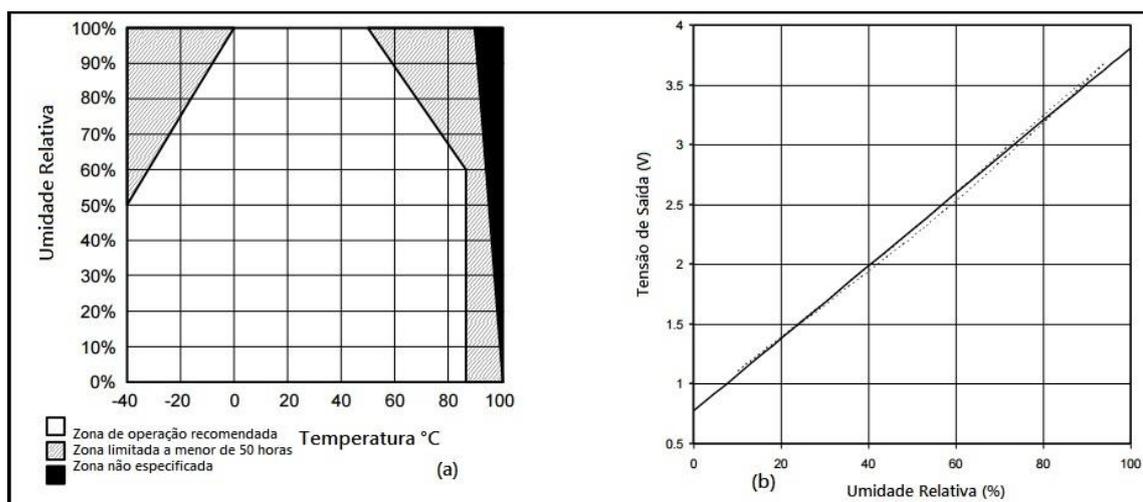


Figura 12 - (a) Região de operação do sensor HIH 4000 (b) Relação tensão x umidade relativa (fonte: HORNEYWELL, 2008)

2.4 Aquisição de dados

2.4.1 Linguagem C#

Segundo a *MICROSOFT* (2010), C# é uma linguagem elegante e de tipos protegidos, orientada a objeto e que permite aos desenvolvedores construir uma variedade de aplicações seguras e robustas, compatíveis com o *.Net Framework*. Sua sintaxe é altamente expressiva, mas também é simples e fácil de aprender.

O C# facilita o desenvolvimento de componentes de software por meio de vários constructos de linguagem inovadores, inclusive os seguintes:

- Assinaturas de métodos encapsulados, chamadas delegates, que permitem notificações de evento de tipo seguro;
- Propriedades, que servem como acessadores para variáveis de membro particular;
- Atributos, que fornecem metadados declarativos sobre tipos em tempo de execução;
- Comentários Embutidos da Documentação XML;
- LINQ (Consulta Integrada à Linguagem) que fornece recursos internos de consulta através de várias fontes de dados;

2.4.2 Módulos I/O

Os dispositivos I/O oferecem uma forma rápida e eficiente de controlar remotamente outros dispositivos e podem ser utilizados em qualquer ambiente que necessite de um monitoramento especial. Em automação industrial um dos módulos que tem destaque é o fabricado pela ICP DAS da série I-7000.

Segundo a ICP DAS (2003), os módulos I-7000 fornecem proteção econômica e condicionamento para uma ampla gama de sistemas de controle industriais.

Um destes módulos da série I-7000, mas especificamente o 7018, pode ser visto na Figura 13.



Figura 13 - Módulo I/O 7018 (fonte: ICPDAS, 2003)

O I-7018 é um modo de entrada analógico de 8 canais que permite a entrada de corrente e tensão, bem como uma entrada termopar.

3 *Materiais e Métodos*

O presente trabalho foi realizado nas dependências do Laboratório de Processamento Pós Colheita do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa.

A etapa inicial deste trabalho foi a elaboração de um sistema que coletasse e gravasse os dados referentes à temperatura e à umidade relativa do ar de saída da bomba de calor. Na Figura 14 pode-se observar o esquema da bomba de calor utilizada.

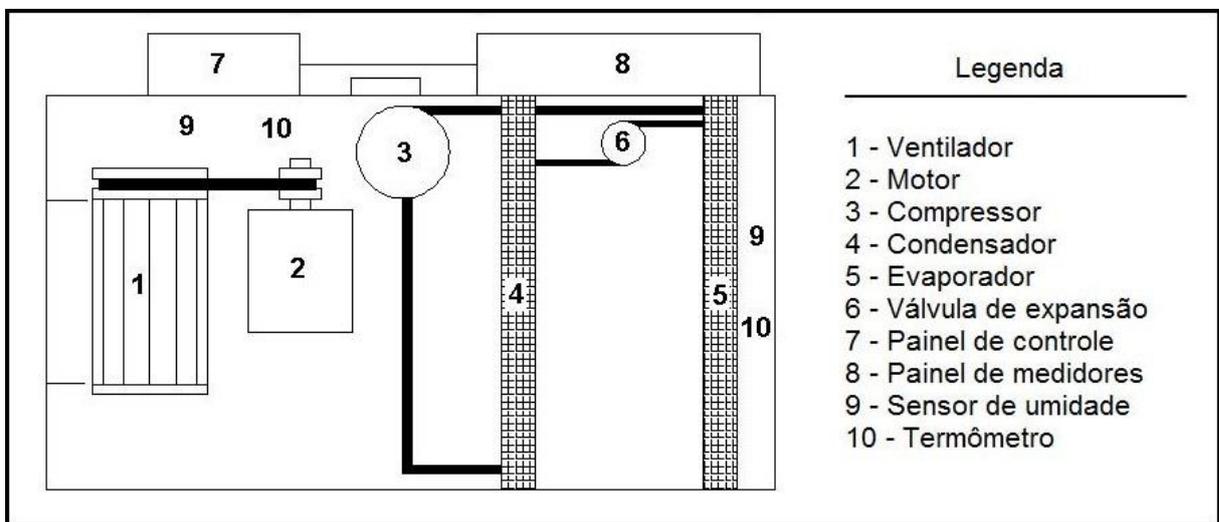


Figura 14 - Esquemático da bomba de calor (fonte: NICACIO, 2010)

A dinâmica das trocas de calor do ar desde a sua entrada até a sua saída estão descritas na Figura 15.

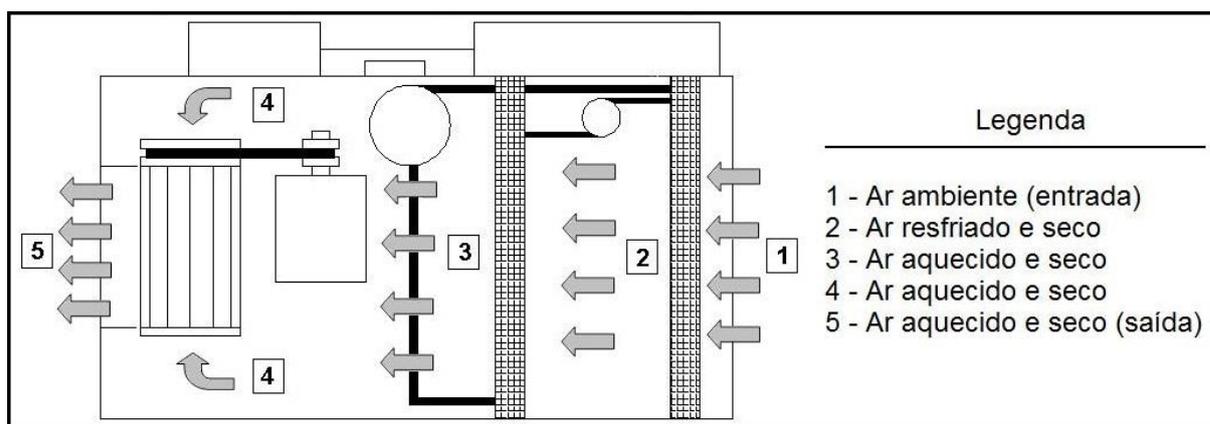


Figura 15 - Fluxo de calor no interior da bomba de calor (fonte: NICACIO, 2010)

No primeiro estágio, simbolizado pelo número 1 da Figura 15, o ar ambiente entra na bomba de calor através da sucção do ventilador. Em seguida esse ar atravessa o evaporador, onde é refrigerado. Como ocorre a condensação de parte da água contida no ar, o resultado disso é um ar frio e seco. Na próxima etapa, o ar resfriado e seco passa pelo condensador onde é aquecido, assim tem-se um ar aquecido e seco. Após deixar o condensador o ar chega à região onde estão o compressor e o ventilador, devido a esses equipamentos dissiparem calor o ar sofre mais um aquecimento. Ao final do processo o ar, que está aquecido e seco, é expulso da bomba de calor por ação do ventilador, sofrendo assim mais um acréscimo em sua temperatura. Assim que o ar deixa a bomba está condicionado para o processo de secagem.

O acionamento do compressor e do ventilador foi feito através de inversores de frequência, podendo-se assim variar tanto a velocidade do ventilador como também variar o ciclo do funcionamento do compressor. O inversor utilizado foi o CFW08 da WEG. Estes foram programados para usar como referência uma tensão analógica de 0 a 10V.

A frequência de trabalho do ventilador foi ajustada para variar entre os valores mínimo e máximo de 30 e 60 Hz respectivamente. Já a frequência do compressor com o mínimo de zero e máximo de 66 Hz. O valor estipulado de 30 Hz para a frequência mínima o ventilador foi para que se conseguisse um fluxo mínimo de ar no interior da bomba de calor evitando assim o seu sobreaquecimento, em virtude do compressor estar acionado.

Todo entendimento da dinâmica do processo pelo qual o ar passa no interior da bomba foi determinante para a criação do sistema de aquisição dos dados de temperatura e umidade

do ar de saída da bomba de calor. Esse sistema foi dividido em duas partes, sendo uma de *hardware*, onde estavam empregados todos os sensores e módulos I/O, e outra de *software*, onde foi desenvolvido um aplicativo através de uma versão gratuita do *software* 'Visual C# Express 2010' da *Microsoft*. A tela do aplicativo está ilustrada na Figura 16.



Figura 16 - Tela do aplicativo de aquisição dos dados

A parte de *hardware* foi desenvolvida utilizando os sensores LM35 e HIH 4000-004, ambos foram alojados em uma caixa, fazendo como que os ruídos indesejáveis fossem minimizados. Os módulos I/O também foram dispostos em uma caixa para evitar choque mecânico, devido a uma queda, por exemplo, ou contato com a água ou mesmo poeira. Na Figura 17 está ilustrado o compartimento onde esses sensores foram alocados.



Figura 17 - Caixa onde foram colocados os sensores

Os módulos responsáveis por receber os valores registrados pelos sensores LM35 foram os da série 7018, pois possuem uma entrada de tensão com valor similar à de trabalho deste sensor, ou seja, 5 volts. Já os sensores de umidade foram conectados aos módulos 7017, devido também à compatibilidade entre as tensões de trabalho do sensor e uma de suas entradas, no caso sendo de 15 volts. Na Figura 18 pode-se ver um esquema dessas ligações.



Figura 18 - Esquema de ligação dos módulos de aquisição de dados

Realizada toda a parte física da aquisição dos dados, foi necessário juntá-la a parte computacional do sistema, ou seja, a parte do *software*. Para isso foi utilizado o módulo de conversão USB para RS-232, 7561 para que assim todos os valores lidos pelos sensores fossem exibidos e gravados pelo aplicativo. Estes valores passavam por um ajuste, que consistia na sua conversão de tensão para a unidade de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e para unidade de umidade relativa (%), antes de serem mostrados na tela principal do aplicativo, conforme ilustrado na Figura 16. Essa conversão foi realizada utilizando o conceito que, no caso do LM35, para cada aumento de 1°C a sua saída gera uma tensão de 10 mV. Já para o sensor de umidade HIH 4000-004 foi utilizada a Equação 10. Na Figura 19 pode-se ver o sistema de aquisição de dados completo.



Figura 19 - Sistema de aquisição dos dados

Visando identificar a dinâmica do processo, utilizou-se neste trabalho, o método da identificação computacional, que envolveu a coleta de dados das variáveis do processo e modelagem matemática do comportamento observado experimentalmente. A modelagem teve como objetivo a função de transferência do sistema em estudo, por meio das relações entre a transformada de Laplace da função resposta e a transformada de Laplace da função excitação.

Estudou-se a variação das variáveis do processo, sem a interferência de um controlador, através das respostas temporais da temperatura e umidade relativa do ar de saída

da bomba de calor frente a um estímulo na forma de degrau. O diagrama de bloco do sistema pode ser visto na Figura 20.

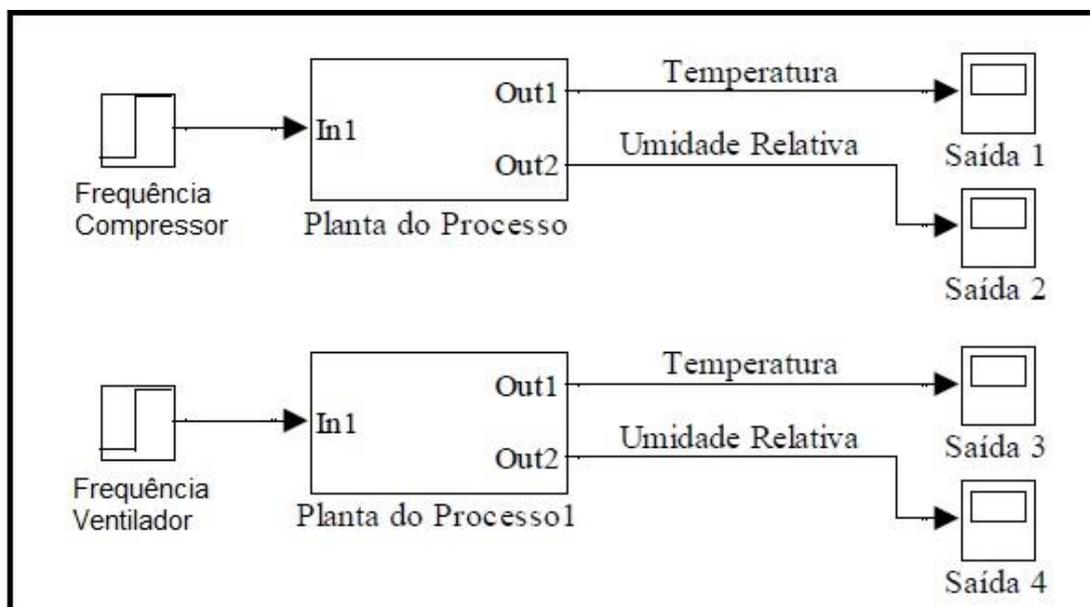


Figura 20 - Metodologia para identificar a dinâmica do sistema mediante excitações das variáveis de entrada e reações temporais das variáveis de saída

A experimentação foi conduzida em duas etapas, na primeira aplicou-se um degrau de 30 Hz na frequência do ventilador da bomba de calor e se verificaram as variações nos valores da temperatura de saída (Saída 1) e umidade relativa (Saída 2) de saída e na segunda aplicou-se um degrau de 40 Hz no compressor da bomba de calor, obtendo-se respostas das variáveis de interesse, temperatura (Saída 3) e umidade relativa (Saída 4). Os dados foram adquiridos pelos sensores com uma taxa de amostragem de 10s e armazenados em forma de planilha eletrônica, registrando-se assim num formato numérico a interação mútua entre a temperatura e umidade de saída da bomba de calor, ao longo do tempo. Utilizou-se a representação gráfica para se obter os parâmetros das funções de transferência. A FT característica de um sistema de primeira ordem foi utilizada com atraso de transporte, conforme a Equação 11.

$$G(s) = \frac{K \cdot e^{-s t_0}}{\tau s + 1} \quad (11)$$

Para determinação dos parâmetros K, t_0 e τ foi utilizado o método descrito pela Figura 21.

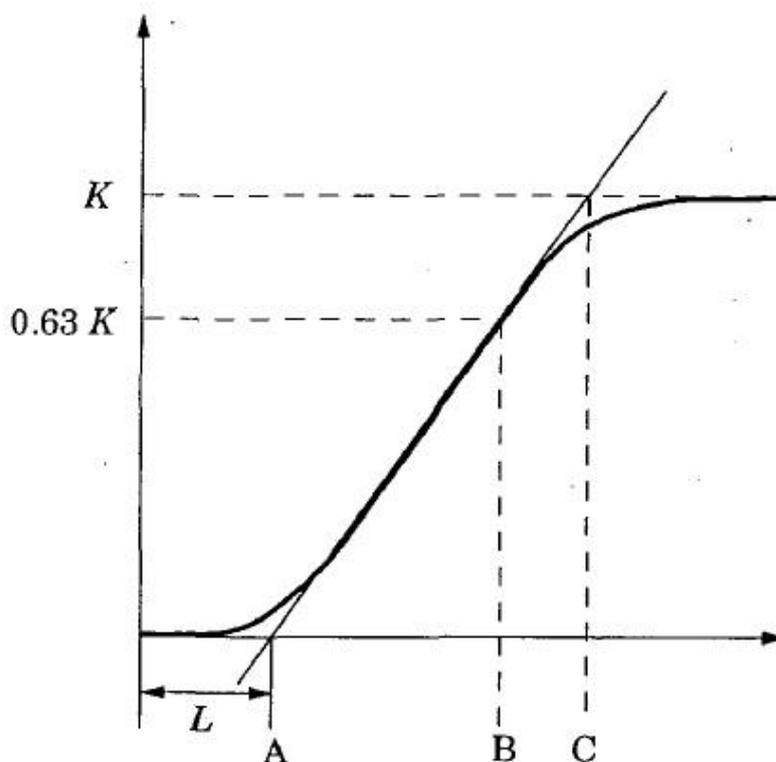


Figura 21 – Método gráfico para determinação dos parâmetros da função de transferência (Fonte: ÄSTRÖM & HÄGGLUND, 1995)

O ganho K é determinado pelo valor onde o sistema atinge o regime permanente. O parâmetro t_0 é encontrado pela intersecção da reta tangente a curva de resposta ao degrau com o eixo horizontal (ponto A). Já o valor de τ é determinado pela diferença entre o valor que o sistema atinge 63,2% do valor de K (ponto B) pelo valor de t_0 (ÄSTRÖM & HÄGGLUND, 1995).

Desenvolveu-se uma plataforma de simulação no ambiente Matlab/Simulink. Dentro deste, a linguagem de programação utilizada é gráfica, em forma de blocos. A partir do conhecimento especializado, desenvolveu-se um diagrama do sistema bomba de calor, que inclui o uso de um bloco controlador com os conceitos de ação controladora PID.

A sintonia do PID foi feita utilizando o método de resposta ao degrau de Ziegler-Nichols e o ajuste fino por meio de tentativa e erro.

4 Resultados e Discussão

4.1 Testes realizados

Para se entender o comportamento causado pela variação das variáveis manipuladas nas variáveis controladas, foram realizados dois testes em entrada degrau no sistema em malha aberta.

O primeiro teste consistia em acionar o motor do ventilador com o inversor em 30 Hz e o compressor com o inversor em 20 Hz. Uma vez que o sistema atingiu o regime permanente foi dado um degrau de 30 Hz no inversor do ventilador, o mesmo está ilustrado na Figura 22.

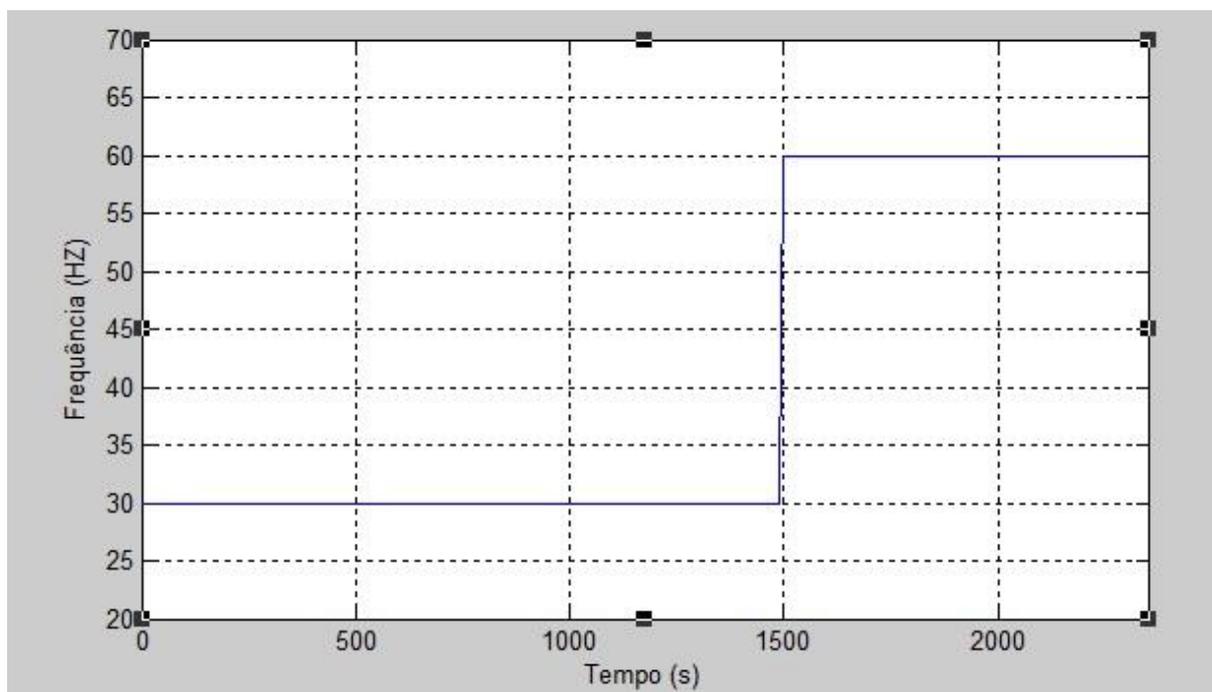


Figura 22 - Entrada degrau aplicada ao ventilador da bomba de calor

Os comportamentos da temperatura e da umidade relativa do ar na saída da bomba de calor para essa entrada degrau estão ilustrados nas Figuras 23 e 24 respectivamente.

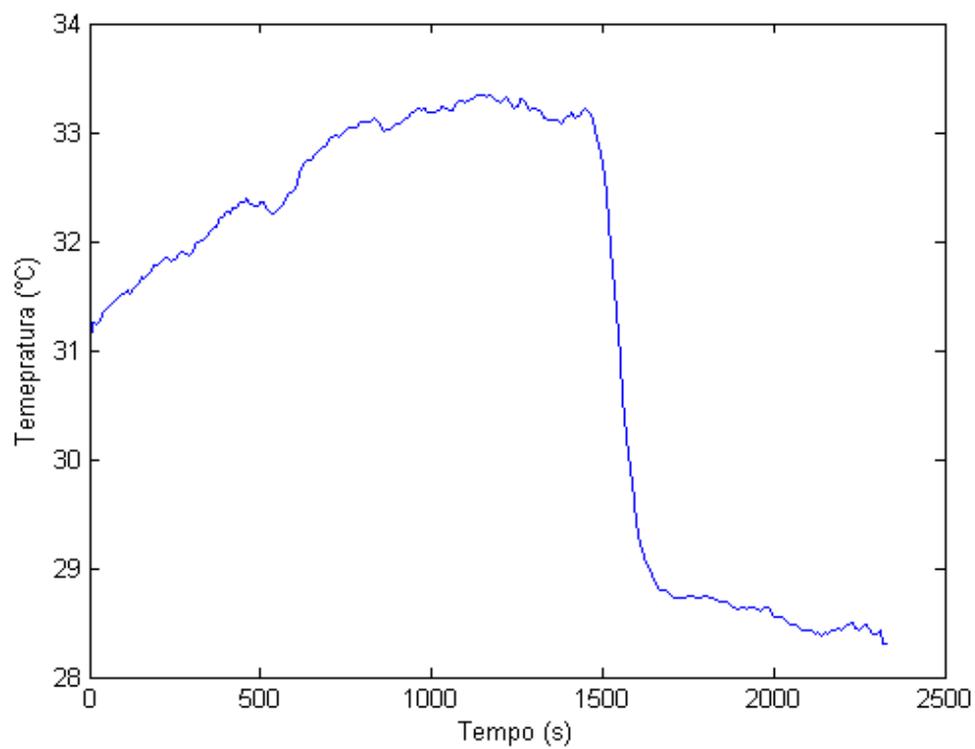


Figura 23 - Variação de temperatura do ar na saída da bomba de calor após o degrau no ventilador

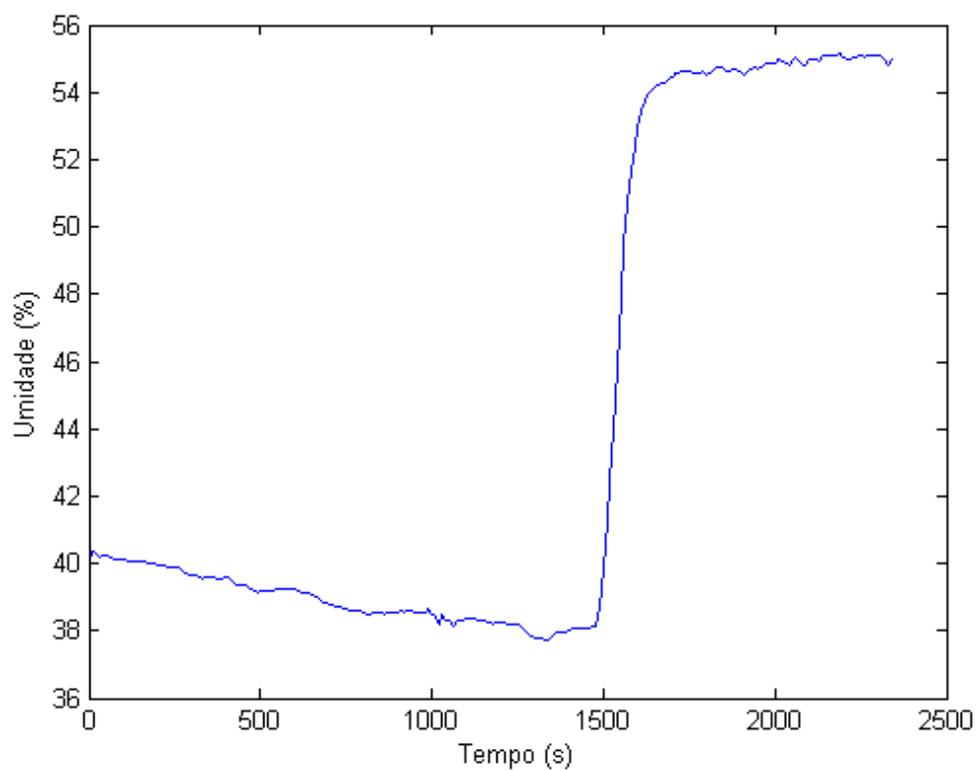


Figura 24 - Variação da umidade relativa do ar na saída da bomba de calor após o degrau no ventilador

Neste teste foi observado que a temperatura do ar de saída da bomba de calor sofreu uma diminuição enquanto a umidade relativa sofreu um aumento devido à ação do ventilador. Uma vez que o ciclo de trabalho do compressor foi mantido constante durante a aplicação do degrau no ventilador, as quantidades de calor trocadas pelo evaporador e pelo condensador também se mantiveram constantes, fazendo com que houvesse um aumento no fluxo de ar na saída da bomba de calor.

No segundo teste o inversor do compressor foi acionado em 20 Hz e o do ventilador em 40 Hz, novamente após o sistema entrar em regime permanente foi aplicado um degrau, agora no inversor do compressor, de 40 Hz. Na Figura 25 pode-se ver uma ilustração deste.

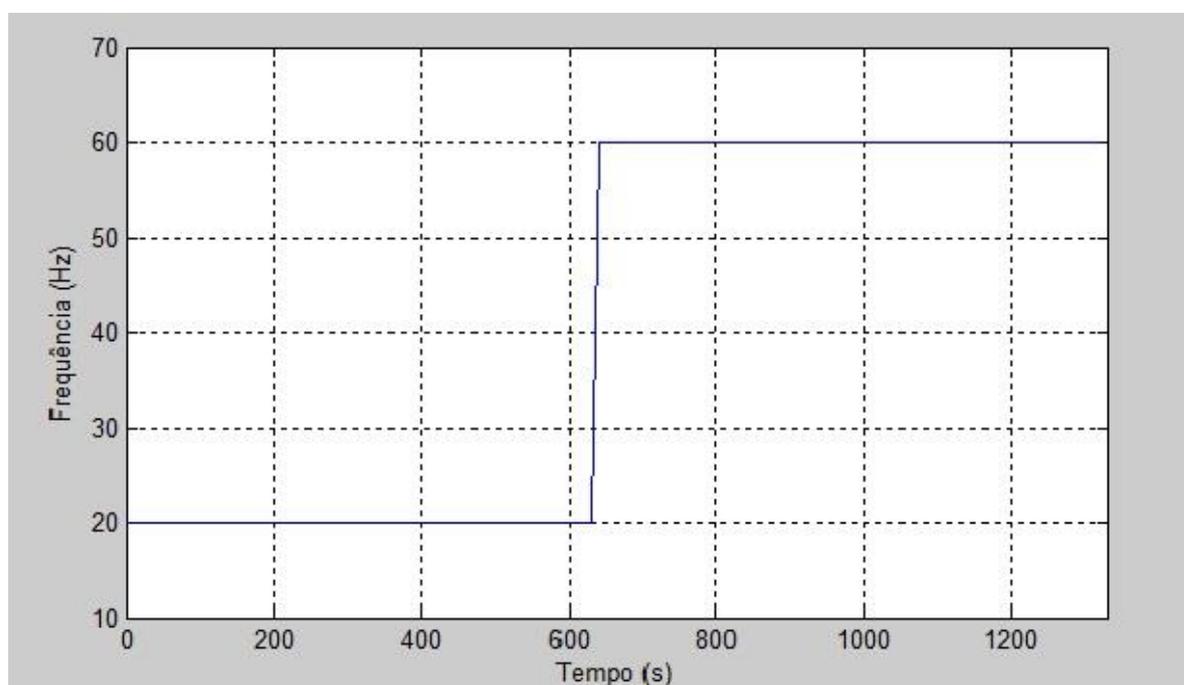


Figura 25 - Entrada degrau aplicada ao compressor da bomba de calor

As variações da temperatura e umidade relativa na saída de bomba de calor devido a esta entrada estão ilustradas nas Figuras 26 e 27 respectivamente.

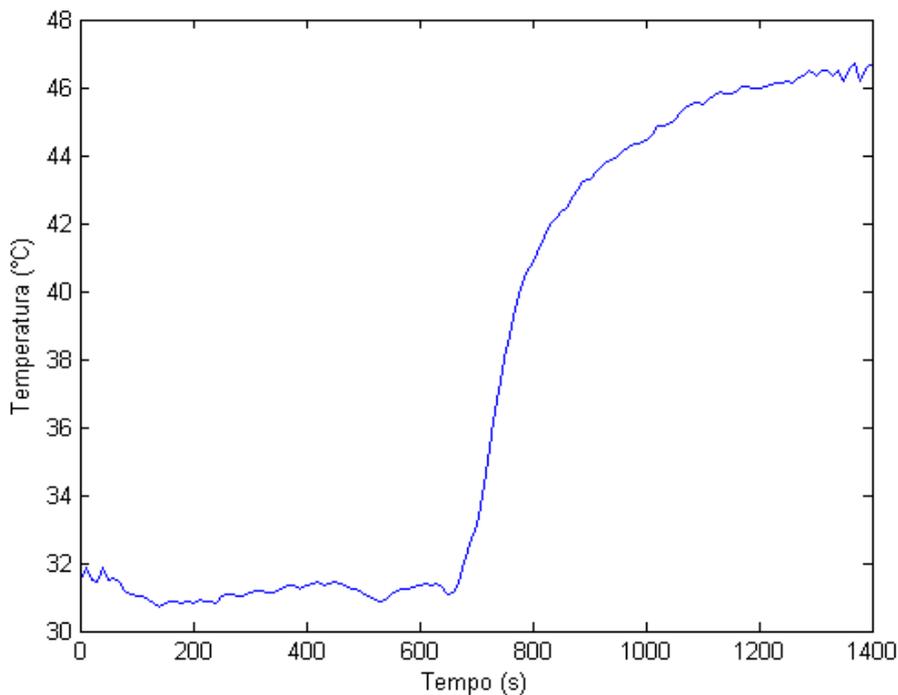


Figura 26 - Variação da temperatura na saída da bomba de calor devido à entrada degrau no inversor do compressor

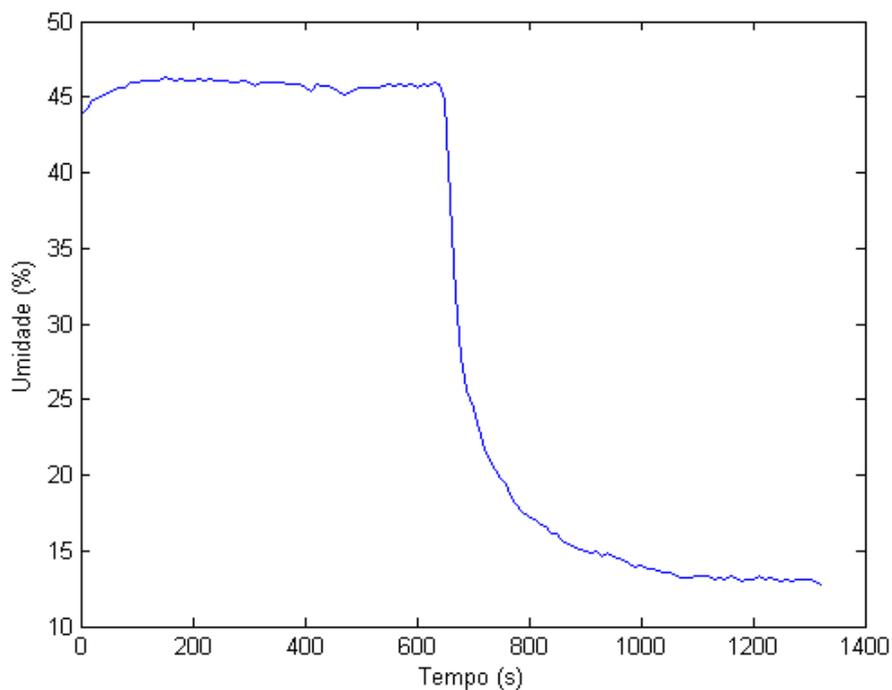


Figura 27 - Variação da umidade relativa do ar na saída da bomba de calor devido à entrada degrau no inversor do compressor

Neste caso, como não houve variação na frequência do inversor do ventilador o fluxo de ar na saída da bomba de calor se manteve constante. Ao passo que, devido ao aumento no ciclo de trabalho do compressor, maior foi a taxa de absorção de calor do ar durante a sua passagem pelo evaporador, resultando num aumento na temperatura do ar na saída da bomba de calor, como se pode observar pela Figura 26. Houve também um aumento na condensação desse ar, resultando assim na diminuição da umidade relativa do ar na saída da bomba de calor, conforme ilustrado na Figura 27.

De acordo com as curvas de resposta do sistema, pode-se observar que à medida que se aumenta a frequência de rotação do motor do ventilador há uma diminuição na temperatura do ar na saída da bomba de calor e um aumento na umidade relativa, ao passo que o contrário ocorreu ao se aumentar a frequência de operação do compressor.

A variação de qualquer uma das variáveis manipuladas causa uma variação nas variáveis controladas do sistema, levando a vários e distintos conjuntos de valores para a temperatura e umidade relativa do ar de saída da bomba de calor. Pôde-se observar também uma forte correlação entre as variáveis controladas, onde qualquer alteração em alguma causa uma variação no valor da outra.

4.2 Modelagem do sistema

As funções de transferência do sistema à vazio, ou seja sem carga, foram encontradas tomando como base os gráficos das Figuras 23, 24, 26 e 27. Elas foram aproximadas segundo a Equação 11. As mesmas estão na Tabela 3.

Tabela 3 - Funções de transferência do sistema MIMO

	Saída Temperatura do ar de saída da bomba de calor	Saída Umidade Relativa do ar de saída da bomba de calor
Entrada frequência do compressor	$G_{11}(s) = \frac{16 \cdot e^{-20s}}{770s + 1}$	$G_{12}(s) = \frac{-5,1 \cdot e^{-20s}}{1536s + 1}$
Entrada frequência do ventilador	$G_{21}(s) = \frac{-33,57 \cdot e^{-20s}}{694s + 1}$	$G_{22}(s) = \frac{17,41 \cdot e^{-10s}}{1555s + 1}$

A sintonia do controle PID foi realizada conforme a resposta ao degrau no ventilador ilustrada na Figura 23 e a resposta ao degrau no compressor conforme Figura 26. Suas constantes foram determinadas pelo método de Ziegler-Nichols citados por Ogata (2003) e, por conseguinte sua sintonia feita com base em tentativas e erros. Elas estão descritas na Tabela 4.

Tabela 4 - Constantes do PID

Controlador	K_p	T_i	T_d
Compressor	0,30	0,009	0
Ventilador	1	0,002	0,000001

4.3 Simulação do sistema

A fim de se analisar a resposta transitória do sistema, uma simulação realizada no ambiente Matlab/Simulink foi desenvolvida.

A simulação teve com base o sistema mostrado na Figura 1, tendo como valores de referência de temperatura 25 °C e 40% para a umidade relativa, tendo como objetivo a

análise do comportamento do sistema e como este responderia aos valores de temperatura e umidade relativa de saída da bomba de calor aos valores colocados de referência.

Um breve detalhamento da simulação desenvolvida está ilustrado na Figura 28.

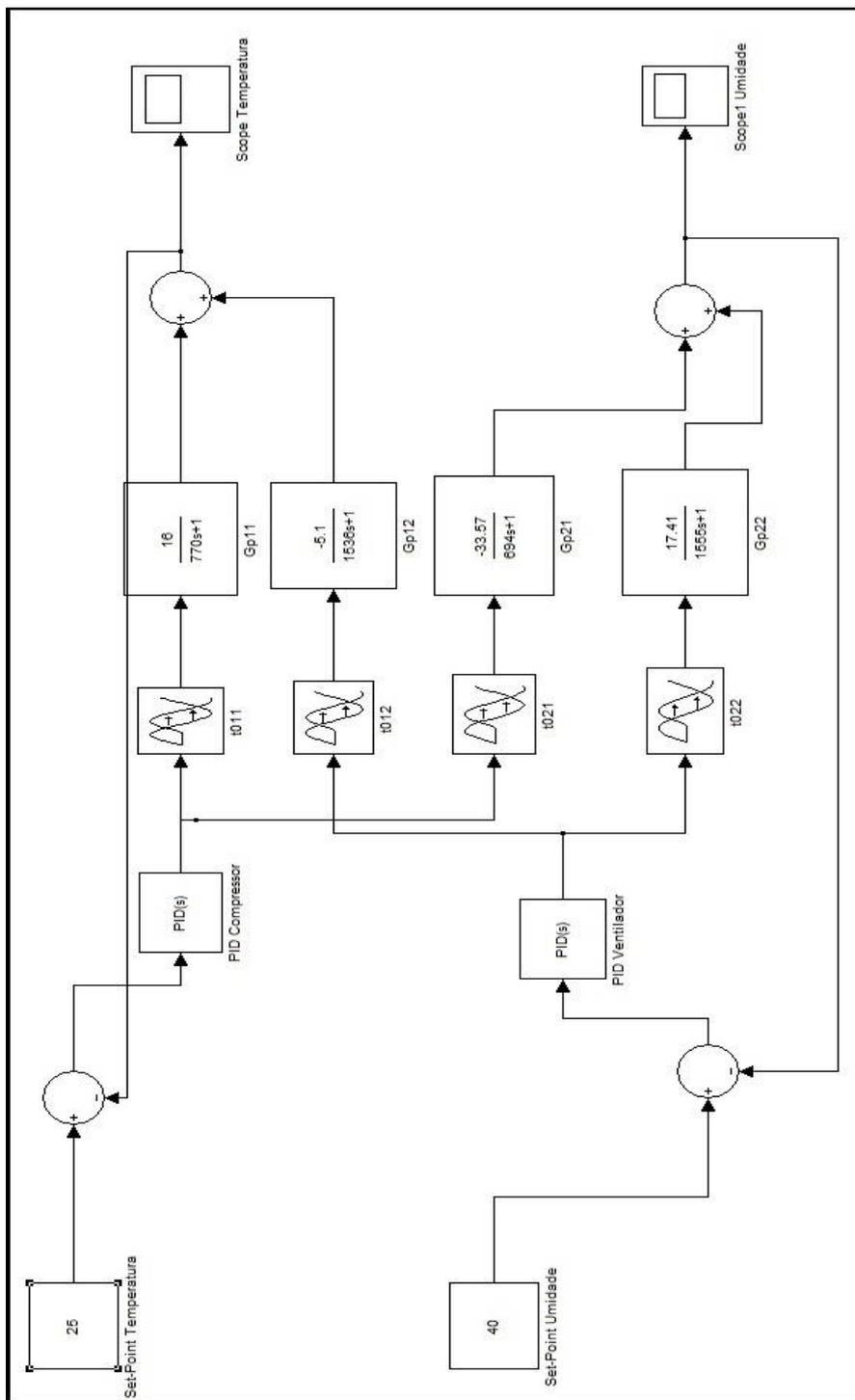


Figura 28- Simulação do sistema MIMO

Os resultados obtidos na simulação das respostas de temperatura e umidade relativa do ar na saída da bomba de calor encontram-se nas Figuras 29 e 30 respectivamente.

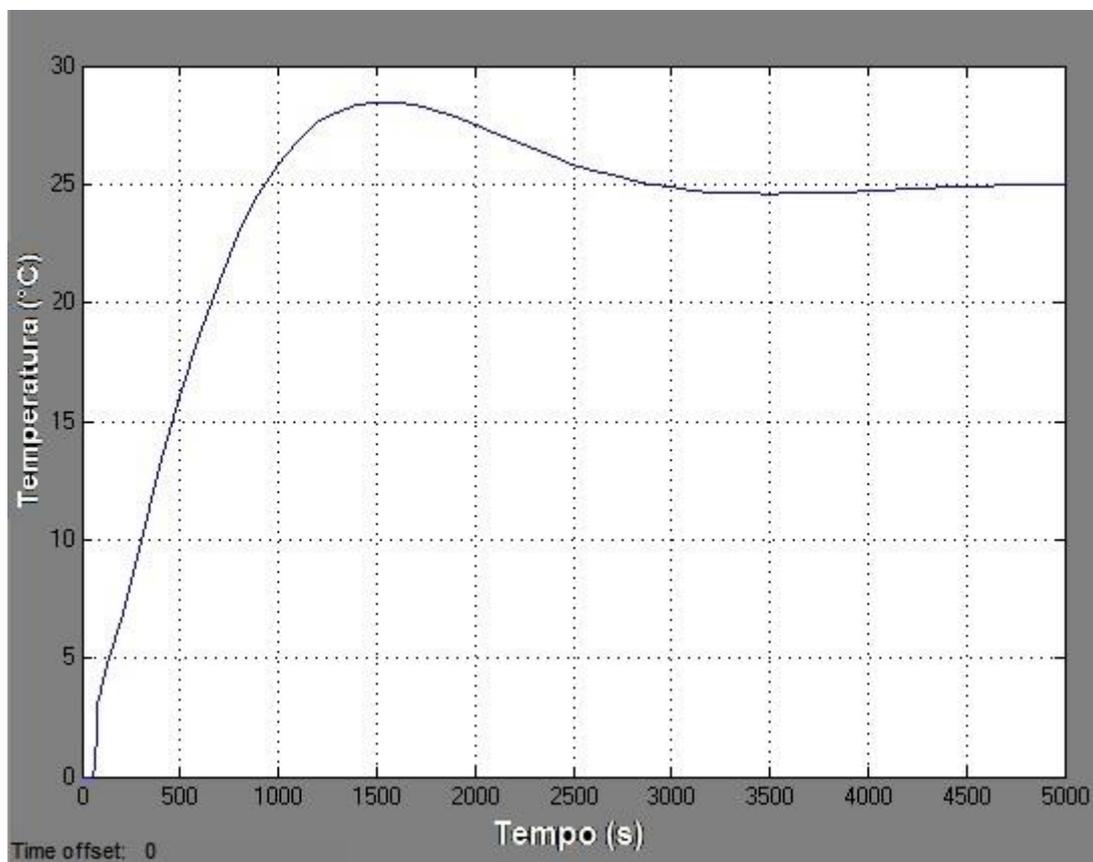


Figura 29 - Resposta transitória da temperatura do ar de saída da bomba de calor

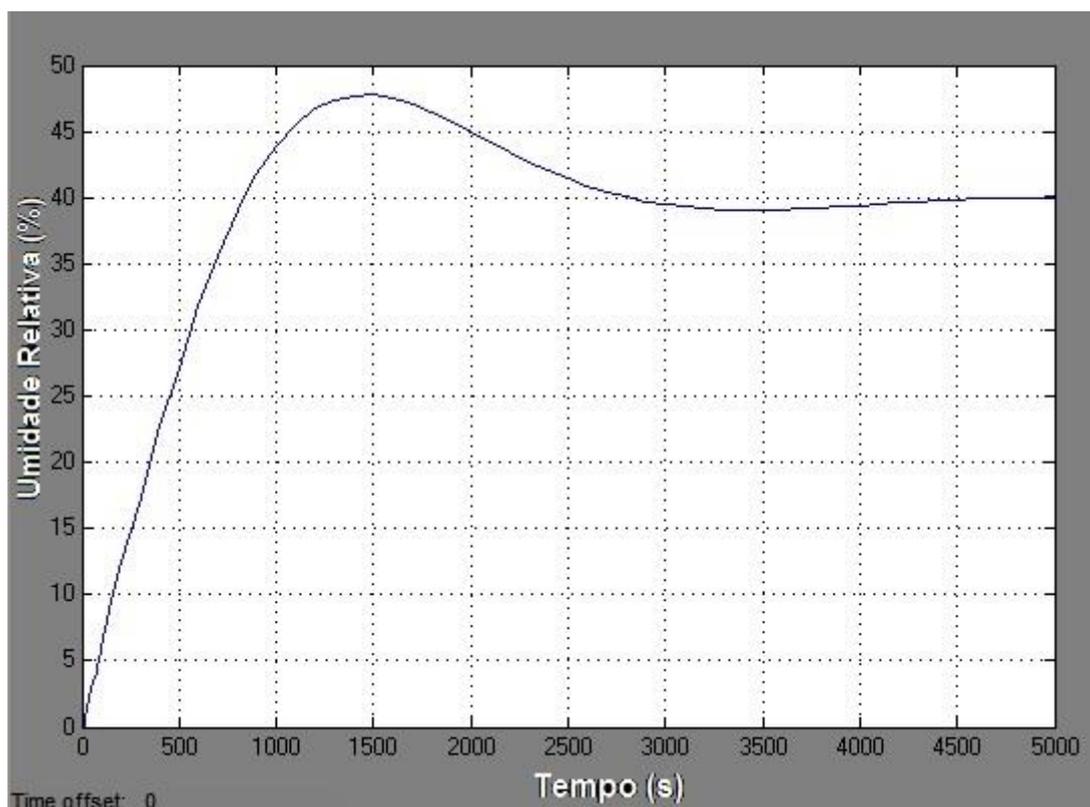


Figura 30 - Resposta transitória da umidade relativa do ar de saída da bomba de calor

Segundo OGATA (2003), para que o sistema de controle PID seja considerado bem sintonizado, este não deve apresentar um sobre-sinal superior a 25% do valor do degrau aplicado. Assim pode-se observar, pela Figura 29, um sobressinal de aproximadamente 3°C na temperatura, o que corresponde a 12% do valor do degrau aplicado. Já tomando como base a Figura 30, pode-se ver um sobressinal de 8% na umidade relativa, o que corresponde a 20% no valor do degrau aplicado.

O tempo de subida das variáveis respostas obtidos, no caso tomou-se o tempo em que a resposta do sistema fosse de 10 a 90% do valor final, foi de aproximadamente 700 s para a temperatura e 642 s para a umidade relativa. Isso mostra o quão grande é a capacitância do sistema e o quanto esta influencia nos tempos de resposta das variáveis controladas.

5 *Conclusão*

Conclui-se com este trabalho que é possível controlar as variáveis temperatura e umidade relativa do ar de saída de secadores que utilizam bomba de calor.

O sistema de aquisição de dados foi bastante eficiente em registrar os valores da temperatura e umidade de saída da bomba de calor e pode ser usado pra monitoramento de todo o processo de secagem.

A sintonia dos controladores PID do sistema MIMO foi bastante difícil, devido à forte relação existente entre temperatura e umidade relativa, por menor que fosse a variação em uma das variáveis, esta influenciava de forma direta na outra dificultando a sintonia do PID.

A partir de simulações numéricas, observou-se que o sistema de controle desenvolvido apresentou desempenho satisfatório, uma vez que as variáveis desejadas foram adequadamente controladas sob as condições de simulação estabelecidas.

6 Referências Bibliográficas

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers - ASHRAE. *HVAC Systems and Equipment Handbook*, 2000.

ÄSTRÖM, 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.

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

GÜREL, A. E., CEYLAN, I. *Thermodynamic analysis of PID temperature controlled heat pump system*. Case Studies in Thermal Engineering. 2013. n.2. p.42-49.

HONEYWELL, 2008. *Data Sheet HIH 4000 Series – Humidity Sensors*. www.sensing.honeywell.com. Acesso em maio de 2015.

ICP DAS, 2003. *Data Sheet I-7000 Modules*. www.icpdas.com. Acesso em maio de 2015.

IRIA, R. R. *Análise de controle aplicada a um sistema térmico-luminoso*. Viçosa, MG. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Viçosa, 2013.

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

MICROSOFT, 2013. *Guia de Introdução ao Visual C#*. <https://msdn.microsoft.com/pt-br/library/z1zx9t92.aspx>. Acesso em junho de 2015.

NATIONAL SEMICONDUCTOR, 2000. *Data Sheet LM 35 – Precision centigrade temperature sensors*. www.national.com. Acesso em maio de 2015.

NICACIO, J.V. *Desenvolvimento de um sistema de controle automático para condicionamento de ar de secagem*. Viçosa, MG. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 2010.

NICACIO, J. V.; MELO, E. C.; LACERDA FILHO, A. F. de; MARTINS, J. H.; PIZZIOLLO, T. A.; "BOMBA DE CALOR COM SISTEMA AUTOMÁTICO PARA CONTROLE DO AR DE SECAGEM", p. 12920-12927. In: **Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química - COBEQ 2014** [= **Blucher Chemical Engineering Proceedings, v.1, n.2**]. São Paulo: Blucher, 2015.

OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. 4ª Edição. São Paulo: Prentice Hall, 2003.

OLIVEIRA, I. S., ROCHA, R., SOUZA, H. A. Sistema de controle de temperatura e umidade para um ambiente construído. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 8., 2007, Cusco. *Anais...* Cusco: Pontificia Universidad Catolica Del Peru, 2007.

RENEDO, C. J. *A more eficiente design for reversible air-air heat pumps*. Energy and Buildings. 2007. n.39. p. 1244-1249.

ROMANINI, C. E. B. et al. Desenvolvimento e simulação de um sistema avançado de controle ambiental em cultivo protegido. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, n. 11, p. 1193-1201, 2010.

SEBORG, D. E; EDGAR, T. F.; MELLICHAMP, D.A. *Process Dynamics and Control*. 1ª Edição, John Wiley, New York, 1989.

SHURT, L.C. *Modelagem matemática e controle multivariável de sistemas de refrigeração por compressão mecânica de vapor*. Florianópolis, SC. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Automação e Sistemas) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, 2009.

SILVA, J.G. *Monitoração e controle de umidade e temperatura em secadores de massas alimentícias*. São Caetano do Sul, SP. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Engenharia Mauá do Centro do Instituto Mauá de Tecnologia, 2009.