

MAURO DE OLIVEIRA PRATES

**CONTROLE DA TEMPERATURA E VELOCIDADE DO AR
DE SECAGEM EM UM SECADOR DE PLANTAS
MEDICINAIS**

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
2009

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

T

P912c
2009

Prates, Mauro de Oliveira, 1983-
Controle da temperatura e velocidade do ar de secagem
em um secador de plantas medicinais / Mauro de Oliveira
Prates – Viçosa, MG, 2009.
xiii, 68f.: il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Evandro de Castro Melo
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f. 66-68

1. Equipamento agrícola. 2. Controle de temperatura.
3. Velocidade - Controle automático. 4. Secagem.
5. Plantas medicinais. 6. Plantas - Efeito da temperatura
I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22.ed. 631.3

MAURO DE OLIVEIRA PRATES

**CONTROLE DA TEMPERATURA E VELOCIDADE DO AR DE SECAGEM EM
UM SECADOR DE PLANTAS MEDICINAIS**

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: 30 de abril de 2009.

Prof. Luis Manuel Navas Gracia

Prof. André Gomes Torres

Profa. Kétia Soares Moreira

Prof. Tarcísio de Assunção Pizziolo
(Co-orientador)

Prof. Evandro de Castro Melo
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a Deus pela graça da vida, e por me conceder sabedoria e força para que fosse possível a conclusão desse trabalho.

Aos meus pais José Prates e Maria Lúcia por sempre confiarem e acreditarem nas minhas escolhas. Agradeço também pelo constante apoio deles e também de meus irmãos Clodoaldo, Rildo e Felipe.

À minha amada namorada Mileny Lacerda, agradeço pelo carinho e compreensão de sempre, e pelo apoio incondicional em minhas decisões.

Ao amigo José Vitor Nicácio, agradeço pelo apoio constante, principalmente quando eu estava ausente de Viçosa.

Aos meus orientadores, Tarcísio de Assunção Pizziolo e Evandro de Castro Melo, deixo um agradecimento especial pelo empenho, compreensão, correções, discussões e principalmente pela escolha do tema.

Ao professor André Gomes Tôrres, agradeço pelos inúmeros conselhos, e por dedicar seu tempo indo até a engenharia agrícola no momento de sintonia do sistema.

Agradeço também ao professor Denílson pelas sugestões propostas ao longo do trabalho.

Ao professor José Tarcísio de Resende, agradeço por ceder o motor elétrico e os wattímetros, além de contribuir com algumas sugestões.

Ao amigo Humberto Bertollo, agradeço pelo incentivo e pelos momentos de excelente convivência durante a Graduação e boa parte do Mestrado.

Ao amigo Otávio Araújo, agradeço pelo tempo dedicado nos momentos em que foi ajustado o programa computacional para a medição da temperatura média, além da grande ajuda na instalação dos sensores de medição.

Ao amigo Cristiano Lúcio agradeço pelas incontáveis discussões referentes ao desenvolvimento e melhorias do trabalho e também pelo apoio durante a montagem do experimento.

Ao amigo José Américo Messias, agradeço pelo apoio em realizar as matrículas quando eu não lembrava do prazo, além de inúmeras e excelentes sugestões sobre o trabalho. Agradeço também pelas ajudas em campo, durante a colheita da planta e também durante a montagem do experimento.

Ao amigo Roni Rocha, agradeço pelos vários dias dedicados durante a colheita da planta medicinal. Agradeço também pelos ensinamentos referentes à secagem de plantas.

Ao estagiário Carlos, agradeço pelos momentos de ajuda durante o corte e secagem das plantas e ao amigo André Goneli, agradeço pelas dúvidas sanadas referentes à secagem de plantas.

Aos professores e amigos Marco Aurélio e Leonardo Bonato, agradeço pelo incentivo em minhas decisões.

Aos amigos que ficaram em Jacobina, na Bahia: Gustavo, Flávio, Daniel Brevileri, Tiago, José Luís e Ruan, agradeço por incentivarem e acreditarem, que no meu retorno à Viçosa eu iria conseguir concluir esse trabalho.

A todas essas pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a execução dessa Dissertação de Mestrado, o meu sincero **MUITO OBRIGADO!**

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE QUADROS	viii
ABREVIATURAS	ix
RESUMO	x
ABSTRACT	xii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	3
1.2 Estrutura da Dissertação.....	3
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1 Microcontrolador PIC	4
2.1.1 A Arquitetura do Microcontrolador PIC16F877A	5
2.1.2 A estrutura interna do PIC16F877A	6
2.1.3 Programação de PIC's em linguagem C	7
2.2 Modulação por Largura de Pulso	9
2.3 Optoacopladores.....	10
2.4 Inversor de Frequência.....	11
2.4.1 Blocos do Inversor	12
2.5 Diagramas de Bloco	13
2.6 Controle PID	14
2.6.1 Controladores Digitais PID.....	16
2.7 Secagem de Plantas Medicinais	17
2.7.1 Composição e Teor de Água das Plantas Medicinais	17
3. MATERIAL E MÉTODOS	20
3.1 Secador utilizado	20
3.2 Medição, Aferição e Controle da Velocidade do ar	21
3.2.1 Aferição do Anemômetro.....	22
3.2.2 Controle da Velocidade do ar de secagem	24
3.3 Controle e Aquisição da Temperatura do ar	27
3.3.1 Aquisição da Temperatura	27
3.3.2 Ligação das Resistências Elétricas.....	28
3.3.3 Controle da Temperatura Média	35
3.4 Estratégia de Controle	39
3.5 Programa Computacional.....	41

3.6 Metodologia utilizada na secagem do Capim Limão.....	43
3.6.1 Seleção, corte, armazenamento e determinação do teor de água	44
3.6.2 Experimento realizado para a secagem.....	45
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1 Ensaio em Vazio.....	49
4.2 Resultados referentes à secagem do Capim Limão.....	54
4.2.1 Secagem utilizando o controle manual de velocidade do ar	55
4.2.2 Secagem utilizando o controle automático de velocidade do ar	58
4.2.3 Avaliação do consumo de energia elétrica.....	61
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	64
5.1 – Conclusões	64
5.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros.....	65
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Necessidades e uso do controle automatizado na indústria.....	2
Figura 2 – Foto Ilustrativa do Microcontrolador PIC	5
Figura 3 – Diagrama de Blocos do PIC 16F877A	7
Figura 4 – Circuito para geração de sinal PWM senoidal.....	9
Figura 5 – Geração de um sinal PWM senoidal com portadora triangular.....	10
Figura 6 – Optocoplador (a) a Triac e (b) a Transistor	11
Figura 7 – Diagrama resumido de um Inversor de Frequência.....	12
Figura 8 - Diagrama de blocos de um sistema de malha fechada	14
Figura 9 – Diagrama de Blocos de um controlador proporcional integral derivativo analógico	15
Figura 10 - Diagrama de Blocos de um controlador proporcional integral derivativo digital	16
Figura 11 – Vista Frontal do Secador	20
Figura 12 – Corte Frontal do Secador.....	21
Figura 13 – Esquema de Medição de Velocidade.....	22
Figura 14 – Posição das medidas na gaveta de secagem para aferição do anemômetro.....	23
Figura 15 – Conversão do sinal PWM para sinal analógico	25
Figura 16 – Circuito responsável pelo ganho do sensor de temperatura.....	28
Figura 17 - Configuração com duas resistências em série	29
Figura 18 - Curvas para configuração com duas resistências em série.....	30
Figura 19 - Configuração com uma resistência.....	31
Figura 20- Curvas para configuração com uma resistência	32
Figura 21 - Configuração com combinação de duas resistências em série e uma resistência isolada	33
Figura 22 - Configuração com combinação de duas resistências em série e uma resistência isolada	34
Figura 23 – Medidor de Energia Elétrica Trifásico do tipo indução	37
Figura 24 – Circuito de disparo da resistência de aquecimento isolada	38
Figura 25 - Circuito de disparo das duas resistências de aquecimento em série...	38

Figura 26 - Diagrama de blocos para o sistema de controle de velocidade e temperatura do ar de secagem	40
Figura 27 – Fluxograma do programa computacional	42
Figura 28 – Placa do circuito impresso utilizado no controle	43
Figura 29 - Plantação de Capim-Limão	44
Figura 30 – Capim-Limão em comprimentos de corte de 2 cm.....	45
Figura 31 – Cone Invertido para controle manual da velocidade do ar	46
Figura 32 – Inversor de Freqüência Siemens G110, para controle automático da velocidade do ar	47
Figura 33 – Ensaio em Vazio para set point de 40 °C e 1,0 m s ⁻¹	50
Figura 34 - Ensaio em Vazio para set point de 40 °C e 1,5 m s ⁻¹	51
Figura 35 - Ensaio em Vazio para set point de 60 °C e 1,0 m s ⁻¹	52
Figura 36 - Ensaio em Vazio para set point de 60 °C e 1,5 m s ⁻¹	52
Figura 37 - Ensaio em Vazio para set point de 80 °C e 1,0 m s ⁻¹	53
Figura 38 - Ensaio em Vazio para set point de 80 °C e 1,5 m s ⁻¹	53
Figura 39 – Variação da velocidade durante a secagem com controle manual. ...	55
Figura 40 – Variação da temperatura média durante o processo de secagem utilizando o método manual de controle da velocidade do ar de secagem.	56
Figura 41 – Valores médios registrados para o teor de água da planta em diferentes velocidades iniciais em função do tempo de secagem, utilizando-se o controle manual de velocidade.	57
Figura 42 - Variação da temperatura média durante o processo de secagem utilizando o método automático de controle da velocidade do ar de secagem.	59
Figura 43 - Valores médios registrados para o teor de água da planta em diferentes velocidades iniciais em função do tempo de secagem, utilizando-se o controle automático de velocidade.....	60
Figura 44 – Comparação entre a secagem utilizando o controle manual e a secagem utilizando o controle automático para a velocidade inicial de 0,8 m s ⁻¹	61

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Dados para aferição do Anemômetro com referência à Figura 12.....	23
Quadro 2 – Comissionamento rápido do Inversor de Freqüência.....	26
Quadro 3 – Resumo dos dados para a configuração com duas resistências em série	31
Quadro 4 - Resumo dos dados para a configuração com uma resistência	33
Quadro 5 - Resumo dos dados para a configuração com combinação de duas resistências em série e uma resistência isolada.....	35
Quadro 6 – Resumo dos dados para os ensaios em vazio.....	54
Quadro 7 – Parâmetros avaliados durante a secagem de capim limão utilizando-se o controle manual de velocidade.....	55
Quadro 8 – Diferença Relativa Percentual entre os tempos de secagem para diferentes velocidades do ar de secagem	58
Quadro 9 - Parâmetros avaliados durante a secagem de capim limão utilizando-se o controle automático de velocidade.....	58
Quadro 10 – Diferença entre o consumo de energia elétrica do secador para os métodos de controle manual e automático de velocidade.....	62
Quadro 11 – Diferença Relativa no consumo de energia elétrica do motor de indução trifásico, utilizando o controle automático e o manual de velocidade	63

ABREVIATURAS

b. s.	base seca
b.u.	base úmida
EEPROM	Memória somente leitura programável e apagada eletricamente, do inglês <i>Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory</i>)
LCD	Display's de Cristal Líquido, do inglês <i>Liquid Cristal Display</i>
LED	Diodo Emissor de Luz, do inglês <i>Light Emitting Diode</i>
IHM	Interface Homem Máquina
PIC	Controlador de Interface Periférica, do inglês <i>Peripheral Interface Controller</i>
PID	Proporcional, Integral e Derivativo
PWM	Modulação por largura de pulso, do inglês <i>Power Width Modulation</i>
RAM	Memória de acesso aleatório, do inglês <i>Random Access Memory</i>
RPM	Rotações Por Minuto
UCP	Unidade Central de Processamento
ULA	Unidade Lógica e Aritmética
USART	Transmissor endereçável serial, do inglês <i>Addressable Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter</i>

RESUMO

PRATES, Mauro de Oliveira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, abril, 2009.
Controle da temperatura e velocidade do ar de secagem em um secador de plantas medicinais. Orientador: Evandro de Castro Melo. Co-orientadores: Tarcísio de Assunção Pizziolo, José Helvécio Martins, Paulo Marcos Barros Monteiro e Denílson Eduardo Rodrigues

Esta dissertação propõe um sistema em malha fechada para o controle de temperatura e velocidade do ar em um secador de plantas medicinais. Foi utilizado o secador de bandejas localizado no Laboratório de Plantas Mediciniais do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. Dentro do secador foram instaladas três resistências elétricas para o aquecimento do ar. Foi conectado ao secador um ventilador acoplado a um motor elétrico de indução trifásico para a injeção do ar. Para medição da velocidade do ar utilizou-se um anemômetro de conchas. Para a aquisição dos valores de temperatura utilizou-se dois sensores LM35 da National Semiconductor, instalados devidamente na da bandeja escolhida para a secagem. Um microcontrolador PIC16F877A foi utilizado para o controle da velocidade e temperatura. Foi desenvolvido um programa em linguagem C, onde foram implementadas rotinas de ações de controle PID a serem aplicadas no microcontrolador. Para o controle da velocidade do ar, utilizou-se uma das saídas PWM do PIC, cuja largura de pulso era controlada pela ação de controle PID. Essa saída PWM digital é filtrada por meio de um filtro passa-baixas, onde são eliminadas as altas frequências, sendo possível converter o sinal de controle para um sinal analógico de 0 a 10V. Esse sinal PWM é enviado à entrada analógica de um Inversor de Frequência, o qual varia a rotação do motor de indução trifásico acoplado ao ventilador. Para o controle da temperatura, foi utilizada a outra saída PWM do PIC, cujo sinal é enviado a dois optoacopladores, os quais disparam triacs e então ligam as resistências à fonte de energia. Um dos triacs liga uma única resistência, enquanto o outro liga as outras duas resistências em série. Para verificar a eficiência do sistema de controle projetado foram realizados testes com o secador em vazio. Verificou-se que existe uma grande influência da velocidade do ar no sistema de

controle de temperatura. Concluiu-se que o controle automático em malha fechada reduz significativamente o consumo de energia do motor elétrico em até 63%, além de manter a velocidade constante durante toda a secagem.

ABSTRACT

PRATES, Mauro de Oliveira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, April, 2009. **Control of the temperature and speed of the drying air in a dryer of medicinal plants.** Adviser: Evandro de Castro Melo. Co-advisers: Tarcísio de Assunção Pizziolo, José Helvécio Martins, Paulo Marcos Barros Monteiro and Denílson Eduardo Rodrigues

This paper suggests a system in closed loop for temperature and air speed control in a tray drier of medicinal plants. The tray drier is located in the Laboratory of Medicinal Plants from the Agricultural Engineering Department of the Federal University of Viçosa was used. Three electric resistances for the air heating were installed in the interior of the drier. A fan connected to an electric engine of three-phase induction for the injection of air was connected to the drier. A cup anemometer was used for measurement of the air speed. Two LM35 sensors of the National Semiconductor were used in order to get hold of the temperature values; they were properly installed on the tray chosen for the drying. A PIC16F877A microcontroller was used for the control of the speed and temperature. A program in language C was developed, where action routines of PID control were implemented to be applied at the microcontroller. For the air speed control, one of the PWM exits of the PIC was used, whose pulse width was controlled by the PID control action. This PWM digital exit is filtered using a low-pass filter, where the high frequencies are eliminated, being possible to convert the control signal into an analogical signal from 0 to 10V. This PWM signal is sent to the analogical entrance of a Frequency Inverter, which varies the rotation of the three-phase induction engine connected to the fan. For the control of the temperature, another PWM exit of the PIC was used, whose signal is sent to the two opto clippers, which go off triacs and then connect the resistances to the power place. One of triacs switches on an only resistance, while the other switches on the other two resistances in series. In order to verify the efficiency of the projected control system, tests with the empty drier were carried through. It was verified that there is a great influence of the air speed on the temperature control system. It was concluded that the automatic control in closed loop significantly

reduces the energy consumption of the electric engine in up to 63%, besides keeping the speed constant during the whole drying process.

1. INTRODUÇÃO

Os parâmetros que mais influenciam a qualidade de plantas medicinais durante a secagem são a temperatura e a velocidade do ar de secagem. Os limites desses parâmetros são determinados em função da sensibilidade dos princípios ativos da planta medicinal em estudo (MARTINAZZO, 2006).

O aumento dos valores da temperatura e da velocidade do ar de secagem ocasiona diminuição do tempo de secagem, uma vez que ocorre um aumento da quantidade de água removida do produto.

Dessa forma, a combinação desses dois parâmetros, que irá interferir diretamente na taxa de secagem, pode contribuir de forma significativa na diminuição do tempo gasto no processo, impedindo a degradação dos constituintes químicos de cada espécie ou parte da planta submetida à secagem (MARTINS 2000). Para que esses parâmetros atinjam os valores ótimos no processo de secagem, é necessário realizar ações de controle nos secadores industriais, que permitam tornar estáveis tais valores em regime permanente.

Em um esquema sobre as necessidades e uso do controle automatizado na indústria (Figura 1), podem-se estabelecer quatro estágios: emergente, em ascensão, estabilizado e em descenso. Frente a setores onde o controle automatizado está estabilizado (eletrônica, papel e celulose, telecomunicações), o agronegócio em geral, em especial a secagem de produtos agrícolas é um nicho de mercado em que o controle automatizado é ainda bastante emergente e está em ascensão (Barreiro 2003).

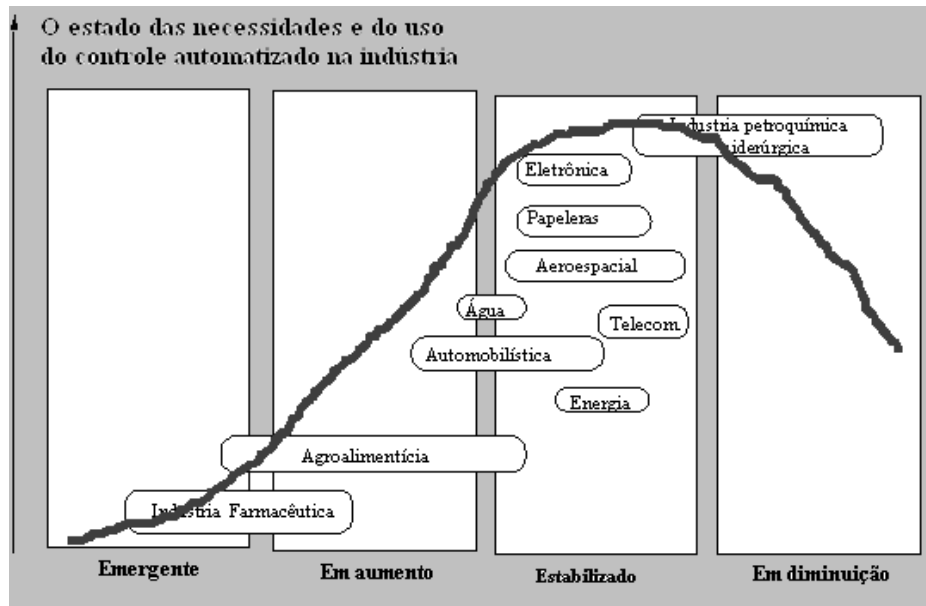


Figura 1 - Necessidades e uso do controle automatizado na indústria

Existem diversos dispositivos que podem ser utilizados para a automação de um processo, mas o desenvolvimento de microcontroladores a um baixo custo provocou uma revolução nos métodos de projeto de sistemas de controle para uso doméstico ou industrial. Sistemas mecânicos já consagrados pelo uso foram e estão sendo rapidamente substituídos por circuitos eletrônicos mais confiáveis e baratos.

Do ponto de vista do projetista dos circuitos de controle, o surgimento desses microcontroladores forçou o deslocamento dos projetos baseados em hardware, onde cada projeto correspondia a um circuito eletrônico, para projetos baseados em software, onde o hardware básico se mantém o mesmo, sendo que a alteração funcional se dá através da alteração do software do sistema. Desta forma, correções e aumentos na funcionalidade do sistema podem ser feitos muito mais rapidamente e com custos reduzidos, se comparados a solução de alteração no hardware (SOLBET, 2007).

Segundo WEBER (1998), citado por SANTOS (2007), dentre todos os processos que se aplicam à manipulação pós-colheita, conservação e armazenagem adequada de sementes, a secagem é o de maior consumo energético. Assim, a utilização de tecnologias que possibilitem a eficiência e racionalização da energia é um recurso que deve ser usado no processo de secagem e armazenamento de sementes, devido à necessidade de redução nos custos de produção para aumentar a competitividade.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um sistema em malha fechada para controlar a temperatura e a velocidade do ar de secagem no interior de um secador de plantas medicinais.

Tem-se com objetivos específicos:

- avaliar a eficiência do sistema projetado durante o processo de secagem;
- a comparação do consumo de energia elétrica entre métodos manual e automático para controle da velocidade do ar de secagem.

1.2 Estrutura da Dissertação

Esse trabalho foi dividido em 6 capítulos e organizados da seguinte forma: o capítulo 2 é uma revisão sobre Microcontroladores, Modulação por Largura de Pulso, Optoacopladores, Inversores de Frequência, além de uma rápida revisão sobre o Controle Proporcional, Integral e Derivativo.

O capítulo 3 trata da metodologia utilizada para a realização do trabalho onde é apresentado o secador onde foi implementado o sistema de controle de temperatura e velocidade do ar de secagem. Também são detalhadas as técnicas utilizadas para a realização do controle, além de expor a concepção utilizada no programa gravado no Microcontrolador.

O capítulo 4 mostra os resultados obtidos. Primeiro são mostrados os resultados obtidos com o secador em vazio. Em seguida, esse capítulo também apresenta a aplicação do secador sendo utilizado para a secagem da planta medicinal conhecida como “capim limão”, na temperatura fixa de 50°C. Foram determinadas curvas de secagem para três diferentes valores de velocidades do ar de secagem. Comparou-se o consumo de energia elétrica na secagem utilizando-se o controle de velocidade do ar automático e o controle manual através de um cone invertido.

O capítulo 5 trata das conclusões, além de algumas propostas de continuidade do trabalho.

O capítulo 6 apresenta as referências bibliográficas utilizadas no trabalho.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 *Microcontrolador PIC*

Podemos definir o microcontrolador como um componente eletrônico, dotado de uma "inteligência" programável, utilizado no controle de processos lógicos, o qual deve ser entendido como o controle de periféricos, tais como: led's, botões, display's de cristal líquido (LCD), resistências, relês, sensores diversos (pressão, temperatura, etc.) e muitos outros. São chamados de controladores lógicos, pois a operação do sistema baseia-se nas ações lógicas que devem ser executadas, dependendo do estado dos periféricos de entrada e/ou saída (SOUZA,2007).

O PIC (Controlador de Interface Periférica, do inglês *Peripheral Interface Controller*) é um circuito, que integra em um único componente, um microprocessador, memórias, dispositivos de entrada e saída (E/S) e outras funções. O microcontrolador utilizado é produzido pela empresa MICROCHIP em diferentes modelos, variando suas características como tamanho de memória, número de entradas e saídas, etc. No entanto, todos os modelos têm o funcionamento semelhante (MICROCHIP, 2003) (PEREIRA, 2004).

Um microcontrolador é um circuito eletrônico digital com as seguintes características:

- está integrado em um chip e encapsulado de diferentes formas como mostrado na Figura 2;
- executa um programa que se encontra em seu interior. Habitualmente, desde que se fabrica até o fim de sua vida útil, o microcontrolador sempre executa o mesmo programa. No entanto, na maioria dos microcontroladores atuais é possível modificar o programa interno gravado.
- contém todos os componentes de um de computador, mas de forma simplificada: ULA (Unidade Lógica e Aritmética) e UCP (Unidade Central de Processamento), memória para execução do programa e memória para armazenar os dados, além de pinos de entrada e saída de periféricos (GIL, 2006).

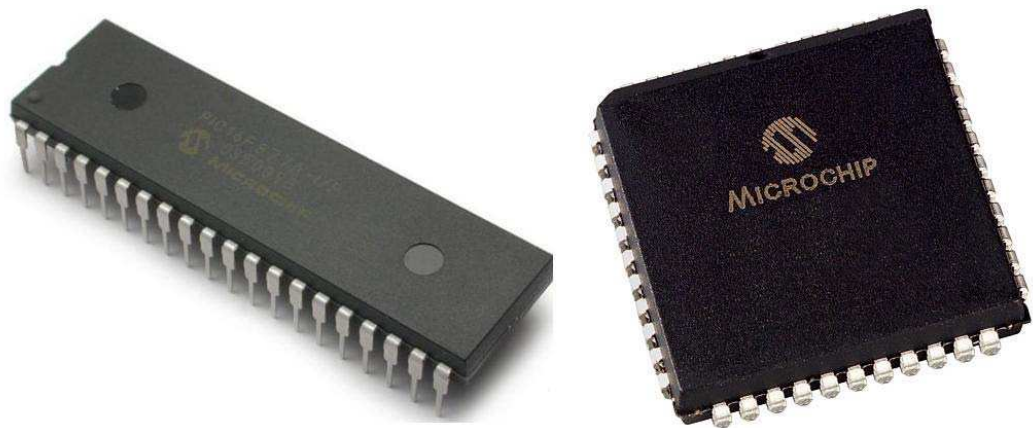


Figura 2 – Foto Ilustrativa do Microcontrolador PIC

2.1.1 A Arquitetura do Microcontrolador PIC16F877A

Os dados dentro de um microcontrolador são manipulados em unidades chamadas palavras. O PIC16F877A possui palavras de dados de oito bits de tamanho, e palavras de instrução de 14 bits. Esse tipo de arquitetura permite que, enquanto uma instrução é executada, outra seja “buscada” da memória, ou seja, a maioria das instruções são executadas dentro de um único ciclo de máquina, um dos motivos da grande velocidade que se consegue nestes microcontroladores.

Pode-se considerar um microcontrolador como um dispositivo composto das seguintes partes: clock, ULA, portas, interrupções, periféricos, memória de dados e memória de programa.

O clock é o responsável pelo sincronismo entre todas as operações de um microcontrolador. Todos os eventos que ocorrem dentro de um microcontrolador obedecem a uma lógica preestabelecida e são processados em tempos determinados pela frequência do clock. No caso dos microcontroladores, o clock é também utilizado como referência de tempo para execução de tarefas que devem ser repetidas a determinado intervalo de tempo.

A ULA (Unidade Lógica e Aritmética) é a componente mais complexa do PIC por conter todos os circuitos destinados a desenvolver as funções de cálculo e manipulação de dados durante a execução de um programa, além de enviar os resultados para os diversos registros ou portas de entrada e saída.

As portas de entrada e saída (E/S) são os pinos através dos qual o PIC interage com o meio ambiente, ou seja, onde são feitas as entradas e saídas de dados.

Muito dos dispositivos do PIC, para serem usados, é necessário a utilização do seu controle por interrupções. As interrupções são desvios no programa que ocorrem quando algum evento ocorre. O programa é desviado para o vetor de interrupção, e neste lugar, estão as rotinas para tratar as interrupções, e depois de tratadas, o programa volta para a posição que estava (SOUZA, 2007).

A memória de programa, do tipo EEPROM (do inglês *Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory*), onde residem as instruções que devem ser executadas pelo programa feito pelo projetista. Nessa memória, não volátil, encontram-se os vetores de reset (posição de memória onde a primeira instrução está armazenada) e interrupção (local onde as interrupções são executadas) (PEREIRA, 2004).

A memória de dados, conhecida como RAM (Memória de acesso aleatório, do inglês *Random Access Memory*) é visível para todo o programa e é onde ficam armazenadas as variáveis que o programa utiliza.

Além das portas de entrada e saída, o PIC16F877A possui inúmeros outros periféricos, tais como gerador de PWM (Modulação por largura de pulso, do inglês *Power Width Modulation*), USART (Transmissor endereçável serial, do inglês *Addressable Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter*), contadores de programa (MICROCHIP, 2003).

2.1.2 A estrutura interna do PIC16F877A

O PIC16F877 utilizado nesse trabalho é encapsulado no formato de 40 pinos, cada um com uma ou mais funções bem definidas, conforme mostrado na Figura 3. Manteve-se neste trabalho os nomes dos terminais correspondentes à nomenclatura inglesa, visto ser esta a forma com que mais frequentemente nos deparamos na literatura técnica.

Outras características e detalhamento das funções de cada pino podem ser encontradas na folha de dados, conhecido como *data sheet*, do PIC 16F877A (MICROCHIP, 2003). Nessa folha de dados é possível obter todas as informações

necessárias para programar o PIC, além de informações detalhadas sobre o funcionamento de todos os módulos internos.

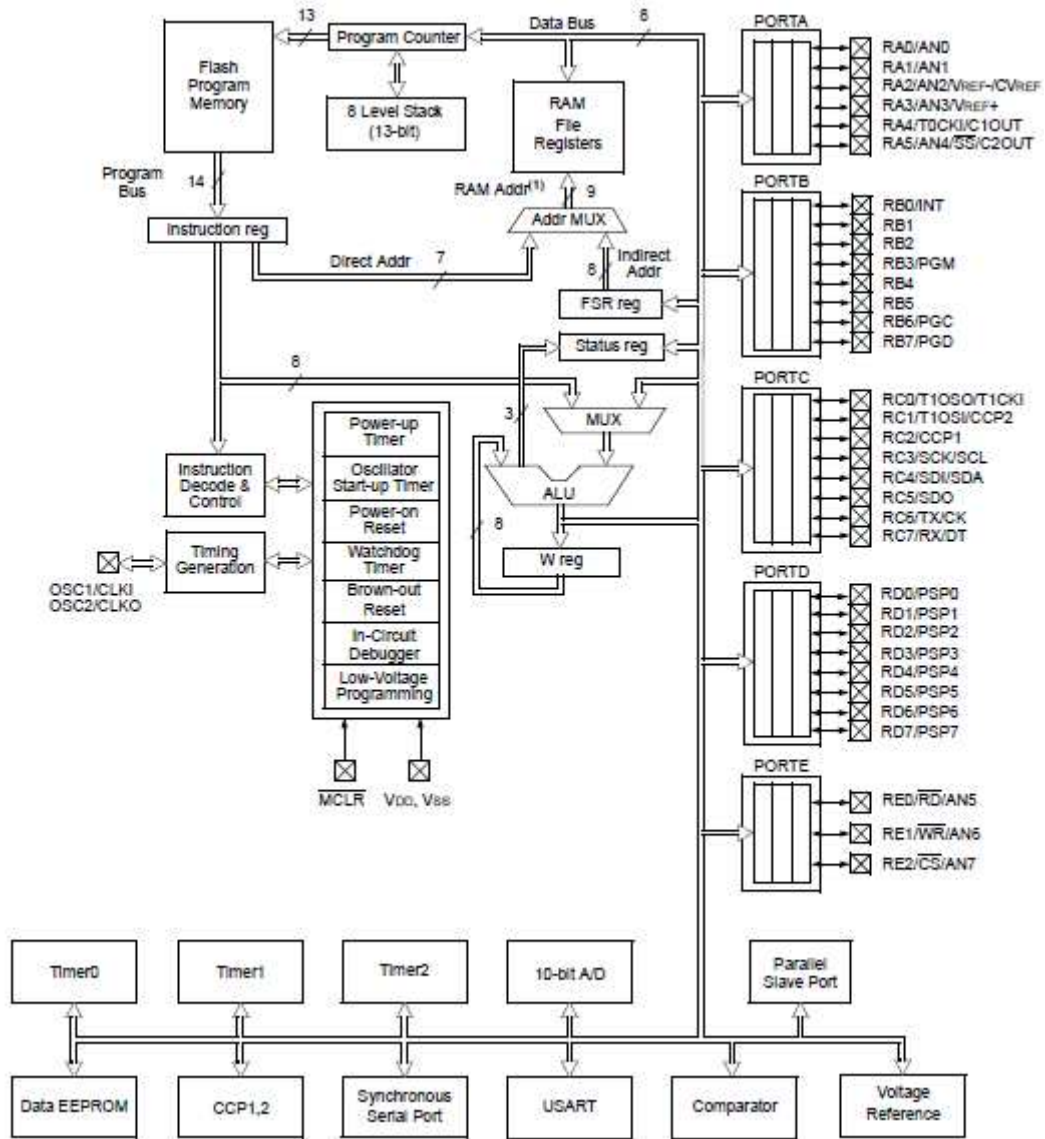


Figura 3 – Diagrama de Blocos do PIC 16F877A

2.1.3 Programação de PIC's em linguagem C

A criação de programas para microcontroladores pode-se tornar uma tarefa difícil dependendo da aplicação a ser desenvolvida. No entanto, a linguagem em C oferece uma alta eficiência na tradução para a linguagem de máquina, gerando um código com menor esforço durante a programação, além de facilitar o acesso aos recursos dos microcontroladores PIC.

Podemos dizer que um programa em C é constituído por um ou mais dos seguintes elementos:

- Variáveis, que são utilizadas para o armazenamento de dados. A linguagem C dispõe de uma grande variedade de tipos de variáveis e dados, o que permite o desenvolvimento de praticamente qualquer tipo de aplicação. Essas variáveis podem ser do tipo inteiro (*int*), do tipo ponto flutuante (*float*), dentre outros;
- Operadores, os quais são elementos utilizados para comandar iterações entre variáveis e dados. Existem diversos tipos de operadores, como os operadores de atribuição, operadores aritméticos, relacionais, etc;
- Comandos de controle ou declarações de controle, os quais são utilizados para controlar, testar e manipular dados e informações dentro do programa. Como exemplo, podemos citar o comando *while*, utilizado na repetição de um determinado bloco de instruções;
- Funções, que são estruturas de programa utilizadas para simplificar, otimizar ou apenas tornar mais claro o funcionamento do programa. Por exemplo, a função *getc* é utilizada para a entrada de dados, ou seja, essa função aguarda pelo recebimento de uma determinada variável.

Através da utilização dos elementos citados, é possível a criação de programas em linguagem C que permitem uma grande velocidade na criação de novos projetos, devido às facilidades de programação oferecidas e também devido à sua portabilidade.

Além disso, o compilador da linguagem C assumiu para si tarefas como o controle e localização das variáveis, operações matemáticas e lógicas, verificação de bancos de memória, etc., fazendo com que o programador preocupe-se mais com a programação em si.

2.2 Modulação por Largura de Pulso

Uma vez que as fontes de alimentação são, tipicamente, de valor constante, sejam elas CA ou CC, caso seja preciso variar a tensão aplicada sobre uma carga, é necessário o emprego de algum dispositivo que seja capaz de "dosar" a quantidade de energia transferida (POMILIO, 2008).

No controle da modulação por largura de pulsos (do inglês *Pulse Width Modulation – PWM*), chaves, como triacs ou transistores, são ligadas e desligadas várias vezes durante os ciclos e a tensão de saída é controlada pela variação da largura de pulsos (RASHID, 1999).

Dessa forma, o processo de modulação por largura de pulso consiste na geração de um sinal chaveado que é resultado da comparação em amplitude de um sinal que contém a informação desejada (sinal modulante) com um sinal de referência (portadora) com frequência maior do que a sinal modulante. Assim, para a geração de um sinal PWM senoidal de frequência f_0 , o sinal modulante corresponde a uma senóide de frequência f_0 e a portadora corresponde a um sinal geralmente triangular devido à facilidade de geração deste sinal, de frequência maior que f_0 . A Figura 4 ilustra um circuito genérico para a geração de um sinal PWM senoidal, onde se observa que quando a amplitude do sinal modulante for maior que a amplitude da portadora, a senóide PWM estará em nível alto e, caso contrário, em nível baixo.

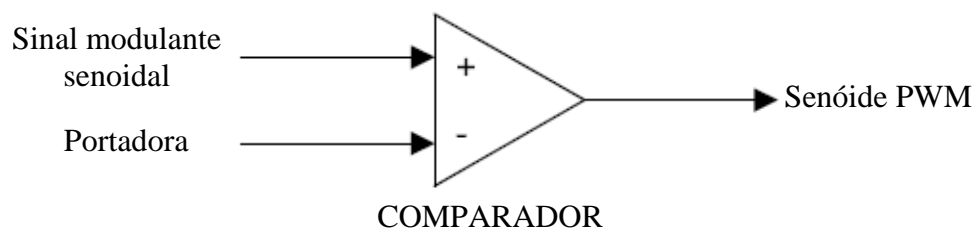


Figura 4 – Circuito para geração de sinal PWM senoidal

A Figura 5 seguinte apresenta formas de onda do processo de geração de um sinal PWM senoidal através de um sinal modulante de frequência de 20 kHz e de uma portadora triangular de 220 kHz (MOHAN, 1995).

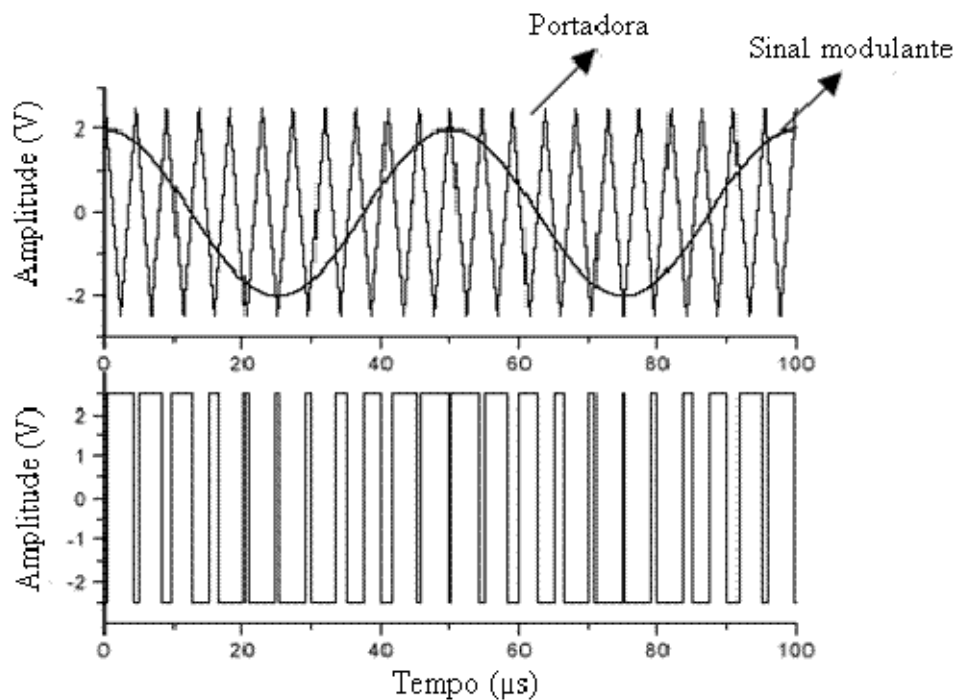


Figura 5 – Geração de um sinal PWM senoidal com portadora triangular

2.3 Optoacopladores

Os optoacopladores possuem um receptor que funciona por polarização através de luz emitida por um emissor, geralmente um diodo luminoso (LED). Este tipo de componente isola os circuitos de outros com tensões elevadas, protegendo assim o circuito com tensões mais baixas.

Existem optoacopladores de diversos tipos: transistores, tiristores, triacs e outros, cuja função é a condução de sinais, possibilitando uma alta frequência no chaveamento da mesma, e obtendo maior precisão no resultado final de controle do processo.

Os diversos tipos de optoacopladores funcionam da seguinte maneira: um sinal de entrada é aplicado a um foto-emissor (geralmente um LED) que envia os sinais à saída, formada por um foto-receptor. Dessa forma, os optoacopladores são capazes de converter um sinal elétrico em uma sinal luminoso modulado e em seguida converte-lo em um sinal elétrico novamente (ALBUQUERQUE, 2005). A Figura 6 ilustra optoacopladores a triac (a) e a transistor (b).

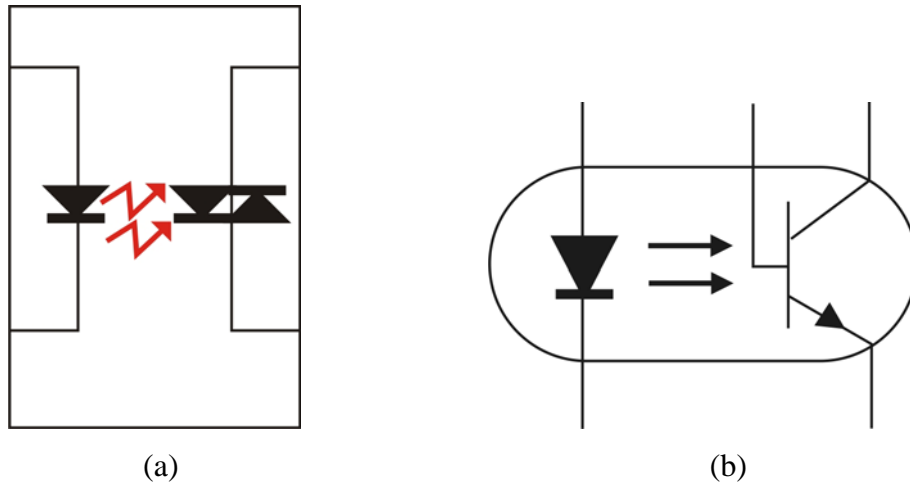


Figura 6 – Optocoplador (a) a Triac e (b) a Transistor

2.4 Inversor de Freqüência

Inversores de freqüência são equipamentos de baixo custo para o controle da velocidade de motores de indução, o que gera uma economia de energia sem prejudicar a qualidade final do sistema.

Nos sistemas convencionais os controladores de vazão, pressão e temperatura comandam válvulas e/ou dampers de estrangulamento, desperdiçando a energia elétrica. Para evitar tal desperdício, as válvulas de estrangulamento devem ser substituídas por Inversores de freqüência, acionando os motores principais. A grande vantagem de utilização de inversores é que além de gerar economia de energia também reduz o custo de instalação do sistema. Os inversores variam as velocidades dos motores de acordo com a maior ou menor necessidade de vazão ou pressão ou temperatura de cada zona de controle. Ao diminuir a velocidade, os inversores proporcionam grande economia de energia. Tal efeito não ocorre com as válvulas tradicionais onde a vazão é reduzida, porém, o motor continua operando na mesma velocidade - pressionando o fluído sobre a entrada da válvula, absorvendo a mesma potência.

Outra vantagem que se pode obter utilizando inversores de freqüência é a possibilidade de redução dos custos de manutenção. Os inversores possibilitam que os motores sejam acionados suavemente, sem trancos. Com isso, reduz-se a quebra de elementos de transmissão como correntes e rodas dentadas, ocorrências freqüentes em virtude do esforço adicional provocado pelos motores com partida direta.

O inversor funciona da seguinte maneira: ele é ligado à rede, podendo ser monofásica ou trifásica, e em sua saída há uma carga que necessita de uma frequência variável. Para tanto, o inversor tem como primeiro estágio, um circuito retificador, responsável por transformar a tensão alternada em contínua, e um segundo estágio, capaz de realizar o inverso, ou seja, de contínua para alternada, e com a frequência desejada pela carga. A Figura 7 apresenta um diagrama resumido de um inversor. Nessa figura, a seção em azul é o retificador e em vermelho é o inversor de tensão contínua para alternada. A seção em verde é utilizada principalmente para filtrar a tensão contínua proveniente da seção retificadora.

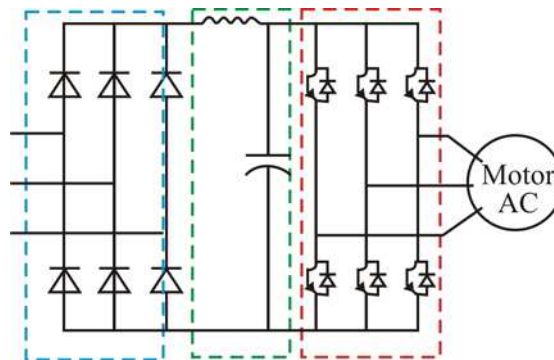


Figura 7 – Diagrama resumido de um Inversor de Frequência

Existem vários fabricantes de inversores de frequência, que apresentam características e funcionamento semelhantes, mas que podem variar de acordo com a faixa de atuação, tanto da frequência quanto da potência.

2.4.1 Blocos do Inversor

1º Bloco – Unidade Central de Processamento (UCP): é nesse bloco que todas as informações (parâmetros e dados do sistema) estão armazenadas, visto que também uma memória está integrada a esse conjunto. A UCP não apenas armazena os dados e parâmetros relativos ao equipamentos, como também executa a função mais vital para o funcionamento do inversor: geração dos pulsos de disparo através de uma lógica de controle coerente para os IGBT's (transistores bipolares de porta isolada, do inglês *Insulated Gate Bipolar Transistor*) (BASCOPE, 1997).

2º Bloco – Interface Homem Máquina (IHM): é através desse dispositivo que pode-se visualizar o que está ocorrendo no inversor (display), e parametrizá-lo de acordo com a aplicação (teclas).

3º Bloco – Interfaces: a maioria dos inversores pode ser comandada através de dois tipos de sinais: analógicos ou digitais. Normalmente, quando necessita-se controlar a velocidade de rotação de um motor no inversor, utiliza-se uma tensão analógica de comando. Essa tensão se situa entre 0 à 10 Vcc. A velocidade de rotação será proporcional ao seu valor. Além da interface analógica, o inversor possui entradas digitais. Através de um parâmetro de programação, pode-se selecionar qual entrada é válida (analógica ou digital) (RASHID, 1999).

2.5 Diagramas de Bloco

Um diagrama de blocos de um sistema representa graficamente as funções desempenhadas por cada componente presente, além de descrever o inter-relacionamento existente entre eles. Dessa forma, o diagrama de blocos tem a vantagem de indicar de uma forma mais real o fluxo dos diversos sinais presentes em um processo a controlar.

Em um diagrama de blocos, as variáveis são ligadas umas as outras através de blocos funcionais, nos quais são aplicados um sinal de entrada e produzem um sinal de saída correspondente, representados por uma seta. Encontra-se também em um diagrama de blocos, o chamado bloco somador, cujo símbolo é um círculo com uma cruz interna e indica a operação de soma entre os sinais.

Em um sistema de controle de um processo, cuja função de transferência (relação entre a entrada e a saída do sistema) é representada por $G(s)$, o diagrama de blocos representado será em malha fechada, ou seja, a saída do sistema $C(s)$ é realimentada através ao bloco somador, e então comparada ao sinal de entrada ou de referência $R(s)$, conforme pode ser observado na Figura 8. No entanto, para que a comparação seja possível, é necessária a conversão do sinal de saída para a mesma unidade de medida do sinal de entrada utilizando-se a função de transferência $H(s)$. Por exemplo, no sistema de controle de temperatura desse trabalho, o sinal de saída é a temperatura que se deseja controlar, expressa em

graus Celsius. Para comparar com o sinal de entrada, em volts, é necessário converter o valor de temperatura em Celsius para um valor de tensão em volts correspondente.

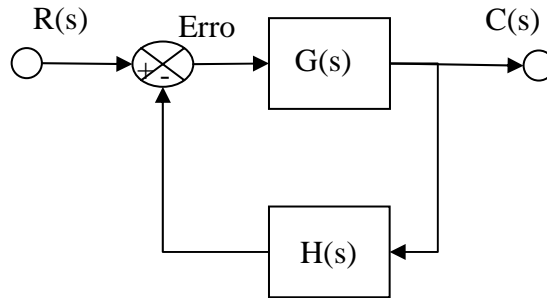


Figura 8 - Diagrama de blocos de um sistema de malha fechada

Em geral, a operação funcional de um sistema pode ser visualizada mais facilmente através do diagramas de blocos do que através do sistema físico em si.

2.6 Controle PID

As técnicas de controle automático propiciam meios para se atingir desempenho ótimo de sistemas dinâmicos, melhoria da produtividade, alívio no trabalho e de muitas operações manuais repetitivas e de rotina. Um controlador automático compara o valor real da grandeza de saída do processo com a grandeza de referência (valor desejado), determina o desvio e produz um sinal de controle que reduzirá o desvio a zero ou a um valor pequeno. A maneira pela qual o controlador automático produz o sinal de controle é chamada de *ação de controle*.

O controle PID combina três tipos de ações de controle: ação de controle proporcional, ação de controle integral e ação de controle derivativa. Esta ação combinada pode ser expressa através da seguinte equação (OGATA, 2003):

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

Em que:

- $u(t)$ = Saída do controlador;
- $e(t)$ = Sinal de erro atuante;
- K_p = Ganho proporcional;
- K_i = Ganho integral;
- K_d = Ganho derivativo.

Utilizando a equação 1 e transformando para o domínio de Laplace, temos a seguinte função de transferência:

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_d s \quad (2)$$

Em que:

- G_c = Relação entre a saída do controlador e o sinal de erro atuante.

O diagrama de blocos de um controlador PID contínuo no tempo (analógico) é mostrado na Figura 9, onde $R(s)$ é a entrada do sistema e $U(s)$ é a saída do controlador.

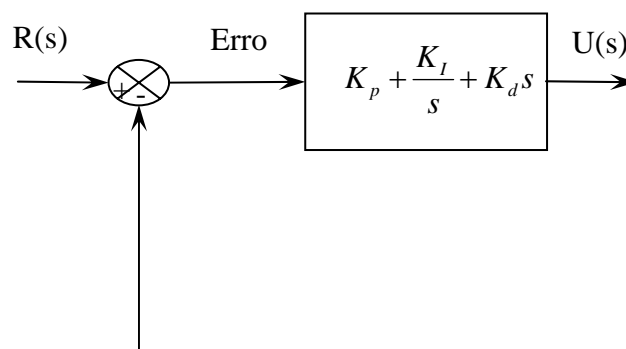


Figura 9 – Diagrama de Blocos de um controlador proporcional integral derivativo analógico

A popularidade dos controladores PID pode ser atribuída parcialmente ao seu bom desempenho em uma ampla faixa de condições de operação e parcialmente à sua simplicidade funcional que permite aos engenheiros operá-los

de um modo simples e direto. Para implementar tal controlador, há a necessidade de serem determinados, para um dado processo: o ganho proporcional, o ganho integral e o ganho derivativo (DORF, 2003).

2.6.1 Controladores Digitais PID

Pode-se determinar uma implementação digital do controlador a partir do controlador contínuo da equação 1, usando-se uma aproximação discreta para a derivada e para a integração. Ou seja, deseja-se fazer a transformação do domínio s (variável complexa) para o domínio z (variável discreta). Assim, utilizando-se a regra da diferença atrasada para a derivada e a integração retangular avançada para a integral, tem-se a seguinte função de transferência no domínio z do controlador digital PID:

$$G_c(z) = K_p + \frac{K_I T_z}{(z-1)} + K_d \frac{(z-1)}{T_z} \quad (3)$$

Em que T_z é o período de amostragem entre duas amostras, conhecido como Tempo de Amostragem.

O diagrama de blocos de um controlador PID digital é mostrado na Figura 10, onde $R(z)$ é a entrada do sistema e $U(z)$ é a saída do controlador.

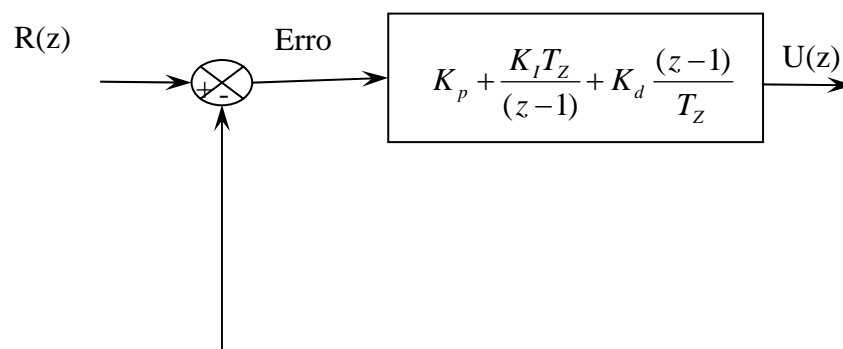


Figura 10 - Diagrama de Blocos de um controlador proporcional integral derivativo digital

O algoritmo da equação a diferenças que fornece o controlador PID é obtido somando-se os três termos da equação 3:

$$u(k) = K_p r(k) + K_I [r(k-1) + T_z r(k)] + \left(\frac{K_d}{T_z} \right) [r(k) - r(k-1)]$$

$$u(k) = \left[K_p + K_I + \left(\frac{K_d}{T_z} \right) \right] r(k) + K_d T_z r(k-1) + K_I r(k-1)$$
(4)

E equação 4 pode ser implementada usando-se um computador digital ou um microcontrolador.

2.7 Secagem de Plantas Mediciniais

Uma vez realizada a colheita, as plantas medicinais seguem basicamente três destinos: a comercialização das plantas frescas, a extração de substâncias por solventes ou a secagem. Dentre esses destinos, a secagem é o processo comercial mais utilizado, pois mantêm os princípios ativos por mais tempo e, conseqüentemente maior período de comercialização (SILVA e CASALI, 2000).

A secagem consiste na remoção de grande parte de água inicialmente contida no produto logo após a sua maturidade fisiológica, a um nível máximo de teor de água no qual possa ser armazenado por longos períodos, sem que ocorram perdas significativas.

Nas plantas medicinais, a secagem é uma etapa de preparação normalmente feita para atender às necessidades da indústria farmacêutica de fitoterápicos, que não tem estrutura para usar as plantas frescas nas quantidades exigidas para a produção industrial (LORENZI & MATOS, 2002).

As pesquisas mais recentes sobre secagem de plantas medicinais têm oportunizado como objetivos de estudo os seguintes parâmetros: a) temperatura e velocidade do ar de secagem, b) umidade relativa do ar dentro e fora do sistema de secagem, c) temperatura do produto e d) pressão estática em função da altura de camada do produto.

2.7.1 Composição e Teor de Água das Plantas Mediciniais

As plantas medicinais e outros produtos são materiais higroscópicos constituídos por água no estado líquido, em contato íntimo com a estrutura

celular, e por matéria seca, constituindo sua massa total. A água se encontra sob duas formas básicas nesses produtos: *água livre*, que é aquela facilmente removida dos grãos e sementes pelo processo de secagem, e a *água de constituição*, na qual suas moléculas estão ligadas quimicamente à matéria seca, fazendo parte da estrutura celular. Por isso, a retirada da *água de constituição* do produto é difícil e, quando isto ocorre, também são retiradas outras substâncias, ocorrendo a oxidação deste material. A outra parte constituinte dos produtos é a matéria seca.

As plantas medicinais podem ser designados ou medidos em relação a massa total (água + matéria seca), fornecendo resultados em diferentes formas de teor de água (BROOKER, 1992).

O teor de água pode ser expresso em duas formas:

- *base seca (b. s.)*: quando a massa de determinado constituinte de um produto é expressa em função da massa de matéria seca deste mesmo produto, ou seja, é a massa de água do produto em função da massa de matéria seca deste produto. É expressa pela seguinte equação:

$$U = \frac{m_a}{m_s} = \frac{m_a}{m_t - m_a} \quad (5)$$

Em que:

- U = Teor de água em base seca (b. s.);
- m_a = Massa de água do produto (g);
- m_s = Massa de matéria seca do produto (g);
- m_t = Massa total do produto (g).

- *base úmida (b. u.)*: Quando a massa de determinado constituinte de um produto é expressa em função da massa total deste produto, ou seja, é a massa de água do produto em função da massa total deste produto. É expressa pela seguinte equação:

$$U = \frac{m_a}{m_t} = \frac{m_a}{m_a + m_s} \quad (6)$$

Em que:

- U = Teor de água em base úmida (b. u.);
- m_a = Massa de água do produto (g);
- m_s = Massa de matéria seca do produto (g);
- m_t = Massa total do produto (g).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Secador utilizado

O secador utilizado para o controle de temperatura e velocidade do ar de secagem de plantas medicinais e aromáticas, mostrado na Figura 11, está localizado no Laboratório de Secagem de Plantas Medicinais do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa.

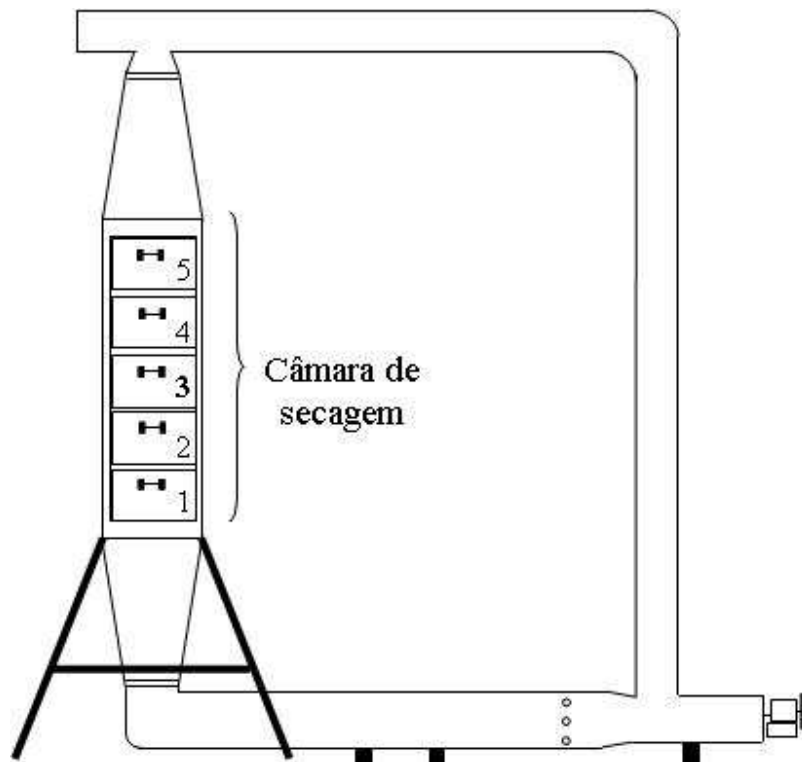


Figura 11 – Vista Frontal do Secador

Esse secador possui cinco bandejas, de tampas teladas, construídas de aço inoxidável, cada uma com dimensões de 0,25 m de lado e 0,15 m de altura, onde poderão ser colocados os produtos para a secagem. Entretanto, a gaveta escolhida foi a terceira, por estar numa posição mais central da câmara de secagem.

Com a intenção de se detalhar todos os equipamentos que constituem o secador, fez-se um corte frontal no mesmo, conforme a Figura 12.

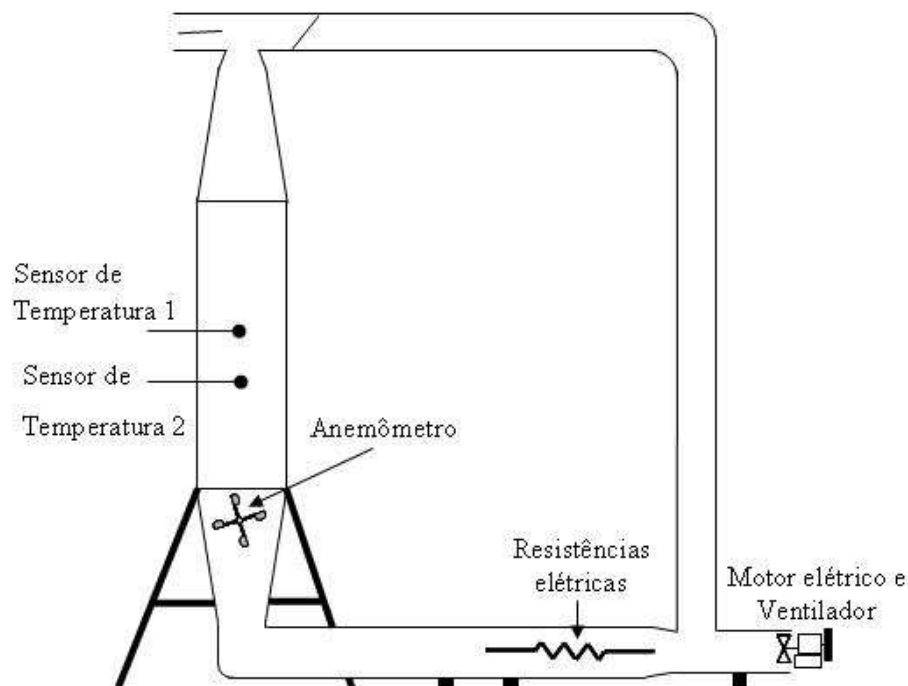


Figura 12 – Corte Frontal do Secador

O secador utilizado é composto por ducto para entrada e recirculação do ar, ventilador, motor elétrico, resistências elétricas, anemômetro de pás e sensores de temperatura.

O secador foi construído com chapa metálica galvanizada número 18. Objetivando minimizar o consumo energético, foram colocadas chapas metálicas de forma dupla nas gavetas de secagem, para possibilitar a fixação do isolamento térmico, sendo o espaço entre elas preenchido com uma camada de 25 mm de lã de rocha.

O ar de secagem é insuflado por um ventilador acoplado a um motor elétrico de 368 W (1/2 cv), situado no ducto da entrada de ar (Figura 12). Foi construído um plenum inferior na forma de “V”, visando melhorar a distribuição do fluxo do ar de secagem através da massa do produto, e um plenum superior, mas em formato de “V” invertido (RADÜNS, 2004).

3.2 Medição, Aferição e Controle da Velocidade do ar

A medição da velocidade do ar é realizada através de um anemômetro de conchas. Ele está acoplado na sua extremidade a um disco que possui furos. Esse

disco gira dentro de uma cavidade onde se encontra um optocoplador a transistor, conforme ilustrado na Figura 13.

O disco possui oito furos distribuídos regularmente em intervalos de forma angular na sua periferia. Quando o disco gira, a luz do LED passa pelos furos do disco e é interrompida pela parte sólida do mesmo. Por esta razão, o optocoplador gera um pulso na saída proporcional a velocidade em que o disco gira. Assim, esse transdutor digital de velocidade fornece uma saída em forma de pulsos, variável com a velocidade.

Esses pulsos são enviados à entrada do microcontrolador PIC16F877A, o qual realiza a contagem dos mesmos.

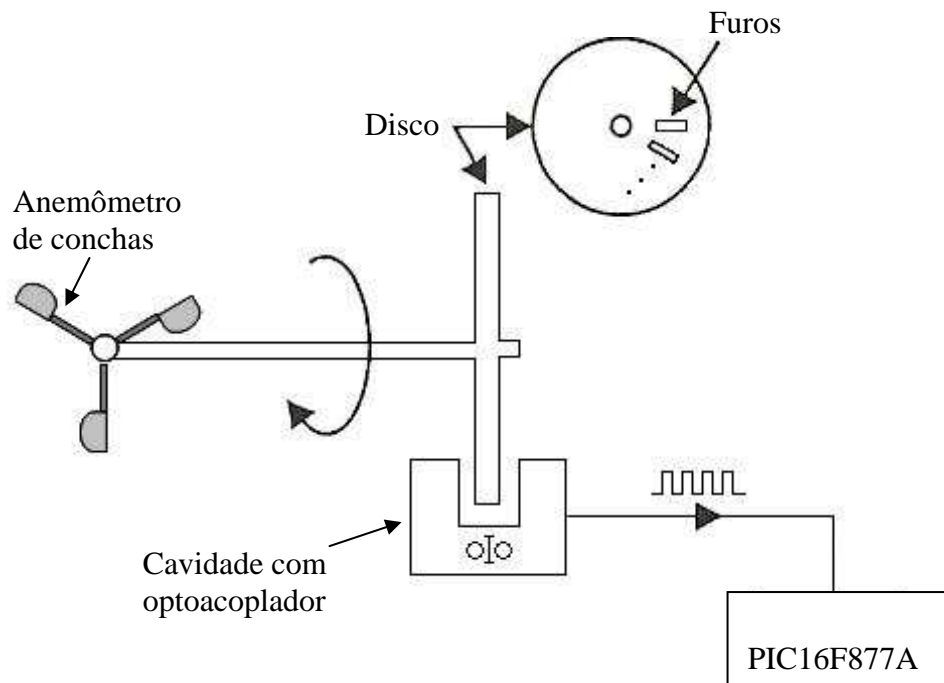


Figura 13 – Esquema de Medição de Velocidade

3.2.1 Aferição do Anemômetro

Para a aferição do anemômetro descrito, foi utilizado um anemômetro digital padrão comercial, da marca Instrutherm, modelo TAVR-650, utilizado na escala de 0,3 a 45,0 m s⁻¹ (Precisão: ± 3% ; Resolução Básica: 0,1.) Com ele, foram realizadas cinco medidas dentro da gaveta de secagem, conforme Figura 14, que mostra o corte frontal da terceira gaveta.

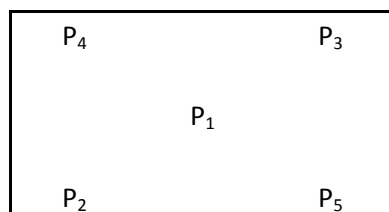


Figura 14 – Posição das medidas na gaveta de secagem para aferição do anemômetro

Dessa forma, variou-se a frequência através do Inversor de Frequência acoplado ao motor e foram feitas diversas medidas com o anemômetro padrão na gaveta de secagem. O anemômetro de conchas foi então aferido.

Dessa forma, registrou-se a velocidade com o anemômetro através do display do microcontrolador. Foi extraída a média das medidas obtidas dentro da gaveta com o anemômetro padrão. Assim, para aferir o anemômetro de conchas, foi calculada uma constante média (valor final), através da seguinte equação:

$$\text{Constante} = \frac{\text{Velocidade registrada no anemômetro de conchas}}{\text{Velocidade média do anemômetro padrão}} \quad (7)$$

O Quadro 1 exibe os valores encontrados durante a aferição, nas diversas frequências, assim como o valor médio da constante, que foi utilizada no programa realizado no microcontrolador.

Quadro 1 – Dados para aferição do Anemômetro com referência à Figura 14

Freq. (Hz)	Velocidade do anemômetro de conchas (m s ⁻¹)	Medidas de Velocidade no anemômetro padrão nas diversas posições dentro da gaveta (m s ⁻¹)					Velocidade média do anemômetro padrão (m s ⁻¹)	Constante
		P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅		
60	13,50	2,35	2,44	2,42	2,15	2,58	2,388	5,653266
50	11,85	2,05	2,04	2,10	1,75	2,04	1,996	5,936874
40	9,00	1,67	1,68	1,70	1,70	1,34	1,618	5,562423
30	6,25	1,12	1,15	1,16	0,80	1,18	1,082	5,776340
20	2,37	0,59	0,54	0,50	0,30	0,52	0,490	4,836735
30	6,12	1,13	1,13	1,05	0,79	1,14	1,048	5,839695
40	8,75	1,57	1,60	1,55	1,20	1,54	1,492	5,864611
50	11,75	2,05	1,99	2,04	1,54	1,94	1,912	6,145397
60	14,25	2,32	2,35	2,30	1,78	2,46	2,242	6,355932
							Valor Final	5,774586

3.2.2 Controle da Velocidade do ar de secagem

Para o controle da velocidade do ar, foi necessário a definição de um valor desejado (setpoint de velocidade). Dessa forma, foi utilizado um potenciômetro que varia a tensão contínua de entrada no microcontrolador de zero a cinco volts. Optou-se pela faixa de entrada de velocidade entre zero metro por segundo (equivalente a zero volts) a $2,5 \text{ m s}^{-1}$ (equivalente a cinco volts).

O microcontrolador recebe esse valor analógico e converte para um sinal digital através de seu conversor analógico digital de 10 bits, o qual converte o sinal analógico de 0 a 5V para o valor binário correspondente de 0 a 1023. Dessa forma, encontrou-se uma constante para tal conversão, conforme equação abaixo:

$$\text{Constante do setpoint de velocidade} = \frac{1023}{2,5} = 409,2 \quad (8)$$

Assim, qualquer valor de tensão lido pelo microcontrolador é convertido para binário e dividido pela constante acima para se obter o valor desejado de velocidade.

De posse do valor lido e do setpoint de velocidade, são realizadas ações de controle PID para o cálculo da duração da largura de pulso do sinal PWM, que posteriormente é amplificado e levado à entrada analógica do Inversor de Frequência.

Os parâmetros da ação de controle PID implementada foram obtidos através de ensaios prévios. Percebeu-se que o efeito proporcional atuava diretamente na melhoria da velocidade de resposta do sistema, mas aumentava o sobre-sinal. O efeito integral interagiu mais com o estado do erro, diminuindo o mesmo em regime permanente. Já o efeito derivativo atuava na tentativa de reduzir as oscilações do sistema de controle, atuando claramente na redução do sobre-sinal.

Utilizando a função PWM existente no microcontrolador (CCP1), que produz em sua saída um sinal digital de resolução de 10 bits, e fixando uma frequência para o mesmo de 20 KHz para que fosse mais fácil filtrar os ruídos, foi calculada a largura de pulso do mesmo através da seguinte equação:

$$Ciclo_v(PWM) = P_v + I_v + D_v \quad (9)$$

Em que:

$Ciclo_v(PWM)$ = Largura de pulso em que o PWM ficará em nível alto;

P_v = Saída do controlador proporcional;

I_v = Saída do controlador integral;

D_v = Saída do controlador derivativo.

De posse do sinal de saída do sinal PWM do microcontrolador, foi realizada a conversão do mesmo para um sinal analógico. Porém, a conversão de formas de onda de PWM para sinais analógicos envolve o uso de filtros passa-baixas, devido à existência de harmônicos no sinal PWM gerado.

Dessa forma, foi construído o filtro passa-baixas da Figura 15, e na saída dele o sinal foi amplificado para a variação de 0 a 10 volts.

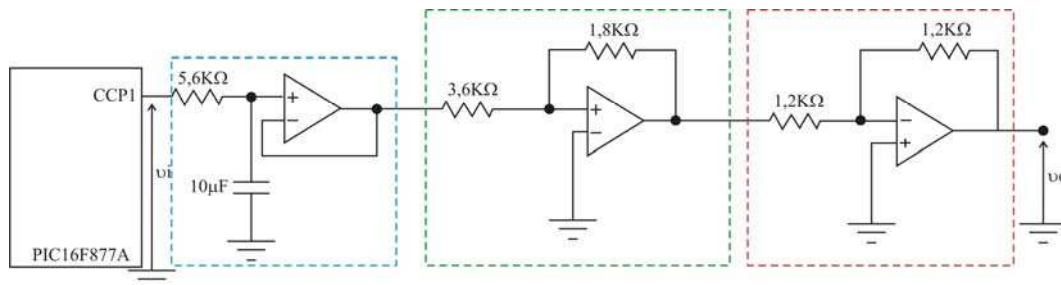


Figura 15 – Conversão do sinal PWM para sinal analógico

Para a conversão do sinal digital PWM, na saída do PIC (CCP1), para um sinal analógico, foi utilizado o filtro passa-baixas, composto pelo resistor de $5,6K\Omega$ e pelo capacitor de $10\mu F$. Com esses valores de componentes, a frequência de corte do filtro é de:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = 2,84Hz \quad (10)$$

A frequência de corte f_c calculada é bem inferior à frequência do sinal PWM, deixando passar apenas as pequenas frequências, eliminando assim os harmônicos de alta frequência. Esse valor de frequência de corte foi definido por

ser um valor muito menor que a frequência do PWM, facilitando até mesmo a filtragem de ruídos do pico fundamental. O filtro passa-baixas citado está na seção em azul da Figura 15.

Após a passagem pelo filtro, o sinal de 0 a 5 V é amplificado para um sinal analógico de 0 a 10 V, conforme mostrado na seção em verde (bloco amplificador) da Figura 15. A seção em vermelho mostra o bloco inversor do circuito, pois o sinal contínuo estava negativo.

Esse sinal de 0 a 10 volts é enviado à entrada analógica do Inversor de Frequência SIEMENS G110, o qual varia a frequência e, conseqüentemente a velocidade do motor de indução trifásico. O comissionamento do inversor, onde foram ajustados os principais parâmetros do mesmo, inserindo os dados de placa do motor utilizado são mostrados no Quadro 2. Esse procedimento é necessário para proteção se sobrecarga do motor quando o mesmo operar acima de 5Hz.

Quadro 2 – Comissionamento rápido do Inversor de Frequência

Parâmetro	Descrição	Ajuste Final
P304	Tensão nominal	220 V
P305	Corrente nominal	2,1 A
P307	Potência nominal	0,5 CV
P310	Frequência nominal	60 Hz
P311	Velocidade nominal	1710 RPM
P700	Seleção da Fonte de Comando	Teclado
P1000	Seleção do setpoint de frequência	Setpoint analógico
P1080	Frequência mínima	12 Hz
P1082	Frequência máxima	75 Hz
P1120	Tempo de rampa de aceleração	10 segundos
P1121	Tempo de rampa de desaceleração	10 segundos

3.3 Controle e Aquisição da Temperatura do ar

3.3.1 Aquisição da Temperatura

Para a aquisição dos dados de temperatura foram utilizadas as saídas de dois sensores LM 35 da National Semiconductor, colocados nas posições dos sensores 1 e 2, mostradas na Figura 12.

De acordo com a folha de especificações do fabricante (ou *datasheet*), esses sensores oferecem alta precisão, possibilitando não fazer qualquer ajuste no sinal de saída do mesmo. Esta precisão se deve ao fato de utilizar intrinsecamente em sua construção circuitos linearizados. Sua faixa de operação está entre -55°C a 155°C aproximadamente. Estes sensores além de possuir tamanhos muito reduzidos são extremamente lineares com fator de escala de $10\text{ mV} / ^{\circ}\text{C}$. Sendo assim a escolha do sensor se baseou-se nos seguintes critérios: linearidade, faixa de funcionamento e disponibilidade do sensor no mercado.

Para melhor resolução, os sinais provenientes dos sensores foram amplificados, utilizando-se o amplificador operacional LM 324, conforme Figura 16. Para essa figura, o ganho G é dado por:

$$G = \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) = \left(1 + \frac{6,8\text{K}\Omega + 200\Omega}{3\text{K}\Omega} \right) = 3,333 \quad (11)$$

Portanto, para uma tensão de saída máxima de $1,5\text{V}$ do sensor de temperatura, tem-se aproximadamente 5V ($1,5 \times 3,333$) na saída do amplificador operacional. O capacitor na saída do sensor, mostrado na Figura 16, é utilizado com o objetivo de eliminar ruídos em alta frequência. O segundo amplificador operacional, que funciona como um buffer de tensão é utilizado apenas para a proteção da placa de aquisição e dos componentes sensíveis do circuito.

O sistema de controle desejado deveria operar com o setpoint de velocidade entre zero e 2,5 metros por segundo, enquanto que o setpoint de temperatura estaria entre zero e cem graus Celsius. Assim, os testes foram realizados com as velocidades de zero, meio, um e meio, e dois metros por segundo. A tensão entre fases aplicadas em todas as tentativas seguintes é de 220 V. Em todos os testes esperava-se que o sistema atingisse cem graus Celsius em todas as velocidades testadas. Foi feita a média aritmética entre os sensores de temperatura 1 e 2 da Figura 12.

A primeira configuração escolhida para teste foi a com duas resistências ligadas em série, conforme mostrada na Figura 17, onde A, B e C são as fases e N o fio neutro.

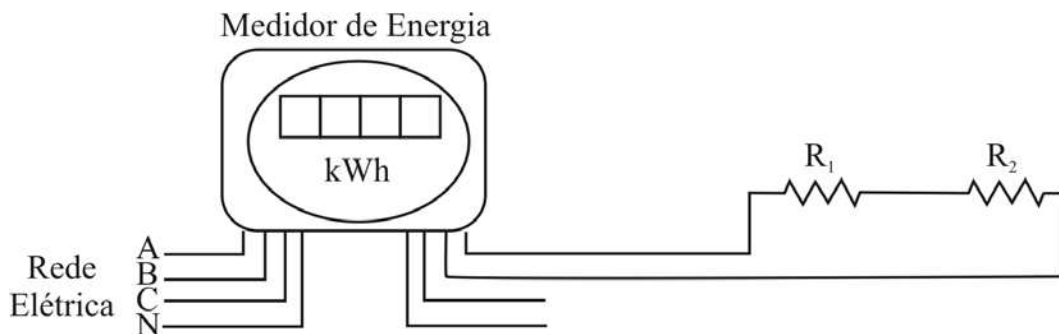


Figura 17 - Configuração com duas resistências em série

As curvas levantadas para a configuração da são mostradas na Figura 18. Nota-se que em nenhum dos quatro gráficos mostrados, a temperatura atingiu cem graus Celsius, mesmo após 1000 segundos com o sistema ligado.

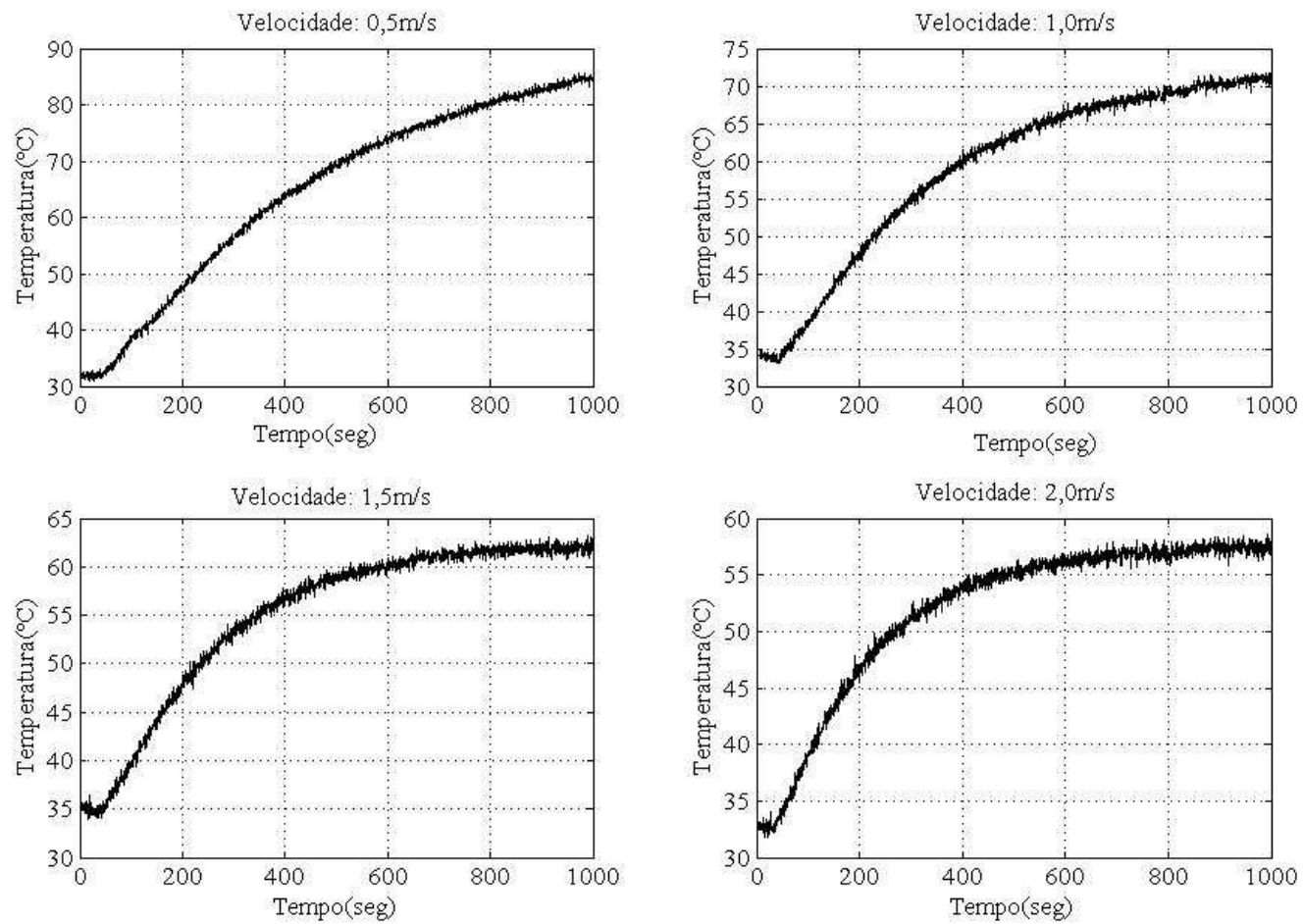


Figura 18 - Curvas para configuração com duas resistências em série

O Quadro 3 resume os dados registrados durante esses testes.

Quadro 3 – Resumo dos dados para a configuração com duas resistências em série

Velocidade (m s ⁻¹)	Frequência no Motor (Hz)	Temperatura Ambiente (°C)	Energia Consumida (kWh)	Temperatura Máxima atingida (°C)
0,5	16	31,5	0,8	85,6
1,0	25	31,2	0,9	71,7
1,5	35	32,9	1,0	63,2
2,0	45	33,4	1,1	58,7

Devido a configuração da Figura 17 não ter atingido a temperatura desejada, foram levantados os mesmos dados, porém com apenas uma única resistência, o que faria a potência total ser dobrada em relação à configuração anterior. Essa configuração pode ser vista na Figura 19 e as curvas levantadas podem ser observadas na Figura 20.

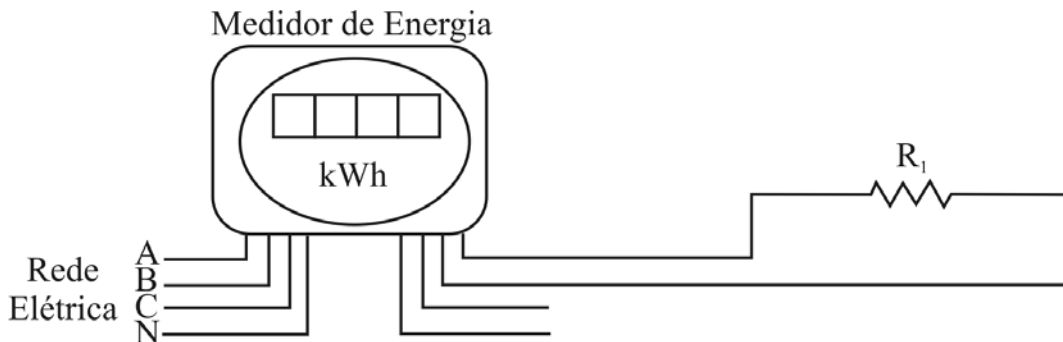


Figura 19 - Configuração com uma resistência

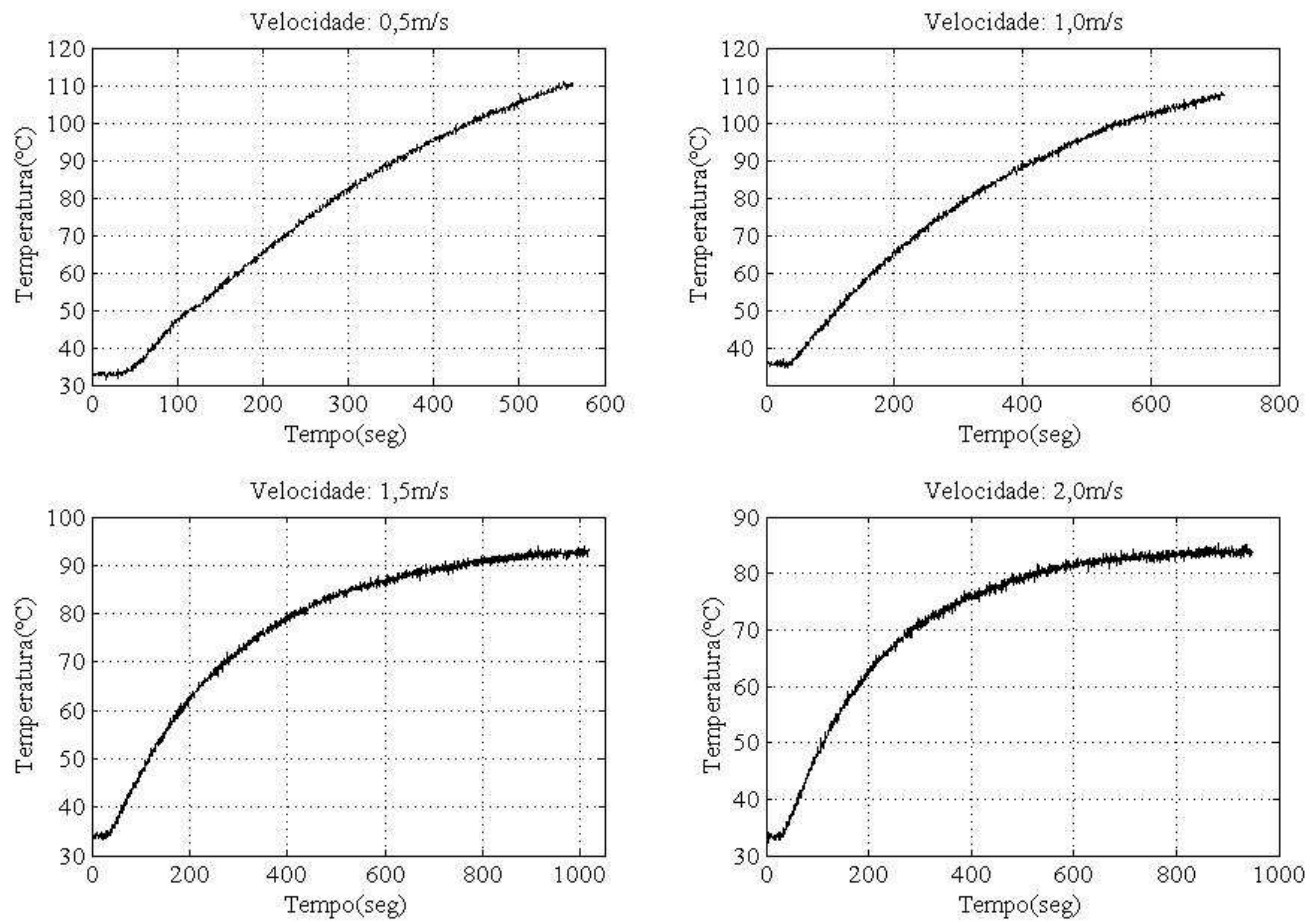


Figura 20- Curvas para configuração com uma resistência

Observa-se na Figura 20 que durante os ensaios com as velocidades de 1,5 m s⁻¹ e 2,0 m s⁻¹, a temperatura desejada de 100 °C não foi atingida. Os dados registrados para essa configuração estão resumidos no Quadro 4.

Quadro 4 - Resumo dos dados para a configuração com uma resistência

Velocidade (m s ⁻¹)	Frequência no Motor (Hz)	Temperatura Ambiente (°C)	Energia Consumida (kWh)	Temperatura Máxima atingida (°C)
0,5	16	30,5	0,9	110,5
1,0	25	32,3	1,0	107,7
1,5	33	31,0	1,2	93,9
2,0	45	32,2	1,3	85,4

Como a temperatura desejada ao sistema de controle não foi atingida nas tentativas anteriores, a configuração mostrada na Figura 21 foi testada. As curvas levantadas para as diferentes velocidades são mostradas na Figura 22, e dados resumidos para essa configuração são exibidos no Quadro 5.

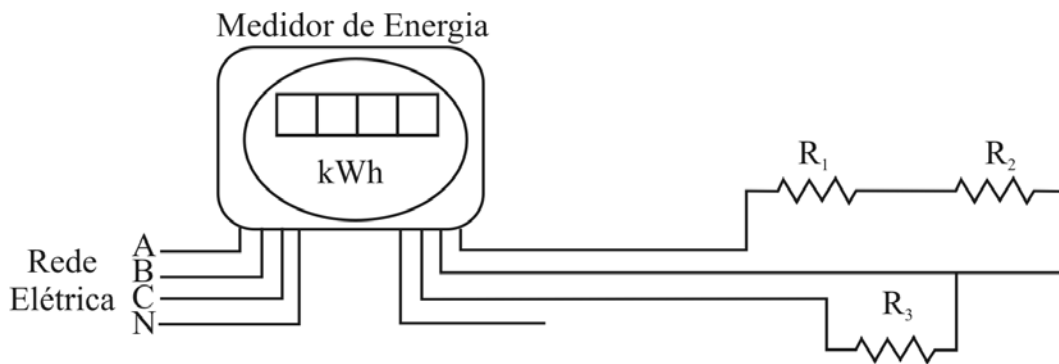


Figura 21 - Configuração com combinação de duas resistências em série e uma resistência isolada

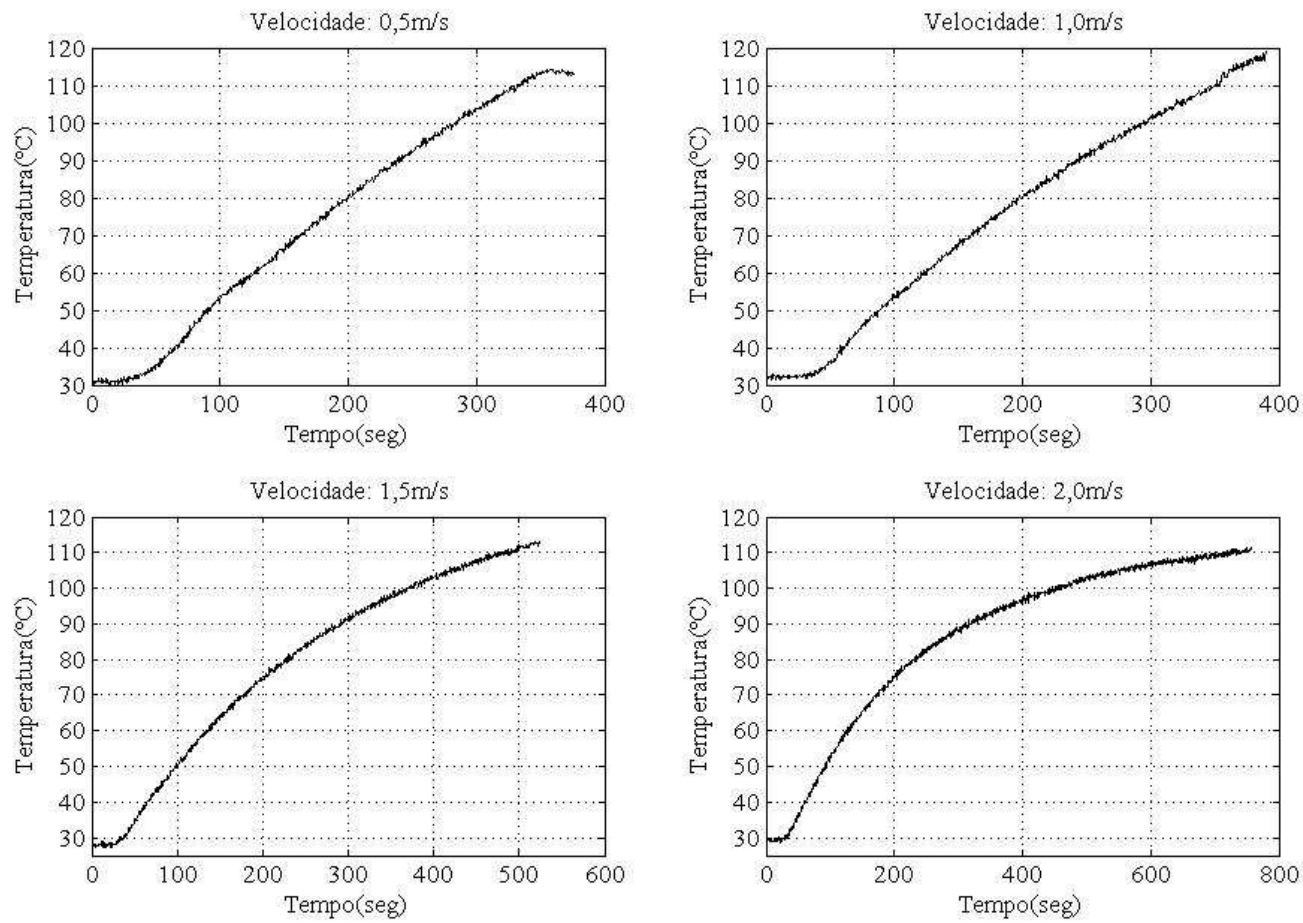


Figura 22 - Configuração com combinação de duas resistências em série e uma resistência isolada

Quadro 5 - Resumo dos dados para a configuração com combinação de duas resistências em série e uma resistência isolada

Velocidade (m s ⁻¹)	Frequência no Motor (Hz)	Temperatura Ambiente (°C)	Energia Consumida (kWh)	Temperatura Máxima atingida (°C)	Tempo necessário para atingir 100 °C (seg.)
0,5	15	30,8	0,9	114,2	284
1,0	25	31,2	1,0	119,1	295
1,5	33	28,1	1,1	113,0	371
2,0	45	30,3	1,3	111,4	452

Com esse teste, verificou-se que essa configuração poderia ser utilizada, pois a temperatura de 100 °C foi atingida em todos os casos. Além disso, o tempo necessário para que o sistema atingisse tal temperatura foi menor que nos testes anteriores, apesar do maior consumo de energia. Nota-se também que em velocidades mais baixas, a temperatura eleva-se mais rapidamente.

3.3.3 Controle da Temperatura Média

Para o controle da temperatura, utilizou-se da leitura dos dois sensores LM 35, colocados na gaveta de secagem. Para a faixa de variação de temperatura desejada (0 a 100°C), a saída do sensor fornecia um sinal de tensão proporcional de 0 a 1V.

Assim, esse sinal analógico de tensão era recebido pela entrada analógica do microcontrolador, que o convertia em um valor de temperatura proporcional. Para a aquisição desses dados, o programa realizado capturava 10 valores de temperatura para o sensor 1 e para o sensor 2, em um segundo. Após isso, era realizada a média aritmética desses dois sinais, que era o sinal de leitura de referência. A partir daí iniciava-se o controle de temperatura.

Da mesma forma que no controle de velocidade, foi ajustado o valor desejado de temperatura para o processo (setpoint de temperatura). Isso foi feito através de outro potenciômetro que gerava um sinal analógico de 0 a 5V na entrada do microcontrolador, que era convertido para um sinal digital através de um conversor analógico digital interno de 10 bits, o qual gerava valores de 0 a

1023 em binário proporcional à tensão e, conseqüentemente, à temperatura de entrada. Também foi calculada uma constante para tal conversão:

$$\text{Constante do setpoint de temperatura} = \frac{1023}{100} = 10,23 \quad (12)$$

O valor de tensão lido pelo microcontrolador era convertido para binário e dividido pela constante acima para se obter o valor desejado de temperatura.

Em função do processo de temperatura possuir constante de tempo elevada devido à inércia térmica, foi necessário apenas a utilização do controle Proporcional, que reduzia o tempo de subida do sistema à medida que aumentava o valor da constante proporcional.

Utilizando a outra função PWM disponível no microcontrolador (CCP2), foi produzida uma saída com uma onda pulsante, com freqüência definida em 1 Hz, de largura variável, calculada pela seguinte equação:

$$\text{Ciclo}_t(\text{PWM}) = P_t \quad (13)$$

Em que:

$\text{Ciclo}_t(\text{PWM})$ = Largura de pulso em que o PWM ficará em nível alto;

P_t = Saída do controlador proporcional.

O PWM em um ciclo por segundo (1 Hz) chaveava os 60 ciclos por segundo (60 Hz) da rede elétrica, determinando de acordo com a sua largura a quantidade de ciclos iriam passar através das resistências de aquecimento em um segundo.

De posse do sinal de saída do sinal PWM do microcontrolador, o mesmo foi enviado a dois optoacopladores MOC 3020M da Fairchild Semiconductor, sendo um para disparo do sinal de tensão da resistência isolada e o outro para as duas resistências em série.

O circuito interno do MOC 3020M possui um LED entre os pinos 1 e 2, o qual é protegido pelo resistor de 220Ω, na saída do PIC. Toda vez que o sinal

PWM atinge nível alto, esse LED emite luz, sensibilizando o triac (entre os pinos 4 e 6) que entra em condução.

Imediatamente, ocorre o disparo do Triac BTA 41, que suporta uma corrente máxima de 40 A. Assim, tem-se o fechamento dos circuitos mostrados na Figura 24 e na Figura 25, ligando as resistências elétricas de 220V e 5kW, que provocam o aquecimento da temperatura do ar de secagem. Os capacitores presentes e as demais resistências do circuito são para a proteção do triac contra as variações de corrente (di/dt) e tensão da rede elétrica (dv/dt).

A Figura 24 apresenta a ligação do circuito com somente uma resistência de aquecimento, enquanto que a Figura 25 mostra o circuito contendo duas resistências de aquecimento ligadas em série, para a redução da potência e conseqüentemente, do consumo de energia elétrica.

É importante lembrar que todos os equipamentos, sejam as resistências ou o motor e demais componentes, estavam conectados a um medidor de energia elétrica trifásico do tipo indução, como o mostrado na Figura 23, para o registro do consumo de energia elétrica do processo.



Figura 23 – Medidor de Energia Elétrica Trifásico do tipo indução

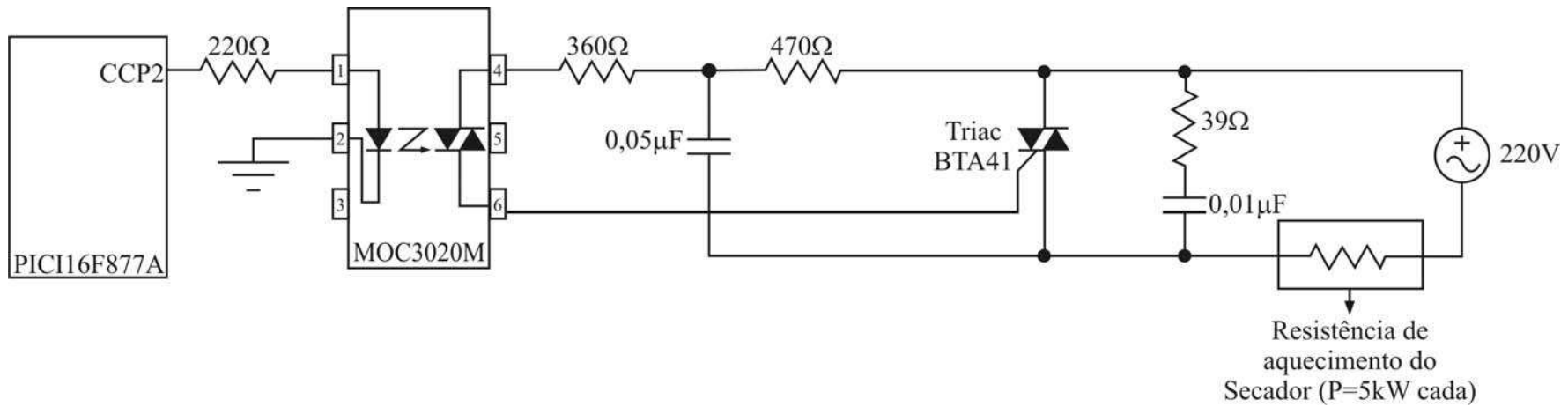


Figura 24 – Circuito de disparo da resistência de aquecimento isolada

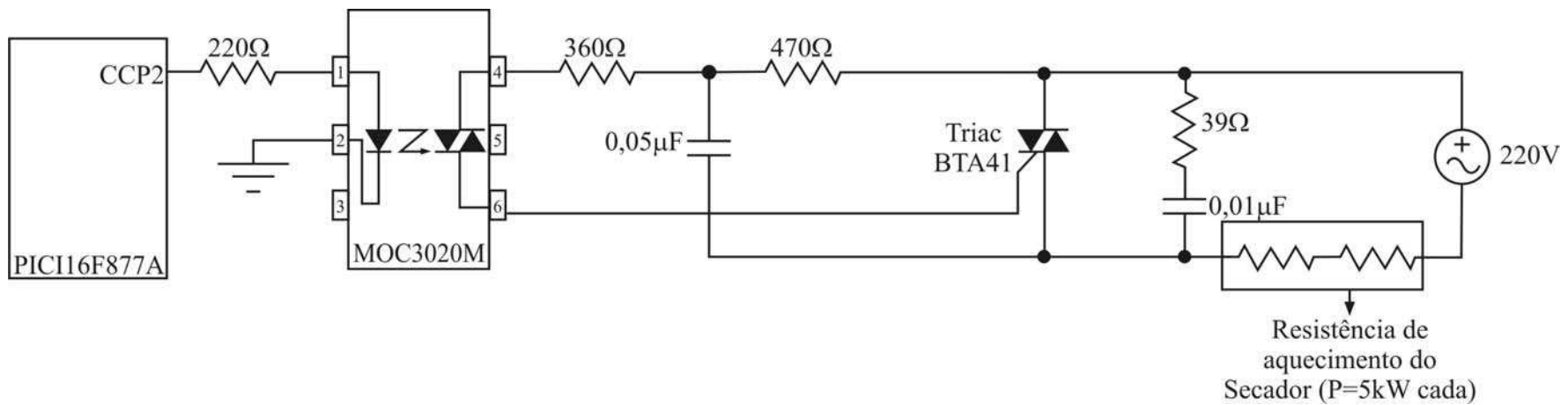


Figura 25 - Circuito de disparo das duas resistências de aquecimento em série

3.4 Estratégia de Controle

Devido à influência da velocidade do ar no controle de temperatura observado nas figuras 18, 20 e 22, a estratégia de controle necessária ao controle adequado do sistema foi elaborada segundo o diagrama de blocos apresentado na Figura 26. O controle de velocidade e temperatura projetado possui realimentação, ou seja, são sistemas de malha fechada. Esse tipo de sistema, na presença de distúrbios, tende a diminuir o erro entre a saída da realimentação e a entrada de referência do sistema.

Através do diagrama de blocos da Figura 26, nota-se que a velocidade do ar atua como distúrbio do sistema de controle de temperatura, atuando, portanto, como um comando direto de atuação, ilustrado através de um triângulo.

O sistema de controle de velocidade e temperatura do ar de secagem funcionam da seguinte maneira, respectivamente:

- A velocidade é medida pelo sensor anemômetro, cujo sinal é convertido em pulsos elétricos através de um optoacoplador. O microcontrolador lê o valor desejado e compara com o medido, atuando então no Inversor de Frequência que controla a rotação do motor de indução trifásico. Dessa forma, a velocidade do ar de secagem é ajustada ao setpoint.
- A temperatura é medida pelo sensor LM35, que converte o valor em um sinal elétrico contínuo. O microcontrolador lê o valor desejado e compara com o medido, atuando nos optoacopladores que ligam as resistências elétricas, as quais ajustam a temperatura do ar de secagem ao valor de setpoint.

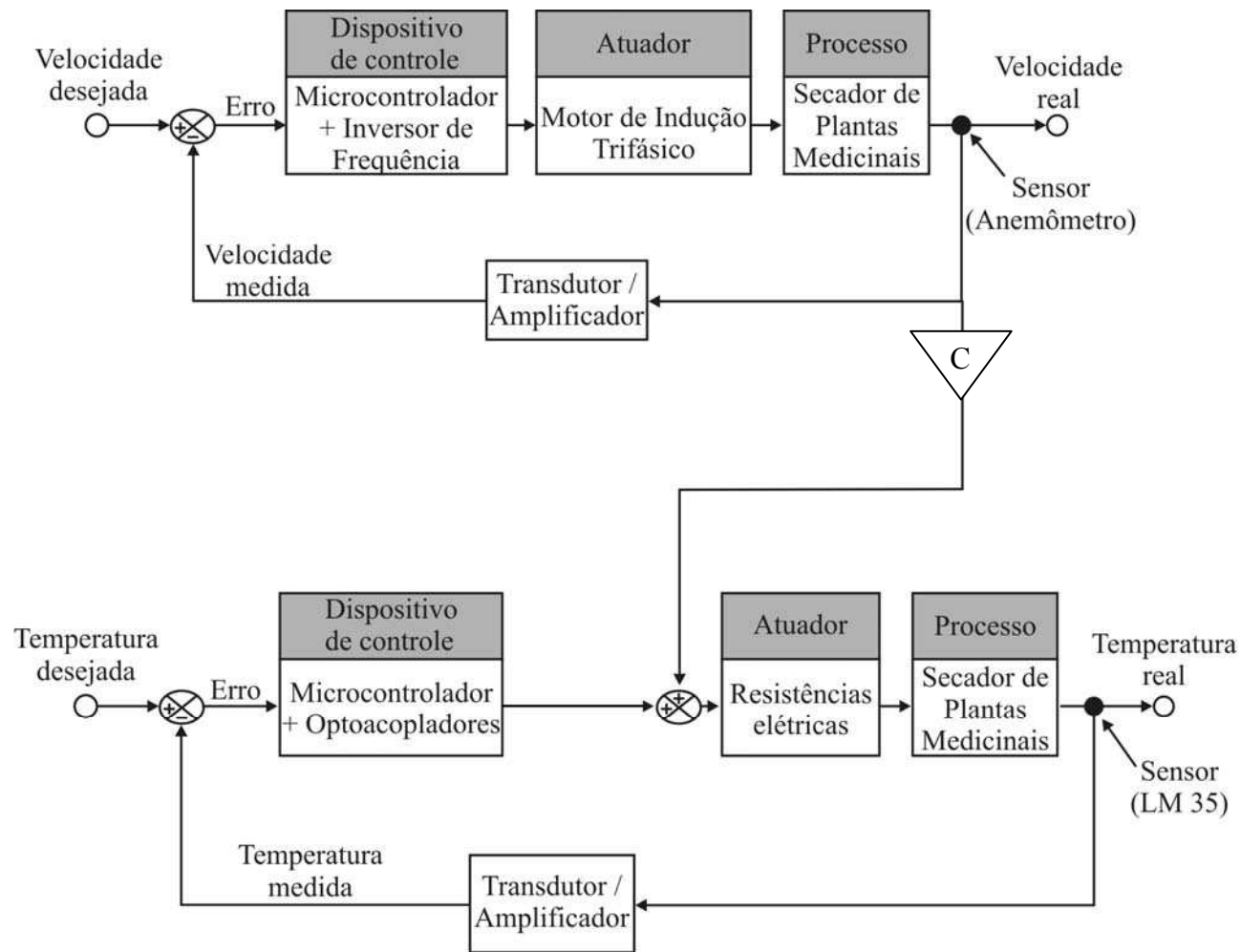


Figura 26 - Diagrama de blocos para o sistema de controle de velocidade e temperatura do ar de secagem

3.5 Programa Computacional

Devido à eficiência e facilidade de programação oferecida pela linguagem C, optou-se nesse trabalho por esta linguagem de programação. A conversão do programa em Linguagem C para a linguagem de máquina do microcontrolador foi executada com o compilador PCH Compiler for PIC do fabricante CCS Inc. Este compilador está disponível no site do fabricante www.ccsinfo.com. O compilador CCS foi utilizado devido ao seu baixo custo e literatura disponível sobre o compilador (PEREIRA, 2007). A linguagem de máquina é o formato pelo qual o programa convertido pode ser gravado na memória do microcontrolador. O programa convertido utiliza as instruções disponíveis no PIC16F877A.

Utilizou-se o ambiente de desenvolvimento MPLAB IDE do fabricante Microchip na gravação do programa na memória do microcontrolador. Este ambiente de desenvolvimento é gratuito e está disponível no site do fabricante www.microchip.com.

O microcontrolador PIC16F877A, além de ser utilizado na implementação do Controlador, também foi aplicado na realização de outras funcionalidades do Sistema, como por exemplo, a interface com usuário incluindo atualização de display.

Todos os cálculos do algoritmo foram realizados com variáveis do tipo ponto flutuante, evitando problemas numéricos que poderiam interferir no seu funcionamento.

Para melhor entendimento da idéia utilizada na realização do programa, foi feito um fluxograma do mesmo, mostrado na Figura 27. Os fluxogramas são elementos gráficos utilizados para estabelecer a seqüência de operações necessárias para o cumprimento de determinada tarefa e, conseqüentemente, a resolução de um problema. Assim, os fluxogramas são ferramentas que auxiliam grandemente a tarefa de codificação de um programa (PEREIRA, 2007).

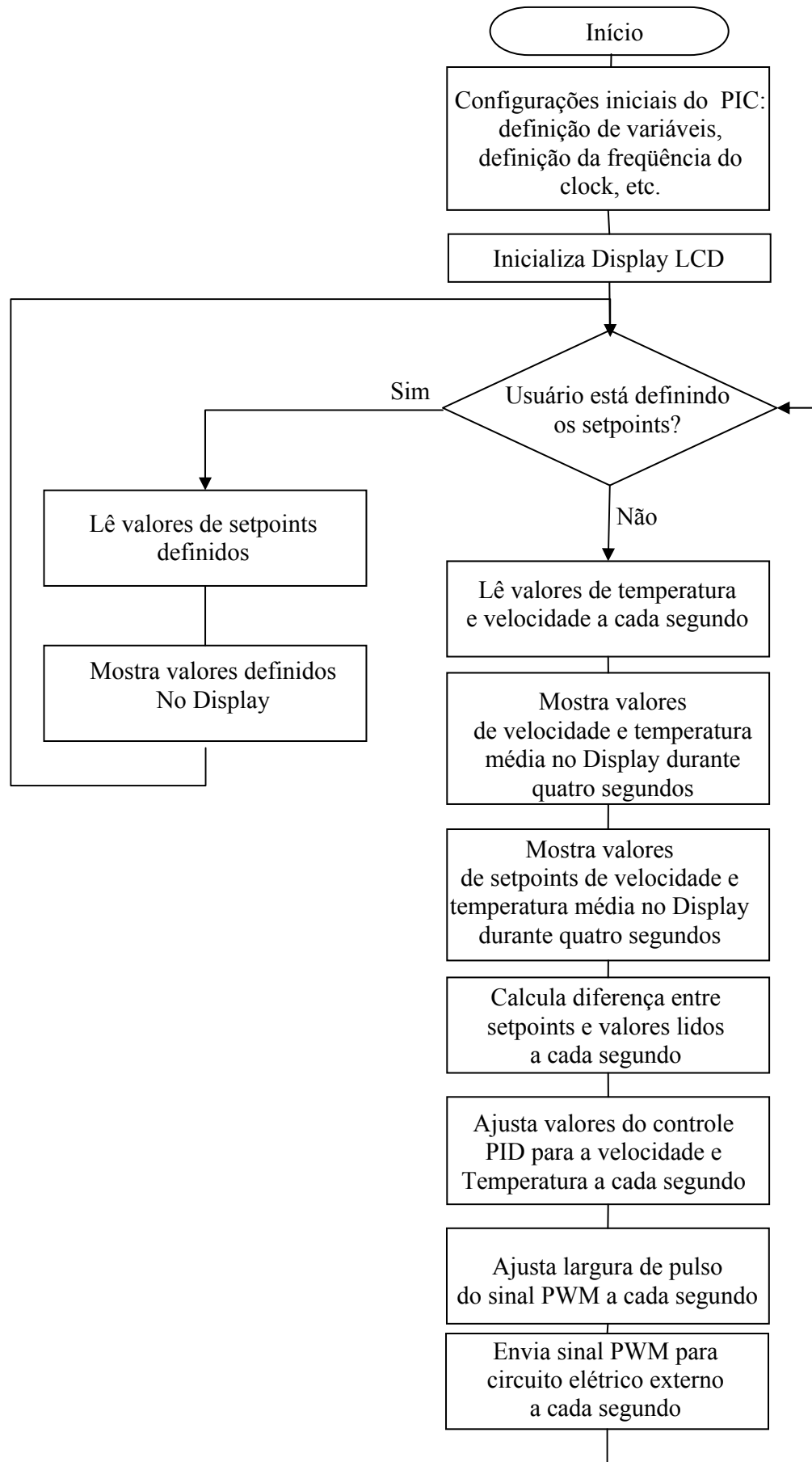


Figura 27 – Fluxograma do programa computacional

A Figura 28 apresenta a placa confeccionada com alguns dos componentes utilizados no desenvolvimento do sistema de controle de velocidade e temperatura do ar de secagem.

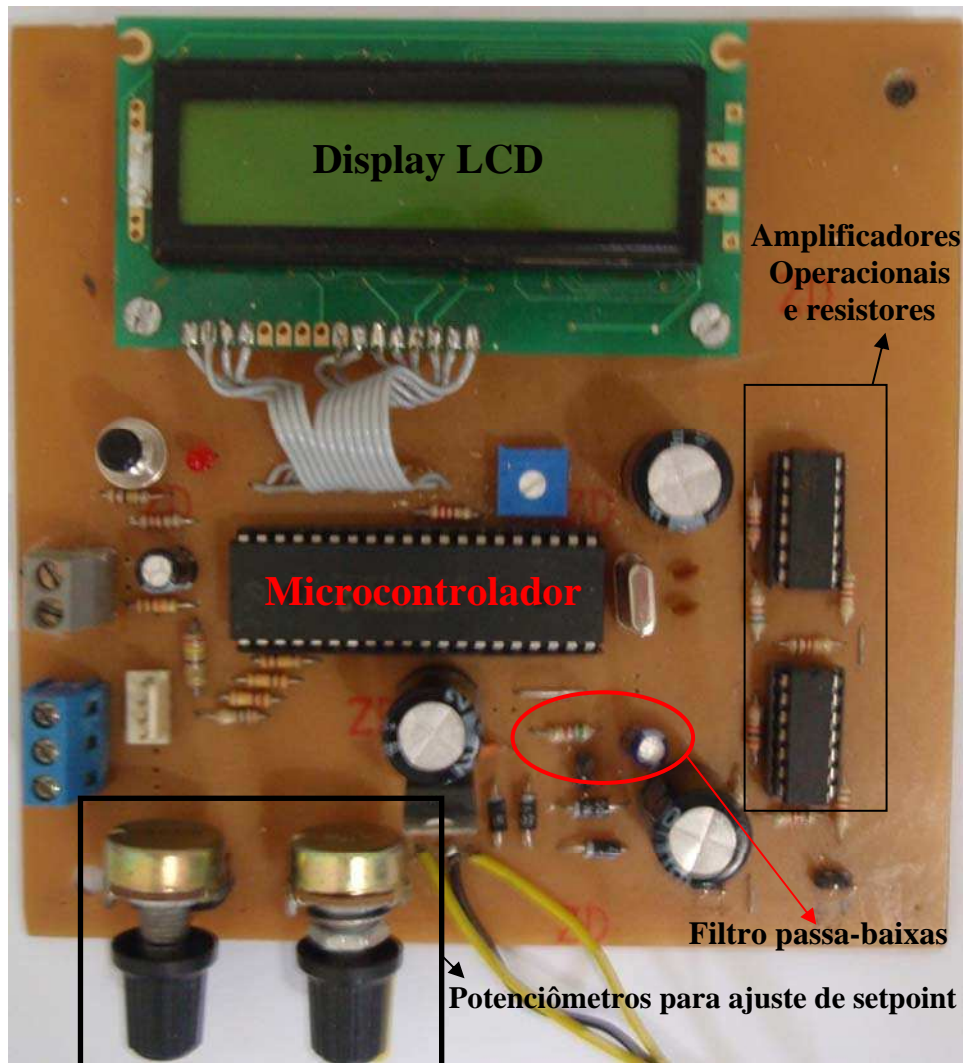


Figura 28 – Placa do circuito impresso utilizado no controle

3.6 Metodologia utilizada na secagem do Capim Limão

Com o intuito de verificar a eficácia do sistema de controle realizado, foi realizada a secagem da planta Capim-Limão (da espécie *Cymbopogon citratus* (D.C.) Stapf), planta medicinal que é amplamente conhecida e utilizada em diversos países e tem seu uso e aplicação nas indústrias farmacêuticas, alimentícias, de cosméticos e perfumaria (MARTINAZZO, 2006).

Foram utilizadas plantas provenientes de uma plantação do campus da UFV, com aproximadamente 3 meses de idade, conforme Figura 29. A colheita foi realizada em três dias (09, 11 e 13 de março de 2009). A altura de corte foi definida em 20 cm a partir da extremidade da folha. O material foi encaminhado ao Laboratório de Secagem, para seleção, determinação do teor de água e armazenamento em câmaras frias a 5 ± 1 °C (MARTINS, 2000).



Figura 29 - Plantação de Capim-Limão

3.6.1 Seleção, corte, armazenamento e determinação do teor de água

As folhas foram selecionadas, retirando-se as partes doentes e danificadas, assim como qualquer parte de outro vegetal ou material estranho. Logo depois o produto foi homogeneizado.

Segundo (MARTINAZZO, 2006), as folhas no comprimento de corte de 2 cm e 5 cm submetidas à secagem, resultaram em maior rendimento de óleo essencial, em relação às folhas secas no tamanho de 20 e 30 cm. Dessa forma, optou-se, nesse trabalho, que as folhas fossem picadas com comprimento de

aproximadamente 2 cm, conforme Figura 30. Após o corte, a planta foi colocada em embalagens plásticas que foram vedados e armazenadas em câmaras frias a 5 ± 1 °C.



Figura 30 – Capim-Limão em comprimentos de corte de 2 cm

A determinação do teor inicial de água foi realizada segundo a metodologia recomendada por MARTINAZZO, 2006. Foram utilizadas 25g de produto, em três repetições, em estufa com circulação forçada de ar a 103 ± 2 °C, durante 24 horas.

3.6.2 Experimento realizado para a secagem

Nesse experimento, foi avaliada a secagem apenas na temperatura de 50 °C, pois de acordo com (MARTINAZZO, 2006), essa foi a temperatura do ar de secagem que demonstrou ser a mais indicada para a secagem da espécie em estudo. No entanto, foram avaliadas três velocidades do ar de secagem: $0,8 \text{ m s}^{-1}$, $1,3 \text{ m s}^{-1}$ e $1,8 \text{ m s}^{-1}$.

Com o intuito de manter a temperatura constante em 50 °C foi utilizado o sistema de controle projetado de acordo com o que já foi descrito nesse trabalho. O controle de velocidade do ar de secagem foi feito através de dois mecanismos:

1. Utilizando o *controle manual* de abertura de um cone invertido acoplado ao duto de entrada de ar do ventilador mantendo o motor em sua velocidade e frequência nominais, conforme exibido na Figura 31;
2. Utilizando o *controle automático* também projetado neste trabalho, onde a velocidade do motor é ajustada através do inversor de frequência Siemens G110, mostrado na Figura 32.

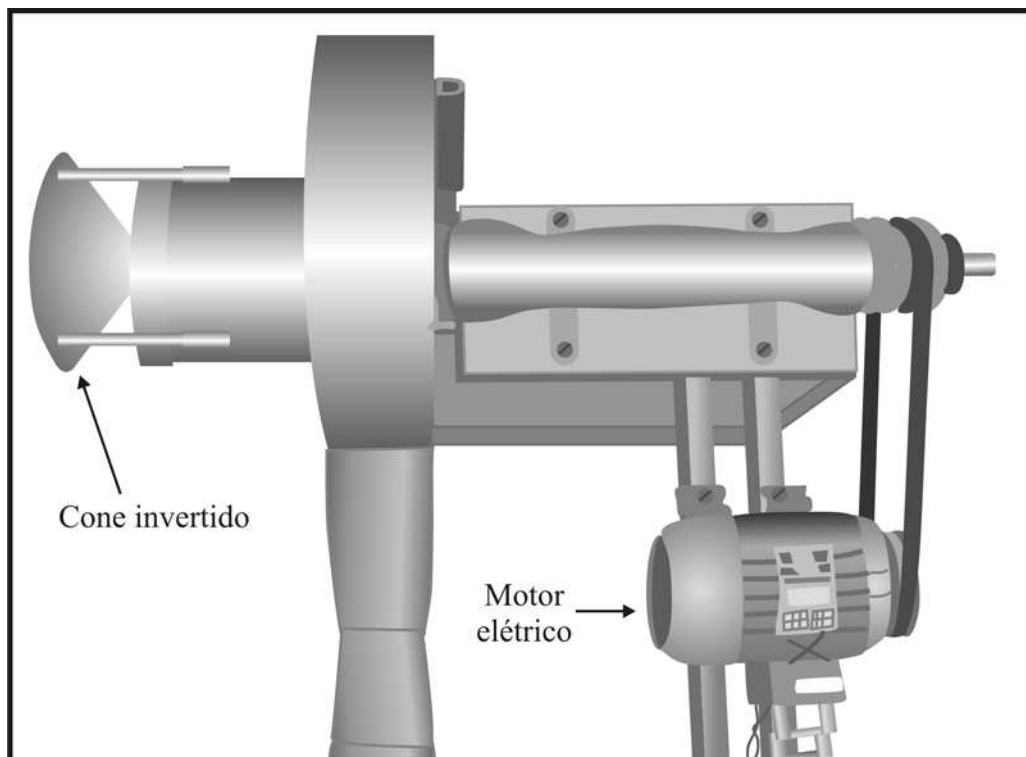


Figura 31 – Cone Invertido para controle manual da velocidade do ar



Figura 32 – Inversor de Freqüência Siemens G110, para controle automático da velocidade do ar

Durante a secagem, a bandeja foi carregada com 250,0 g do produto, perfazendo uma camada de 5 cm de espessura na gaveta, e realizadas três repetições para cada uma das três velocidades, variando também o mecanismo de controle de velocidade.

Segundo (MARTINS, 2000) em análises preliminares da secagem das folhas de capim-limão, observou-se a rápida perda de massa durante a primeira hora. Nas horas seguintes o processo tornava-se mais lento, até o ponto em que a diferença nas massas que geravam diminuição nos valores de teor de umidade foi obtida aproximadamente a cada 30 minutos. Dessa forma, optou-se por adotar a metodologia descrita por (MARTINS, 2000), onde a perda de massa foi medida na primeira hora a cada 10 minutos, na segunda hora a cada 20 minutos e nas horas seguintes a cada 30 minutos.

As pesagens foram feitas em balança semi-analítica digital de precisão. A secagem foi interrompida quando na bandeja o produto apresentara teor de umidade final de aproximadamente 0,11 b.s., pois de acordo com FARIAS (2003), o teor de água final estabelecido nas diferentes farmacopéias varia entre 0,87 e 0,06 b.s, havendo raras exceções. Como a bandeja era carregada com 250,0 g do produto, e já conhecíamos o teor inicial e final de água desejado, foi calculada a massa final desejada do produto através da seguinte equação:

$$m_f = m_i \times \left(\frac{100 - U_i}{100 - U_f} \right) \quad (14)$$

Em que:

U_i = Teor inicial de água (b.u. (%));

U_f = Teor inicial de água (b.u. (%));

m_i e m_f = Massa inicial e final do produto (g), respectivamente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Ensaio em Vazio

Antes de qualquer ensaio com secagem de plantas, foram realizados ensaios em vazio a fim de verificar se o sistema estava agindo conforme o esperado. Dessa forma, procurou-se testar o sistema para diferentes valores de set point (valores pré-definidos e desejados em regime permanente durante a secagem) para a temperatura e a velocidade do ar dentro do secador.

Durante esses testes foram registradas a energia consumida, a temperatura ambiente e a frequência do inversor de frequência. As temperaturas escolhidas para os ensaios foram 40 °C, 60 °C e 80 °C. As velocidades do ensaio em vazio foram de 1,0 m s⁻¹ e 1,5 m s⁻¹. Não foi possível a aquisição de dados de velocidade diretamente no computador, como foi feito para a temperatura. Os valores de velocidade eram mostrados no Display LCD de quatro em quatro segundos, conforme fluxograma do programa computacional.

A Figura 33 mostra o comportamento do sistema para o setpoint de temperatura de 40 °C e de velocidade de 1,0 m s⁻¹. Durante a aquisição desses dados, a temperatura ambiente registrada foi cerca de 26,7 °C. A primeira vez que o sistema atingiu o set point de temperatura (40 °C), também chamado de tempo de subida (tempo requerido para que a resposta passe de 0% a 100% do valor final (OGATA, 2003)), foi atingido aproximadamente aos 800 segundos com uma energia consumida de 0,1 kWh. Percebe-se uma variação de cerca de 5 °C até os 2000 segundos e após uma oscilação de aproximadamente 2 °C do setpoint estabelecido.

O máximo sobre-sinal (M_p), definido como o máximo valor de pico da curva de resposta em relação ao valor desejado em regime permanente, expresso em porcentagem (OGATA, 2003), pode ser calculado pela Figura 33:

$$M_p = \frac{45,1 - 40}{40} \times 100 = 12,75\% \quad (15)$$

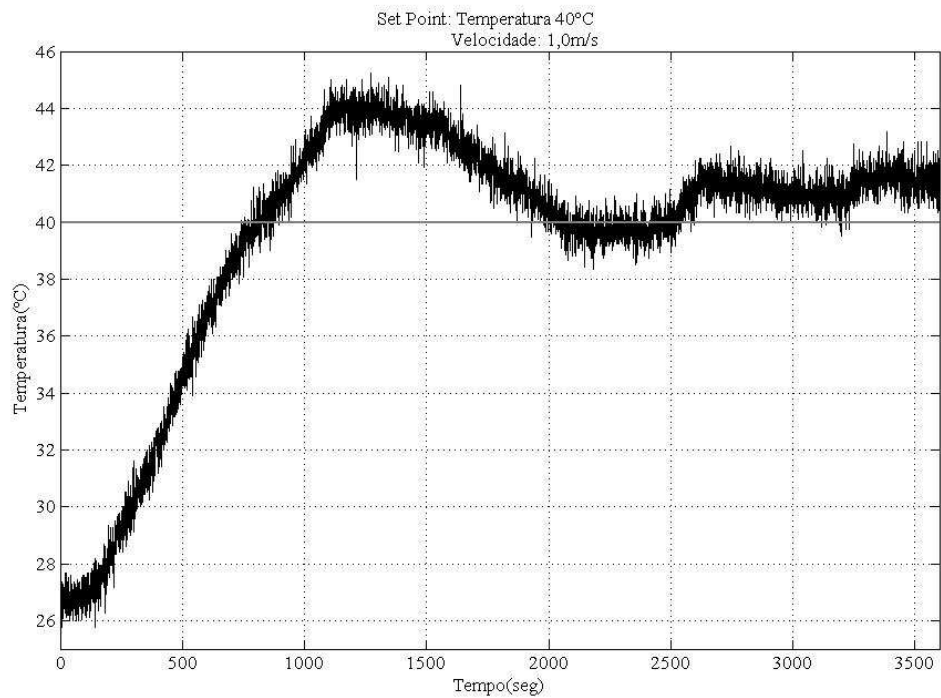


Figura 33 – Ensaio em Vazio para set point de 40 °C e 1,0 m s⁻¹

Durante o ensaio da Figura 33, observou-se no display ligado à saída do PIC, que a velocidade do ar entra em regime permanente em aproximadamente 90 segundos, quando a frequência do inversor estabilizou em 27 Hz.

Já os dados mostrados na Figura 34, fixou-se novamente o set point de temperatura em 40 °C, mas o de velocidade foi 1,5 m s⁻¹, com uma temperatura ambiente monitorada em 29,7 °C. O tempo de subida ocorreu em aproximadamente 900 segundos com uma energia consumida de 0,2 kWh. Neste caso, percebe-se uma variação de cerca de 2 °C do set point após 1000 segundos. O máximo sobre-sinal nesse caso foi de 7%.

Novamente, observou-se no display que a velocidade do ar estabilizou-se em aproximadamente 90 segundos, mas neste caso a frequência do motor observada foi de 38 Hz. Tanto para o ajuste em 1,0 m s⁻¹, quanto para 1,5 m s⁻¹ percebeu-se através do display que a velocidade oscilava 0,1 m s⁻¹ em torno do setpoint ajustado, após o sistema atingir o regime permanente.

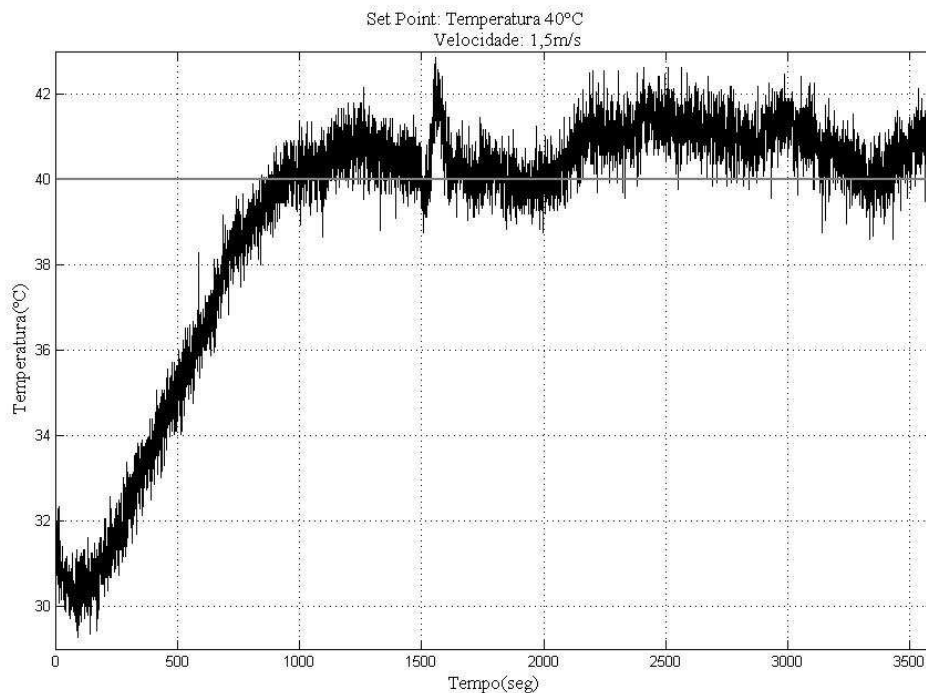


Figura 34 - Ensaio em Vazio para set point de 40 °C e 1,5 m s⁻¹

Para o setpoint de temperatura de 60 °C, fez-se também dois ensaios com as velocidades de 1,0 m s⁻¹ e de 1,5 m s⁻¹, mostrados nas Figuras 35 e 36, respectivamente.

Para a velocidade de 1,0 m s⁻¹ (Figura 35) o set point de temperatura foi atingido em 900 segundos, enquanto que com a velocidade de 1,5 m s⁻¹ (Figura 36) o tempo de subida foi de 1200 segundos. A energia consumida foi de 0,4 kWh e 0,7 kWh nas Figuras 35 e 36, respectivamente. O máximo sobre-sinal foi de 8,67 % para a Figura 35 e de 7% para a Figura 36. Em relação à oscilação da temperatura com relação ao set point, percebe-se na Figura 35 que entre 1000 e 2000 segundos, foi cerca de 5 °C e após os 2500 segundos houve uma variação de 1,5 °C, enquanto que na Figura 36, a oscilação ficou em 3 °C, após 1500 segundos. A temperatura ambiente registrada nos ensaios das Figuras 35 e 36 foram de 32,1 °C e 28,1 °C, respectivamente. Nos dois casos, a velocidade do ar estabilizou-se em 90 segundos, com frequências no motor de 27 Hz e 38 Hz para as velocidades de 1,0 m s⁻¹ e 1,5 m s⁻¹, respectivamente.

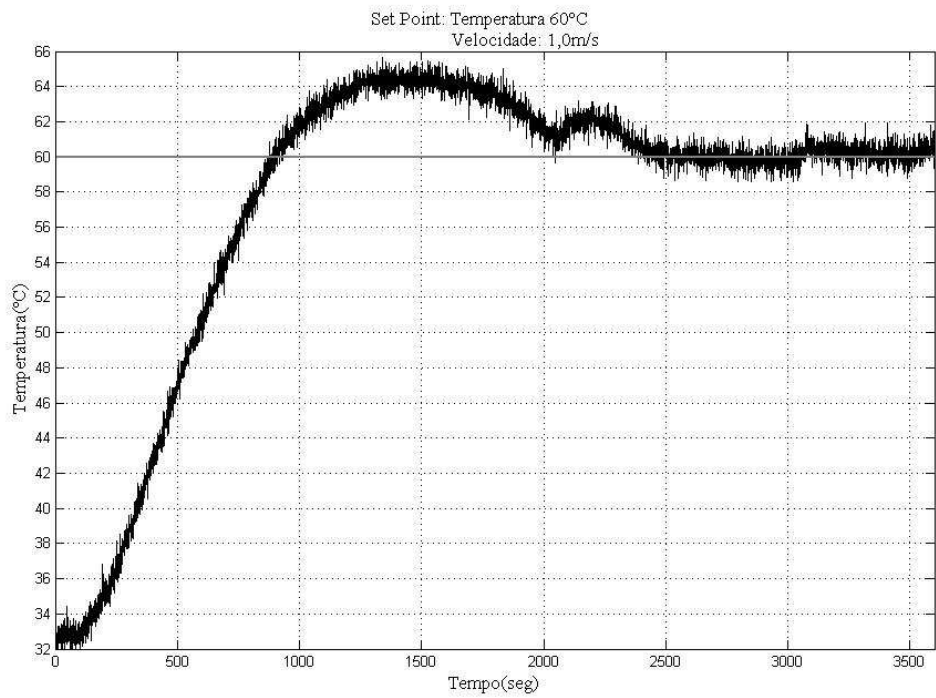


Figura 35 - Ensaio em Vazio para set point de 60 °C e 1,0 m s⁻¹

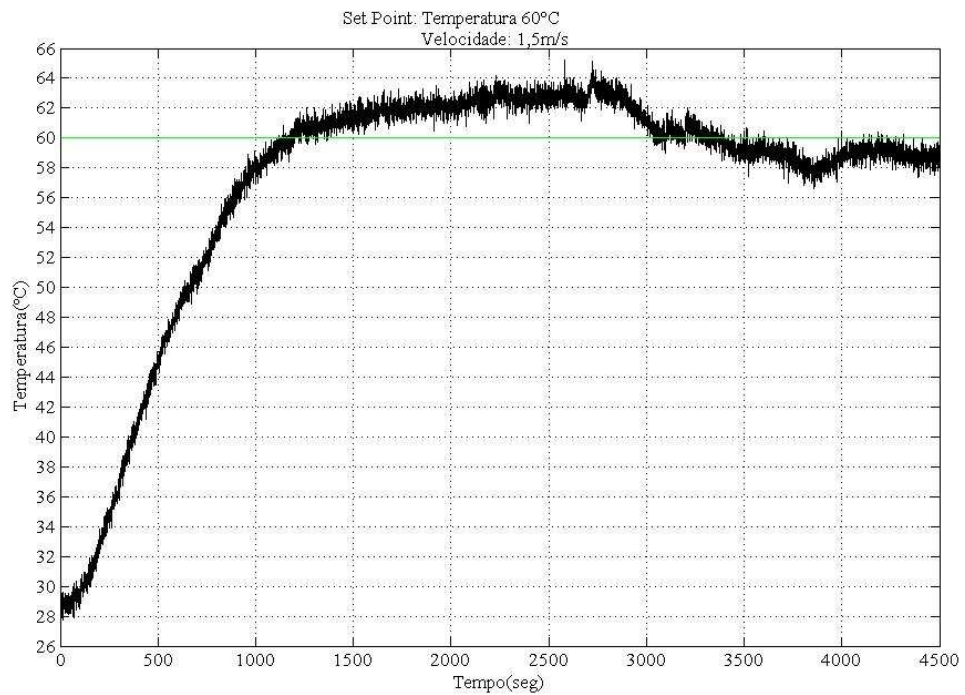


Figura 36 - Ensaio em Vazio para set point de 60 °C e 1,5 m s⁻¹

Os mesmos ensaios realizados com as temperaturas de 40 °C e 60 °C foram repetidos para a temperatura de 80 °C, conforme pode ser observado na Figura 37 e na Figura 38. As observações para os ensaios em vazios são resumidas e mostradas no Quadro 6.

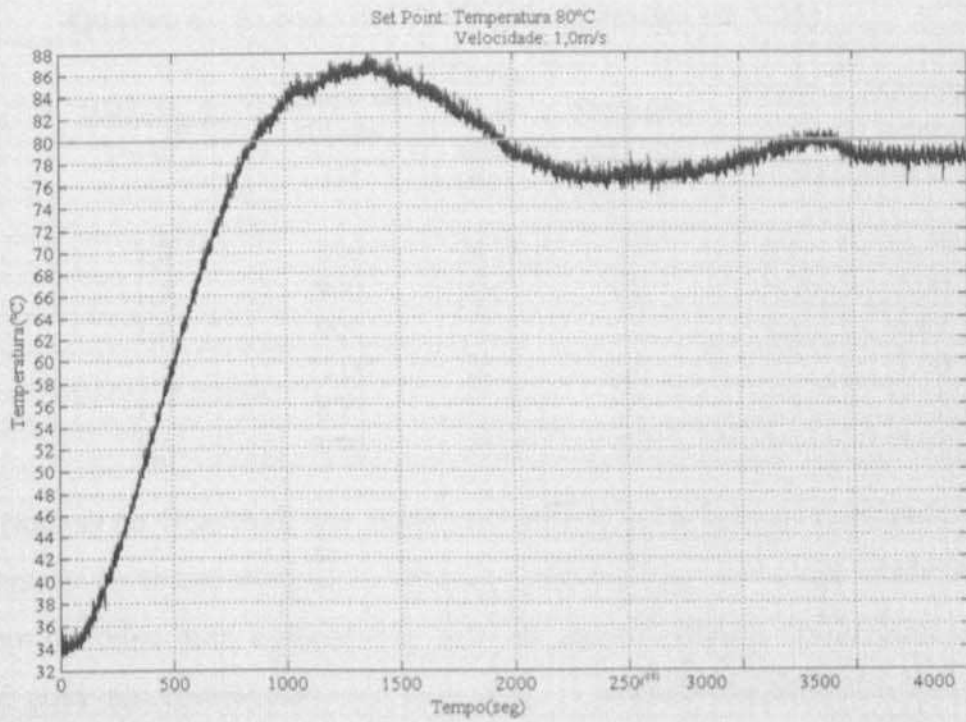


Figura 37 - Ensaio em Vazio para set point de 80 °C e 1,0 m s⁻¹

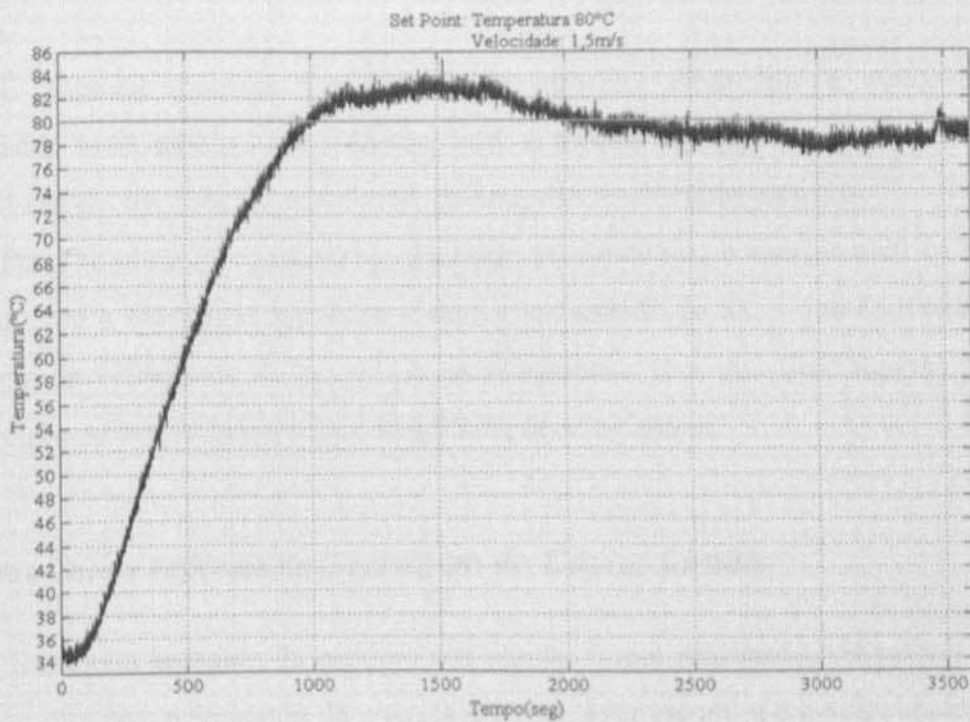


Figura 38 - Ensaio em Vazio para set point de 80 °C e 1,5 m s⁻¹

Quadro 6 – Resumo dos dados para os ensaios em vazio

Temp. (°C)	Velocidade (m s ⁻¹)	Tempo de subida (s)	Temp. Ambiente (°C)	Frequência (Hz)	Energia (kWh)	Máximo sobre-sinal (%)
40	1,0	800	26,7	27	0,1	12,75
40	1,5	900	29,7	38	0,2	7,00
60	1,0	900	32,1	27	0,4	8,67
60	1,5	1200	28,1	38	0,7	7,00
80	1,0	850	32,4	27	0,8	9,25
80	1,5	950	31,1	38	1,1	5,62

Nota-se no Quadro 6, que existe uma grande influência da velocidade do ar no controle da temperatura do ar. Ou seja, podemos dizer que a velocidade atua como um distúrbio para o sistema de controle de temperatura. Outro fator que também pode ser considerado um distúrbio é a temperatura ambiente, pois a temperatura interna inicial do ar de secagem se altera de acordo com seu valor.

Percebe-se também que o sistema possui um tempo de subida muito elevado.

É possível observar também que o máximo sobre-sinal é maior em velocidades mais baixas, em sistemas com a mesma temperatura. Isso ocorre devido à inércia no sistema para o resfriamento das resistências elétricas.

Pode se observar também um aumento no consumo de energia elétrica em sistemas com a mesma temperatura e maior velocidade do ar, o que confirma a influência da velocidade do ar, já que as resistências têm que ficar ligadas por mais tempo, ou seja, a largura do pulso PWM deve ser maior.

4.2 Resultados referentes à secagem do Capim Limão

Durante a secagem do produto em estudo, foram registrados os valores da massa do produto, o consumo de energia elétrica, a temperatura e a velocidade do ar de secagem.

4.2.1 Secagem utilizando o controle manual de velocidade do ar

No Quadro 7 são apresentados os teores inicial e final de água, os valores médios da temperatura do ar de secagem e do tempo total de secagem, com os respectivos desvios padrões, para os tratamentos de secagem com as velocidades de $0,8 \text{ m s}^{-1}$, $1,3 \text{ m s}^{-1}$ e $1,8 \text{ m s}^{-1}$.

Quadro 7 – Parâmetros avaliados durante a secagem de capim limão utilizando-se o controle manual de velocidade

Velocidade do ar de secagem (m s^{-1})	Teor inicial de água (decimal, b.s.)	Teor final de água (decimal, b.s.)	Tempo de secagem (min)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
0,8	$3,12 \pm 0,31$	$0,13 \pm 0,01$	220 ± 20	$50,3 \pm 0,96$
1,3	$3,12 \pm 0,31$	$0,11 \pm 0,01$	200 ± 10	$49,9 \pm 1,23$
1,8	$3,12 \pm 0,31$	$0,12 \pm 0,02$	190 ± 10	$50,2 \pm 0,87$

É importante dizer que a velocidade descrita no Quadro 7 é a velocidade inicial do processo de secagem. Pôde-se observar durante a secagem que houve um aumento da velocidade à medida que o teor de água da planta diminuía, conforme pode ser visto na Figura 39, onde foram registrados os dados de velocidade antes de cada pesagem. Esse fato ocorreu, pois as plantas com menos água permitiam a abertura de espaços entre elas, aumentando a velocidade do ar na bandeja de secagem.

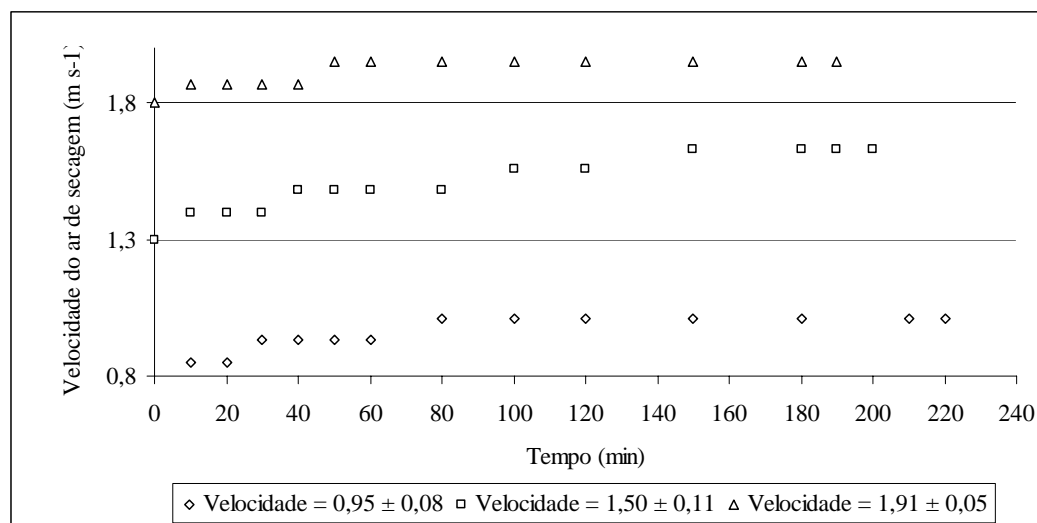


Figura 39 – Variação da velocidade durante a secagem com controle manual.

Em relação à temperatura, nota-se através da Figura 40, que após ligar o sistema, esperou-se que o sistema atingisse aproximadamente os 50 °C logo após seu sobre-sinal para então colocar a planta dentro do secador. Nesse momento, a temperatura média, que é a variável de controle, cai para 41 °C em 50 segundos, pois a planta, com alto teor de umidade, faz uma barreira entre o sensor de temperatura abaixo da bandeja e o sensor acima dela. Isso faz com que a temperatura média caia e faz com que o sistema reaja automaticamente até a temperatura média de 50 °C ser atingida novamente, em aproximadamente 15 minutos após o início da secagem.

A Figura 40 mostra uma das repetições da secagem realizada utilizando-se do sistema com o controle manual de velocidade, quando a mesma foi fixada em $1,3 \text{ m s}^{-1}$. Para esse caso específico a média e o desvio padrão da temperatura durante a secagem foi de $49,9 \pm 1,23 \text{ }^\circ\text{C}$. Esse valor elevado do desvio padrão é devido justamente à queda brusca da temperatura no início da secagem. O comportamento da temperatura em todas as repetições seguiu a mesma tendência apresentada na Figura 40.

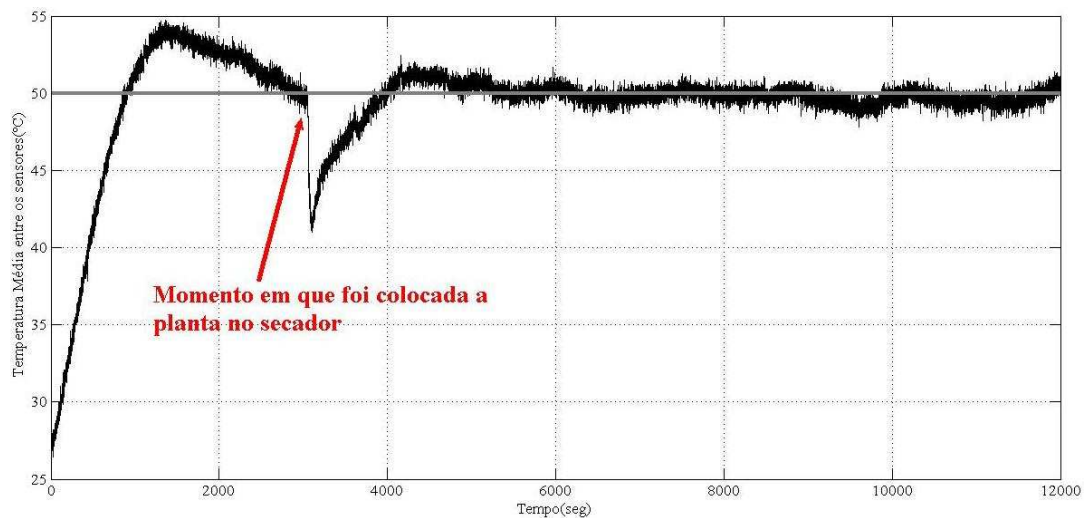


Figura 40 – Variação da temperatura média durante o processo de secagem utilizando o método manual de controle da velocidade do ar de secagem.

A curva de variação do teor de água da planta em função do tempo de secagem, submetida a 50 °C e a três diferentes velocidades do ar de secagem, é apresentada na Figura 41.

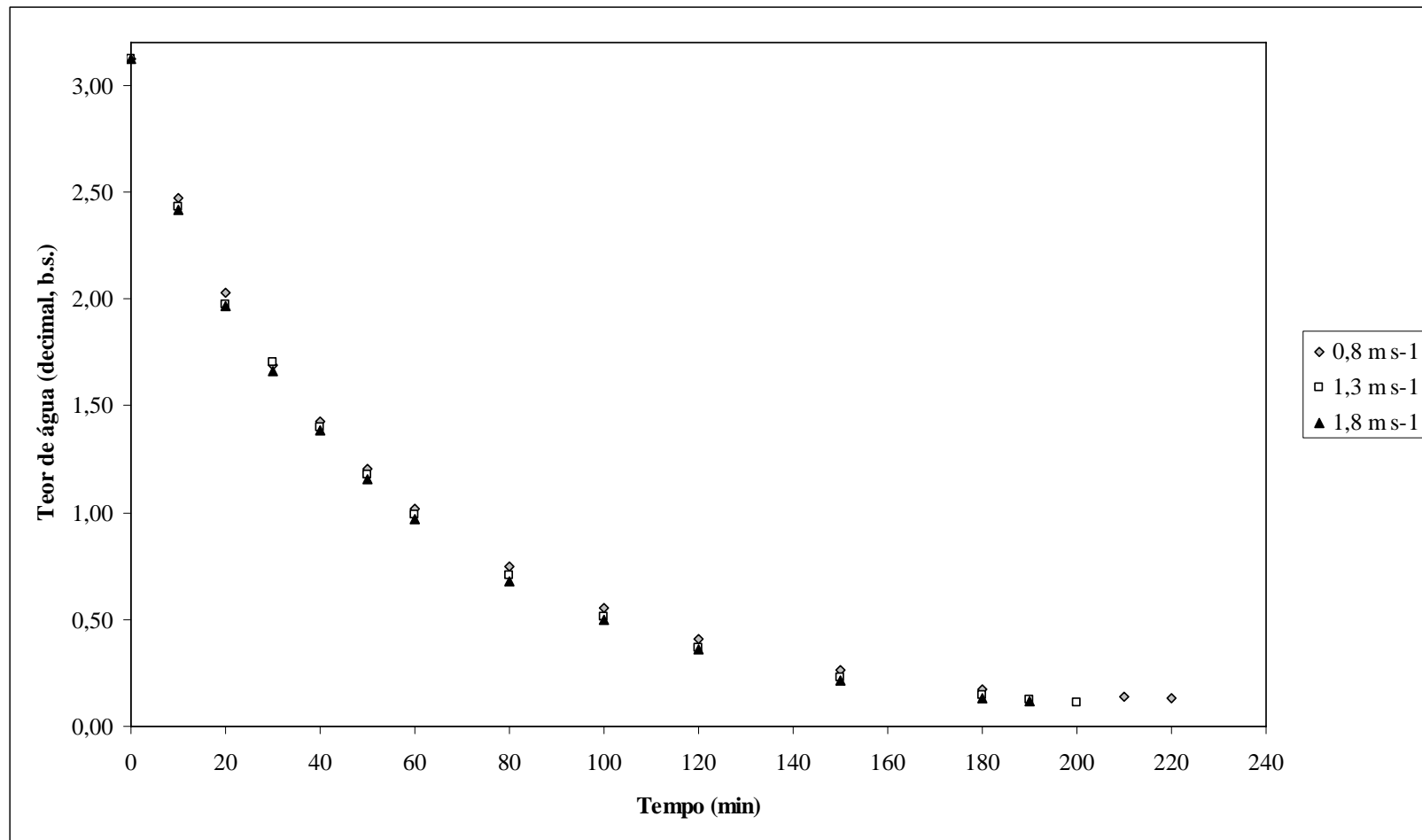


Figura 41 – Valores médios registrados para o teor de água da planta em diferentes velocidades iniciais em função do tempo de secagem, utilizando-se o controle manual de velocidade.

Conforme esperado, o aumento da velocidade do ar de secagem aumentou a taxa de secagem e conseqüentemente diminuiu o tempo total de secagem. Através do Quadro 8, pode-se notar a diferença relativa percentual entre os tempos de secagem para as três velocidades de secagem. Esse comportamento também foi observado por MARTINS (2000), secando a mesma espécie de planta, que verificou que a 50 °C houve uma diferença relativa percentual de 3,8 % no tempo de secagem entre as velocidades de 0,5 m s⁻¹ e 1,0 m s⁻¹.

Quadro 8 – Diferença Relativa Percentual entre os tempos de secagem para diferentes velocidades do ar de secagem

			Diferença Relativa
Velocidade (m s ⁻¹)	0,8	1,3	
Tempo (min)	220	200	9,09 %
Velocidade (m s ⁻¹)	0,8	1,8	
Tempo (min)	220	190	13,64 %
Velocidade (m s ⁻¹)	1,3	1,8	
Tempo (min)	200	190	5,00%

4.2.2 Secagem utilizando o controle automático de velocidade do ar

Os mesmos testes realizados para o controle manual foram repetidos utilizando-se o controle automático da velocidade do ar de secagem. No Quadro 9 são apresentados os parâmetros avaliados durante a secagem.

Quadro 9 - Parâmetros avaliados durante a secagem de capim limão utilizando-se o controle automático de velocidade

Velocidade do ar de secagem (m s ⁻¹)	Teor inicial de água (decimal, b.s.)	Teor final de água (decimal, b.s.)	Tempo de secagem (min)	Temperatura (°C)
0,8	3,12 ± 0,31	0,11 ± 0,09	220 ± 20	50,4 ± 0,97
1,3	3,12 ± 0,31	0,11 ± 0,01	200 ± 10	49,9 ± 0,92
1,8	3,12 ± 0,31	0,12 ± 0,01	190 ± 10	50,4 ± 0,84

Em relação ao tempo de secagem médio, não houve variação em relação à secagem realizada utilizando-se o controle manual de velocidade. Para esse caso, a velocidade se manteve constante durante todo o processo de secagem. Isso foi possível, pois a frequência aplicada ao motor era automaticamente ajustada

quando o teor de água da planta diminuía. Ou seja, à medida que eram abertos espaços entre as plantas, automaticamente a frequência do motor de indução trifásico era diminuída e a velocidade se mantinha constante na bandeja de secagem.

O mesmo comportamento verificado na variação inicial da temperatura média do ar também ocorreu durante a secagem utilizando-se o controle automático de velocidade do ar, conforme pode ser observado na Figura 42, para a velocidade do ar de secagem de $1,3 \text{ m s}^{-1}$. Para esse caso específico a média e o desvio padrão da temperatura durante a secagem foi de $49,9 \pm 0,92 \text{ }^\circ\text{C}$. Esse valor elevado do desvio padrão é novamente devido à queda brusca da temperatura no início da secagem. A temperatura média caiu para $42,5 \text{ }^\circ\text{C}$ em 35 segundos.

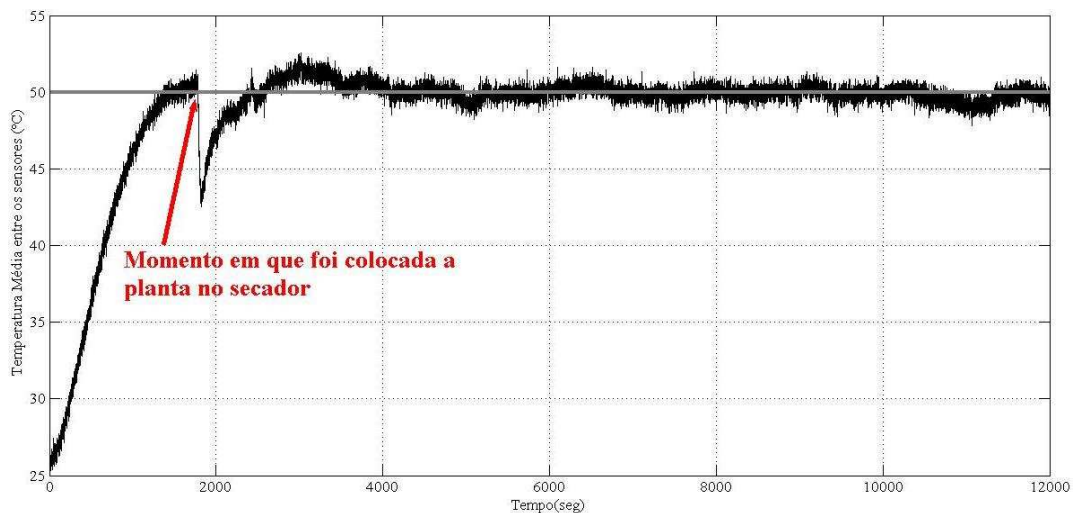


Figura 42 - Variação da temperatura média durante o processo de secagem utilizando o método automático de controle da velocidade do ar de secagem.

A escolha do momento em que a planta deveria ser colocada no secador foi escolhida após análises prévias. Percebeu-se que mesmo esperando pelo sobre-sinal ou por uma maior estabilização da temperatura, ao se colocar a planta a temperatura média sofria a mesma queda e o processo de re-estabilização da temperatura demorava os mesmos 15 minutos. Assim, para evitar um maior consumo de energia, decidiu-se por colocar a planta logo após o tempo de subida.

A variação do teor de água da planta em função do tempo de secagem, submetida a $50 \text{ }^\circ\text{C}$ e às mesmas três velocidades do ar de secagem, é apresentada na Figura 43.

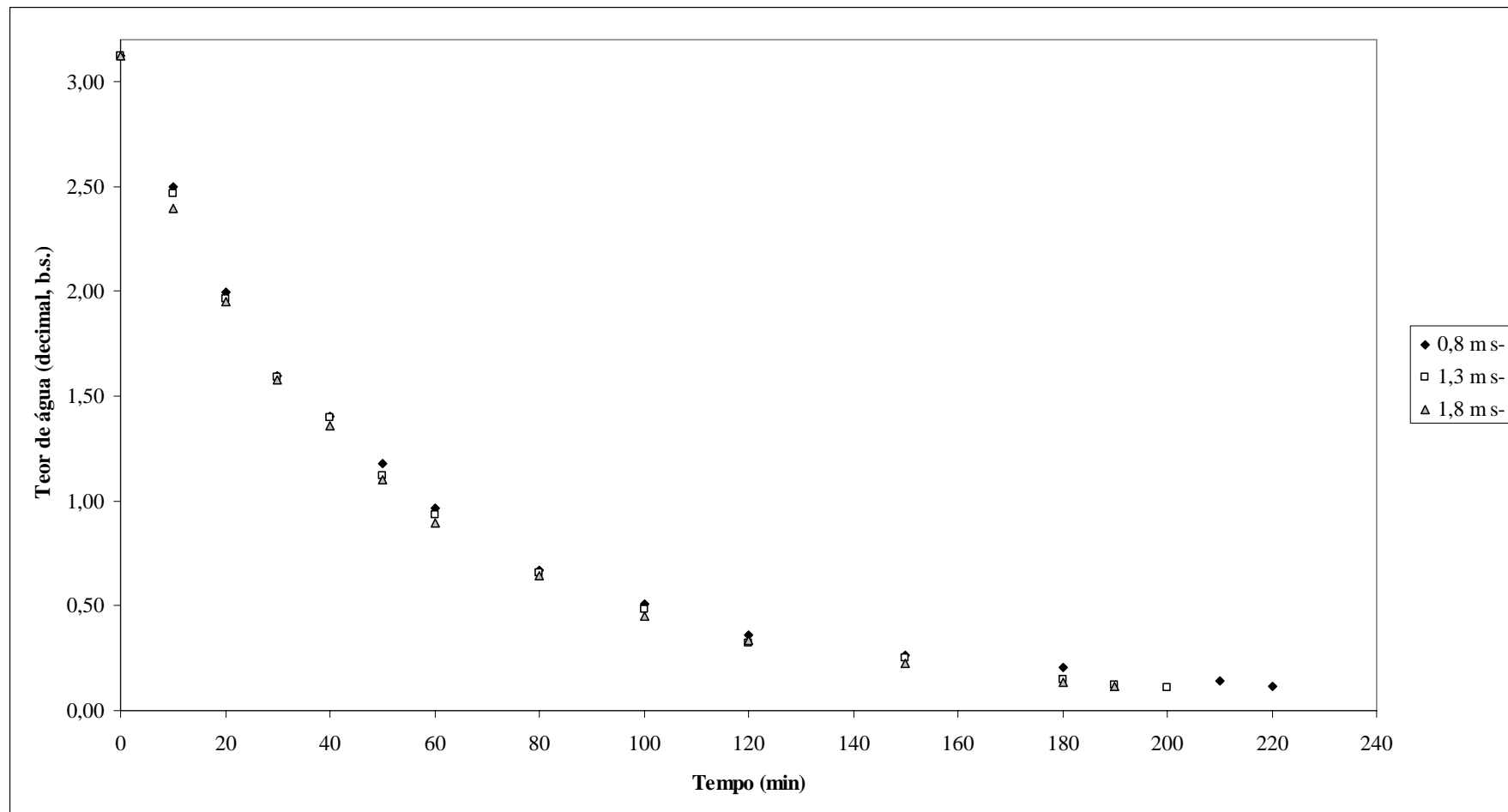


Figura 43 - Valores médios registrados para o teor de água da planta em diferentes velocidades iniciais em função do tempo de secagem, utilizando-se o controle automático de velocidade.

Em relação ao método de secagem utilizado, percebe-se através da Figura 44, onde é mostrada a variação do teor de água a $0,8 \text{ m s}^{-1}$ para o método manual e para o método automático, que não houve variação significativa do durante o processo de um método para o outro.

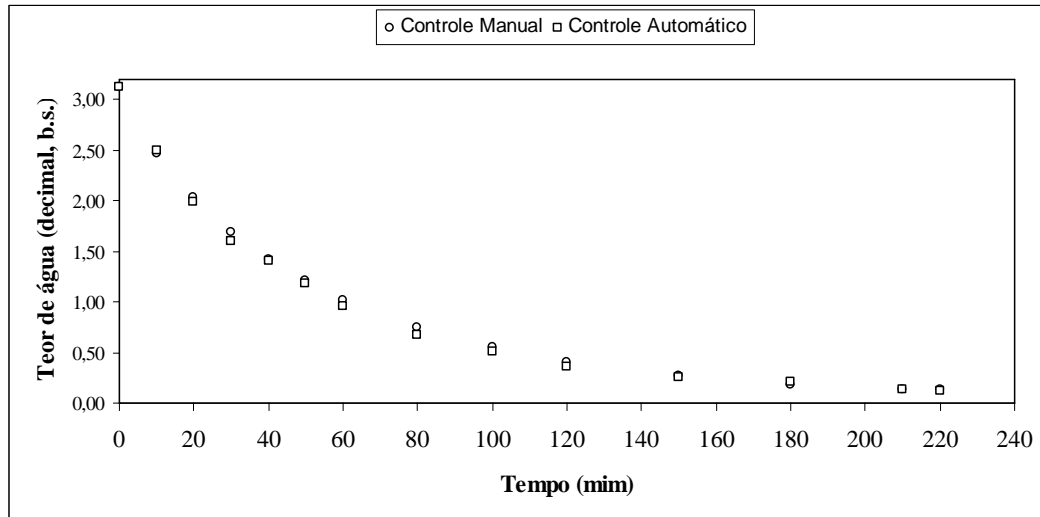


Figura 44 – Comparação entre a secagem utilizando o controle manual e a secagem utilizando o controle automático para a velocidade inicial de $0,8 \text{ m s}^{-1}$

4.2.3 Avaliação do consumo de energia elétrica

O consumo de energia elétrica foi registrado por um medidor de energia trifásico, que media o consumo total do processo, ou seja, o consumo das resistências elétricas e o consumo do motor de indução.

O Quadro 10 apresenta a média do consumo medido nas três repetições para todas as velocidades de secagem, além dos respectivos desvios padrões. O Quadro 10 também mostra a diferença relativa percentual em relação à média dos consumos registrados utilizando-se o controle automático de velocidade e o controle manual. Apesar de em baixas velocidades a duração do tempo de secagem ser maior, verificamos novamente que quanto maior a velocidade do ar, maior o consumo, o que demonstra mais uma vez a influência da velocidade do ar no controle da temperatura.

Quadro 10 – Diferença entre o consumo de energia elétrica do secador para os métodos de controle manual e automático de velocidade

Velocidade (m s ⁻¹)	Média do consumo (kWh)		Diferença Relativa
	Controle Automático	Controle Manual	
0,8	4,7 ± 0,42	4,9 ± 0,26	4,76%
1,3	5,0 ± 0,36	5,3 ± 0,40	5,06%
1,8	5,8 ± 0,26	6,3 ± 0,50	7,95%

Podemos verificar através do Quadro 10 que a utilização do Inversor de Frequência para o controle de velocidade do motor diminui o consumo de energia elétrica no processo de secagem. No entanto, nota-se que o desvio padrão encontrado foi relativamente elevado. Isso ocorre, pois tínhamos a influência da temperatura ambiente durante os vários ensaios de secagem.

Como o intuito dessa comparação era verificar a diferença de consumo devido à utilização do controle automático, foram medidas através do método dos três wattímetros a potência média do motor em cada ensaio. E, como sabemos o tempo total de secagem foi possível estimar o consumo de energia elétrica do motor de indução trifásico durante a secagem.

Dessa forma, foi possível construir o Quadro 11, que apresenta os valores de potência média registrados durante a secagem, além do valor do consumo de energia elétrica. O tempo médio de secagem foi convertido de minutos para horas. O consumo de energia foi calculado através da equação:

$$E = P \times t \quad (16)$$

Em que:

E = Consumo de energia elétrica (kWh);

P = Potência Média (kW);

t = Tempo (h).

Através desses dados, podemos perceber a real diferença percentual de consumo de energia elétrica devido à utilização do controle automático em relação ao controle manual. Isso ocorreu, pois no controle manual a frequência no motor,

a tensão e sua rotação, são fixadas nos valores nominais do motor, que são 60 Hz, 220V e 1710 RPM. Durante a secagem, com a velocidade de $0,8 \text{ m s}^{-1}$, $1,3 \text{ m s}^{-1}$ e $1,8 \text{ m s}^{-1}$, verificamos que a frequência mostrada no inversor de frequência foi de aproximadamente 19, 23 e 28 Hz, respectivamente, o que certamente reduziu a rotação e a tensão no motor, e conseqüentemente o seu consumo de energia.

Quadro 11 – Diferença Relativa no consumo de energia elétrica do motor de indução trifásico, utilizando o controle automático e o manual de velocidade

Velocidade (m s^{-1})	Tempo de secagem (h)	Potência Média (W)		Consumo (kWh)		Diferença Relativa Percentual
		Controle Automático	Controle Manual	Controle Automático	Controle Manual	
0,8	3,67	96,0	260,0	0,3520	0,9533	63,08%
1,3	3,33	118,0	260,0	0,3933	0,8667	54,62%
1,8	3,17	150,0	260,0	0,4750	0,8233	42,31%

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 – Conclusões

Nas condições em que os testes foram conduzidos e em função dos resultados obtidos pode-se concluir que:

- a) o sistema de controle projetado se mostrou eficiente para controlar adequadamente a temperatura e a velocidade do ar de secagem durante todo o processo;
- b) a utilização do controle automático de velocidade do ar de secagem durante o processo implicou em significativa economia de energia no motor elétrico na ordem de 42%, 54% e 63% para as velocidades de 1,8, 1,3 e 0,8 m s⁻¹, respectivamente.

5.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros

São propostas as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- (i) Avaliar a possibilidade de redimensionar as resistências elétricas, com o objetivo reduzir o consumo de energia elétrica.
- (ii) Reajustar as constantes PID do controle de temperatura através de métodos avançados com o objetivo de eliminar o erro residual do processo.
- (iii) Realizar a aquisição dos dados de velocidade do ar de secagem através de um computador, da mesma forma que foi realizado com a temperatura.
- (iv) Acrescentar um sensor para monitoração e controle da umidade relativa do ar de secagem.
- (v) Implementar um dispositivo capaz de realizar a pesagem periódica da planta, sem a necessidade de retirar a mesma de dentro do secador, e então converter para teor de umidade da planta.
- (vi) Desenvolver um modelo matemático que descreva o sistema de controle de temperatura e velocidade do ar de secagem para simulação em computador.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, P. U. B. Sensores Industriais: fundamentos e aplicações – 1. ed. – São Paulo: Editora Érica, 2005;

ARAÚJO, O. G. Desenvolvimento de um Umidificador de Ar para uma Estufa Utilizando Técnicas de Controle PID. 51f. Trabalho de conclusão do curso de Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Viçosa – MG, 2008.

BARREIRO, P.; NAVAS, L. M. Supervisión y control en ingeniería de procesos agroalimentarios. Revista Alimentación. Equipos y Tecnología. V. 181, p. 90-94, 2003.

BASCOPE, R. P. T., Eletrônica de Potência: Projeto de Fontes Chaveadas. 1ª ed. Florianópolis: Ed. dos Autores, 2002.

BROOKER, D. B., BAKKER-ARKEMA, F. W., HALL, C. W. Drying and storage of grains and oilseeds. Westport: AVI, 1992. 450p.

DORF, RICHARD C; BISHOP, ROBERT H. Sistemas de Controle Modernos; tradução Bernardo Severo da Silva Filho... [et al.]. – 8. ed. – Rio de Janeiro: LTC Editora, 2003.

FARIAS, M.R. Avaliação da qualidade de matérias-primas vegetais. In: SIMÕES, C.M.O et al. Farmacognosia: da planta ao medicamento. 5. ed. Porto Alegre / Florianópolis: Editora UFRGS / Editora UFSC, p. 263-288, 2003.

GIL, J. G. Curso Práctico sobre la Programacion de Microcontroladores. Universidad de Valladolid, Valladolid, 2006.

LORENZI, H.; MATOS, F.J. de A. Plantas medicinais no Brasil: nativas e exóticas. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2002.

MARTINAZZO, A. P. Secagem, Armazenamento e Qualidade de Folhas de *Cymbopogon Citratus* (D.C.) Stapf. 156f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa – MG 2006.

MARTINS, P. M. Influência da temperatura e da velocidade do ar de secagem no teor e na composição química do óleo essencial de capim-limão (*Cymbopogon citratus* (D. C.) Stapf). 77f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa – MG, 2000.

MICROCHIP, 2003. Data Sheet PIC 16F877A. Disponível em www.microchip.com. Acesso em fevereiro de 2009;

MOHAN, N., Undeland, T. M., Robins, W. P., Power Eletronics – Converters, Applications and Design. John Wiley & Sons, Inc., Ed 2, 1995.

OGATA, KATSUHIKO. Engenharia de controle moderno; tradução Paulo Álvaro Maya; revisão técnica Fabrizio Leonardi ... [et al.]. – 4. ed. – São Paulo: Prentice Hall, 2003.

PEREIRA, F. Microcontroladores PIC: Técnicas Avançadas. – 3. ed. – São Paulo: Editora Érica, 2004;

POMILIO, J. A. Apostila Didática de Eletrônica de Potência. Universidade Estadual de Campinas - Campinas - SP, 2008.

RADÜNZ, L. L. Efeito da temperatura do ar de secagem no teor e na composição dos óleos essenciais de guaco (*Mikania glomerata* Sprengel) e hortelã-comum (*Menta x villosa* Huds), Viçosa: UFV, 2004.

RASHID, M. H. Eletrônica de Potência: Circuitos, dispositivos e aplicações; tradução Carlos Alberto Favato; revisão técnica Antonio Pertence Júnior. – São Paulo: Makron Books, 1999;

SANTOS, M.A. Qualidade de Sementes De Trigo Secas sob Utilização de Energia Eletrica e Associada a Gás Liquefeito de Petróleo. Dissertação (Mestrado

em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel – PR, 2007.

SILVA, F. da; CASALI, V.W.D. Plantas medicinais e aromáticas: póscolheita e óleos essenciais. Viçosa, MG: UFV, DFT, 2000.

SOLBET Ltda. Considerações Básicas sobre o PIC16F877. Campinas, 2007. Disponível em www.solbet.com.br. Acesso em fevereiro de 2009;

SOUZA, D. J. Desbravando o PIC: ampliado e atualizado para PIC 16F628A - 11. ed. – São Paulo: Editora Érica, 2007.

WEBER, E.A. Armazenagem Agrícola. Porto Alegre: Keepler Weber Industrial. 400 p.1998.