

DIEGO AUGUSTO GONZAGA

**CONTROLE MULTIVARIÁVEL UTILIZANDO PLATAFORMA
ARDUINO PARA SECADOR DE PLANTAS MEDICINAIS E
SOFTWARE DE AQUISIÇÃO DE DADOS.**

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
2015

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

Gonzaga, Diego Augusto, 1988-

G642c
2015 Controle multivariável utilizando plataforma Arduino para
secador de plantas medicinais e software de aquisição de dados :
./ / Diego Augusto Gonzaga. – Viçosa, MG, 2015.
iv, 41f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexo.

Orientador: Evandro de Castro Melo.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.38-40.

1. Equipamento de secagem. 2. Plantas medicinais.
3. Secagem. 4. Arduino (Controlador programável). 5. Software.
6. Sistemas de informação gerencial. I. Universidade Federal de
Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de
pós-graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

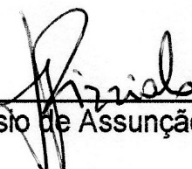
CDD 22. ed. 631.3

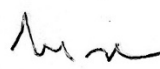
DIEGO AUGUSTO GONZAGA

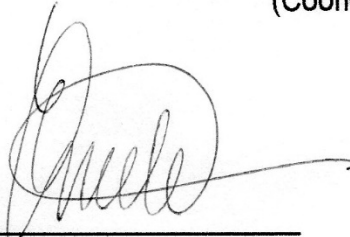
**CONTROLE MULTIVARIÁVEL UTILIZANDO PLATAFORMA
ARDUINO PARA SECADOR DE PLANTAS MEDICINAIS E
SOFTWARE DE AQUISIÇÃO DE DADOS.**

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: 9 de julho de 2015.


Tarcísio de Assunção Pizziolo


Paulo Marcos de Barro Monteiro
(Coorientador)


Evandro de Castro Melo
(Orientador)

Sumário

Resumo.....	iii
Abstract	iv
1 Introdução	1
2 Objetivo	3
3 Revisão Bibliográfica	4
3.1 Controle.....	4
3.1.1 Controle automático	4
3.1.2 Ações de controle.....	5
3.1.3 Sintonia de Controladores.....	6
3.2 Identificação de Sistemas	7
3.3 Arduino.....	9
3.4 Sistemas de medição.....	10
3.4.1 Anemômetro de fio quente.....	11
3.4.2 Termoresistência.....	12
4 Material e Métodos.....	14
4.1 Secador de plantas aromáticas e medicinais	14
4.2 Sistema de Controle	15
4.2.1 Montagem do transdutor de velocidade do ar	15
4.2.2 Montagem do sensor de temperatura.....	18
4.2.4 Filtro de ruídos	20
4.2.5 Atuação sobre a variável Temperatura.....	21
4.2.6 Atuação sobre a variável Velocidade	21
4.2.7 Modelagem	21
4.2.8 Sistema de Controle	25
4.2.9 Interface de comando	28
4.3 <i>Software</i> Supervisório de Secagem.....	28
4.3.1 Versão 2015/1	29
4.3.2 Versão 2015/2	30
5 Resultados e Discussão	33
5.1 Software LSPMC – Supervisório de Secagem.....	33
5.2 Sistema de controle.....	33
6 Conclusão	37
Referências.....	38
Anexo 1.....	41

RESUMO

GONZAGA, Diego Augusto, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2015. **Controle multivariável utilizando plataforma Arduino para secador de plantas medicinais e software de aquisição de dados.** Orientador: Evandro de Castro Melo. Coorientador: Paulo Marcos de Barro Monteiro.

O objetivo deste trabalho foi projetar e desenvolver um controlador para um secador de plantas medicinais e aromáticas, e um sistema de aquisição de dados para a operação do mesmo. As variáveis envolvidas no sistema de controle foram a temperatura e a velocidade do ar de secagem. O trabalho iniciou-se com a instalação e o teste de transdutores de velocidade e de temperatura no secador. Estrategicamente o processo foi dividido duas plantas, uma de velocidade e um de temperatura. Com base nessa divisão e por meio das leituras gerados pelos transdutores foi realizada a identificação não paramétrica do sistema. Após a identificação foram projetados e testados os controladores para as duas plantas. Para o software de aquisição de dados foi desenvolvido um protocolo de comunicação serial entre o Arduino e o software. A avaliação do software foi positiva, atendendo as necessidades de aquisição de dados do processo. O sistema de controle se comportou de maneira satisfatória mantendo o erro das variáveis controladas dentro dos padrões necessários para a garantia da qualidade do produto, obtido no processo de secagem. De acordo com as exigências do processo de secagem podemos concluir que resultados obtidos na implementação do sistema de controle de velocidade e de temperatura do ar de secagem obteve sucesso. O sistema de aquisição dos dados do processo de secagem se mostrou eficaz para a atividade de monitoramento e registro dos dados de secagem.

ABSTRACT

GONZAGA, Diego Augusto, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2015. **Controle multivariável utilizando plataforma Arduino para secador de plantas medicinais e software de aquisição de dados.** Adviser: Evandro de Castro Melo. Co-adviser: Paulo Marcos de Barro Monteiro.

The objective was to design and implement a driver for a dryer of medicinal and aromatic plants, and a data acquisition system for its operation. The variables involved in the control system were drying temperature and air velocity. The work was started with the installation and the speed of testing transducers and temperature in the dryer. Strategically the process was divided two plants, a speed and a temperature. Based on this division and through the readings generated by the transducers was performed at non-parametric system identification. After identifying been designed and tested the drivers for the two plants. For data acquisition software was implemented a serial communication protocol between the Arduino and the software. The software evaluation was positive, meeting the needs of acquisition of process data. The control system behaved satisfactorily keeping the error of the controlled variables within the standards required for quality assurance of the product obtained in the drying process. According to the requirements of the drying process we can conclude that the results obtained in implementation of the drying air speed and temperature control system was successful. The acquisition of the drying process data system met the needs of monitoring and recording of drying data.

1 Introdução

A crescente procura por plantas medicinais, aromáticas e condimentares é observada em diversos países, devido à tendência dos consumidores em utilizarem, preferencialmente, produtos farmacêuticos e alimentícios de origem natural.

O conhecimento sobre plantas medicinais simboliza muitas vezes o único recurso terapêutico de certas comunidades e grupos étnicos. O uso dessas no tratamento de enfermidades remonta aos primórdios da humanidade. No Brasil, ainda hoje, em regiões mais carentes e mesmo nas grandes cidades, as plantas medicinais são comercializadas em feiras, mercados populares e principalmente encontrados em quintais de residências (MACIEL et al., 2001).

Atualmente tem-se verificado grande avanço científico envolvendo os estudos químicos e farmacológicos de plantas medicinais. Esses estudos visam obter novos compostos com propriedades terapêuticas e isto se observa no aumento de trabalhos publicados nesta área (CECHINEL FILHO, YUNES, 1998).

Como principal matéria-prima para a obtenção de produtos fitoterápicos, a parte aérea das plantas medicinais, normalmente, é colhida com elevado teor de água, fator responsável pela má conservação na pós-colheita do produto. Isto ocorre porque a água é o principal responsável pelo aumento da atividade metabólica e pelas mudanças químicas e físicas que ocorrem no produto, durante o seu armazenamento (GONELI et al., 2014). Com a redução da água disponível, são reduzidas a velocidade das reações químicas no produto, bem como o ambiente para o desenvolvimento de microrganismos (MARTINAZZO et al., 2007).

Assim, objetivando a manutenção de sua qualidade após a colheita, é fundamental que as plantas medicinais tenham seu teor de água reduzido, sendo a secagem o processo mais utilizado para esta finalidade. As condições de secagem são muito importantes para manter a qualidade dos produtos agrícolas. As plantas medicinais e aromáticas devem ser submetidas imediatamente à secagem, após a colheita, para a manutenção de suas características físicas e químicas, importantes para o mercado farmacêutico (GONELI et al., 2014).

Melo et al. (2004) indicam que, durante secagem, a velocidade e temperatura do ar exercem influência na quantidade e qualidade dos princípios ativos presentes

em plantas medicinais, aromáticas e condimentares. Rocha et al (2011) concluíram em seus estudos, em relação à ação da temperatura na secagem, que os valores recomendados na literatura e os utilizados na prática são frequentemente distantes, confirmando que existe uma necessidade de pesquisas sobre o tema.

Randünz et al. (2006) evidenciam em seus estudos a importância da influência da temperatura e da velocidade do ar de secagem sobre o tempo de secagem bem como sobre a qualidade e quantidade dos princípios ativos presentes nos óleos essenciais. Destacam também a influência sobre a cor das folhas das plantas ao final do processo de secagem.

Buscando-se maximizar a presença desses princípios ativos, a secagem requer o emprego de tecnologias de controle para a obtenção de um processo eficiente. Os sistemas de sensoriamento e controle podem reduzir a necessidade do trabalho em laboratório e permitir uma avaliação dos estados físico-químicos dos produtos agrícolas, na medida em que tornam os processos de secagem automáticos e confiáveis (LEMOS et. al., 2004).

Considerando-se os benefícios da utilização de plantas medicinais e provada a influência do processo de secagem na qualidade do produto final, é de suma importância o estudo e o desenvolvimento de tecnologias de controle e de aquisição de parâmetros de secagem no processamento das plantas.

2 Objetivo

O objetivo desse trabalho foi desenvolver um sistema para controlar a velocidade e a temperatura do ar de secagem no interior de um secador protótipo para plantas medicinais e também um sistema de aquisição dos dados durante o processo de secagem.

3 Revisão Bibliográfica

3.1 Controle

3.1.1 Controle automático

O controle automático é estudado desde o século XVIII, quando James Watt construiu um controlador centrífugo para o controle de velocidade de uma máquina a vapor. Desde então as teorias de controle evoluíram e hoje representam grande importância no avanço das engenharias e da ciência. As aplicações dessas teorias são vitais, nos dias de hoje, para o funcionamento de sistemas de pilotagem de aviões, veículos espaciais, para processos industriais e outros processos presente no dia a dia (OGATA, 1985).

As principais vantagens da aplicação do controle automático dos processos são: qualidade e quantidade dos produtos durante os mesmos. A adição do controle possibilita resultados como produtos fabricados com segurança, subprodutos menos nocivos, e economia na produção. O controle automático possibilita o uso de processos complexos, que apenas com o controle manual, provavelmente seriam impossíveis de existirem (RIBEIRO, 2001).

De acordo com Ogata (1985) um sistema de controle de um processo é um sistema regulador automático que tem como saída uma variável do processo.

Segundo Lourenço (1997), a seleção de qual tipo de ação de controle deve-se usar depende das condições de operação do sistema em questão e de especificações de desempenho, tais como o erro em regime permanente aceitável, sobressinal máximo e tempo de estabilização desejado. Idealmente o controlador mais indicado é o controlador mais simples que satisfaça essas condições.

Existem várias formas de implantar ações de controle. A forma mais simples de controle é a malha aberta com controle manual. Um operador aplica energia no processo por meio de um atuador. O ajuste de calibração do atuador determina, com precisão, quanta energia é aplicada. O processo usa esta energia para produzir sua saída. Mudando o ajuste do atuador, se altera a energia no sistema e a saída resultante do processo (RIBEIRO, 2001).

Segundo Ogata (1985) um sistema de controle em malha aberta utiliza um controlador inserido no processo a ser controlado. Nessa configuração a entrada do

processo deve ser projetada para que sua saída se comporte como desejado. Sua característica predominante é que a ação de controle não depende da saída do processo.

Controle realimentado é a aquele que tende a manter uma relação prescrita entre a saída e a entrada de referência comparando-as e utilizando a diferença como meio de controle (OGATA, 1985).

3.1.2 Ações de controle

Os controladores automáticos podem ser classificados de acordo a ação de controle que exercem sobre os processos. Segundo Ogata (1985) essa ação pode ser do tipo:

- Liga-Desliga;
- Proporcional;
- Integral;
- Proporcional mais integral;
- Proporcional mais derivativo;
- Proporcional mais integral mais derivativo.

Dentre os tipos de ação de controle automático o mais simples é o de duas posições, conhecido como controle liga-desliga. Nesse tipo de ação o atuador pode assumir as posições de 0 ou 100%. É um modo descontínuo, muito utilizado para controle de sistemas simples com dinâmicas lentas, como o controle de temperatura (FACCIN, 2004). Apesar de não poder ser representado por uma equação analítica, estabelecendo-se o erro como a diferença entre a saída e o *setpoint* do processo, pode-se representá-la por:

$$u(t) = 100, se(erro) > 0; \quad (1)$$

$$u(t) = 0, se(erro) < 0; \quad (2)$$

Já na ação proporcional a relação entre a sua saída e o sinal de erro, é dada por

$$u(t) = K_p \cdot e(t) \quad (3)$$

onde K_p é denominado sensibilidade proporcional ou ganho. Independente da forma de uso, o controlador proporcional é essencialmente um amplificador com ganho ajustável. Uma característica importante desta ação de controle é a existência de um erro residual permanente. Esse erro depende de K_p e da carga, podendo ser minimizado por um aumento do valor de K_p . Em contrapartida aumentando o valor deste parâmetro aumenta o tempo de estabilização do controle, podendo conduzir eventualmente, até à instabilidade do sistema (LOURENÇO, 1997).

De acordo com Faccin (2004) na ação de controle integral é gerada uma ação proporcional à integral do erro no tempo, como descrito na equação 4. O grande benefício da sua utilização é a eliminação do erro em regime permanente.

$$u(t) = T_i \cdot \int_0^t e(t) dt + u_0 \quad (4)$$

Já a ação de controle derivativa é proporcional à taxa de variação do erro. Ela é representada pela derivada do erro no tempo, descrita na equação 5, e estima a tendência do aumento ou diminuição deste. Sua principal característica é aumentar a velocidade de correção do processo.

$$u(t) = T_D \cdot \frac{de(t)}{dt} + u_0 \quad (5)$$

A combinação entre estes três modos básico de controle produz um dos mais eficientes algoritmos de controle já desenvolvidos, o controlador PID. Isso proporciona simplicidade e atende as necessidades de controle da grande maioria dos processos. Esta ação combinada de métodos de controle possui as vantagens individuais de cada uma das três ações de controle individuais (OGATA, 1985).

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + T_D \cdot \frac{de(t)}{dt} - T_i \cdot \int_0^t e(t) dt + u_0 \quad (6)$$

Neste tipo de controlador, o modo integral é usado para eliminar o erro estacionário causado por grandes variações de carga. O modo derivativo, com o seu efeito estabilizador, permite um aumento do ganho e reduz a tendência para as oscilações, o que conduz a uma resposta mais rápida (LOURENÇO, 1997).

3.1.3 Sintonia de Controladores

Para que o controlador PID apresente um bom desempenho a especificação dos seus parâmetros é de vital importância. Por esse motivo, este é o grande desafio encontrado pelos operadores na sua utilização. A solução do problema de

especificação paramétrica do PID pode ser encontrada fazendo-se uso de métodos baseados em tabelas empíricas que informam os valores de k_p , T_i e T_d (OLIVEIRA et al., 2004).

O processo de selecionar parâmetros para o controlador que garantam uma dada especificação de desempenho é conhecido como sintonia do controlador. *Ziegler* e *Nichols* propuseram regras para determinar os valores do ganho proporcional K_p , o tempo de integração do erro T_i , e do tempo derivação do erro T_d , baseado nas características de resposta temporal de uma determinada planta (MONTGOMERY et al., 2010).

O método de sintonia pioneiro para controle PID é com certeza o desenvolvido por *Ziegler* e *Nichols*. Porém este método tem a tendência de produzir respostas oscilatórias com grandes *overshoots* para mudanças de *set-point*. Por isso *Tyreus* e *Luyben* desenvolveram um método mais conservador, tentando amenizar estas desvantagens dos métodos contínuos cíclicos (SILVA, 2007).

Outros métodos como o de Cohen-Com e de Síntese Direta são aplicáveis, assim como a sintonia por meio de softwares. SILVA (2007) em sua pesquisa constatou que é possível encontrar diversos softwares que tenham como objetivo a sintonia de controladores PID por diversas técnicas diferentes.

Porém após o cálculo dos parâmetros do controlador é necessário a instalação desses no sistema e a realização da sintonia fina. Sintonia fina é a otimização dos parâmetros estimados pelos cálculos de sintonia, realizada de forma manual na planta.

3.2 Identificação de Sistemas

Existem várias formas se realizar a modelagem de sistemas e de classificar as técnicas de modelagem. Uma delas agrupa os métodos em três categorias: modelagem caixa branca, modelagem caixa preta e modelagem caixa cinza.

Na modelagem caixa branca é necessário conhecer bem o sistema em estudo, bem como as leis físicas que descrevem o sistema a ser modelado. Por essa razão esse tipo de modelagem é também conhecido como modelagem conceitual (RIBEIRO et al., 2009).

Porém, em geral, o modelo de um sistema é algo relativamente complexo e

essa abordagem se torna ineficiente ou muito custosa. Por esse motivo, utilizam-se métodos alternativos para a estimação das características do sistema. Esses métodos são chamados de Identificação de Sistemas. As técnicas de identificação surgiram como uma alternativa numérica à modelagem convencional baseada nas leis da física (ADES, SILVEIRA, 2008).

A área do conhecimento relativo à identificação de sistemas se dedica ao estudo de técnicas de modelagem alternativas à modelagem convencional. Uma das características dessas técnicas é que pode se ter pouco conhecimento prévio em relação ao sistema. Tais métodos são também conhecidos como modelagem (ou identificação) caixa preta ou modelagem empírica. Assim, o objetivo da modelagem consiste em desenvolver um modelo com boa capacidade de predição e cujo procedimento de identificação e validação não se torne mais complexo do que o necessário (RIBEIRO et al., 2009).

De acordo com Quachio (2012), identificação de sistemas é o nome dado à família de algoritmos utilizados para a obtenção de modelos matemáticos de representação de sistemas dinâmicos. É uma classe de métodos que engloba os métodos paramétricos de identificação, nos quais o objetivo é a obtenção de um modelo dinâmico, na forma de função de transferência ou espaço de estados, que explique satisfatoriamente o sistema observado.

Uma das características relevantes para o planejamento do processo de identificação de sistemas é o número de entradas e de saídas desse sistema. Para sistemas SISO (*single input single output*), já existem diversas metodologias consolidadas e que apresentam resultados satisfatórios, a ressaltar as perturbações por degrau e sinais aleatórios. Porém, na maior parte das vezes os sistemas são do tipo MIMO (*Multiple Input - Multiple Output*). Para estes casos, o sistema é dividido em subsistemas, e então, são aplicadas as mesmas metodologias dos sistemas SISO. Esta abordagem normalmente apresenta algumas deficiências, como a dificuldade em manter as demais entradas constantes, a necessidade de vários testes e a impossibilidade de se detectar relações entre as variáveis (ORENSTEIN, 2013).

A base do método da identificação de sistemas consiste em perturbar o processo de interesse e observar as reações do mesmo. Para tanto, é aplicado um

sinal conhecido à variável de entrada. Uma vez aplicada ao sistema a excitação, são medidas as respostas do sistema no decorrer do tempo. Com base nessas entradas e saídas, busca-se uma função matemática que seja a representação do sistema, a qual se dá o nome de modelo (ORENSTEIN, 2013).

3.3 Arduino

O Arduino, segundo sua proposta de utilização, é uma plataforma eletrônica de código aberto baseado em hardware e software de fácil utilização (ARDUINO.CC, 2015). Projeto italiano iniciado em 2005 tinha em primeiro momento a intenção de ser utilizado em atividades de cunho educacional e de interação com aplicações escolares.

Tecnicamente o Arduino é uma plataforma física, como mostra a Figura 1, de computação de código aberto baseado em uma placa microcontroladora ATMEEL AVR. Ele possui um ambiente de desenvolvimento para escrever o código e inseri-lo no microcontrolador com comunicação serial. O Arduino pode ser usado para desenvolver objetos interativos, por meio de sensores, chaves, e outros atuadores, utilizados como forma de interação com o mundo físico. Projetos no Arduino podem ser independentes, ou podem se comunicar com um *software* executado em um computador. Os circuitos, por sua vez, podem ser montados à mão ou adquiridos pré-montados. O acesso ao *software* de programação é código-livre e gratuito. A linguagem de programação do Arduino é uma implementação do *Wiring*, sendo assim uma plataforma computacional física semelhante a este, que é baseada no ambiente multimídia de programação *Processing* (ARDUINO.CC, 2015).

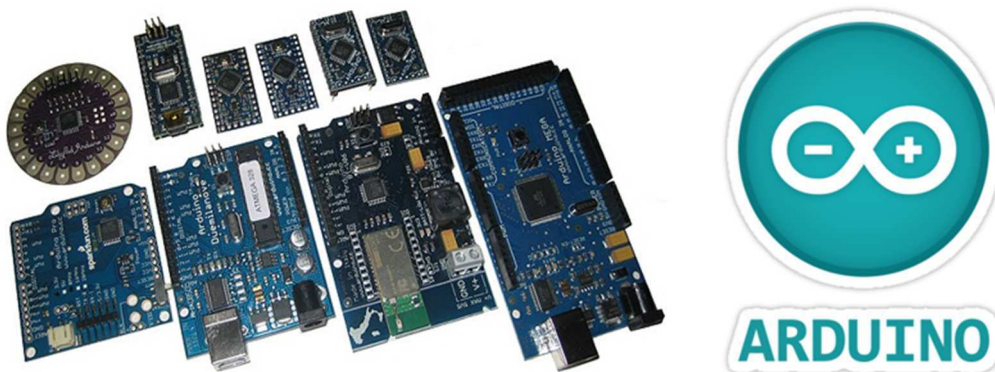


Figura 1 - Ilustração de Placas Arduino e símbolo.

Fonte: (ARDUINO.CC, 2015)

As unidades Arduino são constituídas por microcontroladores Atmel AVR de 8 bits, pinos digitais e analógicos de entrada e saída, entrada USB – o que permite conexão com computadores. A placa Arduino não possui recursos de rede, mas pode ser combinada com outros Arduino criando extensões chamadas de *shields*. As placas controladores necessitam de fonte de alimentação, que deve fornecer de 7 a 35 V em corrente contínua mínima de 300 mA. A placa e os demais circuitos funcionam com tensões entre 5 e 3,3 V. Embutido no Arduino há, ainda, um *firmware* – que combina memória ROM para leitura e um programa gravado neste tipo de memória – carregado na memória da placa controladora, que aceita Windows, Linux e Mac OS X (SOARES, 2013).

Segundo Ribeiro et al. (2014), uma característica da plataforma Arduino, em relação aos outros microcontroladores, é que a mesma possui licença aberta de o uso para hardware e software. Vale ressaltar também que permite a integração com Linux, Macintosh e Windows, apresentando a melhor relação de custo benefício do mercado.

3.4 Sistemas de medição

Um sistema de medida é uma combinação de elementos com a função de correlacionar, de forma objetiva e empírica, um número ou uma qualidade a um evento ou objeto, de forma a descrevê-lo segundo uma característica (ARENLY, 1989).

De acordo com Ribeiro (2002) um sistema genérico de medição é composto pelos seguintes elementos:

- Elemento sensor ou elemento transdutor;
- Elemento condicionador do sinal; e
- Elemento de apresentação do dado.

O elemento sensor, em instrumentação, é responsável pela detecção da variável física e a conversão desta em um sinal mais apropriado para medição, normalmente mecânico ou elétrico (FRANÇA, 2007).

Teoricamente, qualquer dispositivo que seja capaz de converter um sinal, de

um tipo de grandeza física em outro tipo de grandeza física útil pode ser chamado de transdutor. Porém na área de instrumentação a saída dos transdutores são normalmente sinais elétricos (ARENY, 1989).

Para Ribeiro (2002) o elemento condicionador do sinal gerado na transdução da grandeza medida, é aquele que manipula e processa a saída do sensor de forma conveniente, segundo as características do sistema. Essa manipulação pode ser amplificação, filtragem, conversão entre outras adequações do sinal para uso de aquisição e controle.

Os elementos de apresentação desempenham o estágio final do sistema de medição. Normalmente desempenhada por controladores, sua função é apresentação final dos dados, o seu armazenamento, e se necessário o controle da variável medida (FRANÇA, 2007).

De acordo com Areny (1989) a apresentação dos dados pode ser feita de forma analógica ou numérica. Já o registro pode ser feito de variadas formas, discos rígidos, discos removíveis, bancos de dados em nuvens, *data-center's* e entre outros.

3.4.1 Anemômetro de fio quente

Anemômetros são instrumentos usados para medidas de velocidade de ar e de outros fluidos. Dentre dezenas de instrumentos diferentes destinados a medir a velocidade de fluídos os medidores térmicos destacam-se por apresentarem melhor precisão em relação a outros instrumentos, que utilizam outro princípio físico (EGUTI, 2005).

Os tipos de transdutores térmicos de velocidade se distinguem especialmente pelo método de controle da corrente elétrica que passa pelo elemento sensor. O modo de operação mais difundido é o anemômetro de temperatura constante. Neste, a corrente do sensor sofre variações de acordo com a velocidade do fluido, de modo a manter a sua resistência e temperatura constantes (MORAES, 2003).

De acordo com Eguti (2005) e Sampaio et al. (1998) a transferência de calor entre o elemento sensor aquecido e o meio fluído do qual se deseja medir o escoando define o fenômeno básico da anemometria de fio quente. No mercado existem vários tipos de anemômetros de fio quente com características de

construção e operação variadas. A Figura 2 mostra o esquema básico de construção de se sensor.

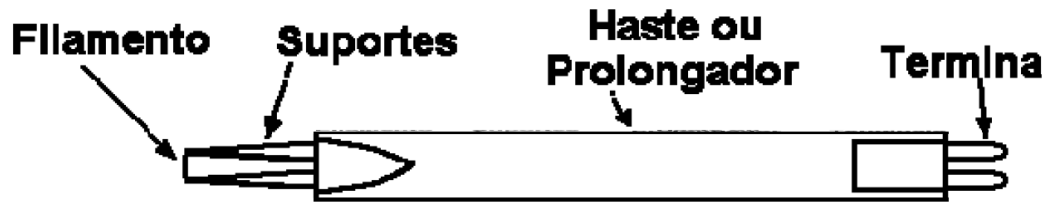


Figura 2 - Esquema de construção de uma sonda de fio quente

Fonte: Eguti (2005)

A construção mais comum de um sensor tipo anemômetro de fio quente possui dimensões diminutas sendo constituído de um fino filamento metálico, o qual é exposto ao movimento de um fluido através de hastes suportes. Uma corrente elétrica controlada é inserida neste filamento e o calor gerado por efeito Joule é transferido ao fluido. A variação do equilíbrio térmico entre o filamento aquecido e o fluido modifica a resistência elétrica do fio metálico e tal variação pode ser quantificada através de circuitos elétricos específicos (EGUTI, 2005).

De acordo com Moraes (2003) a calibração de um anemômetro normalmente consiste de medidas simultâneas da velocidade U e da saída em voltagem do anemômetro V e a partir da relação voltagem-velocidade determinam-se as constantes de calibração. Porém em casos de transdutores comerciais, o instrumento é vendido calibrado, tendo o usuário que adequar apenas o protocolo de comunicação às suas necessidades.

Para baixas velocidades, os anemômetros que operam no princípio de trocas de calor são os mais indicados, sendo os anemômetros de fio quente sempre utilizados (SAMPAIO et al., 1998). De acordo com Silva et al. (1999), outras características que contam a favor dos anemômetros de fio quente são repetibilidade, durabilidade, capacidade de medição em várias faixas de vazões e praticidade de manuseio.

3.4.2 Termoresistência

O desenvolvimento de tecnologias para sensores tem fundamental importância no avanço de monitoramento e controle de variáveis em diversos

processos. Temperatura, pressão, vazão e outros tipos de variáveis em diversos equipamentos e processos, necessitam serem “lidas” para que se possa realizar o monitoramento e o controle desses.

Segundo Sabino et al. (2003), alguns óxidos cerâmicos possuem sensibilidade a variações de temperatura. Por essa propriedade esses compostos podem ser utilizados como sensores de temperatura. Estes dispositivos são chamados de termistores, e apresentam dois tipos distintos de resposta, em relação a variação de sua resistência elétrica, com relação a variação da temperatura a que estão expostos. Os termistores com coeficiente de temperatura negativo são denominados de NTC (*negative temperature coefficient*).

Em geral os permissores utilizados nas diversas situações de leitura de temperatura são do tipo NTC. Para esse tipo de termistores a resistência diminui com o aumento da temperatura. Um termistor NTC é feito de material semicondutor, e é tipicamente utilizado na faixa de temperaturas entre -50 °C e 150 °C (AGUIAR, LAUDARES, 2001).

Na prática, um sensor NTC é uma resistência variável com a temperatura. A aquisição de dados lidos por sensores geralmente é feita por microcontroladores. Esses não são aptos a ler diretamente uma informação de resistência fornecida por um NTC. Desse modo, faz-se necessário converter a informação de resistência numa informação de tensão, visando por fim obter uma relação entre a temperatura nas proximidades do NTC e a tensão medida pelo microcontrolador (TEIXEIRA, LEAL, 2007).

A relação entre a resistência e a temperatura absoluta de um NTC é não linear, e pode ser aproximada por uma curva exponencial. A resistência de um NTC e geralmente especificada a 25 °C, e na maioria dos casos está entre 10 e 100 k. Tipicamente, a sensibilidade a 25 °C é da ordem de -4% °C⁻¹ (AGUIAR, LAUDARES, 2001).

De acordo com Lima et al. (2013), das vantagens que um termistor NTC apresenta, podemos enumerar a de que é semicondutor de baixo custo, versátil de fácil manuseio. Como característica operacional traz como vantagem a velocidade de reação a variações de temperatura, tendo reação satisfatória na medição de variação rápida de temperatura.

4 Material e Métodos

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Plantas Medicinais do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa (MG). Os ensaios foram realizados em um secador de plantas medicinais e aromáticas, que a seguir se descreve.

4.1 Secador de plantas aromáticas e medicinais

O secador de plantas medicinais e aromáticas, aqui objeto de estudo, é um secador vertical de camada fixa com bandeja com fluxo de ar ascendente, como mostrado na Figura 3. O secador é composto por um ventilador, duto de medição de velocidade, duto de aquecimento do ar, câmara de secagem, *plenum* e duto de saída.

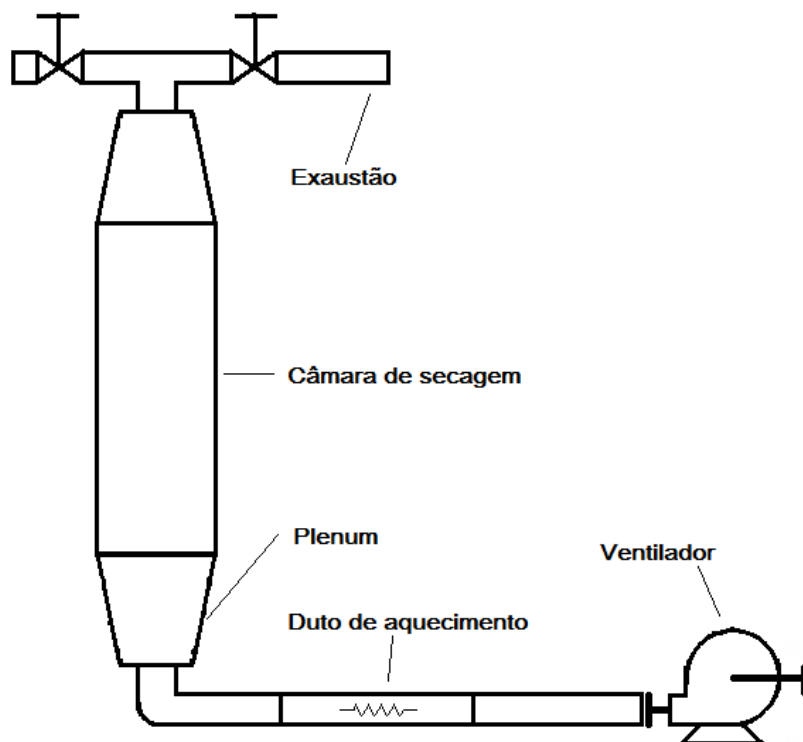


Figura 3-Esboço estrutural do secador

O secador faz a admissão do ar ambiente e realiza o seu aquecimento como é mostrado na Figura 4. Após passar pela câmara de secagem, onde está o produto a ser seco, o ar aquecido é devolvido ao ambiente.

Para a admissão do ar ambiente, está instalado um ventilador de pás retas

radial. O ventilador possui potência de 367,75 W, que insufla o ar de secagem, e possui entrada de ar de 0,15 m de diâmetro. No duto de medição de velocidade está instalado o transmissor de velocidade. No duto de aquecimento se encontram instalados um conjunto de três resistências para o aquecimento do ar de secagem. As resistências elétricas, para aquecimento do ar de secagem, estão instaladas em uma tubulação de aço galvanizado de 0,15 m de diâmetro, com potência de 5 kW cada. No *plenum* encontra-se instalado o transdutor de temperatura. A câmara de secagem é composta por cinco bandejas de base quadrada, com tampa e base teladas, construídas de aço inoxidável, com as dimensões 0,25 m de comprimento e 0,15 m de altura, perfazendo um volume total na câmara de aproximadamente 0,0469 m³ por gaveta. O duto de saída é composto por um tubo de aço galvanizado de 0,15 m de diâmetro.

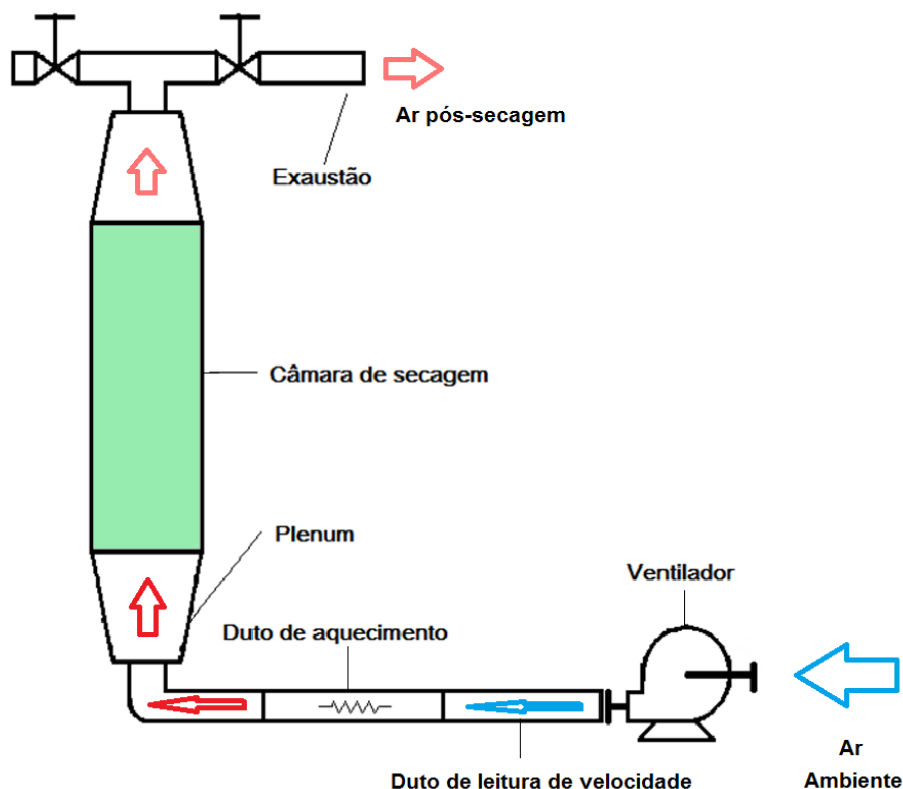


Figura 4 - Fluxo do ar no secador

4.2 Sistema de Controle

4.2.1 Montagem do transdutor de velocidade do ar

O transdutor de velocidade é um anemômetro de fio quente, FMA - 900 Omega. A montagem do dispositivo de velocidade do ar foi feita utilizando-se de materiais diversos, com o intuito de se obter uma estrutura física robusta e confiável,

respeitando-se as especificações técnicas do transdutor e as recomendações do fabricante.

4.2.1.1 Instalação

A instalação do transdutor de velocidade foi feita em um ponto fora da gaveta de secagem. Isso se deu devido às especificações técnicas de instalação para o condicionamento do fluxo do ar. A instalação foi feita entre o ventilador e o duto de aquecimento e obedeceu às recomendações técnicas do fabricante. De acordo com essas, o transdutor de velocidade do ar FMA - 900 pode ser montado verticalmente ou horizontalmente, sem mudança na calibragem, com ponto de medição a 1/8 da parede do duto onde se quer medir a velocidade do ar. Nas especificações recomenda-se também o comprimento mínimo de 15 vezes o diâmetro de tubo a montante do ponto de instalação do sensor e para a jusante o comprimento de 5 vezes o diâmetro do tubo.

O transdutor está instalado em um tubo de PVC, posicionado horizontalmente, com diâmetro de 0,1 m. A instalação do transdutor foi feita na posição vertical. Foram respeitadas as recomendações do fabricante para comprimento a montante e a jusante. A montante o tubo tem medida de 1,5 m, e a jusante 0,5 m.

4.2.1.2 Ponto de medição

Nos tubos circulares o fabricante indica a montagem do sensor de velocidade de cerca de 1/8 de um tubo em diâmetro a partir da parede do tubo. Para o caso em questão o sensor ficou instalado a uma distância de 0,0125 m da parede do tubo. Assim, não se faz necessário nenhum cálculo de ajuste de leitura, uma vez que a sonda é montada no local da velocidade média de escoamento do ar no tubo.

4.2.1.3 Condição de Operação

As condições de temperatura e umidade de operação são sempre a temperatura e umidade ambientes. O sensor irá operar sob velocidades de 2,5 a 12 m s⁻¹ no ponto de medição. A comunicação com o controlador do secador e com o sistema supervisorio será feita por meio de sinal analógico de 0 a 5 V, e sua alimentação é feita por uma fonte de corrente contínua dedicada de 18 V.

4.2.1.4 Tratamento do sinal

A faixa de operação do transdutor de velocidade é de 0,05 a 25,4 m s⁻¹. Essa faixa é transformada, em um sinal analógico de 0 a 5 V_{cc}, e posteriormente, no Arduino, em um número que pode variar de 0 a 1023 (conversão analógica/digital de 10 bits). Dessa forma a leitura do sinal de velocidade possui resolução de 0,0248 m s⁻¹.

Assim temos que realizar o seguinte cálculo para estabelecer a velocidade no ponto de medição:

$$v_m = 0,05 + N \cdot 0,0248 \quad (8)$$

Todavia, a velocidade que o ar desenvolve no tubo de medição não é igual a velocidade que o mesmo desenvolve no ponto de secagem (gaveta de secagem). A relação entre a velocidade do ar no ponto de secagem e a velocidade do ar no ponto de medição pode ser estabelecida pela equação da continuidade, representada na equação 9, visto que a vazão de ar não se altera entre esses dois pontos.

Assim, estabelecendo-se a relação de continuidade e analisando sob a forma de relação entre as áreas dos dois pontos, na equação 10, temos a relação da velocidade nos dois pontos descrita pela equação 11.

$$Q_m = Q_s \quad (9)$$

$$A_m \cdot v_m = A_s \cdot v_s \quad (10)$$

Fazendo ficar em evidência os as variáveis que representam a velocidade nos dois pontos de interesse, e substituindo a equação 3.2 temos a relação:

$$v_s = \left(\frac{A_m}{A_s} \right) \cdot v_m \quad (11)$$

Onde:

Q_m: Vazão no ponto de medição, m³ s⁻¹;

Q_s: Vazão no ponto de secagem, m³ s⁻¹;

A_m: Área da secção transversal do ponto de medição, m²;

A_s: Área da secção transversal do ponto de secagem, m²;

v_m: Velocidade do ar no ponto de medição, m s⁻¹;

v_s: Velocidade do ar no ponto de secagem, m s⁻¹);

N: número adimensional de resultante da conversão de analógico/digital de 10 bits.

Assim, substituindo a equação 8 na equação 11 que a velocidade no ponto de secagem é:

$$v_s = \left(\frac{A_m}{A_s} \right) \cdot (0,05 + N \cdot 0,0248) \quad (12)$$

Dessa forma estabelecemos a relação entre a velocidade desenvolvida pelo ar no tubo de medição e a velocidade no ponto de secagem.

Como a área da seção transversal do tubo é de $A_m = 0,0078 \text{ m}^2$ e a área da seção transversal da gaveta de secagem é $A_{sec} = 0,0576 \text{ m}^2$, temos que:

$$v_s = 0,0068 + N \cdot 0,003373 \quad (13)$$

Este valor é lido a cada 1 m s^{-1} e é realizado cálculo de média móvel, que funciona como filtro a variações bruscas no sinal de leitura.

4.2.2 Montagem do sensor de temperatura

O transdutor de temperatura é um sensor NTC de 10K de resistência. Como visto na seção , o NTC é um resistor que modifica sua resistência de acordo com a variação de temperatura a que está exposto. Dessa forma se aplicada tensão em seus terminais a variação de temperatura será proporcional a uma variação na queda de tensão sobre o termistor. Assim pode-se realizar a transdução de temperatura em tensão e utilizar o termistor como sensor de temperatura.

4.2.2.1 Instalação

O transdutor de temperatura está instalado no *plenum*. Ponto que antecede a gaveta de secagem. Dessa forma a temperatura do ar de secagem no *plenum* é a mesma que no ponto de secagem (gaveta de secagem). A instalação levou em consideração a exposição máxima ao ar de secagem e a rigidez de fixação do sensor, visando a confiabilidade da leitura dos dados de temperatura.

4.2.2.2 Ponto de medição

O sensor-transdutor foi fixado na parede do secador por meio de uma haste. Esta haste projeta o sensor perpendicularmente a parede interna do secador, para

que o ponto de leitura se localize no centro da seção transversal do ponto de instalação.

4.2.2.3 Condição de operação

O sensor-transdutor irá operar em faixas de temperatura que irão variar entre a temperatura ambiente e 80 °C, que é a temperatura máxima de operação do secador.

4.2.2.4 Tratamento do sinal

O sensor resistivo de temperatura NTC foi calibrado por comparação com termômetro bimetálico instalado no secador. A calibração foi feita em função do valor de saída da conversão A/D, realizada pelo Arduino quando faz a leitura dos dados, da temperatura.

Os dados da calibração estão descritos na Tabela 1 e na Figura 5.

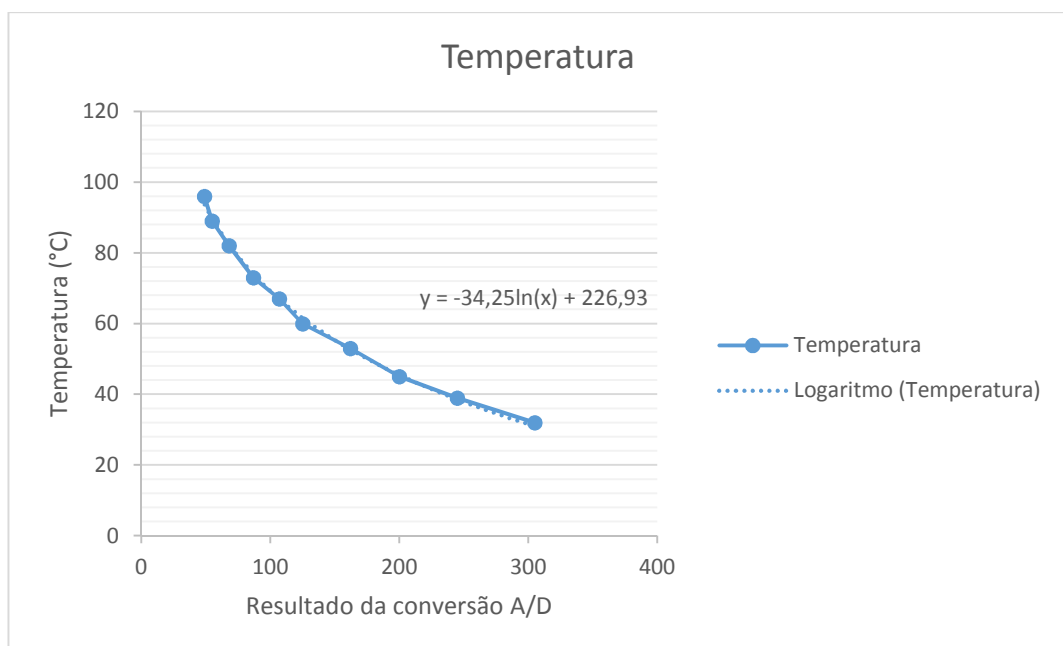


Figura 5 - Dados da calibração do NTC

Tabela 1 - Dados da calibração do sensor NTC

Leitura	Resultado da conversão A/D	Temperatura
1	305	32
2	245	39
3	200	45
4	162	53
5	125	60

6	107	67
7	87	73
8	68	82
9	55	89
10	49	96

A saída do sensor-transdutor de temperatura é um sinal analógico que varia de 0 a 5 V, e no Arduino é convertida em um número digital de 10 bits, variando assim de 0 a 1023. Após a calibração foi feita a estimação da equação de calibração do NTC. A equação de calibração do transdutor é:

$$T = -34,25 \cdot \ln(N) + 226,93 \quad (14)$$

Onde:

T: temperatura do ar de secagem;

N: Número de dez bits resultante da conversão Analógico/Digital.

4.2.4 Filtro de ruídos

Após os primeiros ensaios práticos, percebeu-se a necessidade de utilizar um filtro para tratar os ruídos dos sensores de temperatura e principalmente de velocidade. A origem dos ruídos pode ser atribuída à turbulência nos pontos de medição, à vibração do secador (no caso do sensor de velocidade), e à interferência eletromagnética dos elementos de acionamento.

A lógica utilizada no filtro é simples, porém muito eficaz no caso em questão. O filtro utilizado foi o filtro de média móvel do histórico de 10 leituras. Esse filtro consiste em manter um histórico das 10 últimas leituras da variável lida. Cada nova leitura é feita a atualização da leitura mais recente e o descarte da mais antiga (é feita também a média das 10 últimas leituras e atribuído esse valor a variável em questão).

$$v_{mm} = \sum_{i=0}^9 v_i \cdot 0.1 \quad (15)$$

Onde:

v_{mm} : Média móvel da Variável lida;

v_i : Variável lida a i ciclos de leitura.

Notou-se também que a filtragem dos possíveis ruídos contribuiu para o alcance de estabilidade do controlador e para a qualidade do processo de aquisição

de dados, devido a menor dispersão dos dados.

4.2.5 Atuação sobre a variável Temperatura

A atuação sobre o sinal de temperatura é feita por meio de resistências elétricas de aquecimento. Essas resistências são acionadas por um circuito de chaves estáticas, que por sua vez são acionadas segundo um sinal do controlador. O acionamento feito pelas chaves estáticas é do tipo On-Off (Liga/Desliga). O controlador decide qual a ação necessária para a correção do erro e altera o estado da saída de nível alto para baixo ou vice-versa. Devido à característica On-Off do circuito de chaves estáticas, não é possível o acionamento proporcional das resistências.

Apesar disso, acionando as chaves estáticas em frequências baixas e médias, é possível o estabelecimento de períodos de acionamento nos quais o tempo de “ligado” e “deligado” possam ser variados. Dentro desses períodos de acionamento a resistência tem seu tempo de acionamento variado entre 0 e 4 segundos, de acordo com a atuação do controlador. Devido a inércia térmica das resistências, é gerado um efeito de aquecimento das resistências proporcional ao tempo em que as resistências ficam ligadas dentro do período de acionamento. Essa forma de acionamento possibilita o uso de controladores proporcionais e proporcionais-derivativos, proporcionando controle de maior qualidade.

4.2.6 Atuação sobre a variável Velocidade

A atuação sobre variável de velocidade é feita por meio do acionamento proporcional de um inversor de frequência. Esse inversor aciona o motor que está acoplado ao ventilador. O controlador envia sinal analógico de 0 a 5 V para um circuito elevador de tensão, que transforma esse sinal para um sinal de 0 a 10 V. O sinal analógico de 0 a 10 V é lido pelo inversor de frequência que interpreta esse sinal como um comando de acionamento em frequência, variável de 0 a 65 Hz. Essa frequência é diretamente proporcional à velocidade de rotação do motor. A velocidade do ar no *plenum* pode variar de 0,6 a 2,3 m s⁻¹, de acordo com o sinal de comando expresso pelo controlador.

4.2.7 Modelagem

A abordagem de modelagem do sistema foi a modelagem do tipo “caixa

preta”, na qual não se necessita conhecer as leis físicas que descrevem o sistema a ser modelado.

O experimento para a aquisição de dados, com o intuito de identificação do sistema, levou em consideração principalmente as características construtivas, a natureza do sistema, e a estratégia de controle que se poderia empregar a partir dessa identificação. O processo é constituído de um sistema multivariável, e de acordo com Orenstein (2013), é necessário a divisão desse sistema em subsistemas para a realização da identificação das funções de transferências que representam esses subsistemas.

4.2.7.1 Identificação da malha de velocidade

Devido ao fato de a velocidade do ar se comportar como variável independente no sistema, foi realizado um processo de identificação individual para esta malha. Foi elaborado um código na plataforma Arduino para a geração de um sinal de ruído binário generalizado, como mostra a Figura 6, para a excitação do inversor de frequência, e por consequência do motor que insufla o ar no secador. O Ruído Binário é um sinal periódico que alterna entre dois níveis pré-fixados de forma determinística, com intuito de simular as características na frequência de um ruído branco. O Ruído Binário Generalizado adiciona características de baixa frequência ao ruído binário, predominantemente de alta frequência e foi proposto por Tulleken na década de 90, para o uso em identificação de sistemas como uma opção aos sinais estocásticos utilizados na época (ORENSTEIN, 2013).

Com a ajuda de um *software* de aquisição de dados elaborado na plataforma Visual C# 2010 Express 2010, os dados relevantes para esses testes, o sinal de excitação do inversor e a velocidade do ar, foram coletados e salvos para a realização dos cálculos posteriores, como mostra a Figura 7.

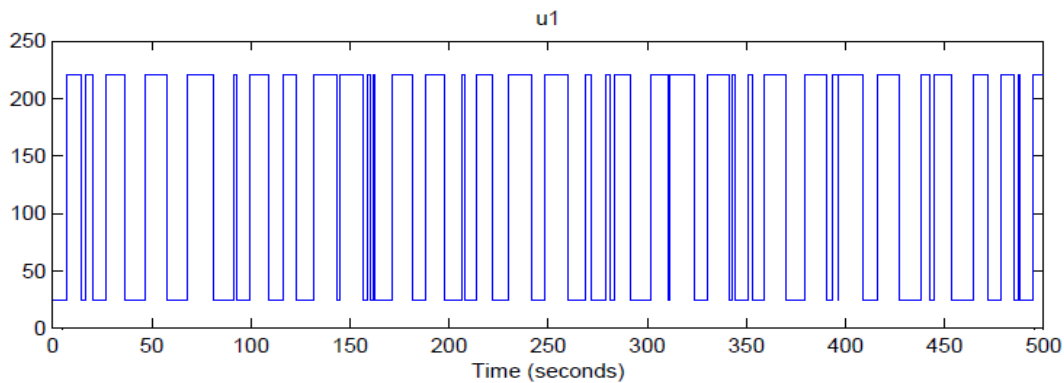


Figura 6 - Ruído Binário de excitação da variável Velocidade.

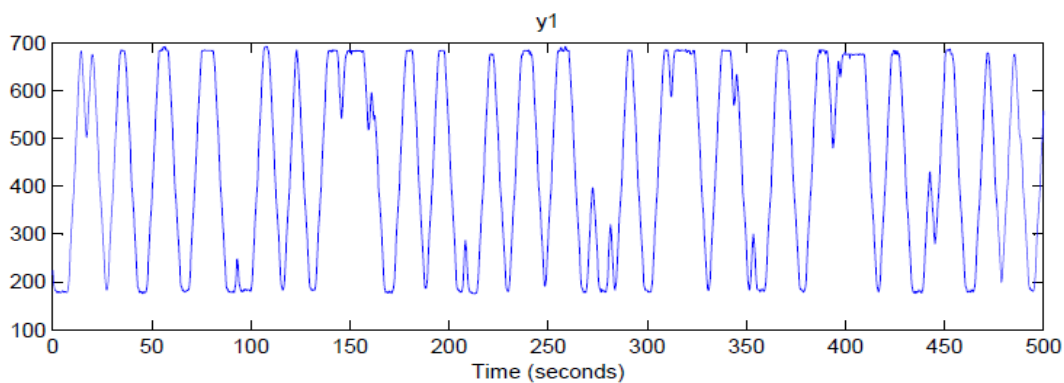


Figura 7 - Resposta da variável velocidade em relação ao ruído binário.

Após a coleta dos dados, foram implementados filtros para normalização dos dados e selecionados parte dos dados para a validação da função de transferência encontrada.

Os cálculos para a identificação do sistema foram baseados no algoritmo dos mínimos quadrados recursivo (MQR), para uma função de transferência de 1 zero e 2 polos. Essa configuração para a função de transferência foi escolhida devido a relação assertividade/complexidade. Nessa configuração foi alcançada a maior assertividade da função de transferência calculada com uma menor complexidade da mesma. O processo de cálculo da função de transferência foi feito por meio da toolbox *System Identification* do software MatLab.

Com um ajuste de estimativa de 80,11%, a equação para a função de transferência encontrada foi $f_{t_{velocidade}}$.

$$f_{t_{velocidade}} = \frac{0,1868 \cdot s + 0,4719}{s^2 + 0,6546 \cdot s + 0,155} \quad (16)$$

4.2.7.2 Identificação da malha de temperatura

Para a temperatura foi utilizado um método de modelagem não-paramétrico, o método da Curva de Reação. O método da curva de reação é realizado a partir de dados coletados na saída da planta quando excitado por um sinal de onda quadrada. Esta técnica baseia-se na modelagem não paramétrica, aproximando o modelo dos processos por funções de transferência de primeira ordem com atraso de transporte, como mostra a Figura 8.

Como a velocidade influencia a temperatura, o sistema foi exposto ao caso de maior influência da velocidade sobre a temperatura, e foram colhidos os dados referentes à curva de reação para a variável de temperatura.

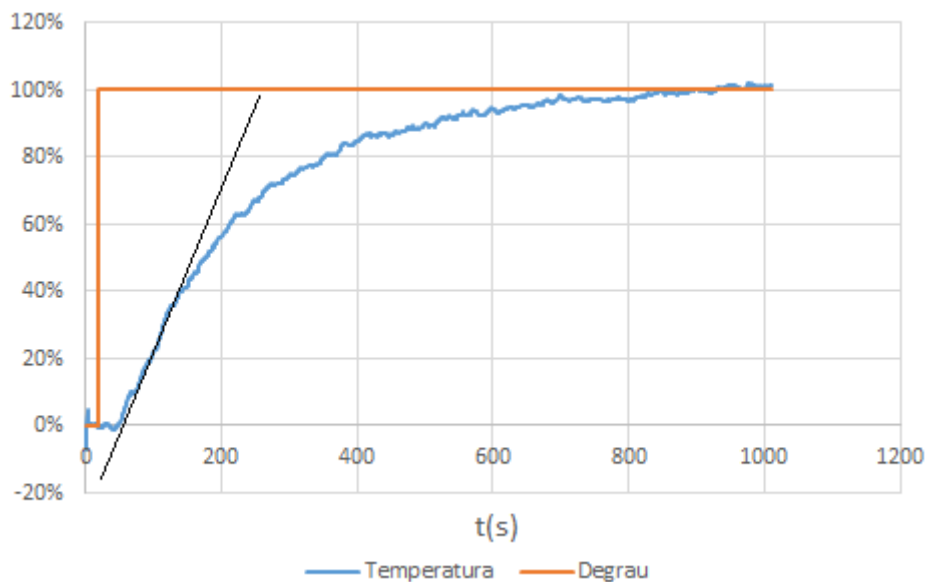


Figura 8 - Resposta da variável temperatura a excitação em degrau.

A função de transferência de primeira ordem com atraso de transporte referente ao sistema tem o seguinte formato.

$$G(s) = \frac{K \cdot e^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (17)$$

Onde:

K: Coeficiente angular da reta tangente;

θ : atraso de transporte;

τ : constante de tempo do sistema.

De acordo com a análise da curva de reação obtêm-se os parâmetros da

função de transferência.

$$f_{t_{temperatura}} = \frac{0,0044 \cdot e^{-25s}}{175S + 1} \quad (18)$$

4.2.8 Sistema de Controle

4.2.8.1 Arduino

O sistema de controle é baseado na plataforma Arduino. A placa utilizada no desenvolvimento deste sistema é a Placa Arduino Leonardo. Para a aplicação do controle do secador de plantas medicinais utilizou-se entradas e saídas digitais e entradas analógicas desta plataforma, de acordo com a necessidade do projeto. A tabela apresentada no descreve as conexões feitas entre os diversos dispositivos e as entradas e saídas do Arduino e a Figura 9 mostra o diagrama P&ID do sistema.

Foram utilizadas para a aquisição dos sinais as entradas analógicas A0 e A1, para a velocidade e para a temperatura, respectivamente. A leitura dos dados é feita no padrão de 0 a 5 V analógico, e dentro do Arduino é processada a conversão desse sinal analógico para digital de 10 bits (que varia de 0 a 1023).

Dentro do controlador são realizados os cálculos de equivalência entre o valor da conversão de 10 bits e os valores reais das variáveis do processo. Essas conversões estão descritas nas seções de montagem dos sensores de velocidade e de temperatura respectivamente.

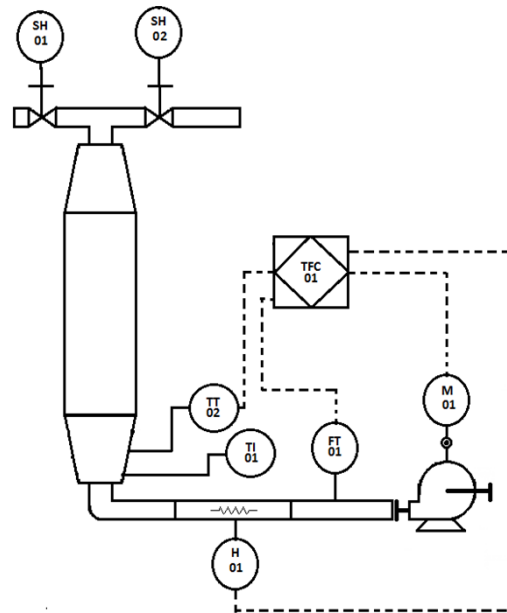


Figura 9 - Diagrama PI&D do sistema de controle do Secador de Plantas Medicinais

- | | |
|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| SH-01: Chave manual 01. | FT-01: Transmissor de fluxo 01 |
| SH-02: Chave manual 02. | M-01: Motor elétrico 01. |
| TT-01: Transmissor de temperatura 01. | H-01: Aquecedor elétrico 01 |
| TT-02: Transmissor de temperatura 02 | TFC-01: Controlador de fluxo e temperatura 01. |
| TI-01: Indicador de temperatura 01. | |

A estratégia de controle empregada com o Arduino foi escolhida de acordo com as características do sistema. O sistema é caracterizado por um sistema multivariável de duas entradas e duas saídas. As variáveis de entrada são a velocidade e temperatura do ar de secagem, e as variáveis de saída são velocidade do ventilador de ar e tensão nas resistências de aquecimento do ar no secador. De acordo com a dinâmica do sistema a velocidade é uma variável totalmente desacoplada da variável temperatura. A variável temperatura, com tudo, sofre influências da variável velocidade. Com base nessa característica de interação entre as variáveis, a melhor estratégia de controle a ser usada foi a de controle PID para a velocidade e controle preditivo adaptativo para a temperatura.

4.2.8.2 Controle de velocidade

Para o controle da velocidade do ar usou-se um controlador PID. O projeto do controlador PID para a velocidade se baseou função de transferência obtida com base na identificação do sistema. De posse da função de transferência estimada na identificação do sistema realizou-se a verificação da estabilidade do sistema e a seleção dos ganhos do controlador, chamada de sintonia do controlador PID.

A sintonia do PID foi realizada na plataforma online de sintonização de controladores PIDlab. O PIDLab é uma plataforma *online* grátis de auxílio de projeto avançado e resolução de problemas de controle PID. Fazendo as simulações do comportamento do controlador em relação os parâmetros de projeto (tempo de subida e de acomodação) no *software* chegou-se aos valores de ganho $K_p=9$, $K_i=0,625$ e $K_d=1,8$.

A definição dos ganhos exigiu a sintonia fina do PID, isto é, ajuste manual em loco dos ganhos para um melhor resultado no controle. Após a sintonia fina os valores de ganho foram $K_p=0,4$, $K_i=0,2$ e $K_d=0,10$.

4.2.8.3 Controle de temperatura

O controle para a variável temperatura foi projetado com base na modelagem do sistema e em suas características de operação. A estratégia de controle empregada foi a de controle PID. Essa escolha se deu em conformidade com as características do sistema, como constante de tempo elevada e influência da variável velocidade do ar sobre a variável temperatura.

O controlador desenvolvido é do tipo PID. O sinal de controle, proveniente do controlador PID, atua como regulador do tempo de ação da chave estática que aciona as resistências, criando um pseudo-PWM na correção da temperatura do sistema, baseando-se na inercia térmica das resistências. O procedimento para determinação dos parâmetros de sintonia de controladores PID baseou-se na função de transferência aproximada obtida pelos métodos de modelagem não-paramétrica do processo. O conjunto de parâmetros iniciais que foram a serem empregados no controlador PID, isto é, os ganhos proporcional, integral e derivativo, foram determinados com base nas formulas do método de sintonização de Ziegler-Nichols em malha aberta.

De acordo com o formulário calculou-se os ganhos para o controlador como sendo $K_p= 7$, $K_i= 0,14$ e $K_d= 87,5$. Assim como para o controlador de temperatura, foi necessário realizar a sintonia fina para os valores dos ganhos no controlador de temperatura. Os valores finais dos para o controle de temperatura foram de $K_p=1000$ e $k_i=1,8$.

4.2.9 Interface de comando

Para o comando do secador foi implementada na plataforma Arduino uma interface de comando. Essa interface é composta um três botões de seleção e um LCD. Por meio dos quais são selecionados o modo de operação e os parâmetros para a utilização do secador. A operação do secador é feita de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 10.

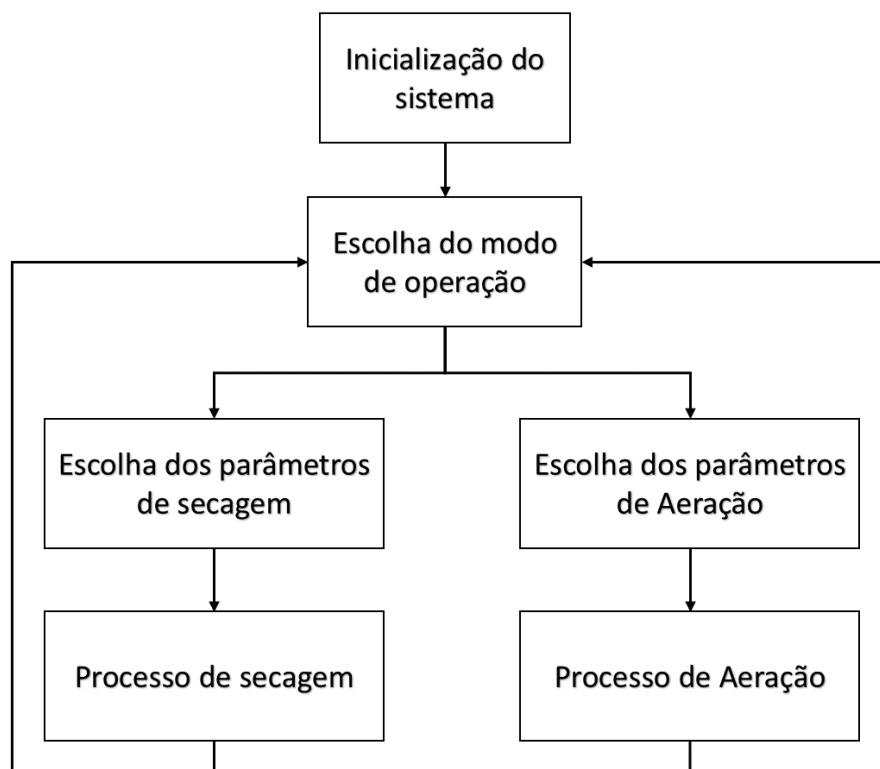


Figura 10 - Fluxograma da interface de comando

4.3 Software Supervisório de Secagem

O LSPMC – Supervisório de Secagem (Laboratório de Secagem de Plantas Medicinais e Condimentares) é uma interface de aquisição de dados e supervisão de secagem de plantas medicinais de fácil operação e de grande utilidade em atividades de pesquisa. Desenvolvido utilizando a ferramenta Visual C# 2010 Express, o *software* tem como intuito de facilitar a atividade de secagem de plantas durante as pesquisas realizadas no LSPMC.

O Visual C# é uma implementação da linguagem C# pela Microsoft. Visual Studio suporta o Visual C# com um editor de código completo. Além do editor de

texto estão disponíveis um compilador, modelos de projetos, designers, assistentes de código e um depurador de fácil utilização e outras ferramentas (Microsoft, 2015).

O LSPMC – Supervisor de Secagem possui, até o momento, duas versões. Em sua versão mais simples, 2015/1, o registro dos dados de secagem é feito de forma manual. Na versão 2015/2 o *software* possui as mesmas funcionalidades da versão mais simples e a leitura automática de algumas variáveis.

4.3.1 Versão 2015/1

Em sua versão 2015/1, mostrada na Figura 11, o registro dos dados de secagem é realizado de forma manual. Assim, o operador da secagem tem total liberdade para a inserção dos dados na planilha e para o controle dos tempos de secagem, o que confere aos estudos grande flexibilidade de coleta dos dados. O registro dos dados coletados é feito em arquivos eletrônicos de texto, que podem ser facilmente convertidos para documentos de texto e planilhas eletrônicas.

As leituras são feitas em intervalos estabelecidos pelo usuário e registradas pelo *software* adicionando-se a classificação cronológica da leitura e a hora da realização da mesma. Os dados são organizados com base em referências de tempo fornecidas pelo *software*, não tendo o usuário, acesso a esses dados.

O registro dos dados é feito a cada atualização dos dados. Esta funcionalidade evita a perda dos dados devido a mau uso do *software*, a quedas de energias e outros contratemplos que possam pôr em risco a coleta dos dados.

O arquivo de dados gerado pelo *software* é gerenciado pelo usuário. No momento de início da secagem o usuário escolhe o diretório de alocação deste e o nome do arquivo. Além disso, no arquivo de dados são gravados dados como data, produto da secagem e outros dados de identificação.

O *software* possibilita também a visualização instantânea dos dados em uma tabela. Essa tabela tem as mesmas características do arquivo de dados salvo pelo usuário, possibilitando a análise dos dados durante a secagem. Além da tabela, é apresentado um gráfico com o comportamento descrito pelas variáveis durante a secagem.

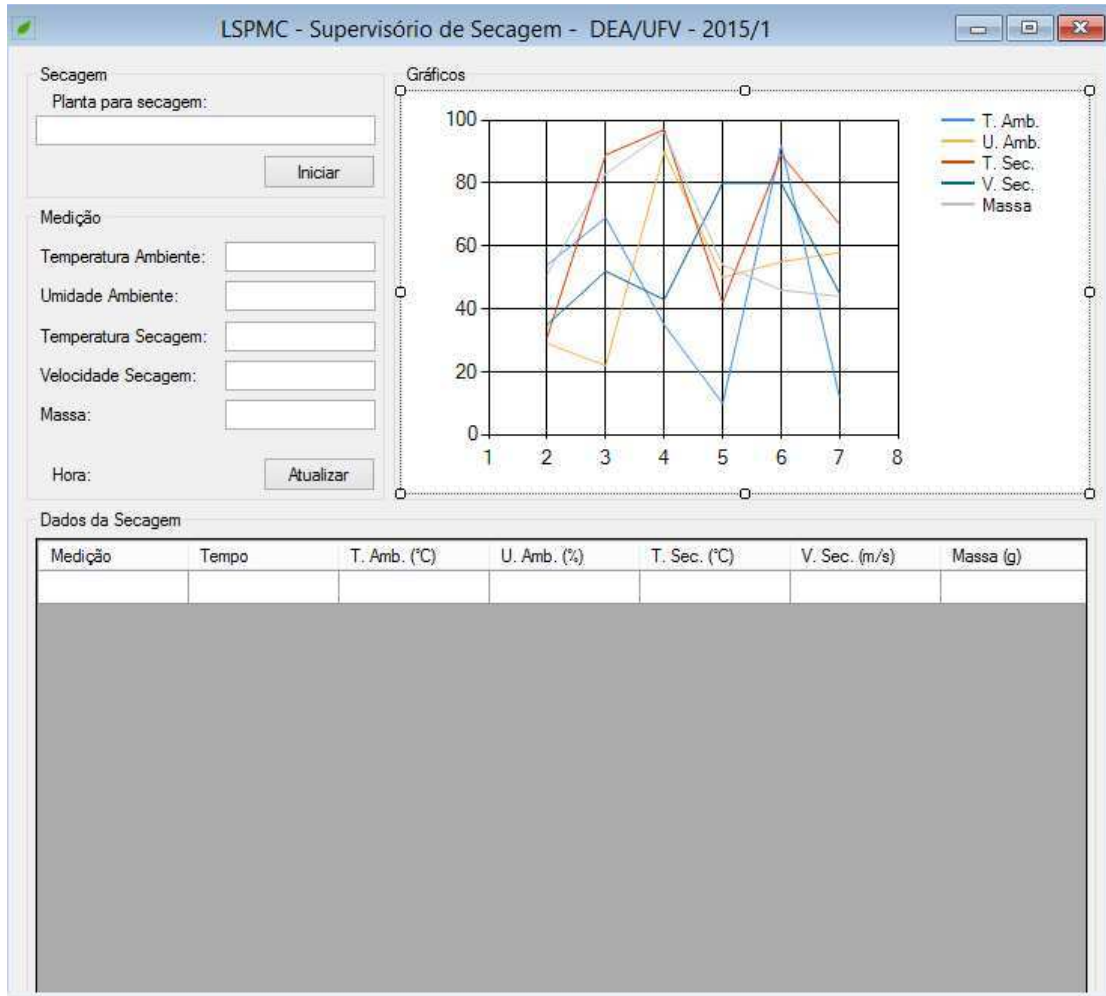


Figura 11 - LSPMC – Tela do software Supervisório de Secagem 2015/1

4.3.2 Versão 2015/2

Na versão 2015/2 o *software* possui as mesmas funcionalidades da versão mais simples, e a leitura automática de algumas variáveis. Essa leitura automática é possível devido à inserção de sensores no secador de Plantas Medicinais e à integração da plataforma de aquisição de dados Arduino ao *software* de aquisição usando de comunicação serial, como mostra o diagrama P&ID na Figura 12.

Na versão 2015/2 são coletados dados de temperatura e velocidade do ar de secagem. Esses dados são obtidos a partir dos sensores-transmissor de velocidade do ar e do sensor-transmissor de temperatura.

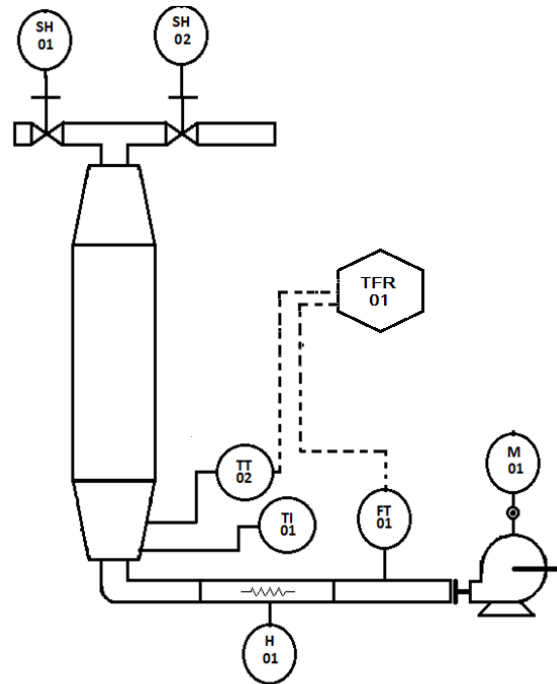


Figura 12 - Diagrama PI&D do sistema de aquisição de dados.

TFR-01: Registrador de fluxo e velocidade 01 (plataforma Arduino).

O sensor tem seus sinais condicionados para o padrão de comunicação Arduino como mostrado nas seções e . Como mostrado na Figura 13, o operador faz a requisição dos dados ao software de aquisição. Este por sua vez, envia ao Arduino sinal para que retornados os valores de velocidade e temperatura. Após a leitura o Arduino converte o sinal analógico para um valor digital de 10 bits e os envia para o computador. A informação recebida pelo software é uma palavra de sete caracteres dos quais os três primeiros são referentes a velocidade, o quarto é um caractere separador e os três últimos referentes a temperatura. Esses valores são tratados no software, de acordo com as características de conversão de cada variável, registrados e apresentados ao usuário.

A comunicação entre a placa eletrônica de aquisição e o computador é feita através de uma porta serial emulada por meio do driver da porta USB. O software supervisor faz a recepção dos dados na porta serial emulada, realiza os registros dos dados e os apresenta ao usuário, como mostrado na

Figura 14.

Assim como na versão 2015/1, o registro dos dados é feito a cada atualização dos dados e esses são organizados com base em referências de tempo fornecidas

pelo *software*.

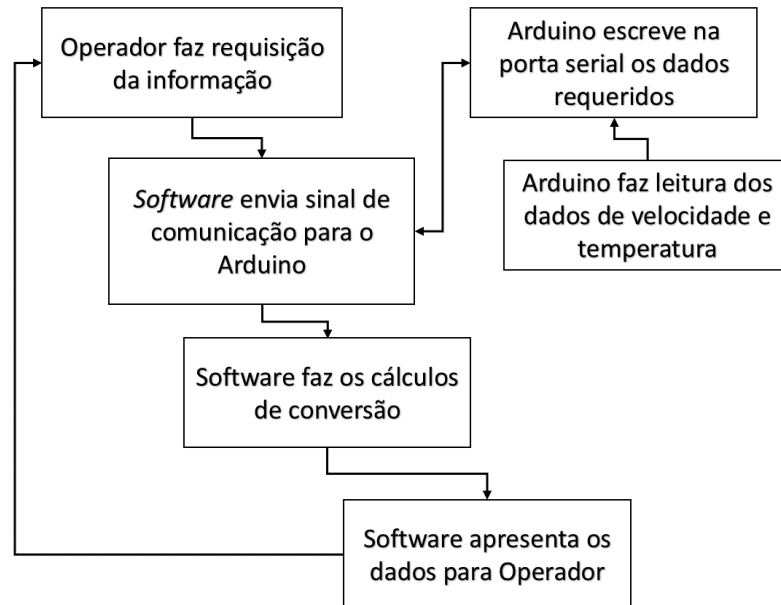


Figura 13 - Fluxo de informação na aquisição de dados

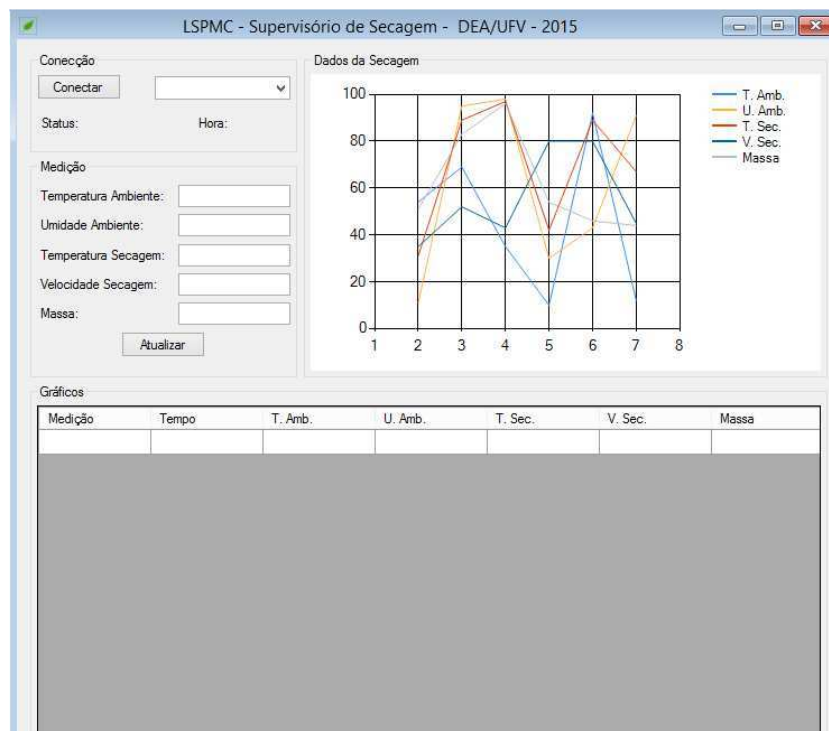


Figura 14 - Interface do software LSPMC – Supervisório de Secagem

5 Resultados e Discussão

5.1 Software LSPMC – Supervisor de Secagem.

O desenvolvimento do *software* se deu de forma progressiva. O seu desenvolvimento foi realizado paralelamente às atividades de estudo da linguagem e do desenvolvimento do programa de aquisição.

O *software*, em sua função de aquisição e registro de dados, se mostrou estável, não apresentando problemas no período de utilização. A comunicação do *software* com o Arduino se mostrou estável possibilitando a sua aplicação. O protocolo de comunicação elaborado para esta aplicação atendeu as necessidades de comunicação do *software*.

Além da avaliação das funcionalidades e da estabilidade do *software*, foi realizada também uma avaliação técnica do ponto de vista do usuário. O Software de LSPMC – Supervisor de Secagem foi avaliado segundo os critérios técnicos de avaliação estabelecidos por Silva et al. (2011), com restrições de aplicação. Essas restrições se devem ao fato deste *software*, voltado para o apoio à pesquisa, e a origem do trabalho de referência na avaliação se tratar de softwares educacionais. Estão descritas aqui apenas a avaliação da Versão 2015/2 devido ao fato de esta ser a mais completa.

Em primeira análise observou-se que seriam necessários ajustes, a fim de sanar algumas deficiências observadas no momento da utilização. Dentre essas melhorias estão, por exemplo, a criação da funcionalidade como “Desfazer”, para se editar a alteração mais recente, a inserção de recursos sonoros e da função de impressão dos dados. Ainda segundo a avaliação da aluna, é interessante também que as próximas versões do *software*, adicionem funcionalidades de aquisição de mais variáveis do processo de secagem, como umidade e temperatura do ar ambiente e monitoramento automático da massa do produto de secagem.

5.2 Sistema de controle

A montagem física dos sensores e atuadores do sistema de controle se mostrou robusta e atendeu as necessidades do processo. O transdutor de velocidade necessitou de correções em sua instalação para diminuir os efeitos da vibração mecânica do sistema sobre a leitura da velocidade. A correção foi feita

instalando-se uma união flexível, de borracha, entre o ventilador e o duto de medição da velocidade. Esta correção diminuiu a vibração e garantiu a leitura correta para todas as faixas de velocidade do ar.

O controle da velocidade foi testado em um intervalo de tempo de 200 segundos. Dos dados colhidos observou-se que, para os valores de ganho sintonizados, o sistema se comportou de maneira adequada em relação as demandas do processo. Como se pode observar o controle da variável velocidade com tempo de acomodação é aproximadamente 30 segundos e o erro em regime permanente se manteve em 2%.

Para a variável temperatura o intervalo de teste foi de 600 segundos. Dos dados colhidos observou-se que o tempo de acomodação máximo foi de aproximadamente 440 segundos e um valor de sobressinal de 9%. Para os valores de ganho sintonizados após a sintonia fina, o erro em regime permanente se manteve dentro de 4%. As curvas de reação do controle podem ser observadas na Figura 15 e na Figura 16.

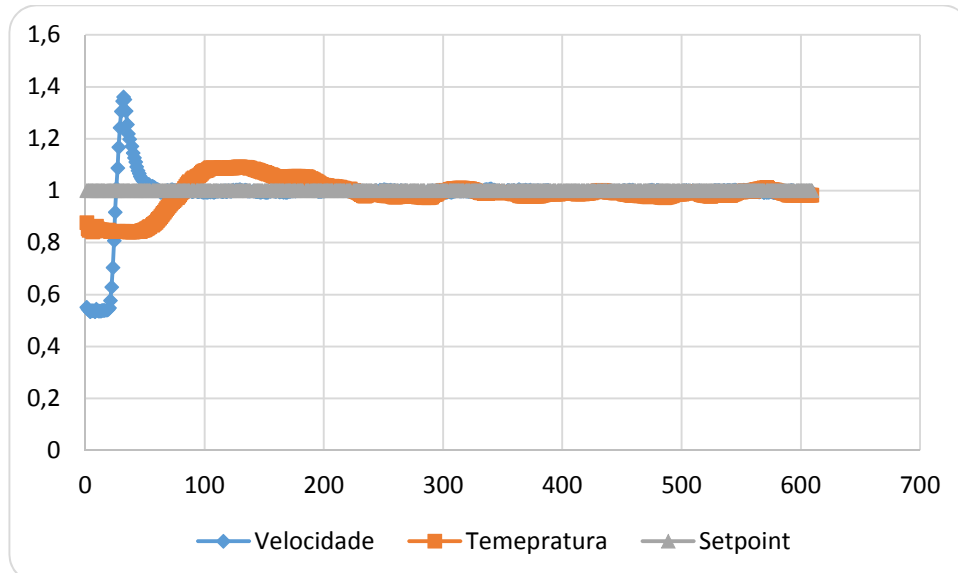


Figura 15 - Curva de comportamento do controle de temperatura e velocidade para 1 m s^{-1} e 30°C

A diferença entre os valores de ganho calculados e os valores de ganho sintonizados, no controlador de temperatura, se deve a diferença entre a forma de acionamento utilizada no momento da identificação e a utilizada no momento da sintonia fina dos ganhos. Devido a ação proporcional por meio do chaveamento da

chave estática, a configuração das características de tempo de trabalho e tempo de acionamento, alteraram a dinâmica de acionamento do sistema, alterando assim o valor de ganho ótimos.

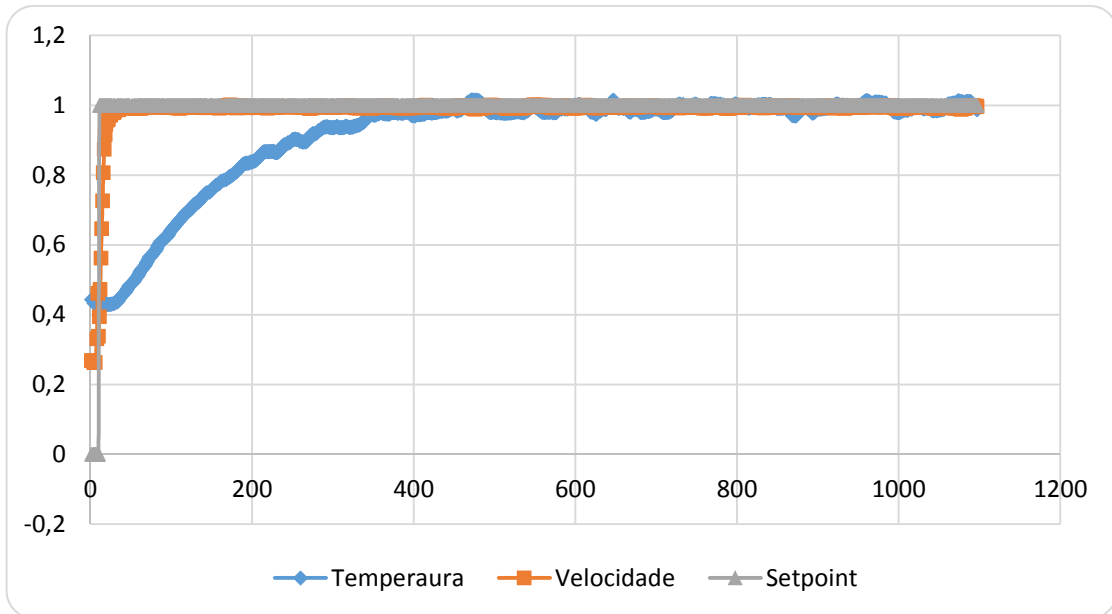


Figura 16 - Curva de comportamento do controle de temperatura e velocidade para 2 m s^{-1} e 60°C

Como forma de elucidar as diferenças entre o funcionamento do secador antes após a realização deste trabalho, foi realizada a secagem de *Cordia verbenacea* com o controle de velocidade em malha aberta e, após a coleta de dados, foram comparados os resultados com o controle realimentado, como mostra a Figura 17.

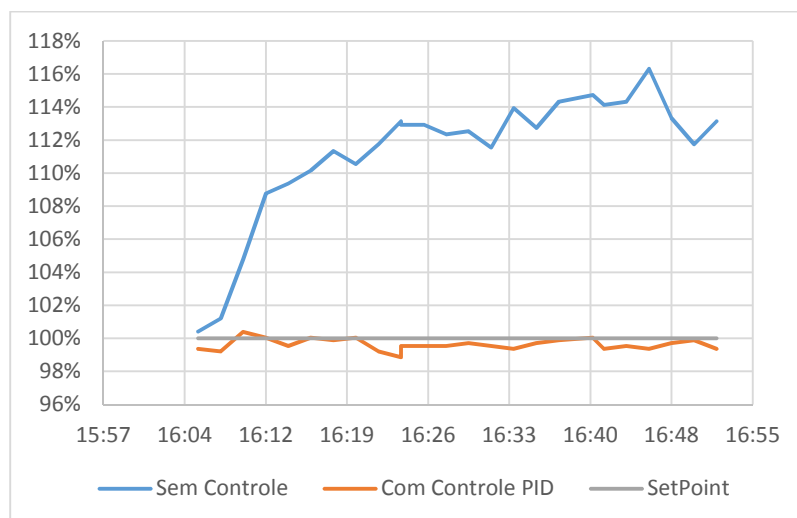


Figura 17 - Comparação de velocidade controlada e não controlada em secagem de *Cordia verbenacea* a 60°C .

Como se pode observar, para o sistema sem controle, a velocidade tende a aumentar à medida que a planta vai secando. Isso ocorre devido à redução da resistência a passagem do ar, e por consequência a redução da pressão estática. Como mostrado na **Figura 17** a velocidade aumenta chegando a valores de erro superiores a 10%.

Para o sistema com controle de temperatura e velocidade os valores de erro permanecem dentro dos valores especificados, garantindo a qualidade das plantas durante o processo de secagem.

6 Conclusão

Em função dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

1. O sistema de controle de velocidade e de temperatura do ar de secagem mostrou-se adequado ao objetivo proposto, mantendo os valores de erro para a temperatura e velocidade do ar dentro dos limites aceitáveis.
2. A plataforma Arduino se mostrou eficiente e confiável para desenvolvimento de sistemas de controle e de comunicação com interfaces de supervisão. Assim, pode-se recomendá-la como uma alternativa viável e de baixo custo para controle de secadores em nível de laboratório;
3. O sistema de aquisição dos dados do processo de secagem é estável e supriu as necessidades de monitoramento e registro dos dados durante o processo de secagem. Além disso, possibilitou maior agilidade no processo de análise dos dados devido ao registro automático dos mesmos.

Referências

- ADES, R. & SILVEIRA, B. P., 2008. **Método analítico de identificação de sistemas multivariável no domínio da frequência.** *Revista Militar de Ciência e Tecnologia*, Issue 23, pp. 15-23.
- AGUIAR, C. E. & LAUDARES, F., 2001. **Aquisição de Dados Usando Logo e Porta de Jogos do PC.** *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 23(4), pp. 371-380.
- Anon., s.d. *OMEGA User's Guide*. s.l.:omega.com.
- APARECIDO, C. C., 2005. **Desenvolvimento de um circuito eletrônico experimental de anemômetro de fio quente.** Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.
- ARDUINO.CC, 2015. **Arduino.** [Online]
Available at: <https://www.arduino.cc/>
[Acesso em 23 Junho 2015].
- ARENY, R. P., 1989. **Transductores y Acondicionadores de Señal.** 1 ed. Barcelona: Marcombo S.A..
- BOLTON, W., 2008. **Mecatrônica: Uma abordagem multidisciplinar.** 4ª ed. Porto Alegre: bookman.
- CASSIOLATO, C. & ORELLANA, E., 2010. **Medição de Vazão.** [Online]
Available at: <http://www.smar.com/newsletter/marketing/index40.html>
- EGUTI, C. C. A., 2005. **Desenvolvimento de um circuito eletrônico experimental de anemômetro de fio quente.** Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.
- FACCIN, F., 2004. **Abordagem Inovadora no Projeto de Controladores PID.** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- CECHINEL FILHO, V. & YUNES, R. A., 1998. **Estratégias para a obtenção de compostos farmacologicamente ativos a partir.** *Química Nova*, 1(21), pp. 99-105.
- FRANÇA, F. A., 2007. **Instrumentação e Medidas: Grandezas Mecânicas.** 1 ed. Campinas: UNICAMP.
- GONELI, A. L., VIEIRA, M. C., VILHASANTE, H. C. B. & GONÇALVES, A. A., 2014. **Modelagem matemática e difusividade efetiva de folhas de aroeira durante a secagem.** *Pesquisa Agropecuária Tropical*, Issue 44, pp. 56-64.
- LEMONS, S. G., NOGUEIRA, A. R. A. & NETO, A. T., 2004. **A agricultura na era da informação: desafios e propostas para automação em análises de solos.** *Revista Analytica*, Issue 8, pp. 42-50.
- LIMA, G. F. d., MANIÇOBA, G. G. C. & SALAZAR, A. O., 2013. **Controle de temperatura de um tocha de plasma térmico com acolamento indutivo utilizando a placa Arduino.** Foz de Iguaçu: XI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente.
- LOURENÇO, J., 1997. **Sintonia de Controladores PID.** Manaus: Escola Superior de Tecnologia.
- MACIEL, M. A. M. et al., 2001. **Plantas medicinais: a necessidade de estudos multidisciplinares.** *Química Nova*, Issue 25, pp. 429-428.
- MARTINAZZO, A. P., CORREIA, P. C., REZENDE, O. & MELO, E. C., 2007. **Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão.** *Revista Brasileira de Engenharia química e Ambiental*, 11(3), pp. 301-306.

- Microsoft, 2015. **Visual C#**. [Online]
Available at: <https://msdn.microsoft.com/pt-BR/library/kx37x362.aspx>
- MONTGOMERY, E. et al., 2010. **Sintonia de controlador PID**. Juazeiro: Universidade Federal do Vale do São Francisco.
- MORAES, C. C. d. F., 2003. **Anemômetro a fio quente**. Natal: UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE.
- OGATA, K., 1985. **Engenharia de controle moderno**. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil.
- OLIVEIRA, L. A. G. d., OLIVEIRA, R. C. L. d. & SOARES, R. P. d. O., 2004. **Projeto de controladores PID para processo termico baseado em uma nova regra de sintonia**. Belém: Depto de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Pará..
- ORENSTEIN, L. P., 2013. **Procedimento para identificação de sistemas dinamicos em ambiente industrial**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- QUACHIO, R., 2012. **Análise do Algoritmo PLS-PH para identificação de Sistemas: Metodo analítico de identificação desistemas multivariáveis no domínio da frequência**. São Paulo: s.n.
- RANDUNZ, L. L. et al., 2006. **Influência da Temperatura de Secagem no rendimento do óleo essencial de Hortelã-comun**. *Engenharia na Agricultura*, Out/Dez, p. 251.
- RIBEIRO, J. M. et al., 2014. **Sistema de moitoramento e controle de um processo de distribuição de água usando Arduino e protocolo GSM..** Florianópolis: Congresso Brasileiro de Engenharia Quimica.
- RIBEIRO, M. A., 2001. **Controle de Processos: Teoria e Aplicações**. 7 ed. Salvador: s.n.
- RIBEIRO, M. A., 2002. **Instrumentação**. 9 ed. Salvador: Tek Treinamento & Consultoria Ltda.
- RIBEIRO, R. R., Lopes, L. C. O. & Murata, V. V., 2009. **Implementação e avaliação de tecnicas de identificação de sistemas lineares e não-lineares usando codigo livre Scilab**. *IX Encontro Interno de Iniciação Científica*, p. 29.
- SABINO, S. B., ANTUNES, A., ZARA, A. J. & ANTUNES, S. A. P. S. R. N., 2003. **Obtenção e caracterização de Cerâmicas NTC de sistema Co2SnO4**. João Pessoa: Anais do 47º Congresso Brasileiro de Cerâmica.
- SAMPAIO, C. A. d. P., Passos, E. F., Dias, G. P. & Correa, P. C., 1998. **Desenvolvimento e avaliação de um anemometro de fio quente operando a temperatura constante**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2(2), pp. 229-234.
- SILVA, A. C. B. d., França, R. & Silva, W. C. d., 2011. **Uma proposição de critérios para avaliação de softwares educativos de Língua Portuguesa**. Aracaju: Anais do XXII SBIE - XVII WIE.
- SILVA, P. C., 2007. **Comparação de Técnicas de Sintonia para Controladores PID**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia.
- SILVA, T. M., LIMA, W. S. & CELERE, S. W., 1999. **Proposta de um tipo particular de anmômetro de fio quente:projeto e calibração**. Águas de Lindóia: XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica.
- SOARES, K., 2014. **TechTudo**. [Online]
Available at: <http://www.techtudo.com.br/noticias/noticia/2013/10/o-que-e-um-arduino-e-o-que-pode-ser-feito-com-ele.html>
[Acesso em 22 10 2014].

TEIXEIRA, C. A. & LEAL, A. B., 2007. **Concepção de um mini-refrigerador Peltier para uso como ferramenta de ensino de engenharia.** *XXXV Congresso Brasileiro de Educação na Engenharia*, pp. IB05-1-IB0513.

Anexo 1

Arduino (Mapa de conexões)		
Analógicas		
Terminal	Modo	Conexão / Função
AN0	Entrada	Sensor de Velocidade do ar / Leitura
AN1	Entrada	Sensor de Temperatura do ar
Digitais		
Terminal	Modo	Conexão / Função
D0		S H/L Reg Selct Signal do LCD / Comunicação com lcd
D1		E H- L Enable Signal do LCD
D2		DB4 H/L Data Bus Line do LCD
D3		DB5 H/L Data Bus Line do LCD
D4		DB6 H/L Data Bus Line do LCD
D5		DB7 H/L Data Bus Line do LCD
D6	Saída	S1 do controlador de potência / Acionamento
D7	Saída	S2 do controlador de potencia
D8	Saída	S3 do controlador de potencia
D9	Saída	Inversor de frequência / Acionamento
D10	Entrada	Botão 1 do painel frontal / Seleção
D11	Entrada	Botão 2 do painel frontal
D12	Entrada	Botão 3 do painel frontal