

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**SUPERVISÃO E CONTROLE DE SISTEMA DE SECAGEM DE GRÃOS DE
FEIJÃO EM LEITO FIXO VISANDO ECONOMIA DE ENERGIA E QUALIDADE
DO PRODUTO**

DANIEL GAIESKI

Campinas

Agosto de 2009

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**SUPERVISÃO E CONTROLE DE SISTEMA DE SECAGEM DE GRÃOS DE
FEIJÃO EM LEITO FIXO VISANDO ECONOMIA DE ENERGIA E QUALIDADE
DO PRODUTO**

**Dissertação apresentada a Faculdade
de Engenharia Agrícola da
Universidade Estadual de Campinas
como parte do requisito para obtenção
do título de Mestre em Engenharia
Agrícola.**

DANIEL GAIESKI

ORIENTADORA: BARBARA JANET TERUEL MEDEROS

CO ORIENTADOR: CLAUDIO KIYOSHI UMEZU

**Campinas,
Agosto de 2009**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

G124s Gaieski, Daniel
Supervisão e controle de sistema de secagem de grãos
de feijão em leito fixo visando economia de energia e
qualidade do produto / Daniel Gaieski. --Campinas, SP:
[s.n.], 2009.

Orientadores: Barbara Janet Teruel Mederos, Claudio
Kyioshi Umezu.

Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Feijão. 2. Feijão - Secagem. 3. Agricultura -
Consumo de energia. 4. Feijão - Armazenamento. I.
Teruel Mederos, Barbara Janet. II. Umezu, Claudio
Kyioshi. III. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Agrícola. IV. Título.

Título em Inglês: Supervision and control of drying system of beans in
fixed bed to aim for energy consumption and quality of
product

Palavras-chave em Inglês: Beans, Drying beans, Agriculture energy
consumption, Storage beans

Área de concentração: Máquinas Agrícolas

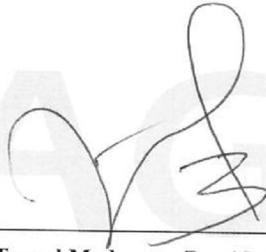
Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Flávio Vasconcelos, João Domingos Biagi

Data da defesa: 10/08/2009

Programa de Pós Graduação: Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da **Dissertação de Mestrado** defendida por **Daniel Gaieski**, aprovada pela Comissão Julgadora em 10 de agosto de 2009, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.



**Prof.^a Dr.^a Bárbara Janet Teruel Mederos – Presidente e Orientadora
Feagri/Unicamp**



**Prof. Dr. Flávio Vasconcelos da Silva – Membro Titular
FEQ/Unicamp**



**Prof. Dr. João Domingos Biagi - Membro Titular
Feagri/Unicamp**

DEDICATÓRIA

**Dedico este trabalho a meus avós (em memória)
Alberto Marigo e Antonieta Celotto**

“O único modo de evitar os erros é adquirindo experiência; mas a única maneira de adquirir experiência é cometendo erros”

Autor desconhecido

AGRADECIMENTOS

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES e a Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP pelo apoio financeiro para o desenvolvimento deste trabalho.

A Universidade Estadual de Campinas e a Faculdade de Engenharia Agrícola pela oportunidade oferecida para a realização do curso de Mestrado em Máquina Agrícolas.

A Professora Doutora Bárbara Teruel Mederos e ao Profissional de Pesquisa, Doutor Claudio Kiyoshi Umezu, pela orientação e dedicação ao longo do curso.

A todos os funcionários do Laboratório de Termodinâmica e Energia - LTE, Laboratório de Instrumentação e Controle – LIC, Laboratório de Pós-colheita e Oficina de Protótipos. Em especial aos funcionários da Oficina de Protótipos José Maria da Silva, Luiz Carlos dos Santos Silva, Francisco Ferreira dos Santos Filho e Devis Freitas Mendes, ao Técnico do Laboratório de Termodinâmica e Energia Pedro Fonte, a Técnica do Laboratório de Pós-colheita Rosa Helena Aguiar.

A minha Família, em especial minha mãe Marlene Marigo Gaietski, e meus avós (em memória) Alberto Marigo e Antonieta Celotto.

A todos que de alguma forma colaboraram na elaboração deste trabalho.

Nomenclatura

ρ - Densidade aparente [kg.m^{-3}]

m_{prod} - Massa de produto [kg]

ΔP - Perda de carga [Pa]

Θ_0 - Temperatura em regime permanente do ar

ΔT - Variação de temperatura [$^{\circ}\text{C}$]

\dot{m} - Vazão mássica [kg.s^{-1}]

Q - Vazão volumétrica [$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$]

V - Volume do produto [m^3]

A - Área do silo [m^2]

a, b - Constantes adimensionais, característicos do produto

C - Capacitância térmica [J.K^{-1}]

C_p - Calor específico [$\text{J.kg}^{-1}.\text{^{\circ}C}^{-1}$]

D - fator de profundidade – adimensional

d - Diâmetro do secador [m]

e_f - Eficiência do motor [Valores comumente entre 0,3 a 0,7]

f_{ar} - Fluxo de ar [$\text{m}^3.\text{min}^{-1}.\text{kg}^{-1}$]

h - Altura da camada de produto [m]

H - tempo de meia resposta

m_{prod} - Massa de produto [kg]

MS - Matéria seca [kg]

PT - Pressão total [Pa]

q - Potência das resistências elétricas [W]

$q(t)$ - Fluxo de calor [W]

Q_a - Obtida pela divisão da vazão volumétrica pela área circular do secador [$\text{m}.\text{min}^{-1}$]

Q_m - Vazão mássica [$\text{kg}.\text{min}^{-1}$]

Q_v - Vazão volumétrica [$\text{m}^3.\text{min}^{-1}$]

Q_V - Vazão volumétrica [$\text{m}^3.\text{min}^{-1}$]

R - Resistência térmica [C s kJ^{-1}]

Rauxiliar - Resistência auxiliar

Rprincipal- Resistência principal

RU- razão de umidade [%]

t- tempo após início da secagem

T1- Temperatura na camada mais inferior do leito de grãos [°C]

T2- Temperatura na camada intermediária do leito a cerca de 0,25 m de altura [°C]

T3- Temperatura na camada intermediária do leito a cerca de 0,5 m de altura [°C]

T4- Temperatura na saída do secador [°C]

U- teor de umidade atual do produto [decimal base seca]

U₀- teor de umidade inicial [decimal base seca]

U_e- teor de umidade de equilíbrio para as condições do ar de secagem [decimal base seca]

UR_e- Umidade relativa do ar na entrada do secador [%]

UR_s- Umidade relativa do ar na saída do secador [%]

$v =$ Volume específico [$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}_{\text{ar seco}}$]

VI- *Virtual instruments*

W- massa específica da matéria seca [kg m^{-3}]

Y- adimensional de tempo

θ_1 - Temperatura do ar antes de passar pela resistência elétrica [°C]

θ_2 - Temperatura do ar depois de passar pela resistência elétrica [°C]

RESUMO

A secagem de produtos agrícolas, especialmente grãos, é importante na pós-colheita, por ser responsável pelo prolongamento no seu tempo de armazenamento e conservação, resultado da redução da atividade de água presente em seu interior e conseqüentemente queda no desenvolvimento de micro organismos que conduziriam o produto a deterioração antecipada. Ao mesmo tempo em que a importância da realização de secagem é inquestionável, também é fato que este processo representa um consumo considerável de energia em virtude do aquecimento e movimentação forçada do ar que irá escoar por entre os grãos promovendo a retirada de massa de água (transferência simultânea de calor e massa). É importante que a temperatura do ar de secagem se mantenha no valor recomendado para não causar danos ao produto e não consumir mais energia que o necessário, este valor de temperatura varia de acordo com o produto e com sua finalidade de uso, neste trabalho considerou-se tal valor como sendo de 50 °C. O objetivo deste trabalho foi desenvolver um sistema de secagem com capacidade de monitorar, registrar e atuar sobre o processo de secagem de maneira *on line* e proporcionar redução no consumo de energia e manutenção da qualidade do produto quando comparado com sistema operando com estratégia de controle *on/off* ou de forma automática com uso de um controlador de temperatura implementado através de *software*. O desenvolvimento do sistema de secagem constituiu-se de várias etapas: concepção, projeto e construção do secador, elaboração e montagem dos circuitos elétricos, instalação dos instrumentos de medição e sistema de aquisição de dados, desenvolvimento e implementação do aplicativo de monitoramento, registro e controle, após a calibração dos instrumentos foram realizados diversos testes livres para conhecer o comportamento do sistema, varios testes com diferentes condições de temperatura e vazão de ar foram necessários para avaliar o controlador, o que também implicou em testar controladores PID para temperatura implementados com diferentes algoritmos. Realizou-se os testes definitivos com o secador contendo cerca de 50kg de feijão e concluiu-se que houve redução no consumo de energia em torno de 18% e manutenção na qualidade do produto.

ABSTRACT

Drying of agricultural products, especially grain is of fundamental importance in the stage of post-harvest, to be responsible for extending their time in storage and conservation, a result of reduced water activity in this consequently and drop them in the development of micro organisms that lead to product deterioration early. At the same time the importance of performing drying is unquestionable, it is also fact that this process represents a considerable consumption of energy due to heating and forced movement of air that will flow between the grains by promoting the removal of the water (simultaneous transfer of heat and mass). Found along the consultations related to the literature it is important to keep the temperature at which the grains are submitted within a limit that can promote or accelerate the removal of moisture without damaging the product, the recommended upper limit varies according in order to use the product, this work was considered as the temperature of 50 ° C. The prime objective of this study was to develop a system capable of drying track, record and act on the drying process so online and provide reduction in energy consumption and maintenance of product quality when compared to how the on/off control strategy or automatically using a temperature controller implemented via software. The development drying system consisted of several stages: design, design and construction of the dryer, preparation and assembly of electric circuits, installation of measuring instruments and data acquisition system, development and implementation of application monitoring, recording and control, after the calibration of the instruments were performed several tests available to determine the behavior of the system, various tests with different conditions of temperature and flow rate of air were required to assess the controller, which also meant to test for PID temperature controllers with different structures. We carried out the final tests with the dryer containing about 50 kg of beans and concluded that there was a reduction in energy consumption around 18% and maintaining the quality of product.

SUMÁRIO

Nomenclatura.....	VII
RESUMO	IX
ABSTRACT	X
SUMÁRIO.....	XI
LISTA DE FIGURAS	XIV
LISTA DE TABELAS	XVI
Capítulo 1	1
Contextualização, etapas do projeto e definição dos objetivos	1
Introdução.....	1
Capítulo 2	5
Revisão Bibliográfica.....	5
Panorama geral sobre processos de secagem de grãos.....	5
Resumo	5
Abstract	6
2.1 Secagem de Grãos	6
2.2 Modelos matemáticos para o estudo da secagem visando à aplicação em algoritmos de controle.....	10
2.3 Monitoramento e supervisão do processo de secagem.....	14
2.4 Aplicação de redes neurais e lógica <i>fuzzy</i> para o controle de processos de secagem	16
2.5 Malhas com controle preditivo de processos de secagem	18
2.6 Processos de secagem, economia de energia e qualidade do produto.....	20
2.7 Discussão	21
2.8 Referencias bibliográficas	22
Capítulo 3	29
Dimensionamento, desenvolvimento, construção e instrumentação do sistema de secagem	29
Resumo	29
Abstract	30
Introdução.....	31
3.1 Material e Métodos	32
3.1.1 Seleção do produto	32
3.1.2 Projeto e dimensionamento do secador	32
3.1.3 Definição das variáveis para o dimensionamento do secador	32
3.1.4- Dimensionamento do ventilador	34
3.1.5 Dimensionamento das resistências elétricas	35
3.1.6 Construção do secador.....	35
3.2 Circuitos eletro-eletrônicos.....	37
3.3 Sistema de aquecimento	40
3.4 Sistema de circulação forçada de ar	42
3.5 Inversor de frequência	42
3.6 Instrumentação do Sistema de Secagem	44
3.7 Medição da Temperatura do ar e dos grãos.....	46
3.8 Medição da umidade do ar no secador	46
3.9 Medição da velocidade do ar no secador.....	47
3.10 Temperatura e umidade relativa ambiente.....	47

3.11 Sistema de aquisição de dados.....	48
3.12 Calibração dos sensores de temperatura.....	51
3.13 Resultados e Discussão.....	51
3.14 Conclusões.....	53
3.15 Referências Bibliográficas.....	53
Capítulo 4	54
Supervisão e controle do processo de secagem	54
Resumo.....	54
Abstract	54
Introdução.....	55
4.1 Aplicativo de supervisão e controle	57
4.2 Metodologia para o desenvolvimento do aplicativo	58
4.3 Digitalização do sinal analógico	60
4.4 Sistema de medição.....	60
4.5 Caracterização do sistema de aquisição de dados.....	61
4.6 Atuação sobre o sistema de secagem	62
4.7 Supervisório de monitoramento e controle do processo de secagem.....	64
4.8 Variação de grandezas relacionadas à tensão sobre o inversor de frequência.....	73
4.9 Testes verificativos do sistema de secagem - Relação temperatura, umidade e tempo de secagem	75
4.10 Resultados dos testes com controle on/off e PID em relação a umidade	78
4.11 - Resultados dos testes com controle <i>on/off</i> e PID em relação a temperatura	81
4.12 Consumo de energia elétrica.....	84
4.13 Erro.....	85
4.14 Conclusões.....	85
4.15 Sugestões de trabalhos futuros.....	86
4.16 Referências Bibliográficas.....	86
Capítulo 5	88
Influência do processo de secagem na qualidade dos grãos de feijão	88
Resumo.....	88
Abstract	88
Introdução.....	89
5.1 Testes de qualidade	89
5.1.1 Determinação do teor de umidade.....	90
5.1.2 Peso de Mil Grãos	90
5.1.3 Peso Específico Aparente, Peso Específico Real e Porosidade	90
5.1.4 Porosidade.....	91
5.1.5 Ângulo de Talude	92
5.1.6 Fatores que afetam o ângulo de talude	92
5.1.7 Classificação do Feijão	93
5.2 Materiais e Métodos	94
5.2.1 Método da Estufa à Pressão Atmosférica	94
5.2.2 Peso de Mil Grãos	95
5.2.3 Peso Hectolitro	95
5.2.4 Peso específico real	96
5.2.5 Danos Mecânicos	96
5.3 Resultados e Discussões	96

5.3.1 Testes preliminares.....	96
5.3.2 Testes definitivos.....	100
5.4 Conclusões.....	106
5.5 Sugestões de trabalhos futuros.....	107
5.6 Referências Bibliográficas.....	107
APÊNDICE	108
A.1 Testes livres	108
A.2 Calibração dos Pt 100.....	111

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Variáveis que interferem no processo de secagem	8
Figura 2.2- Estrutura típica de um secador de leito fixo: a numeração indica posição dos sensores de temperatura e umidade (Adaptado de Chen, et al 2002).	17
Figura 2.3- Esquema de controle auto-ajustável (STR)	19
Figura 2.4- Controle preditivo para secador de grãos	20
Figura 3.1- Dimensões do secador (em milímetros)	36
Figura 3.2- Laboratório de Termodinâmica e Energia	37
Figura 3.3- Esquema elétrico do painel	38
Figura 3.4- Ligação elétrica do relé de estado sólido	39
Figura 3.5- Circuito amplificador	40
Figura 3.6- Resistências elétricas dispostas fisicamente em paralelo	41
Figura 3.7- Habilitação de controle local/remoto e variação de frequência via terminais	43
Figura 3.8- Localização dos instrumentos no secador	45
Figura 4.1 – Operação do secador	59
Figura 4.2 – Diagrama representando o sistema de monitoramento	61
Figura 4.3 – Controle em malha fechada	63
Figura 4.4 – Diagrama de desenvolvimento do controle	64
Figura 4.5 – Painel frontal (modo manual e <i>on/off</i>)	65
Figura 4.6- Painel frontal (PID)	66
Figura 4.7 – Consumo de energia em diversas fontes	67
Figura 4.8 – Diagrama de blocos referente a aquisição de temperatura	68
Figura 4.9 – Diagrama de blocos responsável pela saída analógica e comando do relé de estado sólido	69
Figura 4.10 – Diagrama de blocos utilizado para atuar sobre o inversor de frequência	69
Figura 4.11 – Diagrama de blocos mostrando controle PID	70
Figura 4.12- Controlador PID	71
Figura 4.13 - Ação derivativa	72
Figura 4.14 - Ação Integral, somando o derivativo e o proporcional	72
Figura 4.15- Controlador PID simplificado	73
Figura 4.16- Variação tensão do motor em função da frequência	73
Figura 4.17- Variação da rotação em função da frequência	74
Figura 4.18- Variação da velocidade do ar de secagem em função da frequência	74
Figura 4.19- Variação da tensão em função da rotação	75
Figura 4.20 – Variação da umidade relativa do ar na saída do secador	76
Figura 4.21 - Temperatura máxima	77
Figura 4.22 – Comportamento da temperatura do ar	77
Figura 4.23 - Umidade do ar na entrada e saída do secador (<i>on/off</i>)	79
Figura 4.24 – Umidade do ar na entrada e saída do secador (PID)	80
Figura 4.25 - Umidade de equilíbrio dos grãos	80
Figura 4.26 - Comportamento da temperatura do ar com uso do controle tipo <i>on/off</i>	81
Figura 4.27 - Temperatura na camada intermediária e superior (<i>on/off</i>)	82

Figura 4.28 - Temperatura do ar na camada intermediária (T2) e superior (T3) com controle PID	82
Figura 4.29 - Especificações da resposta transitória	83
Figura 4.30 – Especificações da resposta transitória com secador vazio	83
Figura A.1 – Comportamento da temperatura do ar utilizando ganho proporcional $k_p=3$	108
Figura A.2 - Comportamento da temperatura utilizando ganho proporcional $k_p=2,6$	109
Figura A.3 – Comportamento da temperatura utilizando ganho proporcional $k_p=2,3$ e $k_i=6,9$	109
Figura A.4 – Comportamento da temperatura utilizando $k_p=2,6$ e $k_i=6,6$	110
Figura A.5 - Comportamento da temperatura com uso do controle <i>on/off</i>	110
Figura A.6 – Curva de calibração do Pt100 1	112
Figura A.7 – Curva de calibração do Pt 100 2	112
Figura A.8 – Curva de calibração do Pt 100 3	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Parâmetros para dimensionamento do secador	33
Tabela 3.2 - Valores de erro obtidos com a calibração	52
Tabela 4.1 – Valores estimados do consumo de energia para diferentes combustíveis...	84
Tabela 5.1- Valores de ângulo de talude do feijão para diferentes teores de umidade	93
Tabela 5.2- Teor de umidade antes da secagem (teste preliminar com produto - Antes da secagem)	97
Tabela 5.3- Teor de umidade após a secagem (teste preliminar com produto – Após a secagem)	97
Tabela 5.4- Peso de mil grãos antes e após a secagem do produto (teste preliminar)	98
Tabela 5.5 - Peso Hectolitro (peso específico aparente) calculado antes e após a secagem (teste preliminar)	98
Tabela 5.6 - Peso específico real antes e após a secagem (teste preliminar).....	99
Tabela 5.7 - Ângulo de talude antes da secagem (teste preliminar)	99
Tabela 5.8 - Ângulo de talude após a secagem (teste preliminar)	99
Tabela 5.9 - Classificação do feijão quanto a defeitos graves e leves antes a e após a secagem (teste preliminar).....	100
Tabela 5.10- Teor de umidade antes da secagem (controle <i>on/off</i> – Antes da secagem)	100
Tabela 5.11- Teor de umidade após a secagem (controle <i>on/off</i> – Após a secagem)	101
Tabela 5.12- Teor de umidade antes da secagem (controle PID – Antes da secagem) .	101
Tabela 5.13- Teor de umidade após a secagem (controle PID - Após a secagem).....	101
Tabela 5.14- Peso de mil grãos antes e após a secagem do produto (teste definitivo) ..	102
Tabela 5.15 - Peso Hectolitro (peso específico aparente) calculado antes e após a secagem (teste definitivo).....	102
Tabela 5.16 - Peso específico real antes e após a secagem (teste definitivo).....	103
Tabela 5.17 - Ângulo de talude antes da secagem (teste definitivo)	103
Tabela 5.18 - Ângulo de talude após a secagem (teste definitivo)	103
Tabela 5.19 - Classificação do feijão quanto a defeitos graves e leves antes a e após a secagem (teste definitivo, controle <i>on/off</i>)	104
Tabela 5.20 - Classificação do feijão quanto a defeitos graves e leves antes a e após a secagem (teste definitivo, controle PID)	105
Tabela A.1 - Valores ascendentes de temperatura na calibração dos Pt100	111
Tabela A.2 - Valores descendentes de temperatura na calibração dos Pt100	111
Tabela A.3 - Classificação do produto (testes preliminares – Antes da secagem)	113
Tabela A.4 - Classificação do produto (teste preliminar – Após a secagem).....	114
Tabela A.5 - Classificação do produto (teste definitivo – Antes da secagem).....	116
Tabela A.6 - Classificação do produto (teste definitivo – Após a secagem).....	117

Capítulo 1

Contextualização, etapas do projeto e definição dos objetivos

Introdução

A produção agrícola tem grande importância para a economia do Brasil, destacando-se o setor de grãos, que além da participação significativa no PIB nacional representa ainda uma fonte nutricional importante tanto para alimentação humana como para a fabricação de alimentos para animais. Estes grãos devem passar por um processo de secagem após sua colheita para que ocorra redução na atividade de água e assim possam ser armazenados por longos períodos de tempo conservando sua qualidade e suas propriedades desejadas à cada finalidade específica

Dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) mostram que a safra de cereais, leguminosas e oleaginosas foi recorde, com 145,1 milhões de toneladas em 2008, 9% maior que a de 2007 e a previsão de área a ser colhida (47,4 milhões de hectares) serão 4,4% maior que a do ano de 2007. Dentre os 25 produtos analisados pelo IBGE, se destacam o amendoim em casca (38,8%), arroz em casca (9,2%), aveia em grão (12,2%), café em grão (28,0%), feijão em grão (43,3%), milho em grão (29,1%), soja em grão (3,5%), sorgo em grão (37,5%) e trigo em grão (32,4%).

Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), até o final do ano de 2008, foram embarcadas 52,2 milhões de toneladas de milho, soja, feijão e algodão. De janeiro a julho, a saída desses produtos e seus derivados renderam ao país US\$ 13,29 bilhões. A balança comercial do agronegócio, nesse mesmo período, contabilizou US\$ 40,11 bilhões em exportações.

Mas embora o crescimento da produção de grãos venha sendo significativo nos últimos anos, a capacidade de armazenagem no Brasil não tem acompanhado ao longo dos anos o ritmo de crescimento das safras.

Segundo Nogueira Junior e Nogueira (2007), estima-se que no Brasil apenas 10% da capacidade armazenadora total esteja localizada nas unidades de produção, cifra bastante baixa quando comparada à proporção existente nas propriedades rurais dos Estados Unidos (65%),

na Europa (50%) e na Argentina (25%). A FAO (Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação) recomenda que a capacidade de armazenagem de cada país seja pelo menos, 20% maior que a produção agrícola por questões de segurança alimentar, aqui entendida como garantia de abastecimento. Neste sentido a secagem ganha importância primordial, pois após a colheita e antes da etapa de armazenamento, os grãos devem ser submetidos à secagem para diminuir o teor de umidade até valores compatíveis com os padrões de comercialização estabelecidos, reduzindo as perdas que podem chegar a provocar prejuízo de US\$ 337 milhões referentes a 2,25 milhões de toneladas de grãos, como relatado por Nogueira Junior e Nogueira (2007).

Estudos recentes com as principais culturas apontam o milho como o grão que mais sofre perdas no País, até 10%, sendo que 4% se referem à colheita, 5% ao armazenamento e 1% ao transporte. Diagnóstico elaborado pelo Ministério da Agricultura e do Abastecimento revelou que as perdas decorrentes das diversas etapas dos processos produtivos e de comercialização chegam ao montante de US\$ 2,34 bilhões, considerando-se grãos como o arroz, o feijão, o milho, a soja e o trigo.

Levando-se em conta que o Produto Interno Bruto (PIB) agrícola alcança um valor aproximado de US\$ 30 bilhões, o *deficit* gerado pelas perdas nos grãos chega a 8% do total das riquezas produzidas pelo campo (Conab, 2008). E entre os fatores que ocasionam estas perdas destaca-se a utilização de estruturas de armazenagem inadequadas para a conservação dos produtos agrícolas, manutenção incorreta dos equipamentos e das estruturas usadas nas unidades, operação inadequada dos equipamentos de recepção, limpeza e secagem, além de armazenagem dos produtos com teores de umidade e teores de impurezas acima dos recomendados.

A qualidade do processo de secagem é necessária para conservação e vida útil dos grãos, já que quando secos muito rapidamente tendem a sofrer danos fisiológicos que irão se transformar em trincas ou rachaduras e que, no final, serão perdidos. Segundo a Conab, 2008, o País conta com uma capacidade de armazenagem de 126 milhões de toneladas e desse total apenas 50% têm boas condições para armazenar. O restante das unidades não guarda bem o produto, por problemas de aeração, termometria e limpeza.

Uma compilação apresentada por Silva e Corrêa (2005), sobre trabalhos desenvolvidos no período de 1970 e 2003, mostra que as pesquisas sobre secagem se iniciaram no Brasil nos

anos 70, mas só ao final dos anos 80 e início dos 90, que alguns autores iniciaram as publicações em diversas fontes, nacionais e internacionais.

Os primeiros trabalhos, tanto no Brasil como fora dele, focaram o desenvolvimento experimental e avaliações da cinética de secagem, indo logo pelo caminho do desenvolvimento de modelos matemáticos, visando simulação, otimização, combinação de técnicas e chegando a aplicação de diferentes estratégias para controle automático do processo.

O objetivo geral deste trabalho foi desenvolver e implementar um sistema de supervisão e controle de um secador de leito fixo para grãos, visando reduzir o consumo de energia e manter a qualidade do produto dentro dos padrões estabelecidos.

Os objetivos específicos foram:

- Definir o tipo e estrutura básica do secador de grãos, desenvolvê-lo e construí-lo;
- Instrumentar e montar os circuitos elétricos e demais dispositivos tornando o secador operacional, incluindo o sistema de aquisição de dados;
- Desenvolver e implementar um aplicativo para monitorar, registrar e atuar sobre o processo de secagem;
- Implementar o controle *on/off* e PID sobre a temperatura do ar de secagem;
- Comparar o controle do tipo *on/off* e PID implementados quanto ao comportamento da temperatura, energia consumida e qualidade do produto.

O trabalho foi estruturado em capítulos, sendo este primeiro uma descrição das diferentes etapas do trabalho. O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica e do estado da arte da temática em estudo; no capítulo 3 descreve-se o dimensionamento, desenvolvimento, construção e instrumentação do sistema de secagem; no capítulo 4 trata da supervisão e controle do processo de secagem e o capítulo 5 o estudo da influência do processo de secagem na qualidade dos grãos de feijão.

O desenvolvimento do secador do tipo leito fixo contempla fluxo de ar forçado, aquecido por um conjunto de resistências elétricas, com a supervisão, controle e registro do processo ao longo do tempo. Na primeira etapa do projeto escolheu-se o produto a ser seco e a quantidade deste produto, estabelecendo-se então os parâmetros de projeto e dessa forma dimensionando-se adequadamente o equipamento quanto a suas dimensões físicas e potência elétrica.

Na segunda etapa foi definido e adquirido o material para a construção do secador verificando-se sua disponibilidade, qualidade e custo. Com todo o material necessário adquirido, deu-se seqüência a próxima etapa, que consistiu na construção do secador, tarefa esta realizada na oficina de protótipos da Faculdade de Engenharia Agrícola, esta estrutura foi constituída basicamente por tubos quadrados e perfis de aço que foram devidamente marcados, cortados, dobrados e soldados. Também foi construída uma estrutura em forma de silo, confeccionada em aço e submetido à dobra em calandra e tratado com banho de zinco para evitar oxidação prematura.

A próxima etapa foi à seleção dos sensores e dispositivos para movimentação forçada do ar e aquecimento, pesquisou-se junto a fabricantes os tipos e as características de diversos sensores de temperatura e umidade relativa do ar, e também buscou-se, de acordo com o dimensionamento realizado, o conjunto motor/ventilador adequado, bem como as resistências elétricas para o aquecimento do ar.

Os sensores foram fixados em posições específicas do secador, enquanto o conjunto de resistências elétricas foi montado na câmara de aquecimento, onde acoplou-se o conjunto motor/ventilador responsável pela circulação forçada de ar. A etapa seguinte foi o projeto e a montagem do painel elétrico e dos dispositivos auxiliares que garantem a alimentação elétrica e a segurança do secador.

Com os sensores calibrados, realizou-se a penúltima etapa do projeto, que consistiu no desenvolvimento de um aplicativo de supervisão, controle e registro do processo, com este aplicativo tornou-se possível visualizar as variações das grandezas envolvidas no processo e atuar sobre elas, tanto de forma manual como automática.

Foi implementado um controlador PID, a estratégia de atuação adotada foi do tipo PWM, atuando sobre relés de estado sólido que permitem alterar a potência de trabalho das resistências elétricas, enquanto a vazão do ar de secagem sofre variação pela ação do inversor de frequência controlado também pelo aplicativo desenvolvido e com valores definidos após testes preliminares. A última etapa do projeto foi à realização de testes e ajuste no controle, registrando e analisando os dados obtidos.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Panorama geral sobre processos de secagem de grãos

Resumo

A secagem de grãos é um processo largamente empregado para a conservação pós-colheita, sendo parte importante da cadeia produtiva, uma vez que esta diretamente ligada à qualidade do produto e aumento de seu tempo de armazenamento e de vida útil. Há diversos tipos de secadores com características bem definidas e em todos eles diversas variáveis envolvidas, dentre elas destaca-se a temperatura de trabalho do ar de secagem e seu controle é recomendado para que a qualidade do produto seja mantida e o consumo de energia não se torne maior que o necessário, sobretudo pelo fato de que o aquecimento deste ar é o principal fator de consumo de energia ao longo do processo de secagem. No entanto, o controle efetivo dos processos de secagem é complexo e difícil devido às não linearidades e longos tempos de processo. Apresenta-se neste capítulo uma discussão com base nos resultados de pesquisas referente às tecnologias e estratégias de controle aplicadas a processos de secagem de grãos, pontuando os seus avanços e suas limitações com o objetivo de definir as bases para o desenvolvimento de um sistema de controle com supervisão *on-line* da secagem de grãos, em secador do tipo leito fixo.

Palavras-chave: Leito fixo, grãos, monitoramento.

Abstract

The drying of grains is a process each time more used for the conservation post-harvest, being important part of the productive chain, a time that this directly on to the product quality and increase of the storage time and useful life. In the drying process different variable are involved and must be carried through applying different types of driers, searching the adjusted relation cost-benefit. Particularly, the control of the involved 0 variable as, the temperature, speed and relative humidity of air as well as the text of humidity of the grains, is indispensable, since, in a general way, the operations of drying generate high costs, involving with workmanship hand and mainly, the energy consumption. However, the effective control of the drying processes is complex and difficult, had to non linearity and long times of process. A quarrel is presented, on the basis of the results of research, the state of the art of the technologies and strategies of control applied the processes of drying of grains, highlighting the advances and limitations, with the objective to define the bases for the development of a control system, with supervision in real time, of the drying of grains, in drier of fixed stream bed.

Keywords: Fixed bed, grain, monitoring.

2.1 Secagem de Grãos

Como mostra um estudo apresentado por Mujumdar (2007), tem havido um crescimento exponencial em pesquisas e desenvolvimento associado ao processo de secagem de produtos agrícolas. Esta tendência pode ser explicada também pelo fato de que processos de secagem são grandes consumidores de energia e devem ser avaliados do ponto de vista técnico e econômico. Isto, ligado ao fato de que a cada dia os mercados são mais agressivos, as questões relacionadas com o custo da secagem e da qualidade dos produtos se tornam indispensáveis (Fortes e Ferreira, 2004).

A secagem de grãos vem sendo utilizada há muito tempo por agricultores de todo o mundo, empregando diferentes métodos e sistemas, desde métodos rústicos e intuitivos, até sofisticados equipamentos, para reduzir o teor de umidade dos produtos. Para os padrões do

Brasil, um secador do tipo silo de leito fixo ainda possui alto custo e a viabilidade de uso muitas vezes estão restritas às propriedades que atingem maior produtividade, como mostra um estudo realizado por Jasper et al. (2006), onde fica claro que a viabilidade na obtenção de um silo secador se dá em propriedades de 20 ha com produtividade de 4.500 e 5.100 kg ha⁻¹, 30 ha e 40 ha nos vários níveis de produtividade (3.900; 4.500 e 5.100 kg ha⁻¹), sendo nas propriedades de área menor a 10 ha, sob qualquer produtividade, mais adequado a terceirização da secagem e armazenamento do produto, porém em nenhum caso a ausência da secagem se justifica.

Diminuindo a disponibilidade de água nos grãos, diminui-se o desenvolvimento de fungos e bactérias, evitando surgimento de grãos ardidos e micotoxinas, mas também se ativa o processo de respiração, provocando perdas de peso e geração de calor e há o surgimento de reações bioquímicas, que promovem a auto-degeneração do produto. Nas condições brasileiras o teor de umidade recomendado, como ideal, para a armazenagem de grãos e sementes é de 13%, valor em que se deve estabilizar a atividade aquosa do produto, inviabilizando, principalmente o desenvolvimento de fungos e bactérias.

O processo de secagem acontece, fundamentalmente, em três fases, nas quais o ar de secagem cede calor ao produto, forçando a umidade do grão, a migrar para o ar em volta do produto ou micro-clima, aumentando a umidade relativa do ar. Na segunda fase a umidade relativa do ar do micro-clima é superior à umidade relativa do ar de secagem, estabelecendo-se um fluxo de vapor. Logo após esta fase, o ar de secagem cedeu calor ao grão e absorveu vapor de água, diminuindo a temperatura do ar com aumento da umidade relativa, chamando-se ar de exaustão.

A figura 2.1 ilustra o processo de secagem, onde o ar de secagem atravessa o produto, a temperatura (T, °C) antes de passar pelo produto é maior que após a passagem (T-ΔT, °C), a umidade (U, %) do ar é maior depois que o ar passa pelo produto.

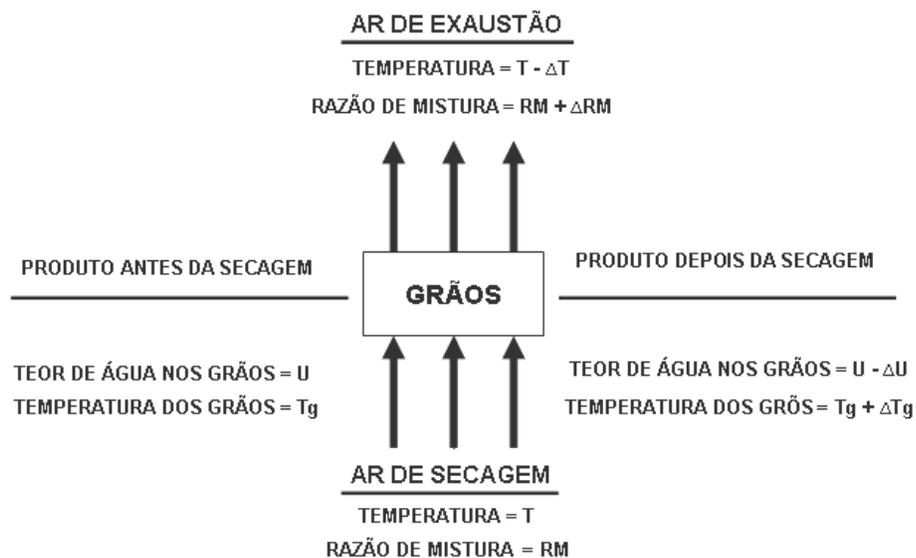


Figura 2.1- Variáveis que interferem no processo de secagem

Um sistema de controle projetado adequadamente pode contribuir para o aumento da qualidade do processo de secagem e a diminuição do consumo de energia.

Mas, o controle do processo de secagem não é simples, devido às não linearidades e ao longo tempo de processo. Os sistemas de controle automático, disponíveis no mercado, não possuem a precisão e robustez necessária, em grande parte provocada pela inexatidão dos modelos de secagem adotados.

Um modelo de secador contínuo de chá, foi estudado por Temple et al. (2000) através de simulação com a finalidade de determinar os parâmetros de controle mais adequados, mostrando que em secadores contínuos o controle deve ser realizado tanto na temperatura do ar de secagem como também na alimentação de produto no interior do secador, além de atuar sobre a umidade com que o produto entra no sistema através de alternativas de pré-secagem.

Experimentos realizados por Martins et al. (2002 a) compararam modelos de secagem simulados a partir de equações matemáticas com a secagem feita em secador real, usando temperatura inferior a 70°C e gás como fonte energética, provando com seus experimentos que o modelo matemático apresenta resultados satisfatórios, porem com um desvio entre os valores reais e simulados de 18 %,.

Mancini et al. (2002) usando como produto o feijão em secador de leito fixo, compararam os resultados com aqueles obtidos em teste real, sendo observado um desvio médio de 10 %

entre os valores real e simulado. Mata et al. (1999) desenvolveram um programa computacional para simulação de secagem de grãos em intervalos de temperatura de 1 a 150 °C, o programa é baseado no modelo de Thompson e os resultados obtidos foram satisfatórios.

Estudo envolvendo a simulação de processos de secagem foi feito por Corrêa et al. (2007), eles empregaram 12 modelos matemáticos já conhecidos na literatura, podendo concluir que metade destes modelos representavam de maneira aceitável o fenômeno da secagem, sendo eles os modelos de Page, Midilli, Henderson e Pabis modificado, Dois termos e Aproximação da difusão.

Martins et al. (2002 b) realizaram diversos testes usando um umidificador acoplado a um secador de camada fina para determinar a umidade de equilíbrio e as curvas de sorção, esses testes foram feitos com uso de larga faixa de temperatura de trabalho para o ar de secagem, de 30 a 60 °C, e umidade relativa de 8 a 65 %, através deste equipamento adaptado foi possível obter valores de umidade de equilíbrio com desvio em relação ao valor calculado inferior a 6 %.

Martins et al.(2002 c) analisaram três modelos matemáticos, dos parâmetros de modelos conhecidos, o modelo *Overhults* e o modelo de coeficiente global, foram estimados para cada curva de secagem. A comparação entre os resultados calculados e experimentais levam a concluir que os três modelos são equivalentes para descrever a taxa de secagem dos materiais, pois os desvios médios foram menores que 6% e os desvios máximos foram menores que 15% em todos os casos considerados.

Uma pesquisa conduzida por Ferreira et al. (2002) buscou avaliar a influência da temperatura em um secador de camada de jorro bidimensional sob a produção de feijão preto moído e concentrado para alimentação, estes grãos foram embebidos em água por 18 horas e depois moídos, sendo então injetados no secador. Dos resultados obtidos concluiu-se que o tamanho das partículas não afetou de maneira significativa as condições operacionais do equipamento, sendo a temperatura a maior fonte de alteração na umidade do produto. No trabalho feito por Amantéa (2008) a temperatura e velocidade do ar de secagem também foram considerados como dois fatores que afetam diretamente a eficiência energética do secador.

Marini et al. (2007) avaliaram a intermitência e a temperatura do ar de secagem na qualidade de grãos de aveia, concluíram que a secagem intermitente, com temperatura do ar até 65°C, é um método eficiente para a conservação dos parâmetros biológicos de grãos de

aveia branca. Embora diminuam a incidência de contaminação fúngica, temperaturas da massa de grãos acima de 45°C durante a secagem provocam redução da qualidade dos grãos de aveia.

Qiang e Bakker-Arkema (2001 a) pesquisaram sobre a secagem de grãos usando fluxo cruzado e observaram que este tipo de processo apresenta grande atraso e não linearidade tornando seu controle complexo e difícil. Em seqüência deste trabalho, Qiang e Bakker-Arkema (2001 b) desenvolveram o controle automático para o secador de fluxo cruzado usado na secagem de grãos de milho, conseguindo robustez e boa estabilidade, operando com faixa de temperatura de 85 a 120 °C.

Nogueira et al. (2009) avaliaram o uso de um silo que opera como secador e como silo de armazenagem, e concluíram que o método pode ser empregado pela agricultura familiar com grande chance de sucesso, visto que o investimento é relativamente baixo se comparado aos sistemas tradicionais de secagem e armazenamento. Ainda vale ressaltar a redução no espaço físico exigido para pós-colheita visto que no mesmo silo em que se realiza a secagem pode se armazenar o produto seco.

Fregolente et al. (2003) analisaram o uso de secador do tipo leito fixo, para grãos de soja, verificando que este tipo de secador é uma solução viável a pequenos produtores, por sua simplicidade de construção e custo reduzido quando comparado a outros tipos de secadores.

Resende et al. (2008) realizaram um trabalho mostrando a importância do teor de umidade de grãos em suas propriedades físicas, concluindo que a redução da umidade pelo processo de secagem proporciona a redução da porosidade e o aumento das massas específicas e unitárias.

2.2 Modelos matemáticos para o estudo da secagem visando à aplicação em algoritmos de controle

Diversas simulações e modelos matemáticos estão disponíveis na literatura, sendo que um dos mais usados é aquele que relaciona a razão de umidade com as dimensões de um leito de camada delgada, este modelo é conhecido como modelo de Hukill e está expresso na Equação 1.1 que é aplicada sob condições controladas de temperatura e umidade relativa do ar.

$$RU = \left[\frac{2^D}{2^D + 2^Y - 1} \right] \quad \text{e} \quad RU = \left[\frac{U - U_e}{U_o - U_e} \right] \quad (1.1)$$

RU- A razão de umidade e representa o teor de umidade para uma determinada posição na camada do produto, após um tempo qualquer depois do início da secagem. Esse parâmetro varia de (0) zero (o produto atingiu o teor de umidade de equilíbrio) a (1) um (o produto com teor de umidade inicial) – razão de umidade do produto - adimensional; D – fator de profundidade - adimensional; Y – adimensional de tempo - dado pela Equação 1.2.

$$Y = \left[\frac{t}{H} \right] \quad (1.2)$$

t – tempo após início da secagem; H – tempo de meia resposta; U – teor de umidade atual do produto - decimal b.s.; U₀ – teor de umidade inicial - decimal b.s., e U_e – teor de umidade de equilíbrio para as condições do ar de secagem - decimal b.s.

O modelo de simulação de secagem de Hukill baseia-se na quantificação de um fator de profundidade (D) que contém uma quantidade de matéria seca, calculada pela Equação 1.3. Esse modelo é também apresentado em forma de curvas para camadas profundas. Essas curvas correspondem ao número de fatores de profundidade (D) e facilitam o cálculo e o acompanhamento da secagem. Quanto mais próximo de zero for o fator de profundidade, significa que mais seco o produto está (com o teor de umidade de equilíbrio) até a altura da camada considerada:

$$D = \frac{MS}{Aw} \quad (1.3)$$

D – fator de profundidade - m; MS – matéria seca - kg; A – área do silo - m², e w – massa específica da matéria seca - kg m⁻³.

A quantidade de matéria seca MS, pode ser calculada pela Equação 1.4:

$$MS = \frac{60QC_a(T_a - T_e)H}{vh_f(U_o - U_e)} \quad (1.4)$$

Onde: MS – matéria seca [kg]; Q – vazão do ar de secagem [$m^3 \text{ min}^{-1}$]; c_a – calor específico do ar [$\text{kcal kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$]; T_a – temperatura do ar de secagem [$^\circ\text{C}$]; T_e – temperatura na qual o ar está em equilíbrio com o grão em seu teor inicial de umidade, depois de o ar ter sido resfriado ao longo de uma linha de temperatura de bulbo úmido constante [$^\circ\text{C}$]; H – tempo de meia resposta [h]; v – volume específico do ar de secagem [$m^3 \text{ kg}^{-1}$ de ar seco]; h_f – calor latente de vaporização da água no produto [kcal kg^{-1}]; U_o – teor de umidade inicial do produto [decimal b.s.], e U_e – teor de umidade de equilíbrio do produto com as condições do ar de secagem [decimal b.s].

A massa específica da matéria seca calcula-se aplicando a Equação 1.5

$$w = \frac{P}{(1 + U_o)} \quad (1.5)$$

w – massa específica da matéria seca [kg m^{-3}]; P – massa específica do produto [kg m^{-3}] e U_o – teor de umidade inicial [decimal b.s].

As equações para a determinação da umidade de equilíbrio assim como calor latente de vaporização da água no produto, são específicas para cada tipo de produto, e podem ser encontradas em diversas literaturas.

Entre os modelos que contemplam a interação grão-secador, aqueles que aplicam o método de Equações Diferenciais Parciais (*Partial Differential Equations*, PDE), é um dos mais conhecidos. Mas a maioria dos modelos que aplicam PDE são complexos, demandando tempo computacional considerável, uma vez que sistemas de controle automático precisam de respostas rápidas, a aplicação de métodos mais sofisticados, podem inviabilizar a qualidade e funcionalidade da estratégia de controle, afetando a qualidade do produto, com os decorrentes custos envolvidos (Liu e Bakker-Arkema, 2001).

Os modelos de processos podem ser categorizados em modelos de parâmetros concentrados ou distribuídos. Os modelos de parâmetros concentrados relacionam o teor de umidade

relativa na saída e entrada do secador com o tempo de secagem do produto. Outros fatores, como a temperatura e a vazão de ar, as dimensões do secador ou do leito de produto e as condições ambientais, são agrupados em coeficientes e obtidos por simulação, experimentação ou estimação *on-line*, sendo tratados como lineares ou não lineares, como discutido por Liu e Bakker-Arkema (2001).

Embora as simplificações no modelo matemático que representa o processo tenha sido uma saída relativamente simples e eficiente para muitas aplicações, há limitações, dentre elas, a falta de autonomia, ou seja, os parâmetros não podem ser determinados por modelos próprios; os resultados não representam a distribuição espacial do teor de umidade do grão e do leito, assim como não representam as verdadeiras características do processo de secagem, devido às simplificações.

Os modelos distribuídos são mais abrangentes que os concentrados, superando as limitações deste último, fornecendo resultados que permitem avaliar a variação, no tempo, do teor de umidade do grão e do leito de grãos, o que seria mais adequado para a implantação de um algoritmo de controle automático.

Buscando superar as limitações e propor um sistema robusto e eficiente, Liu Bakker-Arkema (2001) propuseram um sistema de controle preditivo baseado num modelo distribuído, considerando a transferência simultânea de calor e massa, em um secador fluxo transversal. O modelo é mais simples que aqueles que consideram a secagem em nível do grão, porém considera as não linearidades. O sistema de controle implantado mostrou excelente precisão, robustez e estabilidade, controlando-se o teor de umidade de grãos de milho, com uma variação de $\pm 0,7$ % de umidade em torno do *set point*, partindo de um teor inicial dos grãos de 21 a 32 % e temperatura do ar entre 80 e 120 °C.

Srivastava e John (2002), considerando uma fina camada e equações semi-empíricas, puderam prever a umidade e a temperatura do ar e dos grãos, assim como a variação da temperatura quando varia a altura do leito, incorporando também os efeitos da variação velocidade do ar e da porosidade do leito. Após a implantação do algoritmo e feitas as simulações, concluiu-se que a transferência de massa está relacionada fortemente com a altura da camada de grãos, sendo maior a umidade vaporizada no ar, quanto maior a espessura da camada. Comprovou-se, também que, a porosidade do leito não afeta significativamente a temperatura do ar mas tem forte influencia na temperatura dos grãos.

Um *software* para a simulação da secagem de sementes de milho, tanto em espiga (pré-secagem) como em granel, em secador de leito fixo e com distribuição radial de ar, foi apresentado por Souza et al. (2002), e validado com resultados experimentais. O algoritmo contempla o cálculo da temperatura de equilíbrio entre o ar e o produto, da umidade relativa do ar, do teor de umidade de equilíbrio do produto, e dos valores da razão de umidade do produto no tempo assim como a temperatura final do ar e do produto. A comparação entre os valores de teor de umidade do produto obtido com a simulação e os valores experimentais mostraram um erro relativo médio de 10,88 %.

Um modelo simplificado, usando o coeficiente convectivo de transferência de massa, a umidade de equilíbrio dinâmico e constante de secagem, foi desenvolvido por Nishiyama, Cao e Li (2006). Este modelo foi comparado com valores experimentais, da secagem de trigo e arroz com casca, em leito fixo com fluxo de ar intermitente, obtendo-se erro médio de 0,47%.

Outros modelos, considerando diferentes condições e métodos de resolução são apresentados na literatura, dentre eles, os apresentados por Sitompul, Istadi e Sumardiono (2003), Ziegler e Richter (2000), Wang, e Chen (1999); Ghosh et al 2008; Sitompul e Sumardiono, 2003; Inaba, 2007; Sun e Woods, (1997); Giner e Gely (2007); Aregba, Sebastian e Nadeau (2007); Soponronnarit et al (2001); Rao, Bal e Goswami (2007) e Farkas, Reményi e Biró (2000).

2.3 Monitoramento e supervisão do processo de secagem

É desejável que o processo de secagem possa ser monitorado ao longo do tempo, fornecendo informações relevantes do processo enquanto este ocorre. Monitorar significa visualizar os parâmetros relevantes e inerentes a um processo ao longo do tempo, porém é importante que não apenas se visualize tais parâmetros, mas que seja possível também registrá-los para posterior análise e assim possibilitar a obtenção de melhorias no processo como redução no consumo energético pela adequada combinação dos parâmetros envolvidos.

O conhecimento e controle de fatores como temperatura, velocidade do fluxo de ar e conteúdo de umidade é indispensável nos processos de secagem de produtos agrícolas, visto que, de um modo geral, as operações de secagem apresentam altos custos como a utilização de mão de obra, o tempo de secagem e, principalmente, o consumo de energia. Entretanto, estes

custos podem ser reduzidos de forma significativa se for realizado um estudo visando o controle das propriedades envolvidas no processo. Entre as mais importantes, estão a temperatura e o fluxo do ar de secagem (Leite et al, 2005).

Nos secadores convencionais, invariavelmente, os grãos se deterioram devido à alta temperatura de secagem, havendo alteração da constituição nutricional (o que é observado principalmente pela desnaturação da proteína). O milho secado a baixas temperaturas (menos de 50°C) apresenta conversão alimentar mais adequada do que aquele secado a altas temperaturas (acima de 50°C).

Um processo comumente utilizado em secagem de grãos contempla secadores de leito fixo, porém o estudo das propriedades térmicas do produto submetido a esse tipo de secagem é difícil, devido a umidade dos grãos variar ao longo do processo alterando também os parâmetros envolvidos no processo. Para facilitar a obtenção das propriedades térmicas dos grãos em um secador de leito fixo, Fregolente, Santos e Jorge (2004) estudaram a secagem de grãos em sua última fase, ou seja, quando a transferência de massa cessa e ocorre apenas a transferência de calor (regime permanente), esta é uma forma simplificada de obter dados sobre os parâmetros de secagem sem a presença dos efeitos da troca de massa que alteram a dinâmica do processo a cada instante de tempo.

Diversos estudos foram realizados no sentido de desenvolver e implementar sistemas de supervisão e monitoramento de processos de secagem de maneira *on line*, como o realizado por Vasconcelos e Maciel Filho (1998), onde um sistema de supervisão foi desenvolvido para realizar testes em secagem de grãos utilizando diferentes estratégias de controle como alternativa aos problemas típicos de estratégias do tipo SISO.

Husain, Horibe e Haruki (2006) ressaltaram a importância da seleção adequada dos parâmetros relativos à transferência de calor e massa para otimizar as condições de entrada e saída do ar. Para essa análise utilizaram trigo e milho e desenvolveram um modelo baseado na primeira e segunda lei da termodinâmica, realizando correções experimentais. Analisaram-se com este modelo os efeitos hidrodinâmicos e termodinâmicos sobre a eficiência energética do processo, como temperatura do ar de entrada, umidade inicial, Fourier e número de Reynolds. Algumas conclusões foram interessantes: a eficiência energética foi maior quanto maior era o teor de umidade inicial dos grãos e esta eficiência decrescia à medida que o teor de umidade se aproximava do equilíbrio, quanto à transferência de calor e massa a eficiência do processo

aumentou com a redução do número de Reynolds, o aumento de temperatura do ar de secagem também aumentou a eficiência na troca de calor, mas esse aumento deve ser limitado para não danificar o produto.

Outra maneira utilizada por pesquisadores para avaliar as propriedades e parâmetros relativos à secagem é o uso de simulação e elaboração de modelos matemáticos.

O estudo e investimento em sistemas de secagem de grãos vêm se ampliando na agricultura em todo mundo, esta tendência surge da necessidade de aumentar a vida útil, tempo de armazenagem e de comercialização dos grãos com os padrões de qualidade que o mercado exige, bem como possibilitar a colheita antecipada. Em países onde a produção agrícola assume importância estratégica, estes estudos sobre secagem são ainda mais necessários, como é o caso da China, que apesar de possuir vasta área geográfica, tem pouco território cultivável. Notou-se na pesquisa de Liu et al. (2004) que nos últimos 20 anos a China evoluiu notavelmente em tecnologias de secagem, desenvolvendo a maioria dos equipamentos que necessita.

2.4 Aplicação de redes neurais e lógica *fuzzy* para o controle de processos de secagem

A aplicação de redes neurais também tem sido visto como uma alternativa para análise de processos de secagem. Liu, Chen e Peng (2006) utilizaram rede neural para estimar a quantidade de umidade em grãos a partir da temperatura do ar de entrada, temperatura dos grãos e índice de umidade inicial. Os testes mostraram que a modelagem baseada em rede neural teve boa precisão na predição dos índices de umidade. Farkas, Reményi e Biró (2000) também empregaram rede neural em secador de leito fixo para determinar a relação entre a umidade do produto e os parâmetros físicos de temperatura, umidade e fluxo de ar.

É importante que os parâmetros e grandezas relativas ao processo de secagem monitorado, tanto para acompanhar o processo à medida que ocorre como também para possibilitar posterior análise dos dados.

Chen et al. (2002) analisaram um secador de leito fixo usado comercialmente para secagem de cevada (figura 2.2). Os parâmetros chave do processo mensurado foram temperatura do ar de secagem, umidade relativa, fluxo de ar, umidade dos grãos, tempo de

secagem e energia. As temperaturas medidas no plenum foram de 41,4 e 34,0°C. Concluiu-se analisando os dados do processo que no período inicial da secagem a entalpia do ar se manteve praticamente constante, sendo mais baixa próximo ao centro por haver um eixo ali localizado para movimentação e homogeneização da massa de grãos. A redução de umidade no produto foi mais rápida nas últimas horas de secagem, e a eficiência para as temperaturas adotadas foram de 48,4 e 41,5% respectivamente.

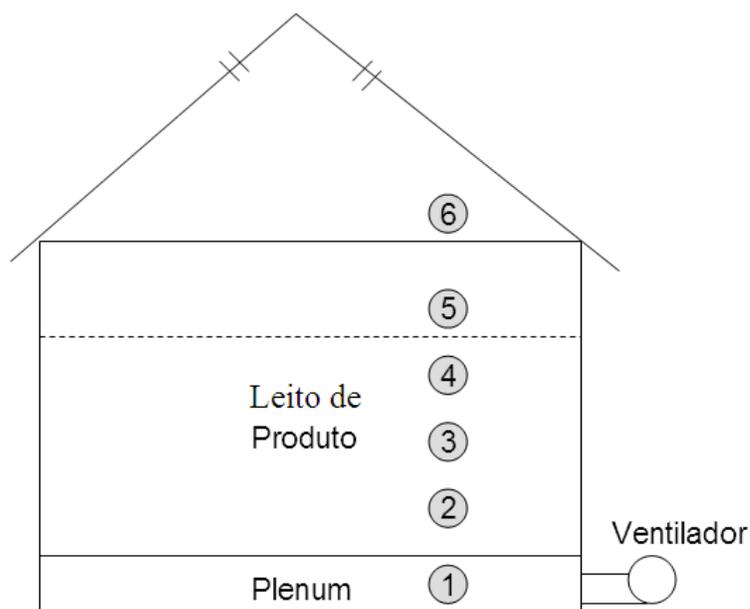


Figura 2.2- Estrutura típica de um secador de leito fixo: a numeração indica posição dos sensores de temperatura e umidade (Adaptado de Chen, et al 2002).

A qualidade do produto deve ser conservada ao longo da secagem, de acordo com seu uso final. Um estudo realizado por Soponronnarit et al. (2001) analisaram a relação entre os parâmetros de secagem e a qualidade de grãos de soja em um secador de leito fixo. A temperatura de secagem foi de 110 a 140°C e conteúdo de umidade 31 a 49% em base seca, velocidade do ar de 2,4 a 4,1m.s⁻¹, a altura da camada de grãos foi de 10 a 15 m. Houve aumento das trincas e quebras de grãos com o aumento da temperatura e do tempo de exposição ao processo. Esses testes foram simulados utilizando equações descritas na literatura e os resultados mostraram que as melhores combinações de parâmetros obtidas foram as seguintes: temperatura do ar de 140°C, altura da camada de grãos de 18 cm, velocidade do ar de secagem de 2,9 m.s⁻¹, recirculação do ar de 90%. Nestas condições a

capacidade de secagem foi de $4,65 \text{ t.h}^{-1}$, e consumo de energia de $6,8 \text{ MJ.kg}^{-1}$, o percentual de grãos rachados após a secagem foi de 27% e grãos rompidos 1,7%.

2.5 Malhas com controle preditivo de processos de secagem

Um sistema de controle para a secagem de grãos deve ter três características muito bem contempladas: a estabilidade, evitando oscilações significativas na resposta do sistema; a precisão, pois o valor do teor de umidade tem que estar bem próximo do *set point* estabelecido e a robustez, garantindo um bom desempenho para uma ampla faixa de condições. A maioria dos sistemas disponíveis comercialmente, e em operação, opera com modelos e sistemas de controle primitivos ou de desempenho comprometido.

A aplicação de controle preditivo, que foi usado pela primeira vez nos anos 70 numa refinaria de petróleo, tem como vantagens de destaque a possibilidade de ter bom desempenho em processos não lineares e demorados, a possibilidade de otimizar o desempenho em tempo real, podendo ajustar e sintonizar as estratégias de controle em tempo real, de acordo com as variações do processo.

Montenegro et al. (2007) realizaram estudos sobre o controle preditivo de um processo envolvendo o controle da temperatura e da ventilação forçada com ar. Um túnel psicrométrico foi utilizado, contendo sistema de circulação de ar e de refrigeração, empregou-se um motor de corrente contínua para mover o ventilador e insuflar o ar no duto do túnel, sensores de temperatura foram instalados na extremidade deste túnel e os parâmetros do sistema estimados pelo algoritmo dos mínimos quadrados recursivo. O controle foi realizado *on-line* sobre a temperatura do fluxo de ar e implementado em LabVIEW (figura 2.3).

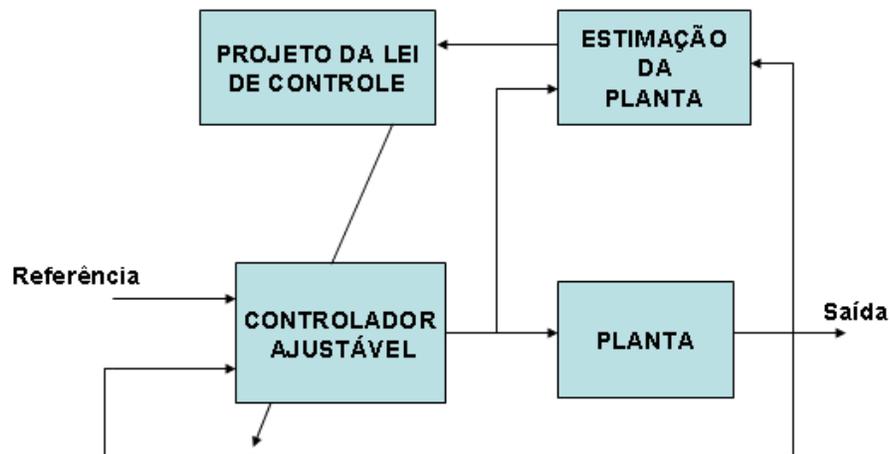


Figura 2.3- Esquema de controle auto-ajustável (STR)

Como observado por Liu et. al (2006) um processo envolvendo secagem de grãos é complexo e de difícil controle, uma vez que há diversas variáveis a serem consideradas e trata-se de um processo não linear. Assim propuseram a realização do controle de um sistema comercial de secagem de grãos tipo fluxo combinado utilizando rede neural e obtiveram excelentes resultados em relação ao controle convencional, reduzindo a variação da umidade no produto causada por perturbações no processo.

Um sistema de controle preditivo foi proposto por Liu e Bakker-Arkema (2001), aplicado a um secador comercial de grãos, de fluxo cruzado, e notaram a dificuldade em controlar o processo pela não linearidade e implementaram um modelo de controle preditivo. Os testes demonstraram que este tipo de controle foi adequado, reduzindo os efeitos gerados por perturbações externas ao processo, mantendo-se estável (figura 2.4).

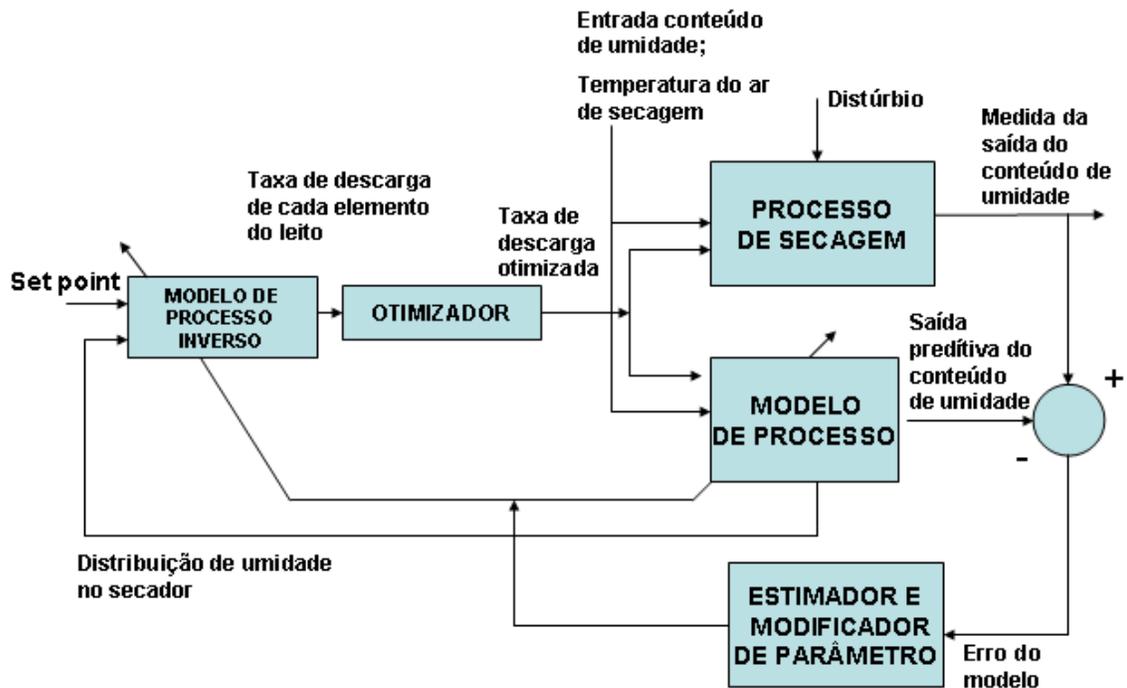


Figura 2.4- Controle preditivo para secador de grãos

2.6 Processos de secagem, economia de energia e qualidade do produto

O efeito dos secadores e métodos de secagem, sobre a qualidade de grãos e a racionalização do consumo de energia em processos agrícolas, é um assunto de suma importância entre pesquisadores, processadores e fabricantes de equipamentos. O custo da energia de secagem depende da eficiência do sistema em aproveitar uma determinada fonte de energia

Dependendo do tipo de grão e do teor de umidade inicial, o tempo de secagem pode se prolongar, conduzindo a um maior consumo de energia, aumentando os custos variáveis do processo, podendo afetar o custo final do produto.

Um estudo realizado por Oliveira (1999) procurou comparar a eficiência energética no processo de secagem de feijão utilizando leito de jorro/leito fixo e leito de jorro/descanso, em um secador de escala laboratorial e operando em batelada, a análise energética do processo

indicou resultados promissores de melhora na eficiência energética de secagem para as condições intermitentes, principalmente trabalhando-se com leito de jorro/descanso, ou seja, intermitência com interrupção no suprimento de ar ao leito.

Kalwar e Raghavan (1993) estudaram a secagem de milho em leito de jorro com a finalidade de determinar os principais parâmetros de influência sobre o processo e concluíram após testes realizados em secadores de escala laboratorial que as taxas de secagem foram diretamente afetadas pela temperatura do ar de entrada, temperatura inicial do grão, umidade relativa do ar de entrada e a geometria do leito.

Alguns estudos mostram o emprego de secagem com parâmetros intermitentes apresenta resultados satisfatórios quanto a eficiência energética, um desses estudos foi realizado por Soares (1998), que utilizou milho como produto de validação dos experimentos, os quais consistiram em alterar a temperatura e a vazão de ar ao longo do processo seguindo a técnica de programação dinâmica, com isso ocorreu um aumento expressivo na eficiência energética, em torno de 50%, em 74% dos casos estudados.

Apesar do uso de secadores de leito de jorro e leito de jorro fluidizado ser comuns, algumas evidências mostram que o tipo leito fixo apresenta um desempenho ligeiramente superior, quando operados sob as mesmas condições, como se observa no estudo de Lima (1995), onde foram empregados os três tipos de secadores citados na secagem de feijão do tipo carioca.

2.7 Discussão

Constata-se que, diversas pesquisas vêm sendo desenvolvidas estudando os processos de secagem de grãos, aplicando-se modelagem matemática, simulação e estratégias de controle.

A secagem de grãos é um processo complexo, não linear, e que envolve diversos parâmetros, os quais devem ser monitorados, supervisionados e registrados, em tempo real, visando à tomada de decisão, para manter a qualidade do produto e uma adequada relação custo-benefício.

Por se tratar de um processo não linear, diversas pesquisas ressaltam que, a aplicação do controle clássico não é a estratégia mais adequada, sendo o controle adaptativo uma alternativa que vem sendo usada com eficiência em processos de secagem, aliada à lógica *fuzzy*, redes neurais e controle PID.

Nota-se que muitos trabalhos exploram o aprimoramento de modelos matemáticos, assim como a implantação de estratégias de controle, apenas para a simulação, sem a validação com dados experimentais, ou até mesmo, a implantação de uma bancada experimental, o que em geral, restringe tais pesquisas e resultados ao campo acadêmico e científico, não havendo aproximação com o setor industrial nem de transferência de tecnologia.

Não foram constatadas propostas viáveis de monitoramento e supervisão interativa, e em tempo real, de processos de secagem, para aplicação industrial.

Um dos desafios atuais é a migração de tecnologia para a aplicação em processos e secadores comerciais, propondo estratégias e sistemas de controle, robustos, estáveis e precisos, como supervisão em tempo real, buscando uma relação custo-benefício adequada à realidade do setor no Brasil.

2.8 Referencias bibliográficas

AMANTÉA, R. P. **Metodologia numérica para análise de secagem de grãos em leito fixo pela primeira e segunda lei da termodinâmica**. 2008. 1 v. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

AREGBA, A W; SEBASTIAN, P; NADEAU, J P. Stationary deep-bed drying: A comparative study between a logarithmic model and a non-equilibrium model. **Journal Of Food Engineering**, Oxford, p. 27-40. 01 jan. 2006.

CHEN, G; A ANDERSON, J; BANNISTER, P. CARRINGTON, C.G. Monitoring and performance of a commercial grain dryer. **Biosystems Engineering**, Bedford, n. 1, p.73-83, 2002.

CORRÊA, P C; RESENDE, O; MARTINAZZO, A P; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão em camadas delgadas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, n. , p.501-510, 2007.

FARKAS, I P; REMÉNYI, P; A BIRÓ,. Modelling aspects of grain drying with a neural network. **Computers And Electronics In Agriculture**, n. 29, p.99-113, jan. 2000.

FERREIRA J. A., ANDRADE T. C. M., MANCINI M. C., SHEID C. M., Obtenção de concentrado de feijão em pó em Leito de forro bidimensional. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Revista Universidade Rural, Série Ciências Exatas e da Terra. Vol. 22 (1): 105-112, 2002. Suplemento.

FORTES, M.; FERREIRA, W. R. Second Law analysis of drying: - Modeling and simulation of fluidized bed grain drying. 14th International Drying Symposium (IDS), São Paulo, 2004. CD-ROM, 8p.

FREGOLENTE, L. V.; SANTOS, O.A.A.; JORGE, L.M.M. Estimativa das propriedades térmicas efetivas de grãos em um secador de leito fixo. *Ciência e Tecnologia dos Alimentos*. Campinas, n. 24(2), p. 270-276, abr.-jun. 2004.

FREGOLENTE, L. V.; CALIANI, E.; SANTOS, O. A. A. dos; JORGE, L. M. de M. **Análise da secagem de soja em leito fixo**. *Acta Scientiarum. Technology*. Universidade Estadual de Maringá/Departamento de Engenharia Química. Maringá, v. 25, no. 1, p. 1-7, 2003

GELY, M.C.; GINER, S.A. Diffusion Coefficient Relationships during Drying of Soya Bean Cultivars. *Biosystems Engineering*, n. 96 (2), p. 213–222, 2007.

GHOSH, P.K.; JAYAS, D.S.; SMITH E.A.; GRUWEL, M.L.H.; WHITE N.D.G.; ZHILKIN, P.A. Mathematical modelling of wheat kernel drying with input from moisture movement studies using magnetic resonance imaging (MRI), Part I: Model development and comparison with MRI observations. *Biosystems Engineering* n. 100, p. 389 - 400, 2008.

HUSAIN, S.; HORIBE, A.; HARUKI, N. Heat and mass transfer analysis of fluidized bed grain drying. Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University. 2006

INABA, H. Heat and Mass Transfer Analysis of Fluidized Bed Grain Drying. *Memoirs of the Faculty of Engineering, Okayama University*, v. 41, p.52-62, January, 2007.

JASPER, S. P., BIAGGIONI, MARCO, A. M., RIBEIRO, J. P. Viabilidade econômica de aquisição de um silo-secador para pequenas áreas de produção. *Engenharia Agrícola*. Dez. 2006, v.26, n.3, p.795-803.

KALWAR, M. I.; RAGHAVAN, G. S. V. Batch drying of shelled corn in two-dimensional spouted beds with draft plates, *Drying technology*, v.11, n.2, p.339-354, 1993.

LEITE, J C C; SOUSA, R F LEITE, J.C.C., SOUSA, R.F., SILVA, A.S., GOUVEIA, J.P.G., SILVA, M.M., SOUSA, A.G. Simulação de Secagem de Milho (*Zea Mays L.*) utilizando o modelo matemático de Thompson. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Campina Grande, v. 5, n. 2, 01 jan. 2005.

LIMA, A C C C. **Análise experimental da secagem de feijão em leito fixo, leito de jorro e leito de jorro fluidizado**. 1995. 1 v. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Feq - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995.

LIU, Q.; BAKKER-ARKEMA, F.W. Automatic Control of Crossflow Grain Dryers, Part 1: Development of a Process Model. **Journal Of Agricultural Engineering**, n. 80, p.81-86, 2001.

LIU, Q.; BAKKER-ARKEMA, F.W. A model predictive controller for grain drying. **Journal of food engineering**, n. 49, p. 321-326, 2001.

LIU, X.; CHEN, X.; WU, W.; PENG, G. A neural network for predicting moisture content of grain drying process using genetic algorithm. **Food Control**, n 18, p. 928-933, 2006.

LIU, X.; CHEN, X.; WU, W.; ZHANG, Y. **Process control based on principal component analysis for maize drying**. *Food Control* n. 17, p. 894–899, 2006.

LIU, X.D; DING, X.M.; WANG, X.Z.; PAN, Y.K.; CAO, C.W.; LIU, D.Y. Drying Research and Development in China, **Drying Technology**, n. 22, p. 123 - 144, 2004.

MARINE, L. J.; GUTKOSKI, L. C.; ELIAS, M. C.; SANTIN, J. A; Qualidade de grãos de aveia sob secagem intermitente em altas temperaturas. **Ciência rural**, v.37, n. 5, p. 1268 – 1273, 2007.

MANCINI M. C., CALÇADA L. A., MASSARANI G., BISCAIA JR. E. C., Secagem de feijão em leito fixo. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. **Revista Universidade Rural**, v. 21, p. 89-96, 2002 (b).

MARTINS M. G., MARQUES W. M., CALÇADA L. A., MANCINI M. C., Secagem de feijão em leito fixo. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. **Revista Universidade Rural**, v. 22 (1), p. 97-104, 2002 (a).

MARTINS M. G., OLIVEIRA D. D., CALÇADA L. A., MANCINI M. C., Adaptação de um equipamento de secagem em camada delgada para a determinação de isotermas de equilíbrio. **Revista Universidade Rural**, v. 22 (1), p. 55-63, 2002 (b).

MARTINS M. G., MANCINI M. C., BISCAIA JR. E. C., Cinética de secagem de feijão em camada delgada. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. **Revista Universidade Rural**, v. 21 (1), p. 83-88, 2002 (c).

MATA, M. E. R. M. C.; DANTAS, L. A.; BRAGA, M. E. D. Programa computacional para simulação de secagem de grãos. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.1, n.1, p.33-50, 1999.

MONTENEGRO, P.H. de M.; RIUL, J.A.; OLIVEIRA, B.S de.; SILVA, S.A da. Controle preditivo generalizado auto-ajustável de temperatura em túnel psicrométrico. **Revista Ciências Exatas**, Taubaté, v. 13, n. 1, p. 91-96, 2007.

MUJUMDAR, A. S. An overview of innovation in industrial drying: current status and R&D needs. **Transport in Porous Media**, v. 66, p. 3-18, 2007.

NISHIYAMA, Y. CAO, W. e Li, B. Grain intermittent drying characteristics analyzed by a simplified model. **Journal of Food Engineering**, n. 76, p. 272–279, 2006.

NOGUEIRA, R. M.; ROBERTO, C. D.; SAMPAIO, C.P **Silo secador-armazenador: uma solução eficiente e economica.** Disponível em: <<http://clubeoai.incubadora.fapesp.br/portal/openaccess>>. Acesso em: 06 out. 2009.

RAO, P. S.; BAL, S. GOSWAMI, T.K. Modelling and optimization of drying variables in thinlayer drying of parboiled paddy. **Journal of Food Engineering**, n. 78, p. 480 - 487, 2007.

RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; RIBEIRO, D. M.; Propriedades físicas do feijão durante a secagem: determinação e modelagem. **Ciência e agrotecnologia, Lavras**, v. 32, n. 1, p. 225-230, jan./fev., 2008

NOGUEIRA Jr, S.; ALVES E NOGUEIRA, E. Centrais regionais de armazenagem como apoio à comercialização de grãos. **Informações Econômicas**, São Paulo, v.37, n.7, jul. 2007.

A OLIVEIRA, C. **Estudo da secagem em leito de jorro, com condições operacionais intermitentes, de grãos de feijão (Phaseolus vulgaris L.), variedade carioca.** 1999. 1 v. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Feq - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

QIANG L., BAKKER-ARKEMA F. W., A model – predictive controller for grain drying. Department of Agricultural Engineering. Michigan State University. **Journal of Food Engineering**. n. 49, p. 321 – 326, 2001 (a).

QIANG L., BAKKER-ARKEMA F. W., **Departament of agricultural engineering.** Michigan State University. Automatic Control of Crossflow Grain Dryers, Part 2: Design of a Model – Predictive Controller, 18 July 2001 (b).

SILVA, M.A.; CORRÊA, J.L.G. Academic Research on Drying in Brazil 1970-2003. **Drying technology.** V. 23, n. 7, p. 1345 – 1359, 2005.

SITOMPUL, J. P.; SUMARDIONO, S. Modelling and Simulation of Momentum, Heat, and Mass Transfer in a Deep-Bed Grain Dryer. **Drying Technology.** n. 21:2, p. 217 - 229, 2003.

SOARES, J B. **Otimização da secagem de grãos a baixas temperaturas.** 1998. 1 v. Dissertação (Doutorado) - Departamento de Fem - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.

SOPONRONNARIT, *, S.; SWASDISEVI, T.; WETCHACAMA, S.; WUTIWIWATCHAI, W. **Fluidized bed drying of soybeans.** **Journal of Stored Products Research,** n. 37, p.133-151, 2001.

SOUZA, C. M.A de.; QUEIROZ, D.M de.; LACERDA FILHO. A.F. de. Simulação do processo de secagem de sementes de milho em camada fixa. **Scientia Agricola,** v.59, n.4, p.653-660, out./dez. 2002.

SRIVASTAVA, V.K.; JOHN, J. Deep bed grain drying modeling. **Energy Conversion and Management,** n. 43, p. 1689–1708, 2002

SUN, D. W.; WOODS, J. L. Simulation of the heat and moisture transfer process during drying in deep grain beds. **Drying Technology,** v. 10, n. 15, p. 2479 - 2492, 1997.

TEMPLE S. J., VAN BOXTEL A. J. B., Control of fluid bed tea dryers: control in the context of design and operation conditions. **Tea Reserarch Foundation,** Mulanje, Malawi, Central African Republic. Departament of Agricultural Engineering and Physics, Wageningen

University. Received 23. April 2000. received form 26 August 2000, accepted 30 August 2000.

VASCONCELOS, L. G. S.; MACIEL F., R. Development of a Supervisory Control Strategy for the Optimal Operation of Grain Dryers. **Drying Technology**, v. 16, n. 9, p.2017 - 2031, 1998.

WANG, Z. H.; Chen, G. Heat and mass transfer in fixed-bed drying. **Chemical Engineering Science**, n. 54, p. 4233-4243, 1999.

ZIEGLER, T; RICHTER, I. (2000), Analyzing deep-bed drying based on enthalpy–water content diagrams for air and grain. **Computers and Electronics in Agriculture**, n. 26, p. 105 - 122, 2000.

Capítulo 3

Dimensionamento, desenvolvimento, construção e instrumentação do sistema de secagem

Resumo

Um processo de secagem supervisionado e controlado é essencial para garantir a qualidade do produto e o consumo de energia adequado, reduzindo assim perdas resultantes da deterioração dos grãos ou geradas pelo desenvolvimento de micro organismos, além de evitar problemas decorrentes de uso desnecessário de energia, que dependendo da fonte utilizada causa danos ambientais, como no caso de queima de lenha. O produto definido para os testes foi o feijão, variedade carioca, esta escolha se deu em função de sua disponibilidade no período de realização dos testes com secador. O feijão usado foi obtido diretamente do campo experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP, evitando a necessidade de transportar o produto ou armazená-lo por longo período. Entre os diversos tipos de secadores de grãos existentes, optou-se em trabalhar com o tipo leito fixo, por ser um secador largamente utilizado e apresentar uma estrutura mais adequada para reprodução em escala laboratorial. Fixou-se então os parâmetros de projeto, baseados em informações e dados provenientes de literatura relacionada e das condições ambientais em que se deram os testes. Calcularam-se as potências para as resistências elétricas e para o ventilador, iniciou-se então a definição de todos os materiais necessários para a construção do secador, buscando fornecedores que oferecessem qualidade e custo adequado. Realizou-se a montagem do secador e posteriormente sua instrumentação, seguindo para o desenvolvimento do aplicativo de supervisão e controle e a integração ao sistema de aquisição de dados. Dentre os objetivos propostos destaca-se a implementação do controle *on/off* e PID, onde o controle PID obteve melhor desempenho tanto no consumo de energia como na manutenção da temperatura definida para a secagem.

Palavras-chave: Secador, controle de temperatura, consumo de energia.

Abstract

A drying process supervised and controlled is essential to ensure product quality and energy consumption appropriate, thus reducing losses resulting from the deterioration of grain or generated by the development of micro-organisms, and avoid problems due to unnecessary use of energy, which depending the matrix used cause environmental damage such as burning of firewood. The product set for the tests was the bean, variety Carioca, this choice was due to its importance in the national scene and the geometric characteristics of high symmetry, which would allow, if necessary, further analysis and mathematical models of the behavior of grain in relation to loss of water when subjected to drying. The beans used were obtained directly from the experimental field of Faculty of Agricultural Engineering at UNICAMP, avoiding the need to carry the product or store it for long periods. Among the various types of grain dryers available, was chosen to work with the fixed bed type, as a widely used hair and make a structure more suitable for reproduction in laboratory scale. Then set up the parameters of design, based on information and data from related literature and the environmental conditions in which they were testing. It was also calculated the power for the electrical resistance and the fan, then there was the definition of all the materials needed to construct the dryer, looking for suppliers that offer quality and cost appropriate. Made assembly of the dryer and then the instrumentation, according to the development of the application of supervision and control and integration of data acquisition system. Among the objectives there is the implementation of control on / off and PID, where PID control obtained better performance in both power consumption and in maintaining the set temperature for drying.

Keywords: Dryer, control of temperature, energy consumption.

Introdução

O principal processo para conservação de grãos após a colheita é a secagem, sendo uma etapa crítica do ciclo produtivo, uma vez que pode gerar danos irreversíveis ao produto caso os parâmetros utilizados não estejam de acordo com valores adequados ao uso final. Brooker et al. (1992) sugerem que o processo de secagem ao ser realizado sem o emprego dos valores recomendados é a principal causa de danos aos grãos, como trincas, alteração das características nutricionais e sensoriais, desenvolvimento de micro organismos, sobretudo fungos, além dos danos ao produto, a secagem inadequada também pode representar consumo desnecessário de energia, ou seja, perda da eficiência energética do processo, elevando os custos para o produtor. Sendo assim, é importante conhecer os valores dos principais parâmetros envolvidos na secagem e sua variação ao longo do tempo, permitindo alterar variáveis de entrada para se obter as respostas ou variáveis de saída desejáveis.

O monitoramento ou supervisão do processo torna possível conhecer o comportamento do sistema frente a alterações sobre as condições operacionais ou com a introdução de algum tipo de perturbação de menor ou maior intensidade. Para se realizar esse monitoramento é necessário o uso de instrumentos de medição, sistema de aquisição de dados e aplicativo computacional onde os valores medidos podem ser visualizados em grandezas conhecidas. Além de monitorar o processo é importante poder atuar sobre ele, modificando sua dinâmica para operar sob valores mais adequados. No caso da secagem de grãos, a atuação é realizada alterando-se a temperatura e vazão de ar e o tempo de exposição do produto a cada combinação de valores.

Observou-se que a maioria dos estudos na área de secagem de grãos se baseia em simulação e análise de modelos matemáticos. Neste presente trabalho optou-se por projetar e construir um secador do tipo leito fixo em escala laboratorial, com características próximas aos secadores reais, tornando o secador uma plataforma para desenvolvimento e implementação de programas de supervisão e estratégias de controle.

3.1 Material e Métodos

3.1.1 Seleção do produto

Em virtude do período de realização dos testes, o produto escolhido foi o feijão (*Phaseolus vulgaris*), variedade carioca, que foi coletado no campo experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola, ao atingir a maturidade fisiológica e tendo os grãos liberados da vagem após uma pré-secagem em terreiro, procedimento este necessário para que a vagem se rompa por ação mecânica externa e não aja dano a estes grãos.

3.1.2 Projeto e dimensionamento do secador

Optou-se em desenvolver um secador do tipo de leito fixo, também denominado por alguns autores como secador estático, e basicamente pode ser entendido como um secador onde as partículas ou grãos do produto estão distribuídos em um espaço delimitado e o fluido de secagem, normalmente o próprio ar ambiente, é condicionado a passar pelo produto em sentido ascendente sem provocar seu arrastamento. O diferencial do projeto foi a possibilidade de se realizar o monitoramento *on-line* de diversos parâmetros permitindo sua operação automática, ou manual de tais parâmetros através de um aplicativo de supervisão e controle.

O secador foi projetado para permitir o estudo de processos de secagem, monitoramento e controle, e também podendo migrar, em estudos futuros para um secador em escala industrial.

3.1.3 Definição das variáveis para o dimensionamento do secador

O dimensionamento do secador foi realizado a partir da definição do tipo de grão e da quantidade máxima que seria secada em cada teste. O produto escolhido para os cálculos e dimensionamento foram grãos de feijão, mas este dimensionamento também é adequado para outros grãos como soja e milho, na quantidade fixada de 50 kg. Os parâmetros estabelecidos para os cálculos são mostrados na Tabela 3.1:

O volume ocupado pelo produto foi calculado utilizando a Equação 3.1.

$$V = \frac{m_{\text{prod}}}{\rho} \quad (3.1)$$

Onde: V = Volume do produto [m^3]; ρ = Peso aparente [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]; m_{prod} = Massa de produto [kg].

Tabela 3.1 - Parâmetros para dimensionamento do secador

Parâmetros	Valores
Pressão barométrica	92,67 kPa
Teor inicial de umidade dos grãos	25% (B.S)
Temperatura ar ambiente	25 °C
Umidade relativa do ar ambiente	60%;
Temperatura do ar aquecido	50°C
Peso aparente do feijão	800 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$.
Quantidade de produto	50 kg

Adotou-se como parâmetro de projeto a altura h da camada de grãos como sendo 0,3 m, e então se obteve o diâmetro D do secador, com o emprego da Equação 3.2.

$$d^2 = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot h} \quad (3.2)$$

Onde: d = Diâmetro do secador [m]; V = Volume [m^3]; h = Altura da camada de produto [m].

A vazão volumétrica e mássica foi estimada através das equações 3.3 e 3.4, respectivamente:

$$QV = f_{\text{ar}} \cdot m_{\text{prod}} \quad (3.3)$$

$$Qm = \frac{QV}{v} \quad (3.4)$$

Onde: QV = Vazão volumétrica [$\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$]; f_{ar} = fluxo de ar [$\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$]; m_{prod} = Massa de produto [kg]; Qm = Vazão mássica [$\text{kg} \cdot \text{min}^{-1}$]; v = Volume específico [$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}_{\text{ar seco}}$].

Onde:

A perda de carga gerada pela camada de grãos foi estimada pela Equação 3.5.

$$\Delta P = \frac{a \cdot Qa^2}{\ln(1 + b \cdot Qa)} \quad (3.5)$$

Onde: ΔP = Perda de carga [Pa]; a , b = constantes adimensionais, característicos do produto; Qa = Obtida pela divisão da vazão volumétrica pela área circular do secador [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]

3.1.4- Dimensionamento do ventilador

Para obter a potência (hp – horse power) do motor foi considerado perda de pressão gerada pela camada de grãos, as perdas causada pela tubulação, conexões e elementos de construção são pequenas em relação a perda gerada pelo produto, mas foi acrescentado um valor de 20% ao resultado obtido como forma de compensação..

$$hp = \frac{Q \cdot PT}{K \cdot ef} \quad (3.6)$$

Onde: Q = Vazão volumétrica [$\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$]; PT = Pressão total [m de coluna de água]; K = Constante de conversão, 63,46; ef = Eficiência do motor [Valores comumente entre 0,3 a 0,7].

O valor em hp deve ser convertido em W para que esteja de acordo com o sistema internacional de unidades (S.I), para isto multiplica-se o valor em hp pela constante 745,7.

3.1.5 Dimensionamento das resistências elétricas

Utilizaram-se dois métodos para calcular o valor de potência das resistências elétricas. Um método é o mais comum e utilizado como mostra a Equação 3.7 e outro método é empregado comumente pela indústria e foi utilizado apenas para efeitos de comparação, sendo mostrado na Equação 3.8.

$$q = \dot{m}.C_p.\Delta T \quad (3.7)$$

Onde: q = Potência das resistências elétricas [W]; \dot{m} = Vazão mássica [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$];

C_p = Calor específico [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$]; ΔT = Variação de temperatura [$^\circ\text{C}$].

$$P = \frac{0,31.V.\Delta T}{860} \quad (3.8)$$

Onde: P = Potência das resistências elétricas [W]; V = Vazão volumétrica [$\text{m}^3\cdot\text{hora}^{-1}$]; ΔT = Variação de temperatura [$^\circ\text{C}$].

3.1.6 Construção do secador

O sistema de secagem é formado por uma estrutura cilíndrica ou câmara de aquecimento de ar, conjunto motor-ventilador, estrutura de sustentação, painel elétrico, instrumentos de medição, sistema de aquisição de dados, aplicativo de monitoramento e controle, e localizado no Laboratório de Termodinâmica e Energia da Faculdade de Engenharia Agrícola. A estrutura cilíndrica, com 500 mm de diâmetro interno e 810 mm de altura, está ilustrada na figura 3.1.

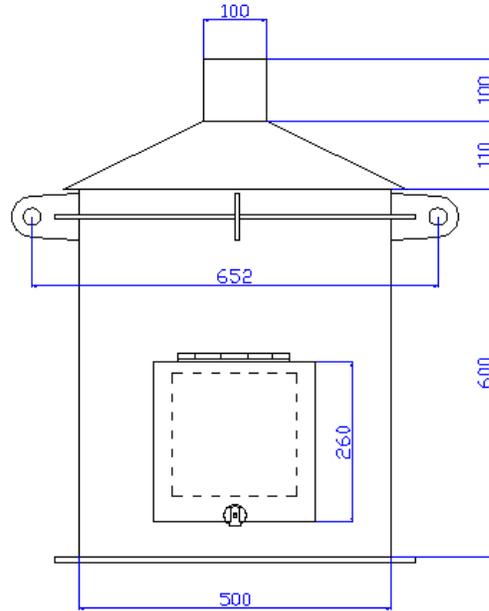


Figura 3.1- Dimensões do secador (em milímetros)

O secador foi construído em chapas de aço de 2,0 mm de espessura, que foram cortadas e dobradas em calandra para assumir a forma cilíndrica. A estrutura conta com dois olhais para facilitar o manuseio e dois flanges que garantem sua rigidez mecânica. Há uma porta para inspeção lateral e no topo a saída do fluxo de ar secante. Após o corte, dobra e soldagem das chapas de aço, este secador foi submetido a um processo de galvanização para melhorar a resistência à corrosão. Uma chapa perfurada foi usada como fundo falso, onde os grãos repousam. A câmara de aquecimento foi construída em liga de alumínio e comporta três resistências elétricas do tipo aletada. Esta câmara de aquecimento é ligada ao conjunto motor-ventilador.

O ventilador selecionado é da marca Torin, modelo DSL 160-51, tipo centrífugo, de aspiração simples, acoplado a motor, rotor siroco, Série: DSL; - Dimensões: 223 mm (largura), 238 mm (comprimento), 323 mm (altura), alimentação de 220/380 V; 3 Fases, 242,71 ; Vazão nominal de $50 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$; Pressão estática de 392,266 Pa.

A estrutura de suporte foi construída utilizando perfis de aço de 2,0 mm de espessura e canos tubulares de seção quadrada, nesta estrutura foram fixados e dispostos todos os elementos do secador, a exceção do sistema de aquisição de dados. Aplicou-se sobre a superfície externa do secador uma manta esponjosa para isolamento térmico, reduzindo as

perdas resultantes da troca de calor entre as paredes do secador e o ambiente. A figura 3.2 mostra o sistema de secagem e seus componentes instalados no Laboratório de Termodinâmica e Energia (LTE) da Faculdade de Engenharia Agrícola.

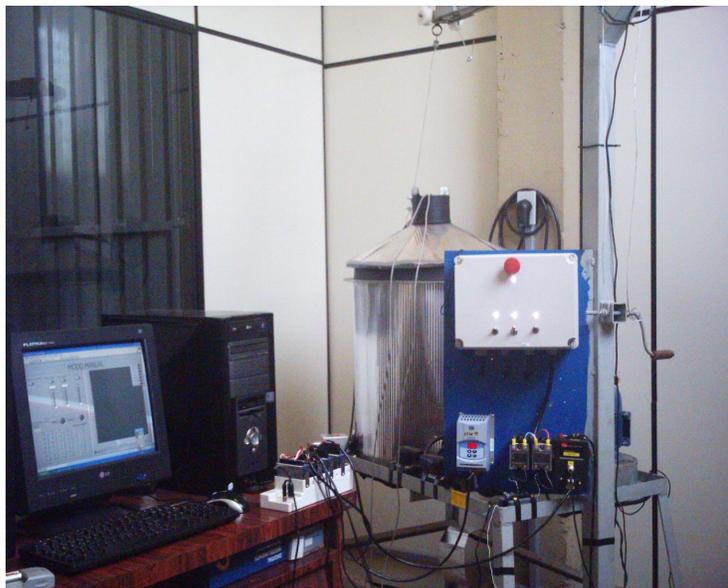


Figura 3.2- Laboratório de Termodinâmica e Energia

3.2 Circuitos eletro-eletrônicos

Os componentes e circuitos elétricos e eletrônicos foram os últimos elementos do sistema de secagem a serem instalados, uma vez que a estrutura da câmara de secagem ficou pronta a serem fixados na estrutura de suporte. O painel elétrico contém chaves de acionamento e dispositivos de proteção, dois disjuntores de 6 A utilizados com a contatora, uma das fases é ligada diretamente no comando desta contatora e outra fase passa por um botão do tipo cogumelo, para parada de emergência e então se conecta a ao segundo terminal de comando da contatora, sendo necessário o acionamento das duas fases para alterar o estado dos contatos. Optou-se por utilizar a contatora e um botão de parada de emergência para aumentar a segurança do processo.

Dois disjuntores bifásicos de 4 A foram utilizados para a proteção das resistências elétricas. Os disjuntores estão ligados em série a chaves tipo *on/off*, que habilitam a alimentação das resistências. Um quinto disjuntor, trifásico, de 10 A é responsável pela

segurança elétrica do inversor de frequência, quando este disjuntor esta fechado, o inversor de frequência é alimentado estando assim habilitado para acionar o motor, seja a partir de controle local ou remoto. Como medida de segurança foi implementado um inter travamento entre o acionamento do inversor do motor e das resistências elétricas, assim caso o motor do ventilador esteja desligado, ou seja, desligado durante o processo, as resistências elétricas tem sua alimentação aberta, evitando que operem sem a presença do fluxo de ar forçado. Os disjuntores estão representados na figura 3.3 pela letra D seguida de um número que os diferenciam, os relés de estado sólido são identificados pelas letras SS, o botão de emergência está representado por B e as resistências elétricas por R seguido do numero que a identifica.

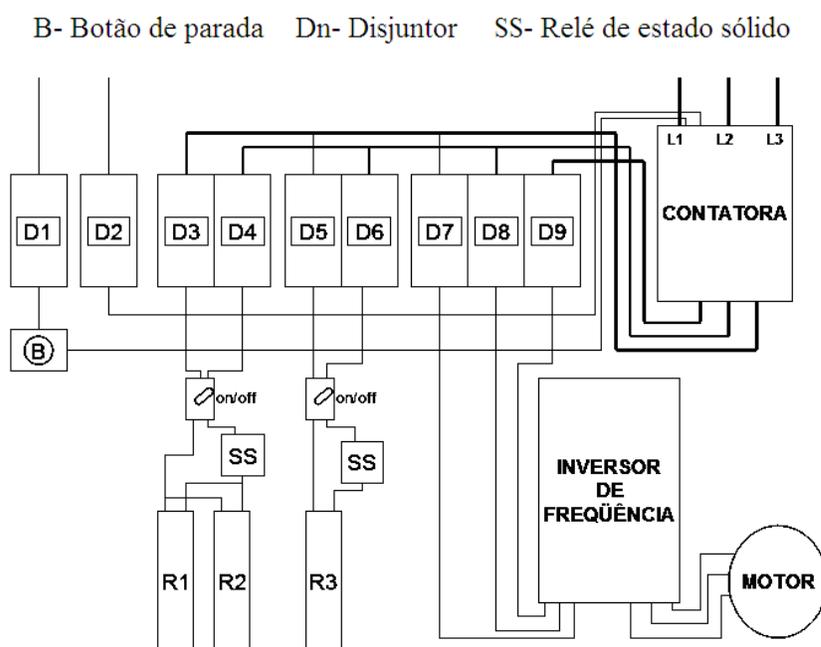


Figura 3.3- Esquema elétrico do painel

Utilizaram-se dois relés de estado sólido para acionar as resistências elétricas. Estes relés suportam cargas de 25 A e 250 VCA, sua tensão de acionamento é de 4 a 32 VCC/VDC e corrente de acionamento de 12 mA, com tempo de acionamento máximo de 8,3 ms, frequência de operação entre 47 Hz a 70 Hz. A figura 3.4 ilustra o esquema de ligação elétrica dos relés de estado sólido utilizados.

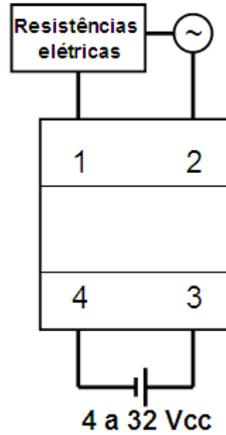


Figura 3.4- Ligação elétrica do relé de estado sólido

Um dos relés aciona o conjunto principal de resistências elétricas, constituído de duas resistências enquanto outro relé pilota a resistência elétrica auxiliar, a operação de acionar o conjunto principal de resistências ou a resistência auxiliar ocorre de maneira independente. Cada relé possui acoplado um dissipador de calor fixado no dispositivo por parafusos e utilizando uma camada de silicone térmico para melhorar a troca de calor, estes dissipadores estão presos a chapa metálica que contem os demais dispositivos elétricos e eletrônicos.

Observou-se durante os testes que o módulo de saída de tensão analógico que opera com valores de ± 10 VDC não conseguia enviar manter a tensão mínima necessária ao acionamento dos relés, chegando ao máximo de 2,8 V, mesmo com a saída do módulo de tensão analógica configurada para operar a 10 V. Isto ocorreu, pois o relé de estado sólido exigia maior corrente elétrica para manter a tensão, assim foi montado e implementado um circuito amplificador de corrente. Este circuito possui alimentação externa proporcionada por uma fonte estabilizada com saída de 12 VDC e corrente de 2,0 A. Este circuito amplificador de corrente permitiu o acionamento dos relés de estado sólido a partir de um sinal de tensão a partir de 1,8 VDC gerada pelo módulo de saída analógica pertencente ao sistema de aquisição de dados. Dois circuitos foram montados em uma única placa, com operação independente e alimentação externa comum. O circuito amplificador de corrente esta ilustrado na figura 3.5, cada um desses circuitos utilizou um relé modelo MC2RC2 de 12 V, um resistor de carvão de 10 k Ω , um resistor de carvão 1M5 e dois transistores BC 548.

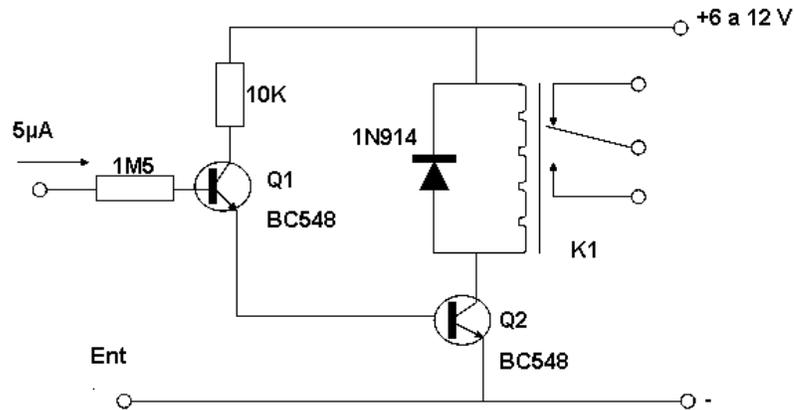


Figura 3.5- Circuito amplificador

3.3 Sistema de aquecimento

O sistema de aquecimento do ar é constituído pelas resistências elétricas e a câmara de aquecimento. As resistências são do tipo tubo aletado, com 300 mm de comprimento cada, e potência de 600 W a unidade, com alimentação de 220 VCA. Foram utilizadas ao todo três resistências, totalizando 1800 W. O sistema de aquecimento está dividido em aquecimento principal e aquecimento auxiliar. Compreende o aquecimento principal o conjunto formado por duas resistências pilotadas por um único relé de estado sólido, e o aquecimento auxiliar foi definido como uma terceira resistência elétrica pilotada pelo segundo relé de estado sólido. O aquecimento principal e auxiliar pode operar de maneira independente ou em conjunto, de acordo com a configuração realizada no aplicativo de supervisão e controle.

As resistências elétricas foram dispostas em paralelo e o fluxo do ar de secagem tem sua passagem forçada através das três resistências, esta configuração pode ser representada pela figura 3.6, onde o fluxo de calor foi definido por $q(t)$ e θ_1 e θ_2 correspondem a temperatura na entrada e após passar pelas resistências, respectivamente.

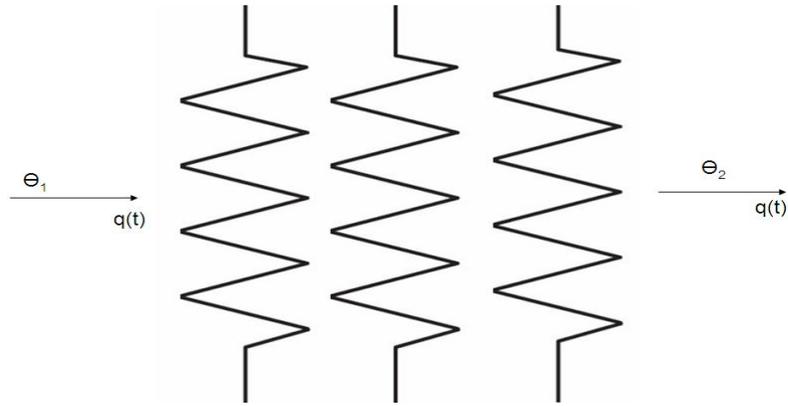


Figura 3.6- Resistências elétricas dispostas fisicamente em paralelo

Pode-se expressar a resistência equivalente como a soma de cada resistência, assim:

$$q = \frac{1}{R_{\text{principal}}} (\Theta_1 - \Theta_B) \quad (3.9)$$

$$q = \frac{1}{R_{\text{auxiliar}}} (\Theta_B - \Theta_2), \text{ então eliminando o termo } \Theta_B, \quad (3.10)$$

$$q = \frac{1}{R_{\text{principal}} + R_{\text{auxiliar}}} (\Theta_1 - \Theta_2), \text{ logo}$$

$$R_{eq} = R_{\text{principal}} + R_{\text{auxiliar}} \quad (3.11)$$

Os sistemas térmicos possuem resistência térmica, que relaciona a variação de temperatura com a variação da taxa de fluxo de calor e uma capacitância, que relaciona a variação do calor armazenado com a variação da temperatura. A função de transferência que rege o modelo de aquecimento pode ser descrita da seguinte forma:

$$q(t) = \frac{Cd\Theta}{dt} + \frac{\Theta_0(t)}{R} \quad (3.12)$$

Aplicando Laplace:

$$Q(s) = Cs\Theta_0(s) + \frac{\Theta_0(s)}{R} \quad (3.13)$$

$$\frac{\Theta_0(s)}{Q(s)} = \frac{R}{(RCs + 1)} \quad (3.14)$$

Onde Θ_0 é a temperatura em regime permanente do ar [°C]; R é a resistência térmica [°C.kJ¹.s⁻¹]; C é a capacitância térmica, kcal.C⁻¹.

3.4 Sistema de circulação forçada de ar

O sistema de circulação forçada de ar consiste em um motor elétrico acoplado mecanicamente ao eixo de um ventilador. Este motor possui potência de 0,245 kW e rotação nominal de 1710 rpm.

O ventilador utilizado foi do tipo centrífugo, captando ar ambiente e insuflando este ar na câmara de aquecimento e em seguida chegando ao *plenum* do secador para ser homogeneizado e distribuído na câmara de secagem. O motor é controlado com o uso de um inversor de frequência.

3.5 Inversor de frequência

O inversor de frequência modelo CFW 10 é responsável por atuar sobre a frequência de alimentação do motor, alterando assim sua rotação e forma de parada e acionamento, podendo ser configurado para operar de maneira local, através da IHM (interface homem máquina) ou remotamente pelo aplicativo de supervisão e controle e sistema de aquisição de dados.

As principais características sobre o inversor estão listadas a seguir:

- Potência: 0,18 a 3,67 kW (0,25 a 5 CV);
- Alimentação monofásica / trifásica;
- Tensão de entrada: 100 a 135V e 200 a 240V;
- Tensão de saída: 200 a 240V;

- Modulação PWM senoidal - *Space Vector Modulation*;
- Regulador PID;
- Filtro EMC incorporado (modelos alimentados em 220 V);
- Métodos de variação de velocidade: potenciômetro incorporado no produto, potenciômetro através das entradas analógicas, potenciômetro via teclado e *multi-speed*.

Os parâmetros do inversor de frequência foram selecionados localmente pela IHM, consultando-se o manual fornecido pelo fabricante. Após a configuração dos parâmetros do equipamento terem sido realizados e o inversor sido testado, alterou-se o seu controle de local para remoto, isso foi feito como indicado na figura 3.7, conectando-se o terminal 5 (GND) ao terminal 1 e este ao terminal 3 e 4. O controle pode a qualquer momento voltar a ser local, bastando para isso abrir os terminais indicados. Também na figura 3.7 são mostrados os dois terminais (7 e 8) utilizados para variar a rotação do motor de maneira proporcional a tensão aplicada a partir do módulo de saída de tensão que por sua vez tem a saída alterada de maneira manual ou automática pelo aplicativo de supervisão e controle. A variação da tensão entre esses dois terminais produz alteração da frequência sobre o motor, esta relação é proporcional. Quando a tensão estiver em zero V a frequência será zero Hz e o motor estará parado, quando a tensão for 8,5 V a frequência será 60 Hz e o motor estará operando sob rotação nominal. Por segurança limitou-se o inversor de frequência produzir no máximo 60 Hz, mesmo que a tensão entre os terminais 7 e 8 ultrapasse os 8,5 V correspondentes a este valor.

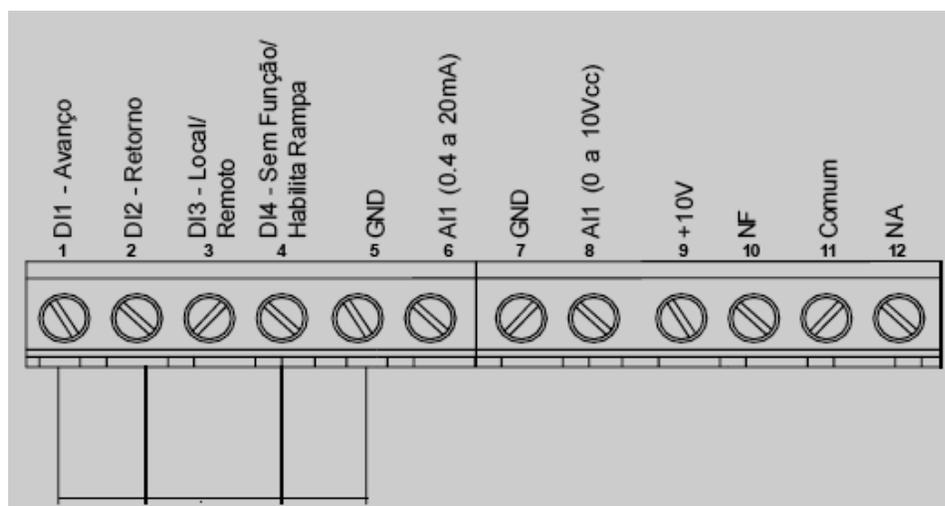


Figura 3.7- Habilidade de controle local/remoto e variação de frequência via terminais

3.6 Instrumentação do Sistema de Secagem

Os instrumentos de medida representam todos os componentes sensoriais de um sistema de medição, ou seja, são os elementos sensíveis às variações de fenômenos físicos como temperatura, pressão, umidade, tensão elétrica, corrente elétrica, nível de iluminação e diversas mais ocorrências físicas produzidas com ou sem a interferência humana.

Comumente os sensores estão associados a transdutores que tem por função converter um fenômeno físico em um sinal capaz de ser interpretado pelo sistema de aquisição de dados, normalmente um sinal elétrico, dessa maneira o fenômeno físico pode ser mensurado, visualizado e registrado tanto local como remotamente, este conjunto de ações pertence a um campo tecnológico designado por instrumentação. A ação de medir pode ser entendida como o ato de relacionar valores numéricos e/ou gráficos a eventos físicos, com isso diversos processos podem ser monitorados e aperfeiçoados tanto nos aspectos produtivos quanto energéticos.

A instrumentação vem sendo aplicada a processos de secagem de maneira mais intensa na última década. A secagem de produtos agrícolas é realizada há muito tempo, no início apenas empregando meios naturais, como secagem em terreiro com incidência solar sobre o produto, ainda hoje este método é utilizado, algumas vezes apenas na fase de pré-secagem, e é usado por ser um método de baixo custo. Porém ao se optar pela secagem natural, as condições a que o produto é exposto não podem ser controladas, criando dependência de fatores ambientais. Com as atuais exigências em relação a qualidade dos produtos e a necessidade de planejamento sobre a colheita e armazenamento, a secagem artificial tem sido cada vez mais adotada pelo produtores, mas para que o processo seja viável é preciso que ocorra seu monitoramento ao longo do tempo, e isso é feito com um sistema de supervisão que exige instrumentos diretamente ligados ao processo permitindo a obtenção das grandezas relacionadas no momento em que ocorrem.

A posição dos sensores no secador está indicada na figura 3.8 de maneira esquematizada. A temperatura foi medida com sensores termo resistivos do tipo Pt 100, utilizou-se este sensor por seu comportamento linear ao relacionar a variação de temperatura com a resistência elétrica e por oferecer elevada exatidão. Eles foram dispostos de maneira a tornar possível a verificação da variação de temperatura ao longo do leito, adotando-se a temperatura por T1

como a variável de processo, a partir da qual o controle tomou por referência para determinar o erro e portanto definir qual o valor de saída para atuar sobre as resistências elétricas. Um segundo sensor de temperatura foi posicionado aproximadamente na altura mediana do leito de produto, T2, o sensor de temperatura T3 está próximo a camada mais alta do leito enquanto o sensor T4 localiza-se na saída do secador. Os sensores foram colocados de forma perpendicular a passagem do ar de secagem e por estar em contato direto com os grãos, adota-se os valores medidos como sendo do próprio produto.

Em relação a umidade relativa do ar dois sensores foram usados, um localizado na entrada do secador (UR 1), no *plenum*, e outro localizado na saída (UR 2), as características deste instrumento estão indicados no tópico 3.8. Todos os sensores estão ligados ao sistema de aquisição de dados em seus módulos adequados, este sistema é responsável por condicionar o sinal e converte-lo de sinal analógico para sinal digital que é enviado ao computador por cabo USB.

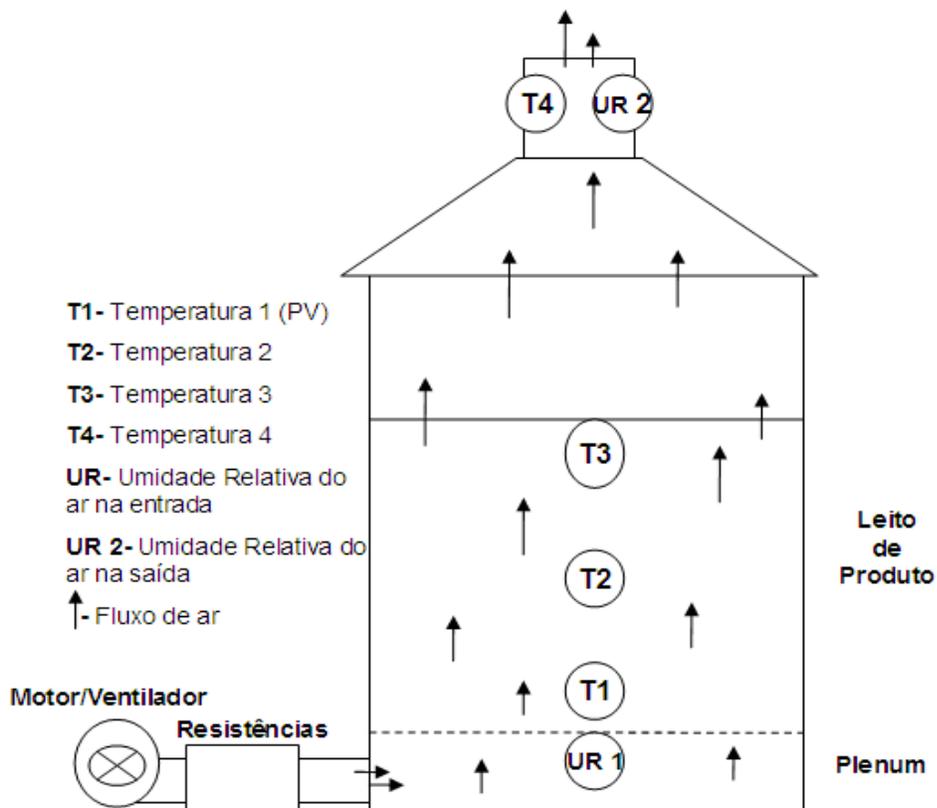


Figura 3.8- Localização dos instrumentos no secador

3.7 Medição da Temperatura do ar e dos grãos

Utilizaram-se três sensores de temperatura tipo Pt 100 distribuídos na câmara de secagem. Estes sensores são caracterizados por sua linearidade e baseiam-se no princípio da variação da resistência ôhmica em função da temperatura. Possui um filamento interno de platina de alta pureza e encapsulado em bulbo cerâmico ou de vidro. Foi utilizado o esquema de ligação a três fios, com cada Pt 100 conectado aos terminais do módulo de aquisição de dados. O módulo utilizado para este fim é específico para RTDs, e após a ligação física dos terminais criou-se e configuraram-se os blocos correspondentes no aplicativo de supervisão e controle. Foi necessário realizar a calibração de cada um dos Pt 100, o que foi realizado com auxílio de um banho térmico e um termômetro padrão.

3.8 Medição da umidade do ar no secador

Foram instalados dois medidores de umidade relativa do ar baseados em sensor marca Honeywell. O instrumento, modelo HIH 3610, possui precisão de $\pm 2\%$, linearidade de $0,5\%$, estabilidade de 1% , todos esses valores estabelecidos a 25°C , com saída proporcional a umidade, de 0 a 10V, correspondendo a 0 e 100% de umidade relativa respectivamente, calibrados pelo fabricante. Os instrumentos foram posicionados no *plenum* e na exaustão, fixados á estrutura do secador por rosca.

A seguir estão apresentadas as principais características do instrumento utilizado para medir a umidade relativa do ar, com a extremidade feita de material poroso para permitir a troca de interação entre o ar e o sensor no interior do instrumento.

- Corpo em alumínio;
- Conexão rosca 1/2" BSP;
- Cabo de conexão incluso 2m;
- Sinal de saída RS 232 (Opcional 485 / 4 a 20mA / 0 a 5Vdc);
- Faixa de operação de umidade: 0 a 100 % não condensado;
- Faixa de operação de temperatura: 0 a 85°C
- Alimentação: 9Vdc

- Sensor de Umidade
- Faixa de leitura de 0 a 100% (não condensado);
- Precisão: $\pm 3,5\%$
- Repetibilidade: $0,5\%$;

3.9 Medição da velocidade do ar no secador

Foi utilizado para medição da velocidade do ar de secagem um termo-anemômetro digital a fio quente marca Instrutherm modelo TAVR-180, com display LCD de 3 1/2 dígitos, posicionado na entrada da câmara de aquecimento, os valores de velocidade foram registrados e relacionados a frequência de alimentação do motor acoplado ao ventilador, conhecendo-se a área da seção em que a medição da velocidade foi realizada tornou-se possível obter indiretamente a vazão volumétrica.

As principais características do instrumento estão mostradas a seguir:

- Escala em $m.s^{-1}$, $km.h^{-1}$, nós, $ft.min^{-1}$, $milhas.h^{-1}$;
- Medidas: 0,2 a 20,0 $m.s^{-1}$, 0,7 a 72,0 $km.h^{-1}$, 1,0 a 31,1 nós, 40,0 a 3940 $ft.min^{-1}$ ou 0,5 a 44,7 $milhas.h^{-1}$;
- Precisão: $\pm 3\% + 1$ dígito;
- Resolução: 0,1 $m.s^{-1}$, 0,1 $km.h^{-1}$, 0,1 knots, 10,0 $ft.min^{-1}$, 0,1 $milhas.h^{-1}$;
- Tempo de resposta: Aprox. 0,8 s;
- Temperatura de operação: 0 a 50°C;
- Umidade de operação: Máx. 80%.

3.10 Temperatura e umidade relativa ambiente

Verificou-se e registrou-se a temperatura e umidade no ambiente em que o secador estava instalado, para verificar as condições em que cada teste foi realizado, para isso utilizou-se um instrumento da marca Instrutemp modelo ITHTR-157. As características deste instrumento estão indicadas a seguir.

- Display de cristal líquido (LCD) de 3 1/2 dígitos;

- Temperatura: - 20 a 60°C;
- Precisão: $\pm 0,8$
- Resolução: 0,1°C
- Umidade relativa: 10 a 95%;
- Precisão: $\pm 3\%$;
- Resolução: 0,1%;
- Umidade: Sensor capacitivo;
- Temperatura: Sensor semiconductor;
- Tecla de seleção de unidade °C / °F;
- Tempo de resposta: 5 segundos. (temperatura); 300 segundos (umidade).

3.11 Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados é baseado na plataforma *CompactDAQ* fabricada pela *National Instruments*. É composto por módulos específicos para cada função, devidamente ligados ao chassi que possui a alimentação desses módulos e realiza a comunicação com o *PC* via USB. São ao todo três módulos: NI 9217, 9215, 9263.

O módulo NI 9217, figura 3.9, é específico para uso com RTDs, possui quatro canais de entrada analógica, com conversor analógico/digital de 24 bits de resolução para uso com instrumentos a três ou quatro fios.

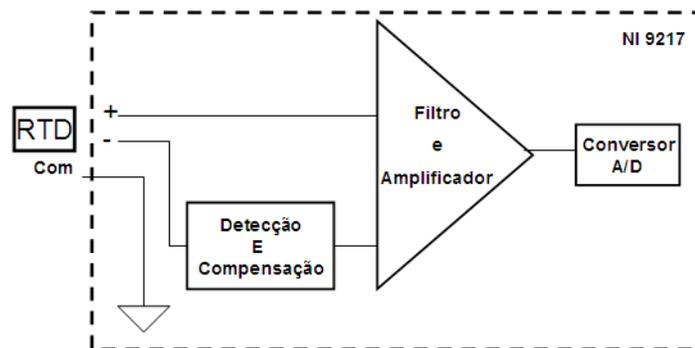


Figura 3.9 – Esquema básico do circuito do módulo 9217

Para leitura dos sinais analógicos foi utilizado o módulo NI 9215, com quatro canais de 16 bits de resolução e entrada de ± 10 V, este módulo utiliza um conversor analógico/digital do tipo registrador por aproximação sucessiva com taxa de aquisição de 100 kS.s^{-1} (figura 3.10).

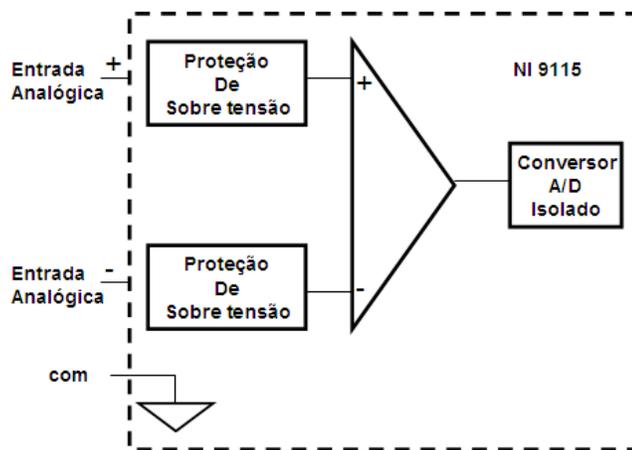


Figura 3.10 – Esquema básico do circuito do módulo 9215

Para saída analógica utilizou-se o módulo NI 9263, que possui 4 canais de 16 bits e opera com taxa de aquisição de até 100 kS.s^{-1} . Demais canais de entrada analógica foram disponibilizados com o módulo NI 9201, que oferece 8 entradas de 12 bits, com taxa de aquisição de 500 kS.s^{-1} (figura 3.11).

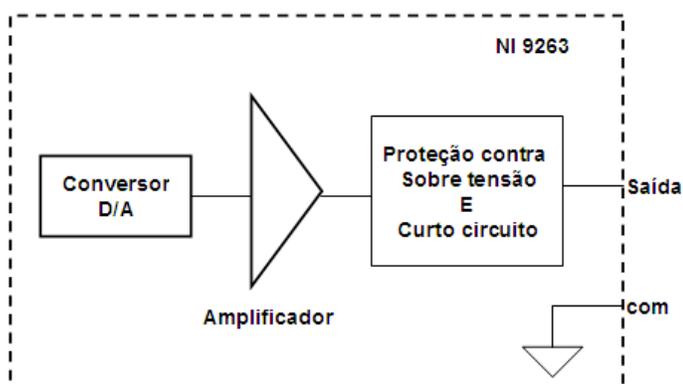


Figura 3.11 – Esquema básico do circuito do módulo 9263

O chassi modelo NI 9172, pode suportar até 8 módulos com conexão a quente, ou seja, os módulos podem ser ligados ao chassi enquanto este opera e ser reconhecido permitindo sua configuração a qualquer momento. Cada chassi pode realizar até $5,0 \text{ MS.s}^{-1}$.

A seguir estão listadas as principais características do chassi NI 9172.

- Conectividade USB 2.0 (480Mb/s);
- Velocidade máxima de aquisição de dados de 250kS/s (32 ch);
- Resolução máxima de 24 bits;
- Capacidade de 8 slots;
- Exatidão absoluta de 0.013% para o *range* completo de medição;

Para o uso deste módulo foi desenvolvido um aplicativo em ambiente compatível, que permitiu configurar os módulos, visualizar os parâmetros do processo e alterar grandezas.

A figura 3.12 mostra uma representação esquemática da localização dos sensores no secador, resistências elétricas, sistema de aquisição de dados e computador.

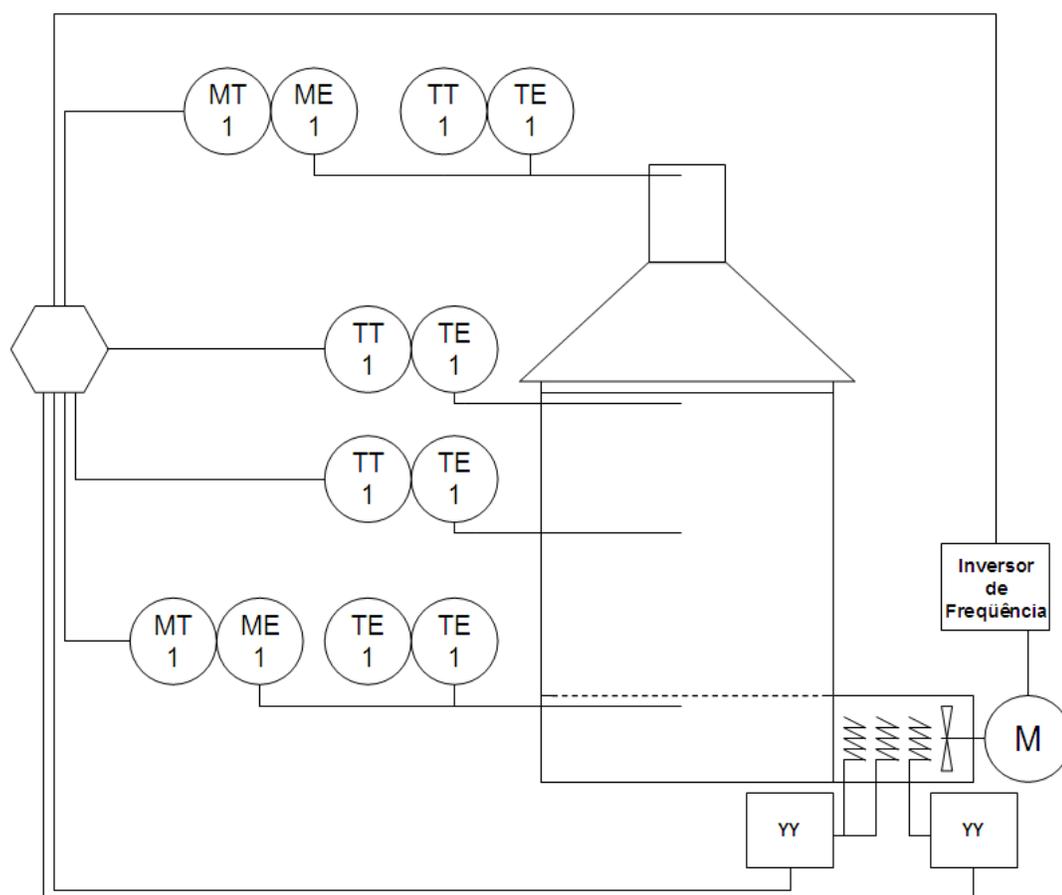


Figura 3.12- Sistema secador e supervisão do processo de secagem.

3.12 Calibração dos sensores de temperatura

Para a calibração dos Pt 100 utilizou-se banho térmico e termômetro padrão. Além da calibração que foi feita comparando-se o valor real obtido pelo termômetro padrão e o valor mostrado pelo aplicativo em dois pontos, também se verificou se haveria presença de histerese. Realizaram-se seis repetições, três com valores crescentes e três com valores decrescentes, os valores obtidos foram registrados e tabelados, permitindo assim montar um gráfico e chegar à equação de calibração. O intervalo de temperatura escolhido corresponde ao intervalo de trabalho que o instrumento será submetido, entre 20 e 80°C, com acréscimos e decréscimos de 5°C, atentando-se durante o procedimento para a estabilização dos valores antes de seu registro.

O banho térmico permaneceu o tempo todo com o sistema de circulação de água ligado para melhorar a homogeneidade térmica do fluido. Os Pt 100 foram totalmente submersos neste fluido e sem entrar em contato com as paredes do banho térmico, fixados próximos entre si e com o termômetro padrão. As tabelas e gráficos referentes a calibração dos Pt 100 estão disponíveis em anexo.

3.13 Resultados e Discussão

O projeto do secador surgiu da necessidade em se obter um sistema de secagem de grãos capaz de mostrar ao usuário alguns parâmetros envolvidos no processo, no caso do secador em questão, estes parâmetros foram a umidade relativa do ar de secagem e a temperatura deste ar em alturas distintas ao longo do leito. A forma e a estrutura do secador basearam-se na concepção dos secadores reais, de leito fixo, instalados próximos aos locais de produção e armazenamento de grãos, optou-se por desenvolver e implementar um protótipo de secador deste tipo por sua ampla utilização no mercado e pela relativa simplicidade em construí-lo e instalá-lo em laboratório. Após a definição dos parâmetros de projeto, como a quantidade de produto que o secador poderia secar em cada batelada e a temperatura máxima que poderia ser atingida, estimou-se os demais valores como a potência elétrica das resistências que aqueceriam o ar. Com a funcionalidade do secador definida, todos os materiais necessários a

sua construção e operação foram adquiridos, iniciando-se sua construção junto ao Laboratório de Protótipos da Faculdade de Engenharia Agrícola, a instalação dos demais dispositivos, sensores, relés, inversor de frequência, resistências elétricas e demais foram realizadas no laboratório de Termodinâmica e energia. Com o secador já em condição operacional, foram realizados uma série de testes livres para verificar o seu comportamento e funcionalidade, iniciando a calibração dos sensores de temperatura do tipo Pt 100, cada sensor foi calibrado utilizando banho térmico e o resultado mostrou que estes sensores apresentaram um desvio pequeno em relação ao valor real (considerado a partir de um termômetro de mercúrio padrão) e uma resposta linear, como o esperado para este tipo de sensor, com a curva de calibração pronta obteve-se por regressão linear a equação de calibração que foi implementada no aplicativo de supervisão e permitiu a correta leitura da temperatura.

Verificou-se uma pequena histerese entre o aumento e a diminuição de temperatura durante a calibração dos sensores de temperatura, mas cujo valor pode ser desconsiderado, mostrando-se na Tabela 3.2 a média de valores finais de erro.

Tabela 3.2 - Valores de erro obtidos com a calibração

Pt100	Erro médio(°C)
1	0,35
2	0,29
3	0,39
4	0,46

Os sensores de umidade vieram calibrados pelo fabricante, sendo a sua resposta apenas comparada com a de um termo- higrômetro digital portátil que confirmou a resposta obtida com o sensor de umidade instalado no secador.

Os testes com inversor de frequência permitiram obter a relação entre a frequência de alimentação do motor, a rotação correspondente, e a velocidade do ar pela câmara de aquecimento, tais dados poderão ser utilizados também em experimentos futuros onde seja necessário variar a vazão de ar. Verificou-se a temperatura máxima que as resistências elétricas poderiam aquecer o ar de secagem, e o valor atingido ficou em cerca de 10°C acima

do valor nominal, o que demonstra que as resistências escolhidas estavam com potência dentro de uma boa margem de trabalho.

Percebeu-se nos primeiros testes que havia muita perda térmica através das paredes metálicas do secador, assim as mesmas foram isoladas por manta térmica e com isso as perdas foram reduzidas tornando o processo viável do ponto de vista energético. Também durante os primeiros testes realizados verificou-se a ocorrência de ruído nos sinais vindos dos sensores, expresso sob a forma de instabilidade não sustentada, algumas ações foram realizadas para corrigir este problema: aterramento de toda a estrutura metálica do secador, redução no comprimento dos cabos dos sensores e uso de cabos blindados, além da implementação de filtros no aplicativo, com isso o problema de ruído foi resolvido obtendo-se um sinal estável.

3.14 Conclusões

Os objetivos propostos para esta etapa do projeto foram atingidos, eventuais problemas relativos à perda térmica e ruído de sinal foram corrigidos. Ao final desta etapa do projeto o secador se tornou operacional, possibilitando sua integração ao aplicativo de supervisão e controle.

3.15 Referências Bibliográficas

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: Avi Publishing Company, 1992.

IPT. **Instrumentação industrial e medidas elétricas**. Disponível em: http://www.estt.ipt.pt/download/docente/256__sebentaInstrumCET.pdf. Acessado em: 15/10/2008

NATIONAL INSTRUMENTS. **Compact Daq**. Disponível em: <http://www.ni.com/dataacquisition/compactdaq>. Acesso em: 03 jan. 2009.

Capítulo 4

Supervisão e controle do processo de secagem

Resumo

O aplicativo utiliza linguagem gráfica, baseando-se na criação de instrumentos virtuais (VI – *Virtual instruments*) permitindo a supervisão e controle de processos de maneira *on-line*. Basicamente este aplicativo se apresenta ao usuário em duas telas, o painel frontal onde se realiza a visualização e controle de processos e o diagrama de blocos que corresponde a parte funcional e lógica do programa. Desenvolveu-se um aplicativo capaz de mostrar a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem, além de permitir atuar sobre a rotação do motor acessando remotamente o inversor de frequência e controlar também a temperatura, ligando e desligando as resistências elétricas através do acionamento dos relés de estado sólido. Os parâmetros são alterados no painel frontal, especificando o valor da temperatura (*set point*). Utilizou-se um inversor de frequência para variar a vazão de ar ao atuar modificando o valor de da frequência do motor acoplado ao ventilador, sua operação pôde ser realizada tanto de maneira local, através de sua IHM (Interface Homem-Máquina), como remota (aplicativo de supervisão e controle). O acionamento das resistências elétricas envolveu o uso de relés de estado sólido, acionados a partir de um sinal em tensão. O tempo de resposta para acionamento das resistências foi satisfatório, não havendo atrasos significativos. O aplicativo desenvolvido permitiu a supervisão e o controle do processo em relação à temperatura e vazão de ar. A correção da temperatura era feita alterando-se a potência das resistências elétricas com uso de relés de estado sólido acionados sob comando do controlador PID, a partir da comparação entre a variável de processo (PV) e o *set point* (SP).

Palavras-chave: Sistema supervisório, instrumentação virtual, controle PID.

Abstract

The application uses graphic language, based on the creation of virtual instruments (VI - *Virtual instruments*) allowing monitoring and control processes so online. Basically this

application is presented to the User on two screens, the front panel which holds the display and process control and block diagram representing the functional and program logic. Developed an application that can display temperature and relative humidity of the drying air, and allow work on the engine speed remotely accessing the drive and also control the temperature, turning on and off the electrical resistance through the activation of solid state relays. The parameters are changed on the front panel, specifying the value of the temperature (set point). We used a frequency inverter to vary the air flow to act by modifying the value of the frequency of the engine coupled to the fan, its operation could be performed either locally, through its HMI (Human Machine Interface) and remote (application of supervision and control). The drive of the electric resistance involved the use of solid state relays, powered from a signal voltage. The response time for activation of the resistance was satisfactory, with no significant delays. The application developed allowed for supervision and control of the process in relation to temperature and air flow. The temperature correction was done by changing the power of electrical resistances with the use of solid state relays driven under control of the PID controller, based on the comparison between the process variable (PV) and set point (SP).

Keywords: Supervisory system, virtual instrumentation, PID control.

Introdução

Supervisionar um processo pode ser entendido em termos práticos como a obtenção de informações deste processo e sua exposição ao operador na forma numérica e/ou gráfica, facilitando a visualização e interpretação das grandezas envolvidas. Realizar a aquisição de dados representa, portanto, obter informações relativas a um processo qualquer pela medição de suas grandezas, as quais por sua vez deverão ser convertidas em sinais digitais (digitalização) possibilitando seu uso por algum aplicativo ou processamento matemático que torne adequado para a visualização, comparação, e registro com grandezas conhecidas. Há diversos *softwares* e *hardwares* disponíveis no mercado para realizar o monitoramento dos mais diversos processos.

Neste trabalho o aplicativo de supervisão e controle foi desenvolvido com auxílio de um *software* que utiliza linguagem gráfica sendo constituído por blocos funcionais e uma série de rotinas que agem de maneira independente ou em conjunto com demais rotinas. Este ambiente de desenvolvimento é construído por VIs e sub-VIs com funções específicas no contexto do aplicativo e possibilidade de alterações em suas configurações de acordo com a necessidade, esta mudança na configuração podem ocorrer de maneira manual ou automática.

O desenvolvimento de aplicativos de supervisão e controle em plataforma *PC* oferece facilidade ao desenvolvedor por sua flexibilidade, sendo recomendado para trabalhos acadêmicos. Outras plataformas poderiam ser utilizadas, principalmente se o processo se voltar a aplicações comerciais, como por exemplo, em silos secadores de grande porte, onde poderia ser empregada CLPs (controladores lógicos programáveis) ou ser desenvolvido um micro controlador dedicado a execução das tarefas exigidas por este processo, assim o uso destas plataformas aumentariam a segurança no funcionamento do sistema ao longo do tempo, tornando-o mais confiável que uma plataforma *PC*, a qual mesmo com seus avanços tecnológicos ainda não tem a mesma estabilidade de um CLP ou um micro controlador, por exemplo. Neste trabalho o condicionamento de sinal deve ser entendido como a adequação de um sinal elétrico proveniente de um sensor/transdutor para um sinal digital que pode ser convertido em um valor numérico correspondente a grandezas normalizadas. Há diversos tipos de condicionamento de sinais que podem ser empregada, como mudança do nível do sinal, linearização, conversões de grandezas, casamento de impedância, filtragem e isolamento.

A mudança do nível de um sinal pode ser feita empregando-se amplificadores ou atenuadores. O amplificador visa melhorar a relação sinal/ruído do sinal que esta sendo medido. Utiliza-se a linearização coma finalidade de corrigir a resposta de sensores que possuem um comportamento não linear, uma vez que sinais lineares são mais fáceis tanto para serem tratados como para serem visualizados. O filtro tem basicamente a função de limitar a banda de um sinal adequando-o as condições exigidas pelo teorema de Nyquist (anti-aliasing) ou eliminado os sinais com valores fora da faixa de interesse. Emprega-se o casamento de impedância quando a diferença entre a impedância interna do sensor e da entrada do elemento seguinte, como um cabo, pode causar erros nas medições. A isolamento é utilizada para eliminar as tensões suficientemente elevadas que possam causar dano ao sistema de aquisição. No

sistema de aquisição adotado, o condicionamento de sinais foi realizado por circuitos presentes em cada módulo.

O sistema de supervisão desenvolvido e implementado possibilita visualizar a temperatura e umidade do ar em vários pontos do secador e ainda estimar a vazão mássica do ar de secagem, a rotação do motor e a energia consumida, em um aplicativo configurável e flexível.

4.1 Aplicativo de supervisão e controle

Um sistema de monitoramento (ou supervisor) é constituído por *hardware* e *software* que interagem e permitem ao operador obter informações *on line* sobre um determinado processo ou conjunto de processos, possibilitando a geração de relatórios, gráficos de tendência, mudança do valor de grandezas, diagnóstico de falhas, etc.

O aplicativo utilizado neste trabalho foi o LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*), da *National Instruments*. Este aplicativo caracteriza-se por utilizar linguagem gráfica, com a programação seguindo o modelo de fluxo de dados, diferenciando-se da maioria dos programas que utiliza instruções sobre a forma de texto, oferecendo um ambiente intuitivo e flexível para a aquisição de dados, demonstração destes dados sob a forma de informações ao operador e também o registro dos valores tanto na forma numérica como gráfica, sendo que o programa não é processado por um interpretador, mas sim compilado, o que significa que um conjunto de códigos escrito em uma linguagem (código fonte) é transformado em um programa semanticamente equivalente em outra linguagem. Escreve-se a programação utilizando-se blocos gráficos funcionais em programação de alto nível e este código é transformado em um programa de baixo nível, que fornece as seqüências de instruções a serem executadas pelo processador. Este programa pode ser dividido em dois ambientes basicamente, o painel frontal e o diagrama de blocos:

- **Painel Frontal:** Constitui a interface do programa com o usuário, possuindo comandos e indicadores. Os comandos podem se apresentar como comutadores, botões, discos, e demais dispositivos de entrada. Os indicadores podem ser LEDs, gráficos, indicadores numéricos, termômetros entre outros mostradores configuráveis.

- **Diagrama de blocos:** É onde está o código gráfico responsável pela funcionalidade de cada VI e sub-VI. Os elementos do painel frontal aparecem como terminais no diagrama de bloco.

Cada uma das diferentes funções é conectada por meio de linhas ou arames por onde ocorre o fluxo de dados.

4.2 Metodologia para o desenvolvimento do aplicativo

Cada bloco funcional é designado de VI e pode operar de maneira isolada, independente de demais VI ou então pode interagir com outros blocos, neste caso é denominada de sub-VI. Uma VI é conectada a outra por meio de fios ou arames, sendo que cada VI pode ter entradas e/ou saídas. Não existe uma ordem definida para a execução das VI, pois as tarefas são executadas em função do fluxo de dados que seguem pelos fios, ao ter todas as entradas ocupadas com dados ocorre o processamento e então a transferência destes dados para as saídas correspondentes. Algumas VIs não possuíam valores de entrada, neste caso seu processamento se deu no início da execução do aplicativo, outras VIs sem terminais de saída tem seus valores ignorados ou então enviados para uma estrutura externa. A criação de um elemento ou objeto no painel frontal cria um bloco equivalente no diagrama de blocos. Vários destes blocos são polimorfos, o que significa que podem se adaptar a vários tipos diferentes de dados.

Elaborou-se um diagrama, como mostrado na figura 4.1, para determinar a seqüência de operações a serem realizadas.

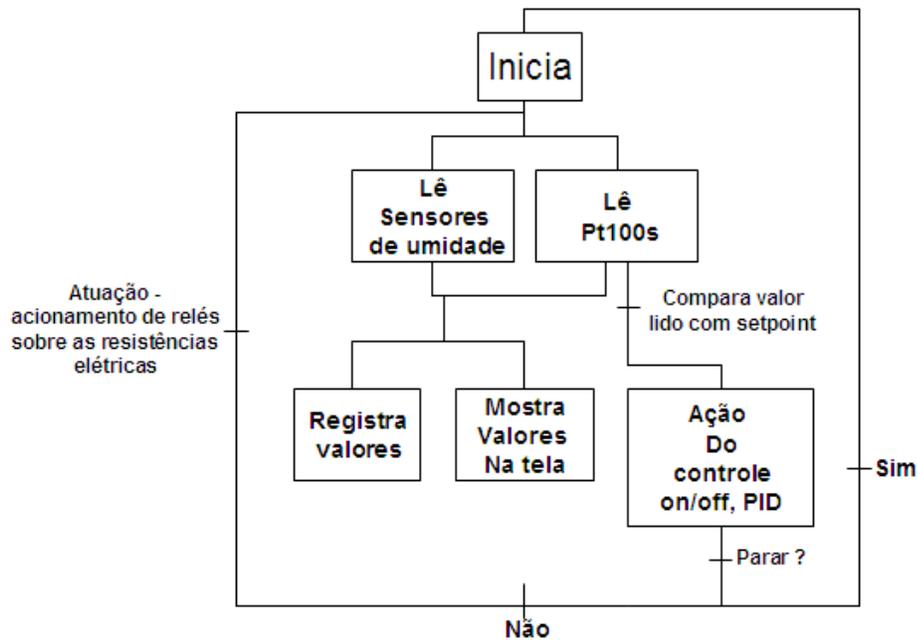


Figura 4.1 – Operação do secador

Iniciou-se o desenvolvimento do aplicativo pelo painel frontal, adicionando-se os principais elementos de visualização como *numeric indicators*. As principais estruturas são as sub-VIs para aquisição de temperatura e umidade, além das estruturas de saída de sinal para atuar sobre os relés de estado sólido, e sobre o inversor de frequência. Quatro canais para a aquisição de temperatura foram implementados para verificar a mudança da resistência Ôhmica ao longo do processo em cada sensor de temperatura tipo Pt 100, configurou-se o tipo de ligação física (a três fios), a faixa de valores a serem lidos (*range*) e a forma de aquisição de dados (contínua), após a criação desta sub-VI foram definidos os seus terminais (contatos) de entrada e saída, que viabilizam a utilização desta sub-VI dentro de outra rotina, a quantidade de terminais corresponde à quantidade de canais utilizados para aquisição da temperatura, neste caso esses terminais são de saída para que o fluxo de dados siga para os *displays* (*numeric indicator* e *thermometer*) e estruturas de comparação (booleana).

Em relação à umidade relativa do ar, dois canais de entrada analógica foram configurados para ler valores entre 0 e 10V que correspondem a 0 e 100% de umidade relativa, respectivamente, após a configuração destes dois canais criou-se seus terminais, ou contatos, de maneira similar a realizada com os Pt 100 para que os valores obtidos pudessem ser

utilizados pela estrutura para mostrar as grandezas ao operador no painel frontal e também para registro e comparação.

Além dos canais para aquisição de dados, outros canais foram configurados e utilizados para a saída de sinais. Um canal analógico fornece saída entre 0 e 10 V para o inversor de frequência e dois canais são responsáveis por acionar os relés de estado sólido. Cada VI está contida em uma estrutura de execução ou *Loop*. Estes *loops* possuem um elemento denominado de critério de parada, optou-se por usar em alguns loops a condição de mantê-lo em funcionamento até que o aplicativo fosse abortado uma vez que a princípio não faria sentido parar a execução destas rotinas enquanto o restante das VIs continuasse a operar.

4.3 Digitalização do sinal analógico

O processo de digitalização consiste em converter um sinal analógico, caracterizado por sua continuidade ao longo do tempo e composição por um número de sinais de frequência simples e sinusoidal cuja amplitude e a fase variam de maneira uniforme, em um sinal discreto, correspondente em bits. Este processo foi realizado pelo conversor A/D presente em cada módulo que constitui o sistema de aquisição de dados.

4.4 Sistema de medição

O sistema de medição pode ser entendido como o conjunto formado e em interação contínua, constituídos pelos transdutores (temperatura, umidade), os módulos de aquisição de dados, o secador e o aplicativo desenvolvido em *software*. Os transdutores, constituídos pelo elemento sensor e demais elementos auxiliares, sofrem certas alterações em seu estado normal pela influência de mudanças no ambiente em que estão inseridos, tais mudanças são captadas pelos módulos de aquisição de dados, que digitaliza os sinais e permiti a visualização e o registro das grandezas através do aplicativo desenvolvido. A figura 4.2 ilustra esquematicamente o sistema de medição.

A supervisão ou monitoramento do processo se constituída da interação entre o sistema de aquisição de dados, análise dos valores provenientes deste sistema e sua apresentação.

O sistema de aquisição de dados condiciona os sinais provenientes dos sensores/transdutores, amplificando, filtrando e convertendo o sinal analógico em sinal digital, a comunicação entre o sistema de aquisição de dados e o *PC* realiza-se via conexão USB. O aplicativo desenvolvido executa os cálculos necessários e formata a apresentação dos dados, com isso as grandezas relativas ao processo são apresentadas ao usuário sob a forma numérica e/ou gráfica, além de serem registradas em forma de arquivo com extensão txt, permitindo análise posterior dos dados. A figura 4.2 mostra de forma simplificada a estrutura que representa o sistema de supervisão.

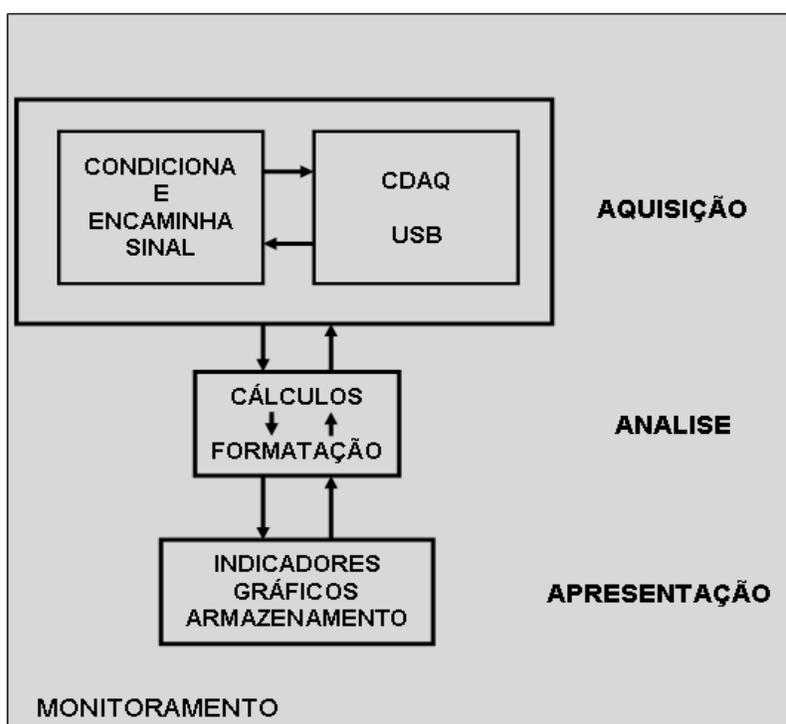


Figura 4.2 – Diagrama representando o sistema de monitoramento

4.5 Caracterização do sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados adotado neste projeto se baseia em comunicação USB 2.0 com o PC. Esta comunicação é realizada em intervalos de tempo denominado de *frames*, com duração de 1 ms quando a interface de comunicação opera em *full speed* ou 125 μ s em *high speed*. Em sistemas similares, se ocorrer falha na transação de um frame em virtude de

problemas de comunicação ou indisponibilidade de dados haverá reprogramação para o frame seguinte, gerando assim atraso na entrega de dados o que pode limitar as taxas reais de aquisição.

Esta plataforma de aquisição de dados possui vários módulos, quando um destes módulos é conectado em um *slot*, um micro-controlador lê os valores presentes na memória do módulo, do tipo EEPROM (*Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*), então o módulo passa a ser identificado pelo sistema, neste ponto da operação o *driver* NI DAQmx realiza o download do *slot*, do *firmware* específico e a comunicação é gerenciada pelo micro-controlador e este *firmware*, permitindo a conexão e identificação a quente dos módulos. Cada *slot* possui um micro-controlador dedicado. Uma única chamada é realizada para iniciar a aquisição de dados em todos os módulos, todos os canais possuem então uma mesma taxa de varredura.

Cada função específica é representada por um canal *DMA* (*Direct Memory Access*) que por sua vez é mapeado em um *endpoint* da interface USB, esta estrutura permite transferir dados no momento em que este estiver disponível na saída do DAQ. É possível a transferência bidirecional de até $3,2 \text{ MS.s}^{-1}$, em 4 fluxos de sinal simultâneos, cada um para diferentes funções e sem interferência entre eles.

O controle dos registros é realizado localmente o que reduz o tráfego de controle na interface USB, uma vez que o DAQ utiliza uma estrutura baseada em mensagens e não em registros, assim o PC envia uma função para o dispositivo que passa a gerenciar o registro.

O desempenho de cada módulo pode variar de acordo com o uso de demais módulos no mesmo chassi. Cada canal possui um conversor A/D, que atua de maneira independente com os demais conversores A/D, mas todos eles utilizam um mesmo circuito de temporização e *buffer FIFO* (*First In First Out*) do controlador USB – STC 2 presente no chassi, em função deste compartilhamento, pode ocorrer redução de desempenho em casos que exijam o uso de completo de canais dos módulos.

4.6 Atuação sobre o sistema de secagem

Consideraram-se dois tipos de variáveis manipuladas no controle do secador: a saída do inversor de frequência (Hz) e a saída dos relés de estado sólido (0 ou 127V), estas variáveis

manipuladas atuam sobre o processo modificando o estado das variáveis controladas, dessa maneira a saída do inversor de frequência altera a rotação do motor que esta acoplado a turbina, modificando a vazão de ar, este valor de frequência de alimentação do motor proveniente do inversor de frequência é proporcional a tensão aplicada em seus terminais de controle e compreende os valores de 0 a 10V.

O relé de estado sólido funciona como uma chave, podendo estar apenas em dois estados, aberto (saída igual a 0V) ou fechada (saída igual a 127V). Cada resistência elétrica funciona com alimentação de duas fases, uma dessas fases permanece ligada, desde que a chave de habilitação das resistências esteja fechada, e outra fase é alimentada, uma por cada relé de estado sólido, correspondente a resistência principal e outra a resistência auxiliar. Cada relé é acionado por uma tensão acima de 4VCC, podendo permanecer ligado continuamente ou ligar e desligar (chavear) em intervalos de tempo definidos via aplicativo de controle, resultado em uma potência elétrica conhecida. A figura 4.3 ilustra de maneira simplificada a malha de controle para o secador.

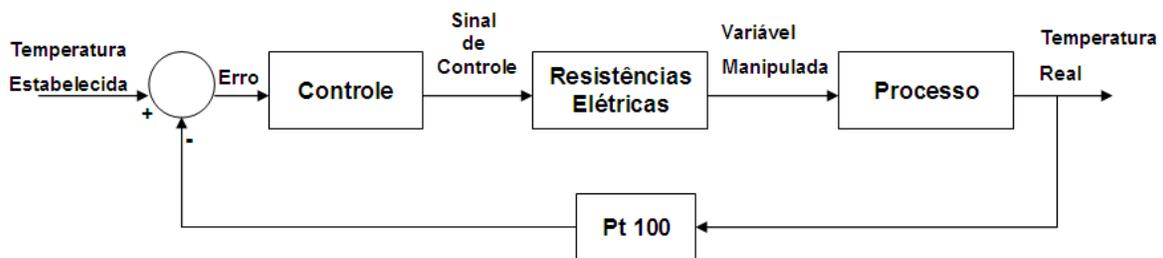


Figura 4.3 – Controle em malha fechada

A estratégia de controle adotada para a temperatura foi o controle tipo PID, e a estratégia de atuação foi a modulação por largura de pulso (PWM). A função correspondente ao PID é a seguinte:

$$G_c(s) = K_p \left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] \quad (4.1)$$

Em relação ao sistema de aquecimento que compõem o secador, o modelo proposto foi:

$$\Theta_o(s) = \frac{R}{RCs + 1} H(s) + \frac{1}{RCs + 1} \Theta_i(s) \quad (4.2)$$

Onde: Θ_0 = Temperatura do ar na saída [$^{\circ}\text{C}$]; Θ_i = Temperatura do ar na entrada [$^{\circ}\text{C}$]; R= Resistência térmica [$^{\circ}\text{C s /kcal}^{-1}$]; C= Capacitância térmica do ar contido na câmara de aquecimento [$\text{kJ} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$]. H= Fluxo de calor [$\text{kJ} \cdot \text{s}^{-1}$].

A figura 4.4 ilustra os procedimentos para o desenvolvimento de um sistema de controle que se baseia em modelos matemáticos.

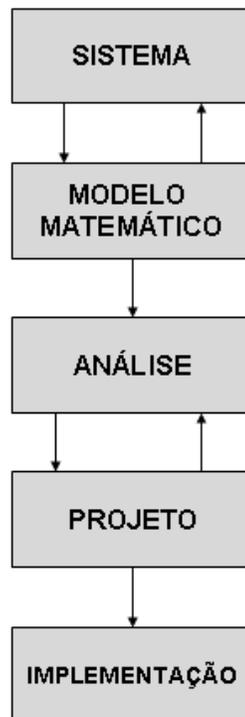


Figura 4.4 – Diagrama de desenvolvimento do controle

4.7 Supervisor de monitoramento e controle do processo de secagem

A figura 4.5 ilustra o painel frontal do aplicativo (modo manual), onde é possível visualizar a temperatura e umidade em quatro alturas do secador ao longo do tempo.

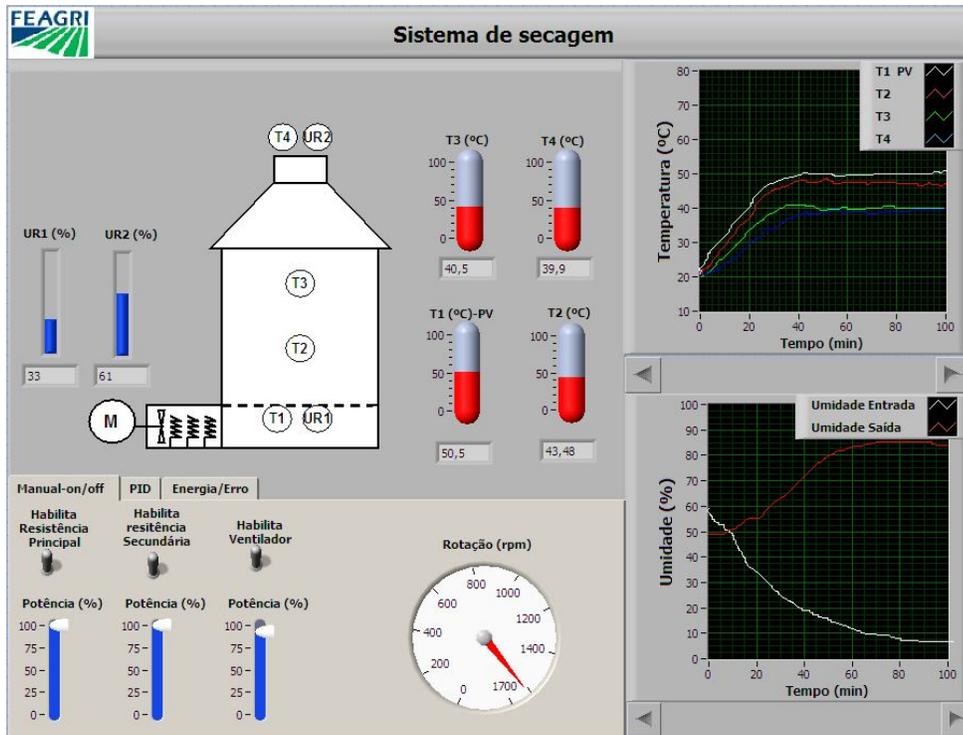


Figura 4.5 – Painel frontal (modo manual e *on/off*)

O outro modo de operação, chamado de automático e com a tela correspondente mostrado na figura 4.6, é aquele em o controle da temperatura é realizado através do controlador PID, sendo permitido neste modo a alteração dos parâmetros de controle (ganho proporcional, tempo integrativo, tempo derivativo) e também o uso do *bias* que garante a manutenção na saída do controlador no valor desejado.

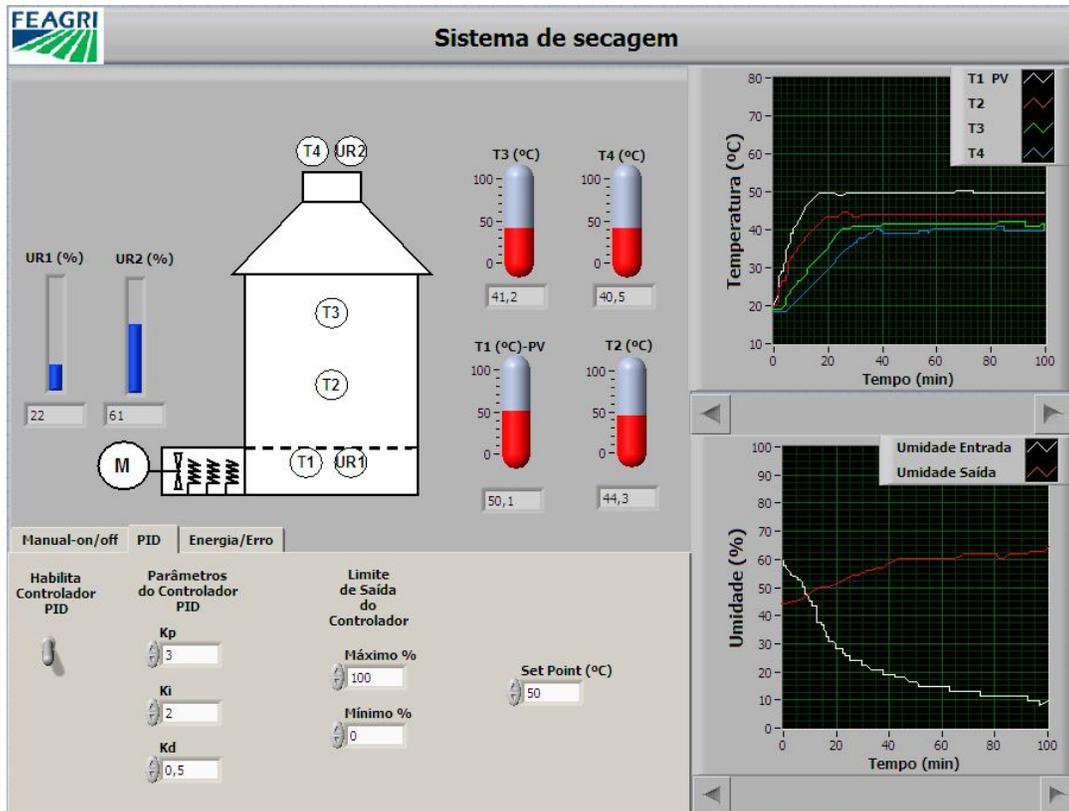


Figura 4.6- Painel frontal (PID)

A figura 4.7 mostra o painel frontal do aplicativo onde é visualizado o erro em °C, a integral do erro absoluto (IEA), e o consumo de energia em diversas fontes.

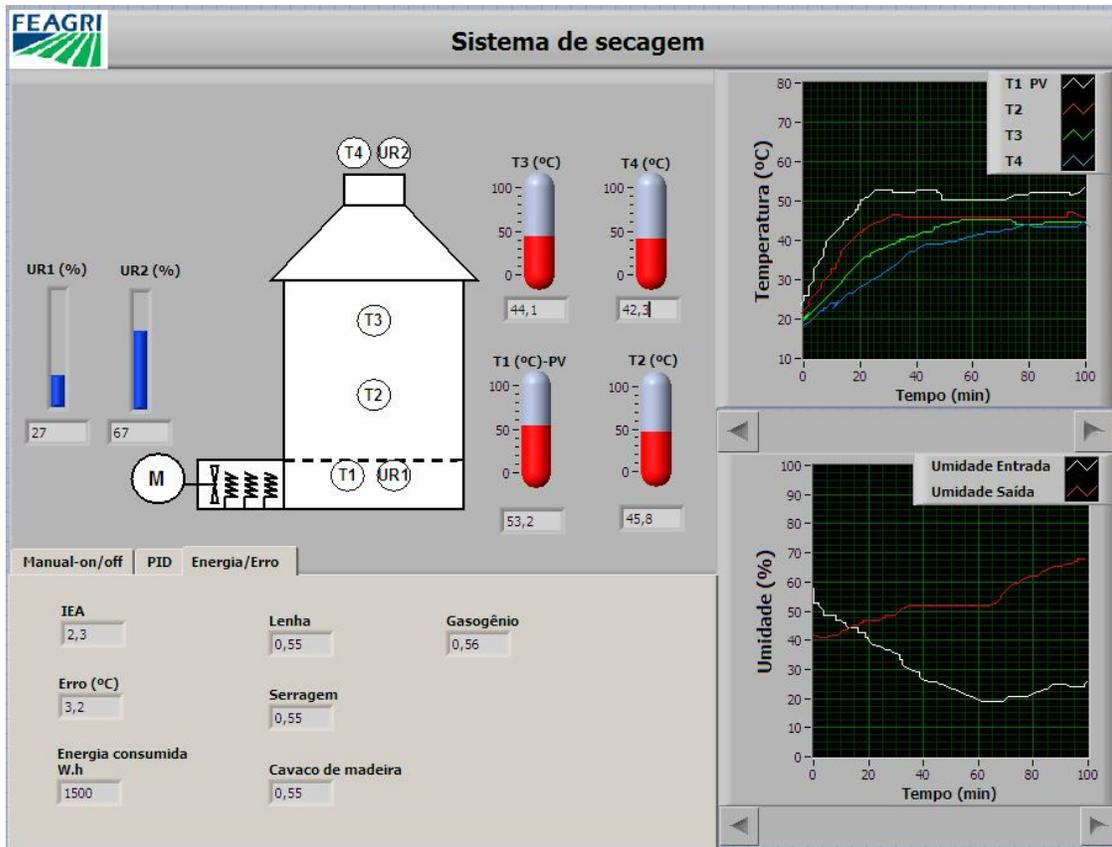


Figura 4.7 – Consumo de energia em diversas fontes

A figura 4.8 mostra o diagrama de blocos implementado para aquisição de temperatura a partir dos Pt 100 instalados no secador, realizando também a média da temperatura.

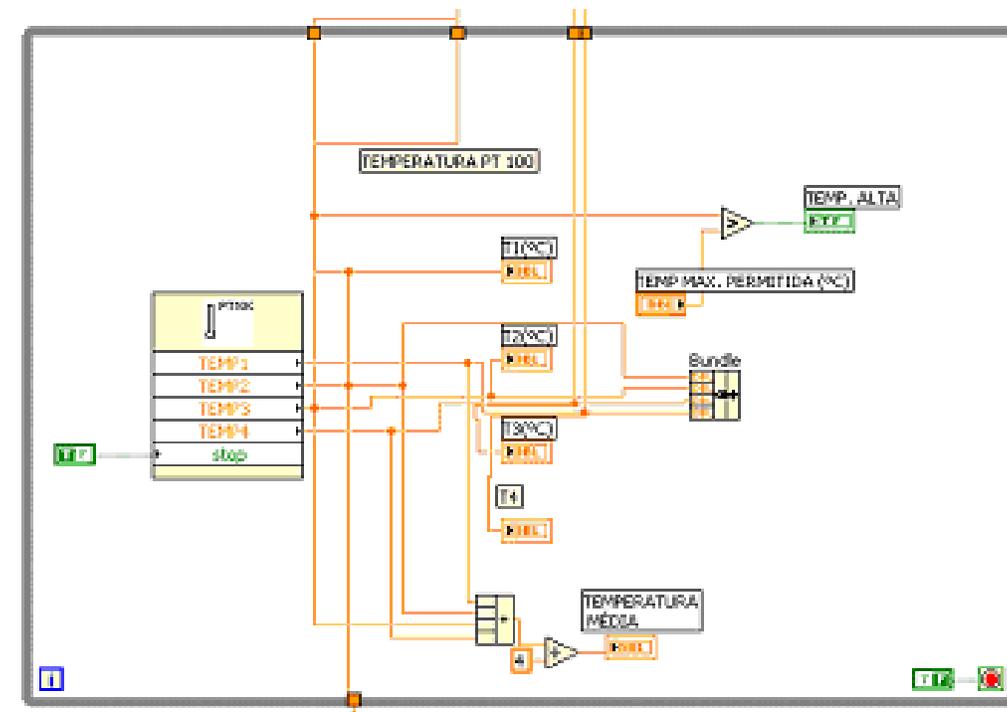


Figura 4.8 – Diagrama de blocos referente a aquisição de temperatura

A figura 4.9 se refere ao diagrama de blocos desenvolvido para atuar sobre o relé de estado sólido, o esquema desta figura foi duplicado para atuar sobre o segundo relé. Criou-se um canal que envia os sinais para o módulo corresponde à saída analógica. As opções de atuação sobre o controle de temperatura de maneira manual ou automática estão implementadas nesta estrutura mostrada, bem como as opções de escolher o valor da tensão de saída caso se opte pelo controle manual. O valor da tensão de saída, no caso desta aplicação estar no modo automático, pode ser feita, mas com o aplicativo parado e diretamente no diagrama de blocos, de acordo com esta montagem mostrada.

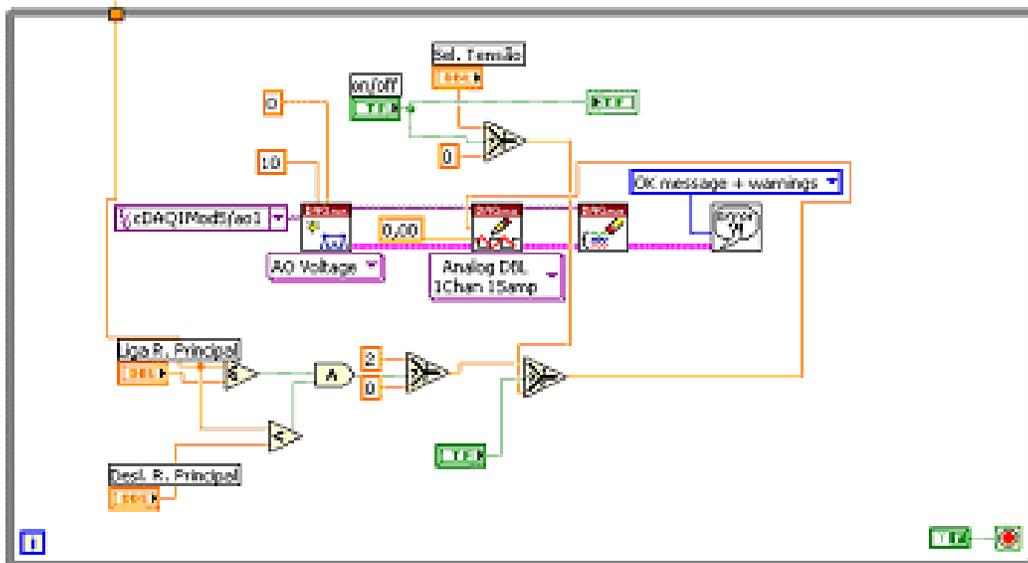


Figura 4.9 – Diagrama de blocos responsável pela saída analógica e comando do relé de estado sólido

A figura 4.10 mostra o diagrama de bloco que atua sobre o inversor de frequência. Pela alteração da tensão de saída, o inversor tem sua frequência modificada de maneira proporcional. Neste caso utilizou-se o *DAQ assistant* para auxiliar a montagem destes blocos.

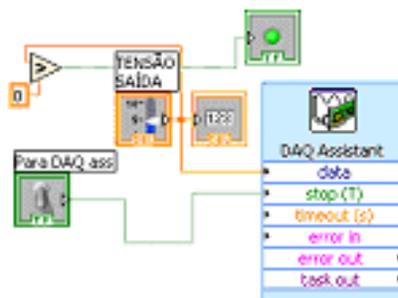


Figura 4.10 – Diagrama de blocos utilizado para atuar sobre o inversor de frequência

A figura 4.11 ilustra a implementação de um controle PID, com a possibilidade de se alterar os valores correspondentes ao ganho proporcional, ação integral e ação diferencial. No controle adaptativo estes blocos deverem ser replicados e os parâmetros definidos para cada intervalo de valores de temperatura.

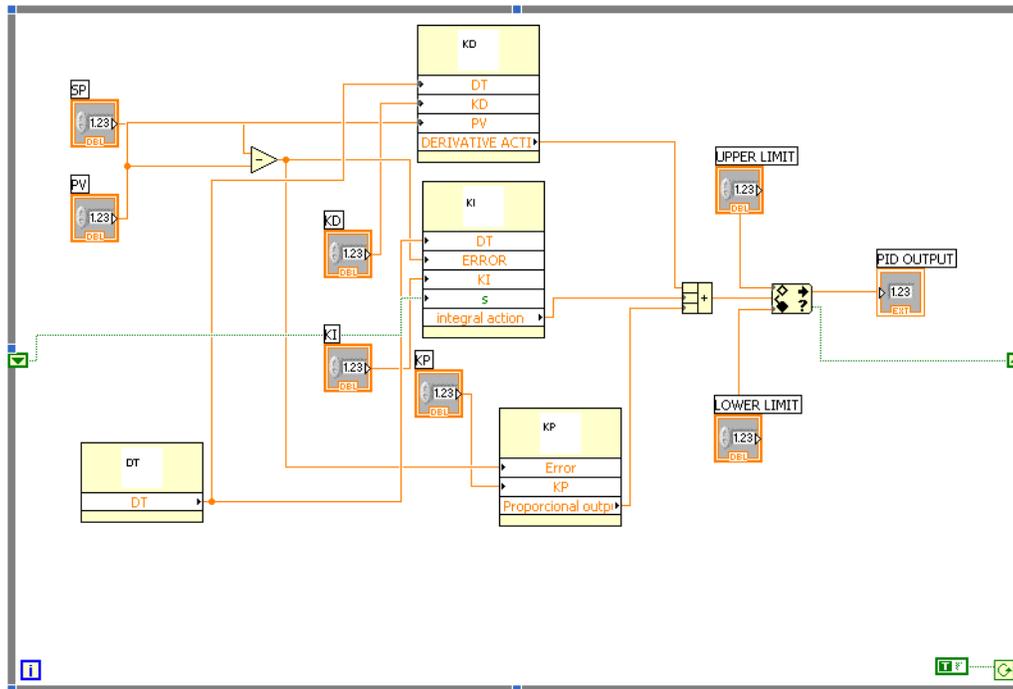


Figura 4.11 – Diagrama de blocos mostrando controle PID

Diversas estruturas de PID foram implementadas e testadas para verificar qual a mais adequada. A figura 4.12 mostra o diagrama de blocos de um controlador PID implementado em substituição a estrutura anterior, com os blocos de tempo integral e tempo derivativo fornecendo a saída que foi somada ao ganho proporcional multiplicado pelo erro. Neste caso também está implementado o termo de *bias*. O uso de diferentes algoritmos com a mesma finalidade foi realizado para comparar-los quanto ao comportamento e assim verificar se uma estrutura apresentaria um comportamento mais adequado quanto ao controle da temperatura.

As ações de cada termo do controlador foram somadas resultando na saída do controlador (*OUT R*), a partir do cálculo do erro (*error*), com valores de zero á 100%, podendo ter este *range (output range)* alterado pelo usuário.

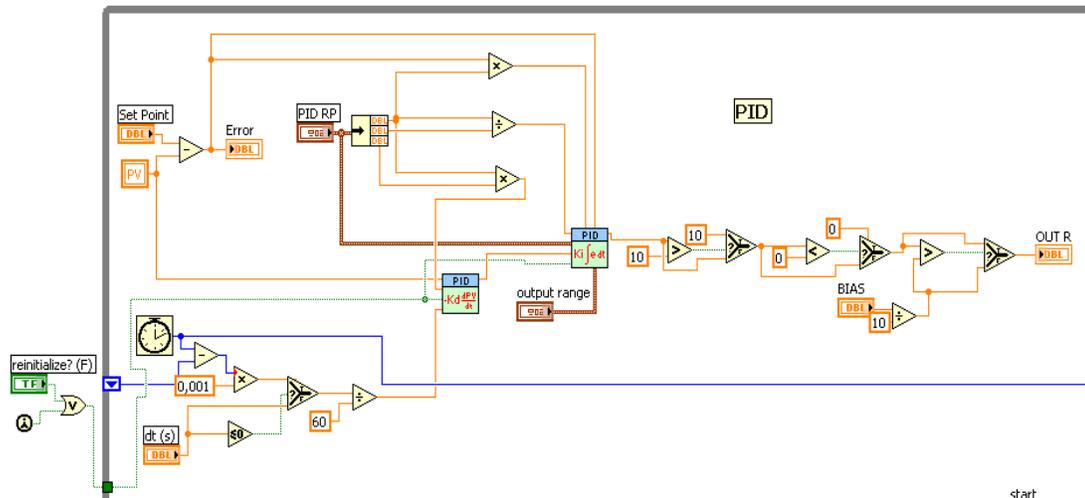


Figura 4.12- Controlador PID

Na estrutura anterior foram usados sub-VIs para atuar com a ação de integral e derivada do erro, as quais são somadas a ação proporcional resultando na saída do controlador. O erro é resultado da diferença entre o valor estabelecido para a temperatura e o valor real medido pelo sensor de temperatura, as três componentes do controlador (PID) estão associadas ao erro e aos ganhos individuais.

A figura 4.13 mostra parte da estrutura utilizada para implementar a ação derivativa do controlador. A ação derivativa permitiu a antecipação do erro e conseqüentemente melhorou a estabilidade do sistema.

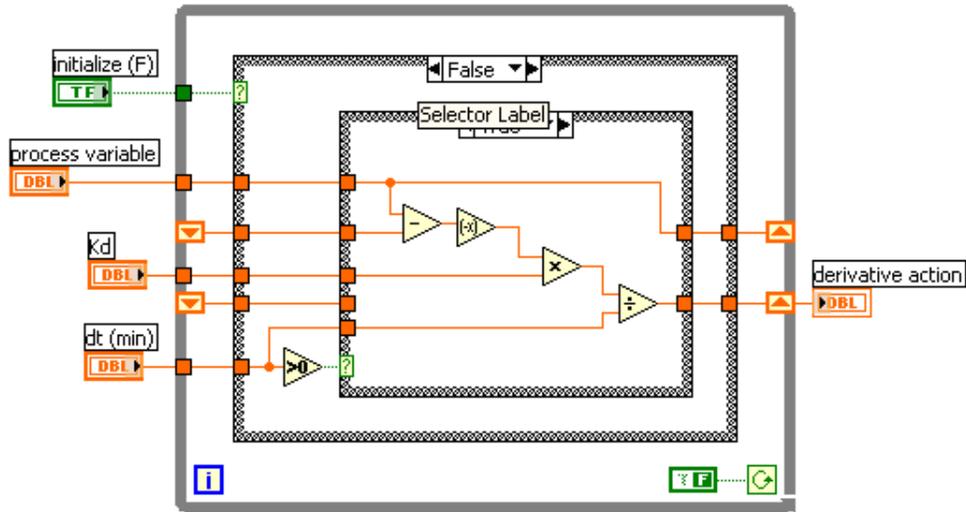


Figura 4.13 - Ação derivativa

A figura 4.14 ilustra a estrutura correspondente a ação do termo integral do controlador, onde o termo do ganho proporcional também este inserido e sendo somada á saída do controlador. O desenvolvimento deste controlador foi baseado na equação 4.1.

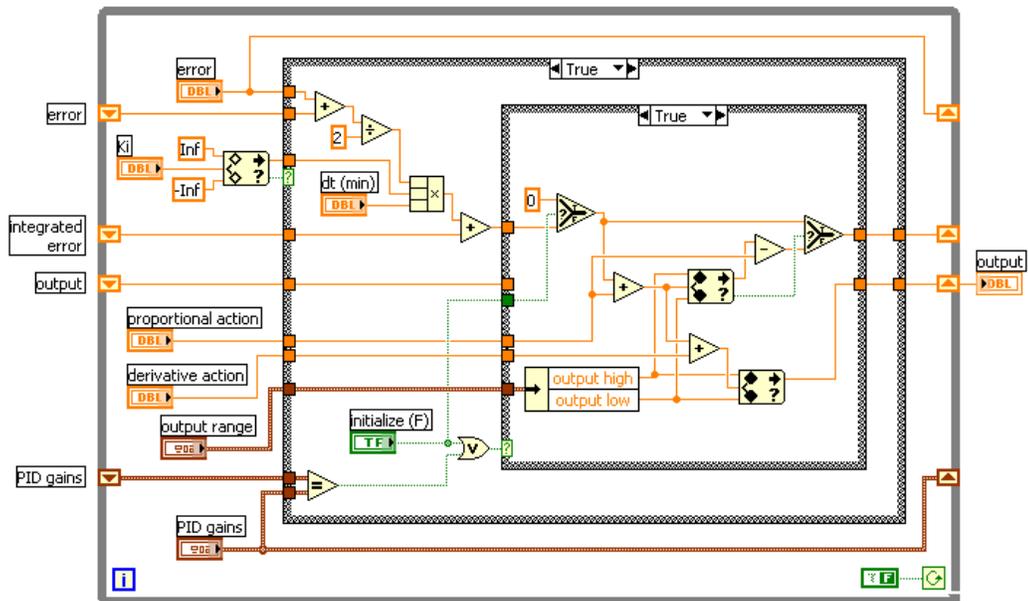


Figura 4.14 - Ação Integral, somando o derivativo e o proporcional

Na figura 4.15 é apresentada uma estrutura simplificada do controlador PID, contendo o termo *bias*.

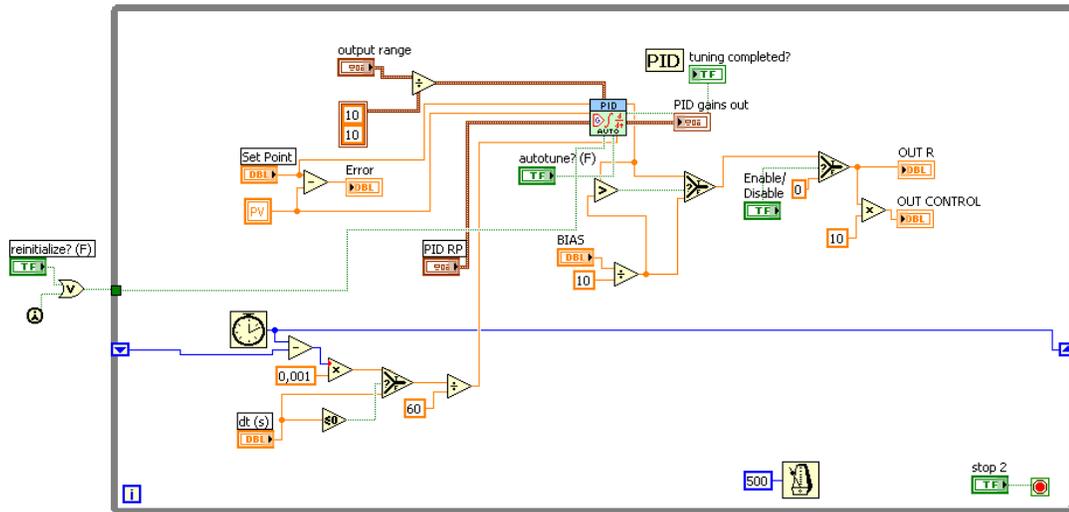


Figura 4.15- Controlador PID simplificado

4.8 Variação de grandezas relacionadas à tensão sobre o inversor de frequência

Nas figuras 4.16 a 4.19 está mostrada a relação de valores entre a tensão aplicada sobre o inversor de frequência e as grandezas referentes ao motor, compreendidas como rotação, frequência e velocidade do ar.

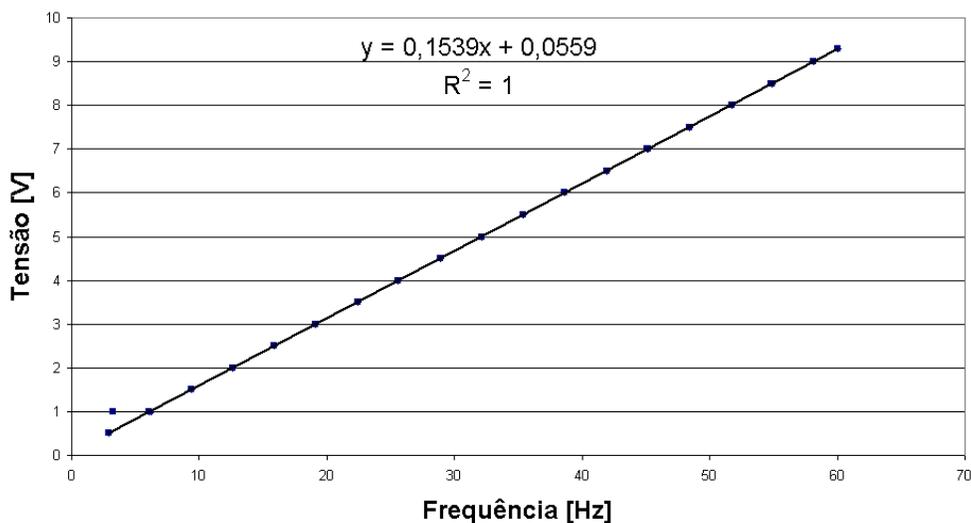


Figura 4.16- Variação tensão do motor em função da frequência

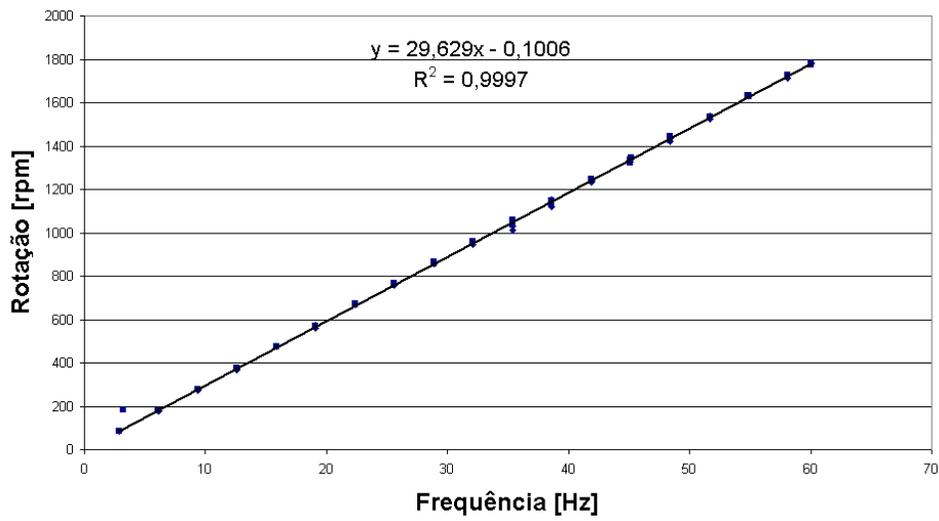


Figura 4.17- Variação da rotação em função da frequência

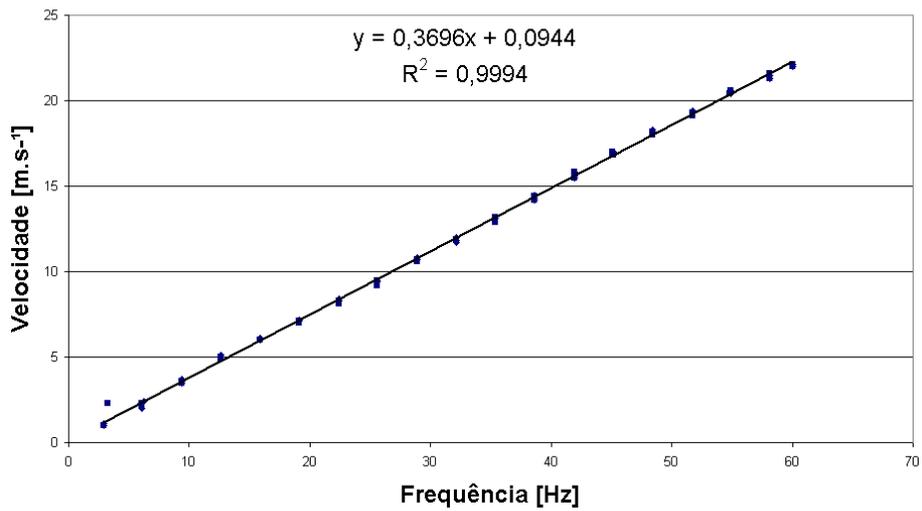


Figura 4.18- Variação da velocidade do ar de secagem em função da frequência

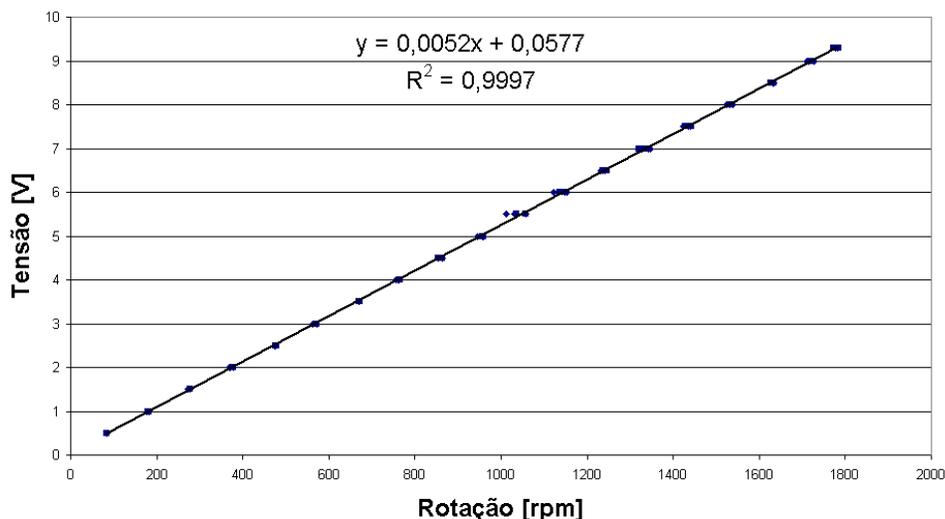


Figura 4.19- Variação da tensão em função da rotação

4.9 Testes verificativos do sistema de secagem - Relação temperatura, umidade e tempo de secagem

Realizaram-se testes com o secador vazio a fim de obter dados que permitissem maior conhecimento quanto ao comportamento do sistema sob diferentes condições de operação, evidenciando assim as principais características que poderiam influenciar no processo de secagem e na qualidade do produto.

Nas figuras a seguir mostram-se os resultados da temperatura em quatro posições, T1- entrada do ar no secador, após a passagem pelo banco de resistências, T2 é a temperatura da primeira camada de grãos no leito, T3 a temperatura da camada superior de grãos no leito e T4 a temperatura do ar na saída do ar do secador, assim como a umidade relativa na entrada e saída do secador. Mediu-se também a umidade relativa do ar de exaustão, bem como o intervalo de tempo em que essas medições foram realizadas, permitindo assim gerar gráficos com as curvas da variação de temperatura e umidade ao longo do tempo. Em cada teste realizado as condições ambientes de temperatura e umidade relativa foram registradas. Todos os testes foram iniciados com o sistema em repouso, aguardando-se entre um teste e outro que o secador retornasse ao equilíbrio térmico com o ambiente.

É possível notar em todos os testes a queda no valor da umidade relativa do ar à medida que a temperatura aumenta. Ao se considerar um sistema térmico ideal, pode-se afirmar que desde que seja mantida a mesma taxa de transferência de calor e seu isolamento dos demais sistemas por uma parede adiabática, a temperatura em todos os pontos será a mesma em um tempo tendendo ao infinito, porém em sistemas térmicos reais ocorre troca de calor com o meio em virtude do isolante não ser ideal (como considerado em teoria), além disso, o sistema considerado nestes testes não é um sistema fechado, uma vez que havia um fluxo de ar sendo constantemente enviado para o meio (exaustão), dessa maneira mesmo que os testes fossem realizados com tempo tendendo ao infinito, ocorreria diferença de temperatura entre os pontos ao longo da altura do secador.

As variações nos valores de umidade relativa do ar de entrada e de saída foram registradas utilizando um bloco para tal finalidade, implementado no aplicativo de supervisão e controle que gerou um arquivo no formato de texto, extensão txt, estes dados foram então exportados para uma planilha eletrônica. A figura 4.20 mostra redução da umidade relativa do ar ao longo do tempo com o secador vazio. Algumas oscilações quanto ao comportamento da umidade foram observadas e são visíveis na figura, resultado da ocorrência de eventual heterogeneidade em relação à massa de ar que atravessou a camada de grãos ou ainda por acúmulo temporário de umidade na ponta porosa do sensor.

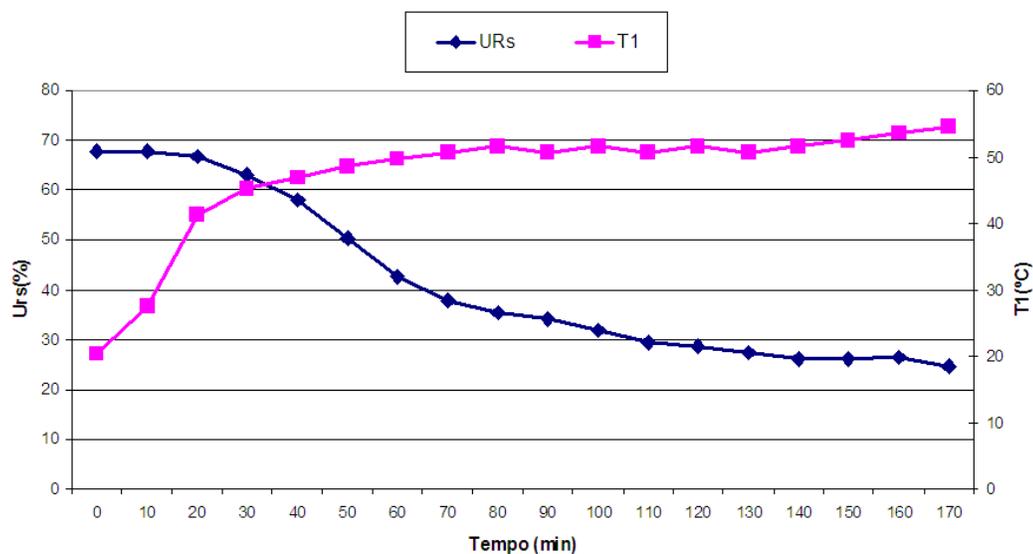


Figura 4.20 – Variação da umidade relativa do ar na saída do secador

A figura 4.21 mostra a temperatura máxima atingida pelo ar de secagem sem o uso de nenhum tipo de controle, o valor se estabilizou, neste ensaio, em 60°C.

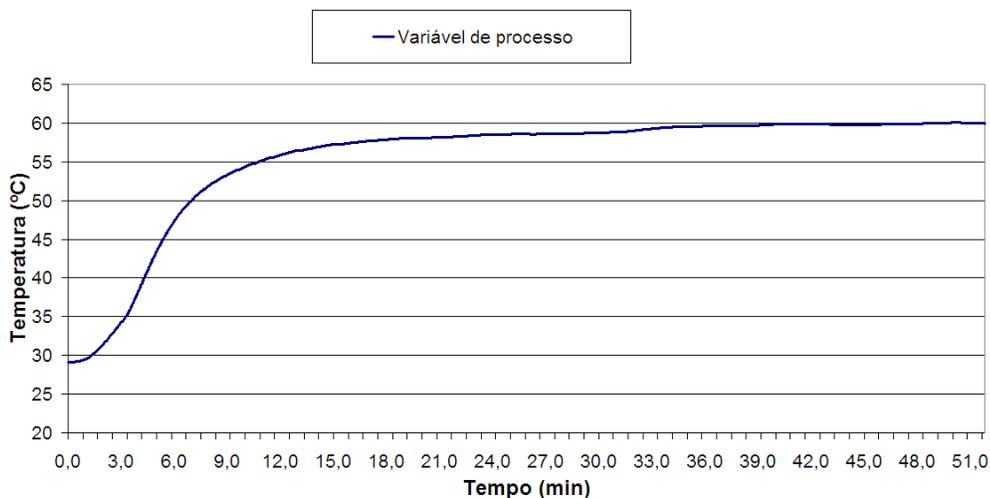


Figura 4.21 - Temperatura máxima

A figura 4.22 mostra a variação da temperatura do ar de secagem com atuação do controlador do tipo PID.

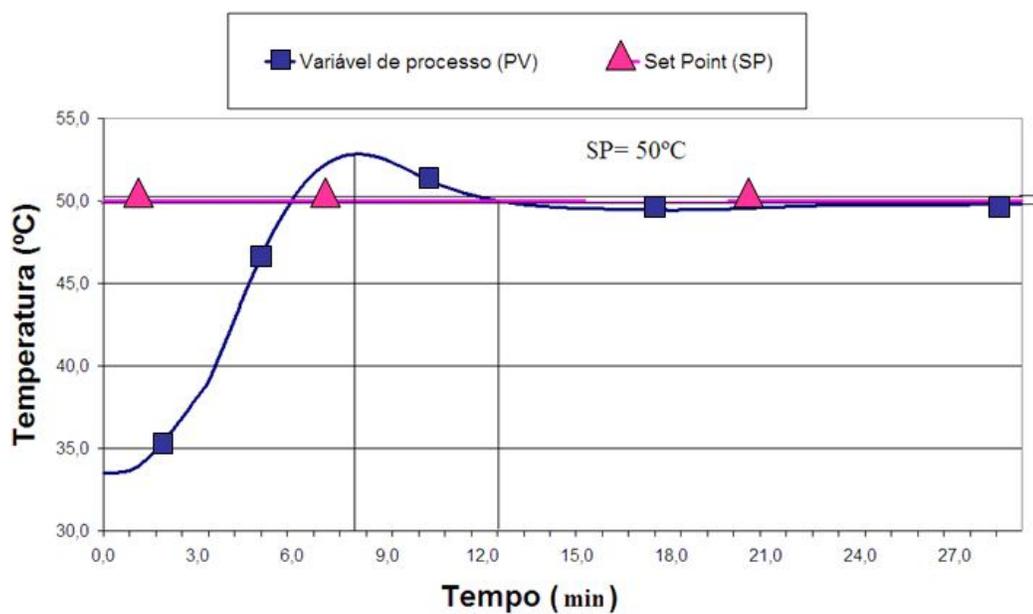


Figura 4.22 – Comportamento da temperatura do ar

4.10 Resultados dos testes com controle on/off e PID em relação a umidade

Os testes de validação do equipamento foram realizados com o secador contendo aproximadamente 50 kg de produto (feijão), correspondendo a sua capacidade nominal. Para efeitos de comparação procurou-se realizar os testes sob condições ambientes semelhantes (temperatura e umidade), estes valores foram medidos com um termo- higrômetro digital posicionado próximo ao secador. A umidade inicial do produto também esteve próxima em ambos os testes.

A temperatura verificada no ambiente em ambos os teste foi de aproximadamente 30 °C (29,8 °C no teste com estratégia de controle *on/off* e 30,2 °C no teste usando PID), a umidade ambiente se encontrava em torno de 50 %. A umidade do produto foi verificada no laboratório de pós-colheita, colhendo-se uma quantidade de aproximadamente 0,2 kg de feijão, o valor de umidade na amostra usada no teste com controle *on/off* foi de 19,8 % e a amostra seca sob atuação do controle PID tinha umidade de 19,5 %.

A figura 4.23 mostra a relação entre a umidade na entrada e na saída do secador com uso do controle *on/off*. É possível notar logo após o processo de secagem ser iniciado, com circulação forçada de ar e aquecimento, que a umidade do ar na saída aumenta rapidamente até atingir cerca de 93 % e posteriormente inicia uma queda representando a redução na taxa de umidade retirada, até que este valor tende a se tornar constante indicando que o potencial de retirada de água do produto foi atingindo.

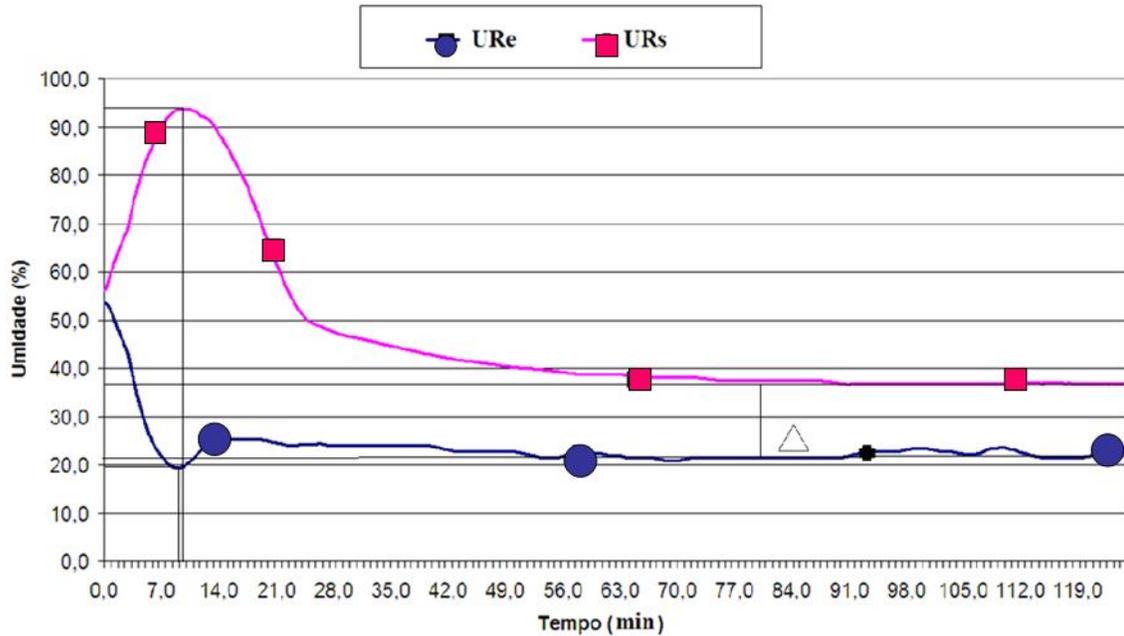


Figura 4.23 - Umidade do ar na entrada e saída do secador (*on/off*)

A figura 4.24 mostra a umidade relativa do ar na entrada e na saída do secador com o teste utilizando controle PID.

O tempo para a umidade na saída estabilizar esta próximo em ambos os testes, porem com o controle PID esta estabilização ocorreu em valores mais baixos que no controle *on/off*.

A economia de energia entre os processos ficou em torno de 20 %, com manutenção na qualidade do produto. A umidade dos grãos verificado em laboratório foi de 13 % e 14 % respectivamente pra o controle *on/off* e PID.

A justificativa para a redução no consumo de energia esta no fato de que com controle e PID, as resistências elétricas permanecem pouco tempo operando com 100 % de sua capacidade, após atingir a temperatura desejada são feitas correções na variável de processo na medida em que é necessário, enquanto no controle *on/off*.

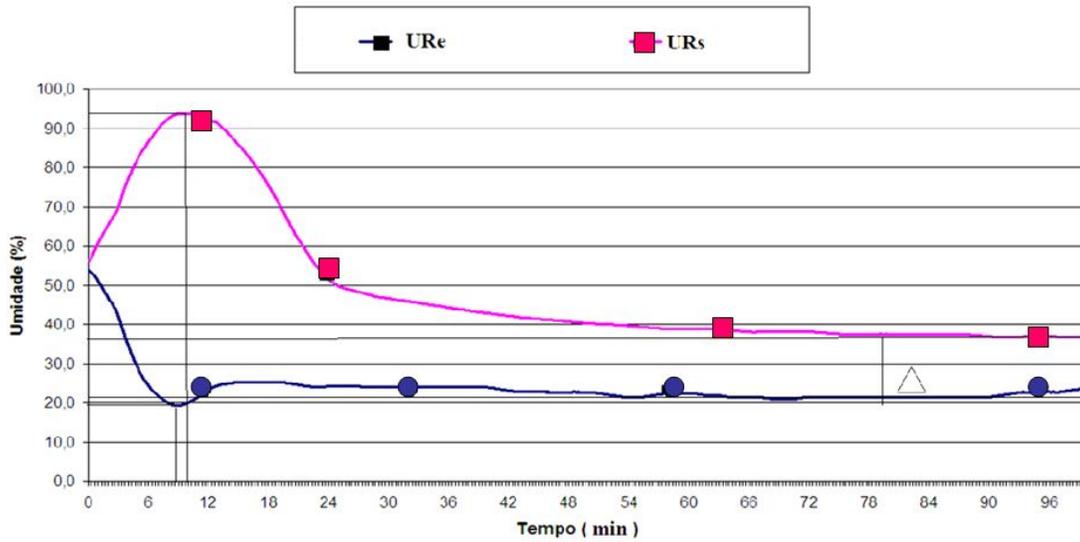


Figura 4.24 – Umidade do ar na entrada e saída do secador (PID)

A figura 4.25 mostra a umidade de equilíbrio do produto para as condições de temperatura do ar de secagem de 50°C e umidade relativa do ar de entrada do secador, esta umidade é mostrada na figura 4.30.

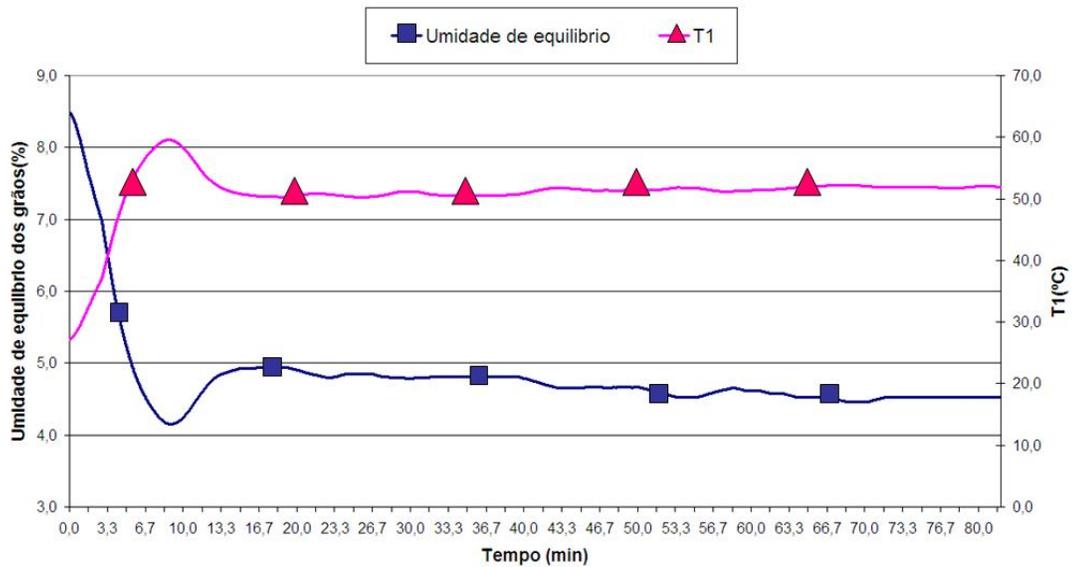


Figura 4.25 - Umidade de equilíbrio dos grãos

4.11 - Resultados dos testes com controle *on/off* e PID em relação a temperatura

A figura 4.26 mostra claramente o comportamento típico de um controle *on/off*, onde a variável de processo (PV) se mantém em torno do *set point*. A temperatura máxima atingida foi de aproximadamente 55 °C, caindo para menos de 45 °C e novamente aumentando até 55 °C. O erro utilizando o critério da integral do erro absoluto chegou, quando a temperatura estava mais distante do valor desejado, a 5,8.

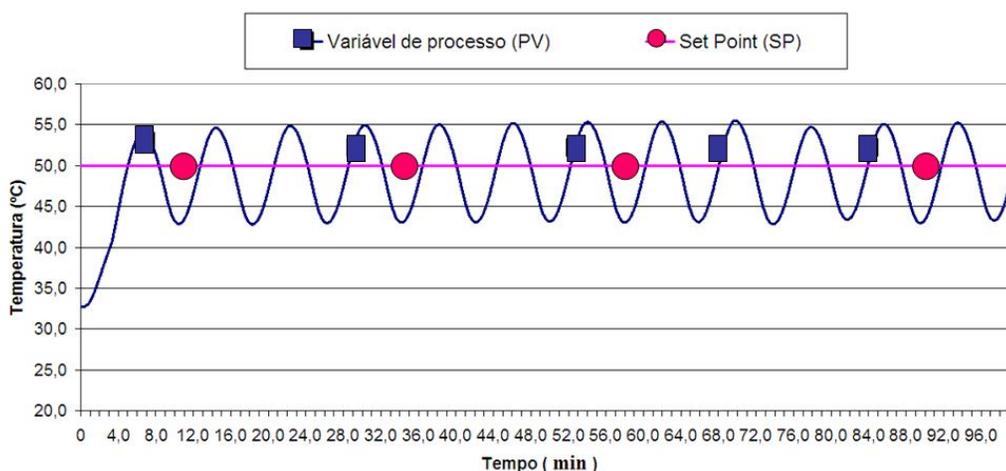


Figura 4.26 - Comportamento da temperatura do ar com uso do controle tipo *on/off*

A figura 4.27 se refere à temperatura atingida em duas camadas distintas do leito, a temperatura 2 corresponde à temperatura a uma altura aproximada de 100 mm do fundo falso e a temperatura 3 esta a cerca de 300 mm de altura mostrando a temperatura na camada mais superior do produto. Como era esperada, a temperatura na última camada é menor que na camada mais baixa, mostrando um gradiente de temperatura maior no início do processo e se aproximando da estabilização, porém os dois valores não entram em equilíbrio pois mesmo com o secador estando com isolamento térmico, ocorre alguma perda. Na figura 4.28 o mesmo teste foi realizado porem com a temperatura sendo mantida pelo controle PID.

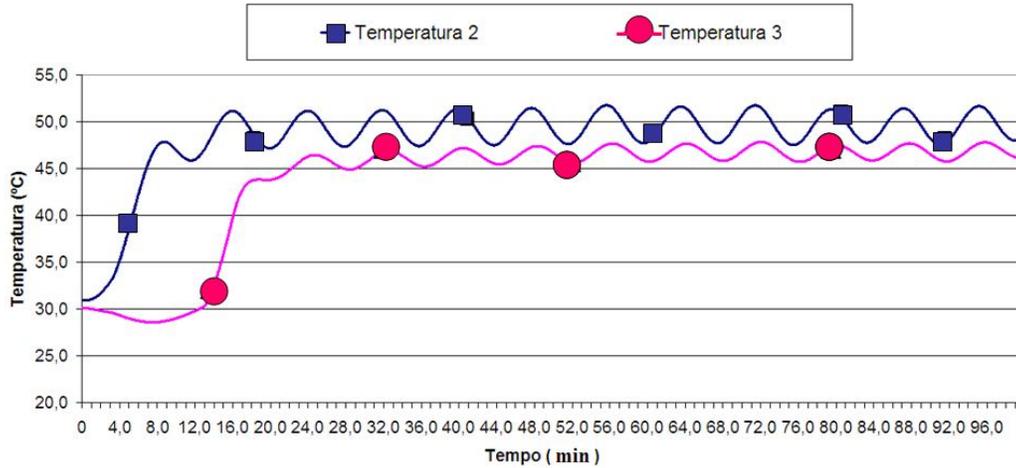


Figura 4.27 - Temperatura na camada intermediária e superior (*on/off*)

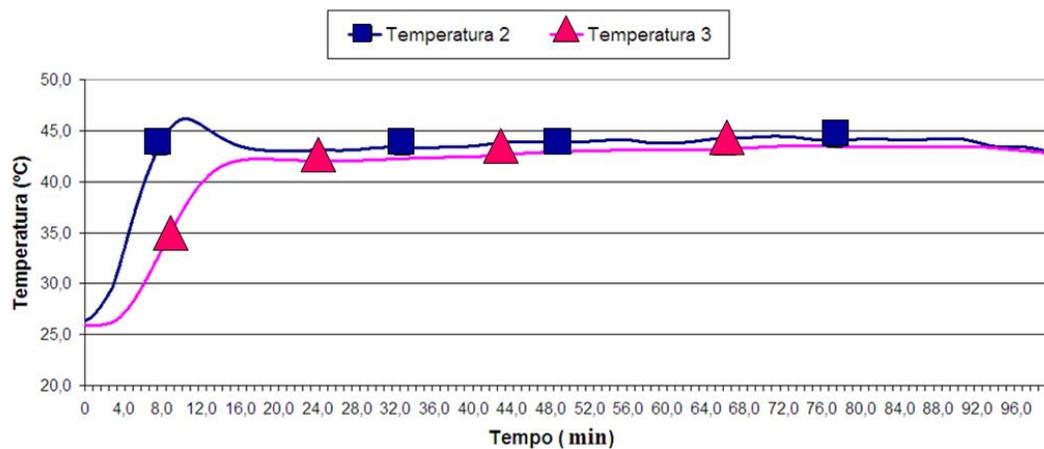


Figura 4.28 - Temperatura do ar na camada intermediária (T2) e superior (T3) com controle PID

Analisando a figura 4.29 é possível definir as principais especificações da resposta transitória do sistema. O tempo de atraso, que corresponde ao tempo requerido para que a resposta atinja metade de seu valor final pela primeira vez, foi de 177 segundos (2,95 minutos), o tempo de subida considerado aqui é para o intervalo de 0 a 100% do valor definido em *set point*, e seu valor foi de 238 segundos (3,96 minutos). O máximo sobre sinal atingido foi de 58,5 °C , e o tempo de acomodação que equivale ao tempo necessário para que a resposta alcance valores em torno de 2% a 5% do valor final desejado e mantenha-se nesta faixa por tempo indeterminado, foi de aproximadamente 1080 segundos (18 minutos).

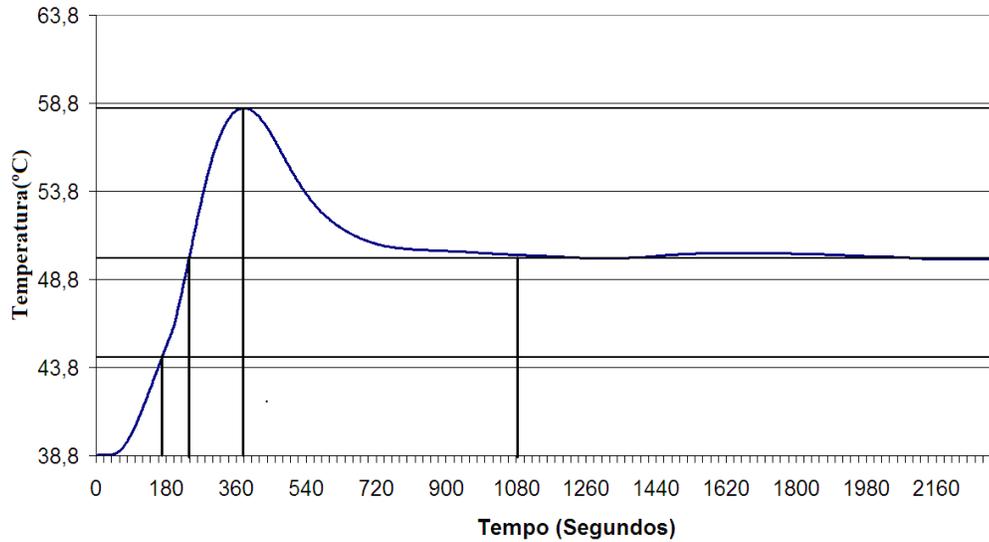


Figura 4.29 - Especificações da resposta transitória

A figura 4.30 mostra as especificações da resposta transitória em teste realizado com secador sem produto, assim é possível comparar a resposta com o caso anterior onde o secador continha uma quantidade especificada de produto figura anterior. Nota-se que sobre sinal foi menor com o secador vazio em aproximadamente 9,5%, o tempo de atraso foi maior, em torno de 235 segundos (3,91 minutos), o tempo de subida foi de 360 segundos (6 minutos), sendo também maior que no caso anterior. O máximo sobre sinal foi atingido com 485 segundos (8,08 minutos) e correspondeu a 52,8 °C.

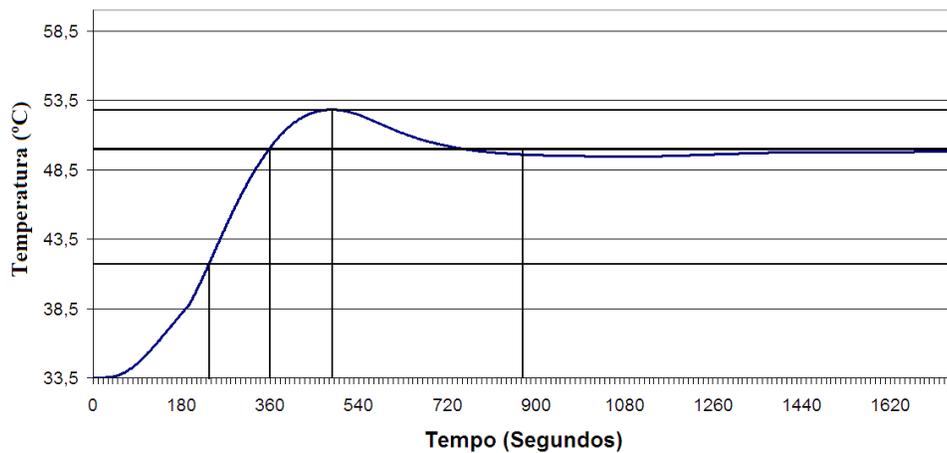


Figura 4.30 – Especificações da resposta transitória com secador vazio

4.12 Consumo de energia elétrica

Houve redução no consumo de energia quando o processo de secagem foi regido pelo controle PID em relação ao controle *on/off*. Este consumo foi da ordem de 1342,18 W.h, o que representa uma redução no consumo de energia elétrica de aproximadamente 20%. A redução no consumo também foi notada nos testes preliminares, onde o secador estava vazio (sem produto).

A Tabela 4.7 mostra uma comparação entre diferentes fontes energéticas, os valores mostrados se referem ao consumo com o secador carregado com aproximadamente 45 kg de feijão, para uma hora de operação do secador, com o secador operando com os dois modos de controle, *on/off* e PID.

A redução no consumo de energia quanto utilizou-se o controle *on/off* e PID se deve ao fato do controlador PID manter o seu valor de saída dentro do necessário para conservar a temperatura enquanto no controlador *on/off* a sua saída atinge cem por cento em ciclos sucessivos elevando o consumo de energia, assim como ocorreu com o uso de energia elétrica para aquecer as resistências, ocorreria também variação na quantidade requerida de diferentes combustíveis que poderiam ser usados como fonte energética, considerando-se a capacidade calorífica de um deles.

Tabela 4.1 – Valores estimados do consumo de energia para diferentes combustíveis

Fonte de energia	Controle <i>on/off</i>	Controle PID	Diferença (%)
W.h	1636,8	1342,18	18
J	5.892.480,00	4.831.848,00	
kcal	1406,313	1153,180	
	(kg)	(kg)	
Lenha	0,56	0,45	19,64
Cavacos de madeira	0,56	0,45	19,64
Carvão vegetal	0,18	0,15	18,00
Bagaço de cana de açúcar	0,61	0,5	18,03
Álcool etílico	0,19	0,15	21,05
Metano	0,10	0,08	20,00
Propano	0,11	0,09	18,18
GLP	0,11	0,09	18,18

Dados apresentados por César (2008) destacam que, geralmente aspectos como o rendimento de massa seca e a qualidade do produto final não são avaliados. Num sistema de secagem em que seja feita a secagem até um valor intermediário de umidade, os custos típicos de consumo de energia elétrica estão na ordem de US\$ 0,25 por tonelada de produto, equivalendo a US\$ 0,90 de consumo de combustível (considerando custos médios de US\$ 0,11 por kWh e US\$ 12,00 por m³ de lenha).

Num sistema de alta performance em que se seque o produto até 16% de umidade o custo para retirada de água foi estimado em torno de US\$ 0,25 por tonelada de produto, correspondente a aproximadamente US\$ 0,11 por kW.h quando utilizou-se a energia elétrica como fonte, enquanto o uso de lenha teve o valor estimado de cerca de US\$ 0,67 por tonelada de produto. Estes valores mudam de acordo com o tipo de combustível usado e o custo da eletricidade na localidade em que o secador está instalado. No experimento realizado, o consumo foi de cerca de 29,82 W.h.kg⁻¹ de produto (0,02982kW.h.kg⁻¹), ao custo de aproximadamente 0,1 US\$ por kW.h, utilizando as tarifas locais.

4.13 Erro

O erro considerado neste trabalho se refere a diferença entre a temperatura real na altura inicial do leito de grãos adotado como sendo a variável de processo e a temperatura desejada, ou *set point*. Este erro foi avaliado pela Integral do erro Absoluto, utilizando a Equação 4.3, no caso do controle *on/off*, este valor permaneceu variando em torno de $\pm 5,9^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ e no controle PID o erro máximo foi de 2,8 e após a estabilização permaneceu entre 0,1 e 0,5.

$$\text{IEA} = \int e \cdot dt \quad (4.3)$$

4.14 Conclusões

- Quanto menor o fluxo de ar através do secador, maior a diferença de temperatura entre as alturas do leito, em virtude da redução na capacidade de transportar o calor. Quanto maior for a temperatura do ar que atravessa a camada de grãos maior será a taxa de redução da umidade do produto, reduzindo-se o tempo em que a temperatura atinge valores superiores a do

ambiente, também se reduzirá o tempo para que a umidade relativa atinja o estado de equilíbrio;

- O secador apresentou perdas térmicas para o meio em função do isolamento não ser plenamente ideal e por este sistema ser aberto, possuindo troca de massa e de calor com meio através da exaustão;

- O controle de temperatura *on/off* gerou instabilidade constante ao longo do tempo, em torno do *set point*, enquanto o controlador PID permitiu, após um sobre sinal, a estabilização da temperatura com variação menor que 0,5°C;

- O controlador PID foi mais adequado para o controle da temperatura em relação ao controlador *on/off*, tanto quanto ao consumo de energia como no comportamento da temperatura;

- Temperaturas mais elevadas reduzem o tempo de secagem, porem aumentam proporcionalmente a taxa de consumo de energia;

- O maior consumo de energia não representa obrigatoriamente prejuízo na eficiência do secador;

- O uso de eletricidade como fonte energética representa custos elevados em relação a outras fontes, sendo justificado seu uso apenas em experimentos laboratoriais ou caso a energia seja resultado de sistemas auto-sustentáveis.

4.15 Sugestões de trabalhos futuros

- Implementar em LabVIEW uma lógica de controle baseada em *fuzzi*;

- Desenvolver um aplicativo que permita monitorar e controlar o secador a distância via *web*;

- Ampliar o uso do aplicativo de monitoramento e controle para diversos tipos de produtos agrícolas.

4.16 Referências Bibliográficas

CESAR, D. Secagem de Grãos. **Revista SEED News**. v. 6, n.2, março/abril, 2008.

D'AZZO, J.; HOUPIS, C. **Feedback control system analysis and syntheses**. 2. ed. New York: Mcgraw Hill, 1966. 824 p.

UFSC (Org.). **Fundamentos de Controle Clássico**. Disponível em: <<http://www.labspot.ufsc.br/~aguinald/ensino/eel7063/cap1.pdf>>. Acesso em: 24 set. 2008.

VARGAS, A.N.; VAL, J.B.R.; MENDES, R.S.; ISHIHARA, J.Y. **Sistemas de controle: Passado, presente e futuro**. Disponível em: <http://www.cp.utfpr.edu.br/vargas/arquivos/historico.pdf>. Acessado em: 12/10/2008.

PORTELLA, J. A.; EICHELBERGER, L. **Parâmetros para secagem de milho em secador estacionário, usando gás liquefeito de petróleo**. Disponível: http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/p_ci09.htm. Acessado: 15/02/2009

WEBER, E. A. Armazenagem agrícola. 2. ed. Porto Alegre: Kepler Weber, 1998. 400 p.

Capítulo 5

Influência do processo de secagem na qualidade dos grãos de feijão

Resumo

Testes foram realizados a fim de avaliar a qualidade dos grãos, antes e após serem submetidos ao processo de secagem, para determinar se o secador é capaz de realizar sua função de reduzir a umidade do produto sem danificá-lo ou provocar qualquer tipo de alteração indesejada. Para a realização dos testes uma amostra do produto foi retirada antes e outra amostra após a secagem, sendo tais amostras levadas imediatamente ao laboratório de pós-colheita onde foram submetidas aos testes de qualidade seguindo os critérios de análise propostos pelo ministério da agricultura. Os testes realizados estão explicados mais detalhadamente nos tópicos deste capítulo foram os de: umidade, peso de mil grãos, peso específico aparente, peso específico real, porosidade, ângulo de talude, além de ter sido feita a classificação do feijão. Os testes preliminares de estufa a 105°C por 24 horas, mostraram que o secador foi capaz de reduzir a umidade do produto até os valores recomendados para armazenamento, sem ocasionar danos aos grãos, sendo assim validado seu uso.

Palavras-chave: Classificação de grãos, qualidade de produto, pós-colheita.

Abstract

Tests were conducted to assess the quality of the grains before and after undergoing the drying process to determine if the dryer is capable of performing its function of reducing the moisture of the product without damaging it or causing any unwanted change . For the tests a sample of the product was withdrawn before and one after drying, such samples being taken immediately to the laboratory for post-harvest and submitted for quality tests according to the criteria of analysis proposed by the ministry of agriculture. The tests are explained in detail on the topics of this chapter were the moisture, thousand grain weight, specific weight, specific weight real, porosity, angle of slope, and has been made to the classification of beans. Preliminary testing

of the oven at 105 ° C for 24 hours showed that the dryer was able to reduce the moisture of the product to the recommended values for storage, without causing damage to the grains and thus validated their use.

Keywords: Classification of grain, quality of product, post-harvest.

Introdução

Qualquer produto, sobretudo os de origem vegetal, ao ser submetido a algum tipo de processamento, tende a sofrer alterações, sejam físicas, químicas ou biológicas. Quando se trata de alterações físicas estas podem ser entendidas como modificação em sua estrutura, no caso específico de grãos isso se traduz por trincas e rachaduras que além das questões estéticas, deixam a parte interno dos grãos mais vulnerável a ação de micro organismos. As modificações químico-biológicas se referem à alteração das propriedades nutricionais, enzimáticas e mesmo sensoriais (sabor e odor principalmente). Em geral essas alterações são indesejáveis e resultam de um processamento com parâmetros mal estabelecidos ou pela ausência de supervisão e controle adequados que garantam que uma vez os parâmetros corretos sejam selecionados, estes de fato se mantenham ao longo do processo. Há uma série de testes a que os grãos podem ser submetidos para avaliar as alterações sofridas pelo produto e assim validar ou não o uso de um determinado sistema de secagem.

5.1 Testes de qualidade

Todos os testes a seguir descritos foram baseados na norma do ministério da agricultura, BRASIL, Regras para Análise de Sementes (1992) e BRASIL, Instrução Normativa N°12 de 28 de Março de 2008 (2008).

5.1.1 Determinação do teor de umidade

Uma matéria prima qualquer é composta dos seguintes componentes, em maior ou menor porcentagem: proteína, carboidratos, gorduras, vitaminas, cinzas, fibras, água, etc. A umidade é a medida da quantidade de água existente no produto. A água presente nos produtos pode ser simplificaradamente, dividida da seguinte maneira:

- Água de constituição (parte da estrutura do produto)
- Água livre: água de adsorção (aderida à superfície sólida) e água de absorção (absorvida por forças capilares)

A umidade é o principal fator para os processos microbiológicos, como o desenvolvimento de fungos, leveduras e bactérias, e também para o desenvolvimento de insetos. No caso dos produtos deterioráveis a secagem, para níveis de umidade até 12-13%, é o processo mais simples e eficaz. O conhecimento do teor de umidade das matérias primas é de fundamental importância na conservação e armazenamento; na manutenção da sua qualidade e no processo de comercialização.

O percentual de umidade tecnicamente recomendável para fins de comercialização do feijão será de até 14,00%. O feijão com umidade superior a 14,00% poderá ser comercializado, desde que não esteja ocasionando fatores de risco à saúde humana.

5.1.2 Peso de Mil Grãos

O peso de mil grãos é em geral utilizado para calcular a densidade de semeadura e o peso da amostra de trabalho, é influenciado pela umidade.

5.1.3 Peso Específico Aparente, Peso Específico Real e Porosidade

Para o armazenamento e manipulação das matérias primas é fundamental o conhecimento de algumas de suas propriedades físicas. Entre elas estão o peso específico real, o peso específico aparente e a porosidade.

Essas propriedades variam de acordo com o tipo de produto e variedade, local de colheita e fertilidade do solo, práticas culturais e de colheita, teor de umidade, teor de impurezas, estágio de maturação, etc.

O peso específico real é a relação entre a massa do produto e seu volume real. Sua importância está relacionada a diversos métodos de separação e/ou classificação da matéria prima. Matematicamente é expresso por:

$$\rho_r = \frac{m}{V_r} \quad (5.1)$$

onde, ρ_r = peso específico real, g/ml; m = massa do produto, g; V_r = volume real, ou volume ocupado pelo produto, ml.

O peso específico aparente é a relação entre a massa do produto e seu volume aparente, ou seja, o volume real do produto acrescido do volume dos espaços vazios que existem quando o produto é colocado em algum recipiente. Seu conhecimento é essencial para elaboração de projetos de silos, permitindo o cálculo de sua capacidade estática. Matematicamente é expresso por:

$$\rho_{ap} = \frac{m}{V_{ap}} = \frac{m}{V_r + V_{int}} \quad (5.2)$$

onde, ρ_{ap} = peso específico aparente, g/ml; m = massa do produto, g; V_{ap} = volume aparente = $V_r + V_{int}$, ml; V_{int} = volume dos espaços vazios, ml.

5.1.4 Porosidade

A porosidade é a porcentagem de espaços vazios existentes num determinado local ocupado pelo produto. Sua determinação é imprescindível para projetar sistemas de secagem e aeração, analisar a resistência ao fluxo de ar do produto e os processos de transferência de calor e de massa. Sua expressão matemática é dada por:

$$P = \left(1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_r} \right) \times 100 \quad (5.3)$$

onde, P = porosidade, em %.

5.1.5 Ângulo de Talude

O ângulo de talude é aquele formado pelo produto, ao escoar através de fluxo constante, com o plano horizontal.

Este ângulo existe porque os grãos não se comportam como fluidos perfeitos, mas sim como materiais granulares, existindo um coeficiente de atrito entre as partículas do material granular, sendo igual à tangente do ângulo de atrito interno de cada material.

Ângulo de repouso estático: é o ângulo de atrito do material granular sólido quando desliza sobre si próprio.

Ângulo de repouso dinâmico: é o ângulo que existe quando o material granular está em movimento, como a descarga de silos e moegas.

O conhecimento do ângulo de talude dos produtos agrícolas é usado em projetos de sistemas de colheita, manuseio e estocagem, sendo utilizado nos cálculos das dimensões de correias transportadoras, nas inclinações necessárias dos dutos que movimentam produtos por gravidade, no dimensionamento da cobertura e do sistema de descarga por gravidade dos silos. Mas deve-se durante a secagem deixar o nível do produto plano para a correta distribuição e passagem do ar.

Nas correias transportadoras, grãos com maior ângulo de repouso são transportados em maior quantidade, num mesmo espaço de tempo, que com os grãos de menor ângulo.

Nos transportadores por gravidade, quanto maior o ângulo de repouso dos grãos, maior deverá ser a inclinação dos dutos que transportam grãos por gravidade. Do mesmo modo, para se descarregar num mesmo ponto é necessária maior altura do elevador para grãos com maior ângulo de talude.

5.1.6 Fatores que afetam o ângulo de talude

O ângulo de talude é influenciado por parâmetros tais como: tamanho, forma, rugosidade, materiais estranhos, orientação das partículas e teor de umidade dos produtos.

- Tamanho: na grande maioria das vezes, quanto maior o grão, menor é o ângulo de talude.
- Forma: quanto mais esférico é o grão menor é o ângulo de talude.

- Rugosidade: havendo mais rugosidade ou pelos na superfície dos grãos, maior será o ângulo de talude.
- Materiais estranhos: a presença de torrões, pedras, galhos, etc, no geral, aumentam o ângulo de talude.
- Orientação das partículas
- Umidade: com o aumento do teor de umidade ocorre um aumento do ângulo de talude. Em alguns casos constata-se que o ângulo de repouso aumenta rapidamente quando o teor de umidade excede a 16-17% em base úmida. Para o feijão, o ângulo de talude sofre os efeitos do teor de umidade do produto sobre o mesmo. (Benedetti, 1987).

Tabela 5.1- Valores de ângulo de talude do feijão para diferentes teores de umidade

Umidade % (bu)	Ângulo de Talude (°)
10	33,80
15	33,40
20	33,90
25	35,80

Fonte: Benedetti (1987)

5.1.7 Classificação do Feijão

A classificação é feita por grupo, classe a tipo, sendo a classe pela cor (branco, preto e cores) e o tipo por defeitos graves e leves. Defeitos graves: aqueles cuja presença na amostra ou incidência sobre o grão compromete seriamente a aparência, conservação e qualidade do produto, restringindo ou inviabilizando o uso do mesmo. São ardidos, carunchados e atacados por lagartas das vagens, germinados, impurezas, matérias estranhas e mofados:

- **ardidos:** os grãos inteiros, partidos ou quebrados, visivelmente fermentados na parte interna, com ou sem alteração na coloração do tegumento (película), assim como os grãos queimados durante o processo de secagem artificial;
- **carunchados:** os grãos inteiros ou partidos que apresentarem início visível de germinação;
- **impurezas:** as partículas oriundas da cultura do feijoeiro, tais como películas, vagens, grãos inteiros com defeitos, bem como grãos chochos ou pedaços de grãos que vazarem pela peneira com crivos circulares de 5,00 mm de diâmetro;

- **matérias estranhas:** corpos ou detritos de qualquer natureza, estranhos ao produto, tais como grãos ou sementes de outras espécies vegetais, sujidades, insetos mortos, entre outros;
- **mofados:** os grãos inteiros, partidos ou quebrados, que apresentarem fungo (mofo ou bolor), visíveis ao olho.

Defeitos leves: são aqueles cuja incidência sobre os grãos não restringem ou inviabilizem a utilização do produto, por não comprometer seriamente a aparência, conservação e qualidade do mesmo. São os amassados, danificados, imaturos, quebrados e partidos:

- **amassados:** os grãos inteiros, partidos ou quebrados, danificados por ação mecânica, com o rompimento do tegumento (película) e do cotilédone (polpa);
- **danificados:** os grãos inteiros, partidos ou quebrados, que se apresentarem com manchas ocasionadas por doenças, condições climáticas ou alteração na cor, na forma de características extrínseca, os grãos inteiros com cotilédones sadios desprovidos de sua película em 50,00% de sua superfície, ou mais, bem como os grãos com avarias provocadas por insetos que não sejam os carunchos e as lagartas das vagens;
- **imaturos:** grãos inteiros que vazarem por uma peneira com crivos oblongos com largura de 3,00 mm e comprimento de 19,00 mm;
- **quebrados e partidos:** os grãos sadios que se apresentam divididos em seus cotilédones, devido ao rompimento do tegumento (película) e os pedaços de grãos sadios resultantes da ação mecânica ou da manipulação do produto, que não vazarem numa peneira de crivos circulares de 5,00 mm de diâmetro.

5.2 Materiais e Métodos

5.2.1 Método da Estufa à Pressão Atmosférica

Materiais:

1. Estufa com controle termostático, isolada, com temperatura uniforme em seu interior, dotada de prateleiras e, se possível, com sistema de circulação de ar;
2. Balança com precisão de 0,1 mg, Marca: AND; Modelo: HR-200
3. Dessecadores contendo sílica-gel;
4. Bandejas, tenazes, luvas, termômetros.

Método:

1. Balança analítica, de precisão de 0,001g, colocar 1 cadinho vazio e anotar o seu peso (Pc), mantendo-o na balança;
2. Retirar da amostra, precisamente homogeneizada, uma subamostra de matéria prima de aproximadamente 5g, colocando-a dentro do cadinho na balança, obtendo-se o peso úmido da repetição (Pc + Pu);
3. Após a pesagem, os cadinhos serão levados à estufa a temperatura de 105°C por 24 horas;
4. A seguir do período de secagem, os cadinhos serão retirados da estufa e levados para o dissecador até esfriarem (± 15 minutos). Pesa-se novamente, obtendo-se o peso bruto seco (Pc+Ps);
5. O teor de umidade será calculado de acordo com a seguinte expressão:

$$\%U_{\text{baseúmida}} = \frac{(Pc + Pu) - (Pc + Ps)}{(Pc + Pu) - Pc} \times 100 \quad (5.4)$$

5.2.2 *Peso de Mil Grãos*

Contaram-se ao acaso, manualmente ou com auxílio de contadores mecânicos, oito sub-amostras de 100 grãos cada e, em seguida, pesam-se essas sub-amostras. Quando se utiliza oito sub-amostras de 100 grãos, calcula-se o desvio padrão e o coeficiente de variação dos valores obtidos nas pesagens.

Calcula-se o desvio padrão das repetições, desprezando-se todas as que apresentarem uma divergência da média maior do que o dobro do desvio padrão obtido. Multiplica-se por 10 o peso obtido entre as demais sub-amostras de 100 grãos, sendo este o resultado do teste.

5.2.3 *Peso Hectolitro*

Método

1. Pesar o recipiente padrão vazio

2. Colocar o produto no “funil” e abrir a abertura para escoamento, sendo este constante e livre, sem qualquer interferência.
3. Pesar o recipiente com o produto
4. Por diferença entre (3) e (1), calcula-se o peso do produto (m_{ap})
5. Calcular o peso específico aparente

5.2.4 Peso específico real

Método (Princípio de Arquimedes)

1. Colocar 150ml de H₂O ou outro líquido na proveta graduada de 250ml
2. Pesar 75g do produto (m)
3. Colocar dentro da proveta e medir o volume deslocado.

Volume deslocado = Volume real

5.2.5 Danos Mecânicos

Método

1. Selecionar 10 grãos ao acaso e imergir em uma solução de azul de metileno
2. Aguardar cerca de 30 minutos e retirar a casca dos grãos;
3. Contar quantos grãos apresentam danos mecânicos devido à presença de marcas azuis.

5.3 Resultados e Discussões

5.3.1 Testes preliminares

Os resultados mostrados nas Tabelas 5.2 e 5.3 referem-se ao teste preliminar realizado no secador, ou seja, antes de ser implementado ajustado o controle PID e também sem o controle *on/off*, com o equipamento operou com sua potência máxima.

Tabela 5.2- Teor de umidade antes da secagem (**teste preliminar com produto - Antes da secagem**)

Amostra	Peso Líquido Inicial	Peso Bruto Inicial	Peso Bruto Final	Diferença de Peso	% de Umidade (B.S)	% de Umidade (B.U)
1	22,45	27,44	26,59	0,85	20,53	17,03
2	21,97	27,21	26,31	0,90	20,81	17,23
3	23,06	28,12	27,29	0,83	19,58	16,38
Média					20,30	16,88
Desvio Padrão					0,52	0,36

Tabela 5.3- Teor de umidade após a secagem (**teste preliminar com produto – Após a secagem**)

Amostra	Peso Líquido Inicial	Peso Bruto Inicial	Peso Bruto Final	Diferença de Peso	% de Umidade (B.S)	% de Umidade (B.U)
1	21,97	27,01	26,37	0,63	14,40	12,59
2	22,96	27,89	27,27	0,62	14,55	12,70
3	21,56	26,55	25,90	0,64	14,81	12,90
Média					14,59	12,73
Desvio Padrão					0,21	0,1282

Comparando-se as duas tabelas fica comprovado que o secador foi capaz de reduzir a umidade do produto para valores aceitáveis para seu armazenamento.

O peso de mil grãos foi avaliado com 800 grãos. Registraram-se os valores de tara dos recipientes antes e após a secagem apresentados a seguir, e resultado da avaliação na Tabela 5.4, a tara do recipiente neste caso (antes da secagem) foi de 18,2723 g e após a secagem de 18,2612 g para a amostra referente ao teste preliminar no secador, na amostra retirada do produto utilizado no teste definitivo os valores antes e depois da secagem foram 18,2701 e 18,2591, respectivamente. O peso do hectolitro, ou peso específico aparente esta mostrado na Tabela 5.5.

Tabela 5.4- Peso de mil grãos antes e após a secagem do produto (teste preliminar)

Amostras	Peso amostra (g)		Peso Mil Grãos (g)	
	Antes da secagem	Após a secagem	Antes da secagem	Após a secagem
1	43,50	44,57	252,29	263,13
2	43,79	43,01	255,19	247,55
3	46,37	44,66	280,99	264,07
4	45,09	43,93	268,23	256,76
5	43,50	44,51	252,35	262,49
6	45,49	42,59	272,20	243,31
7	47,29	42,15	290,27	238,90
8	44,96	46,92	266,88	286,68
		Média	267,30	257,86
		Desvio Padrão	13,81	15,10

O peso hectolitro (Tabela 5.5), ou também chamado de peso específico aparente, foi calculado antes e após a secagem, da mesma forma que o peso específico real (Tabela 5.6) para a determinação da porosidade. Para o peso hectolitro obteve-se os seguintes dados:

- Volume do recipiente = 1420ml
- Tara do recipiente = 14,0kg.h⁻¹
- Para o peso específico real o volume inicial de água foi de 150ml.

O ângulo de talude foi determinado antes e após a secagem, tanto nos grãos utilizados nos testes preliminares quanto nos grãos usados nos testes definitivos, como mostrado nas Tabelas 5.7 (antes da secagem) e 5.8 (após a secagem).

Tabela 5.5 - Peso Hectolitro (peso específico aparente) calculado antes e após a secagem (teste preliminar)

Amostras	Peso Hectolitro Amostra		Peso Hectolitro Grãos	
	Antes da secagem	Após a secagem	Antes da secagem	Após a secagem
1	80,60	96,60	66,60	82,60
2	80,80	96,40	66,80	82,40
3	80,80	96,60	66,80	82,60
4	80,50	96,70	66,50	82,70
5	80,60	96,40	66,60	82,40
		Média	66,70	82,50
		Desvio Padrão	0,10	0,10

Tabela 5.6 - Peso específico real antes e após a secagem (teste preliminar)

Amostras	Peso (g)		Volume alcançado (ml)		Peso Específico Real (g.ml ⁻¹)	
	Antes da secagem	Após a secagem	Antes da secagem	Após a secagem	Antes da secagem	Após a secagem
1	75,10	75,00	208,00	208,00	0,40	0,40
2	75,00	75,00	208,00	208,00	0,40	0,40
3	75,20	75,00	208,00	208,00	0,40	0,40
4	75,00	75,00	210,00	208,00	0,40	0,40
5	75,00	75,00	210,00	210,00	0,40	0,40
		Média	208,80	208,40	0,40	0,40
		Desvio Padrão	1,10	0,90	0,00	0,00

Tabela 5.7 - Ângulo de talude antes da secagem (teste preliminar)

Repetições	Ângulo de Talude (°)			
	1	32	29	33
2	31	32	28	31
3	30	34	32	32
4	29	30	29	34
5	29	34	30	31
Média	30,20	31,80	30,40	31,20
Desvio Padrão	1,30	2,30	2,10	2,20
CV (%)	4,30	7,20	6,80	6,90

Tabela 5.8 - Ângulo de talude após a secagem (teste preliminar)

Repetições	Ângulo de Talude (°)			
	1	34	33	29
2	29	29	31	32
3	30	30	32	29
4	36	29	33	28
5	31	31	30	27
Média	32	30,40	31	29,20
Desvio Padrão	2,90	1,70	1,60	1,90
CV (%)	9,10	5,50	5,10	6,60

A classificação do produto usado no teste preliminar esta na Tabela 5.19. Também foi realizada a classificação do produto usado no teste com controle *on/off* e PID, tal classificação é mostrada no tópico seguinte, nas tabelas

Tabela 5.9 - Classificação do feijão quanto a defeitos graves e leves antes a e após a secagem (teste preliminar)

Defeitos	Peso (g)	
	Antes da Secagem	Após a secagem
Defeitos Graves		
Matérias Estranhas e Impurezas	0,72	0,50
Ardidos	7,05	7,56
Germinados	0,00	0,00
Mofados	0,00	0,00
Carunchados + Atacados por Lagartas das Vagens	0,00	0,00
Defeitos Leves		
Amassados	2,56	1,65
Danificados	1,67	0,78
Imaturos	0,99	0,37
Partidos e Quebrados	2,68	2,34

5.3.2 Testes definitivos

As Tabelas 5.10 e 5.11 mostram os resultados obtidos com o secador operando com controle do tipo *on/off* sobre a temperatura do ar de secagem. Verificou-se a umidade do produto antes e após ser submetido ao processo de secagem.

Tabela 5.10- Teor de umidade antes da secagem (**controle *on/off* – Antes da secagem**)

Amostra	Peso Líquido Inicial	Peso Bruto Inicial	Peso Bruto Final	Diferença de Peso	% de Umidade (B.S)	% de Umidade (B.U)
1	22,44	27,66	26,30	1,36	35,38	26,13
2	21,87	27,58	26,22	1,36	31,35	23,87
3	23,12	28,40	26,99	1,40	36,44	26,71
Média					34,39	25,57
Desvio Padrão					2,19	1,22

Tabela 5.11- Teor de umidade após a secagem (controle *on/off* – Após a secagem)

Amostra	Peso Líquido Inicial	Peso Bruto Inicial	Peso Bruto Final	Diferença de Peso	% de Umidade (B.S)	% de Umidade (B.U)
1	21,87	26,75	26,12	0,63	14,83	12,92
2	22,58	28,65	27,77	0,88	16,96	14,50
3	21,62	26,96	26,28	0,67	14,56	12,71
Média					15,45	13,38
Desvio Padrão					1,07	0,79

As Tabelas 5.12 e 5.13 mostram os resultados da umidade dos grãos quando foi utilizado o controle PID para atuar na manutenção da temperatura do ar de secagem.

Tabela 5.12- Teor de umidade antes da secagem (controle PID – Antes da secagem)

Amostra	Peso Líquido Inicial	Peso Bruto Inicial	Peso Bruto Final	Diferença de Peso	% de Umidade (B.S)	% de Umidade (B.U)
1	22,10	27,28	26,19	1,09	26,65	21,04
2	22,79	28,13	27,00	1,13	26,91	21,20
3	21,63	27,82	26,52	1,30	26,58	21,00
Média					21,08	26,71
Desvio Padrão					0,14	0,08

Tabela 5.13- Teor de umidade após a secagem (controle PID - Após a secagem)

Amostra	Peso Líquido Inicial	Peso Bruto Inicial	Peso Bruto Final	Diferença de Peso	% de Umidade (B.S)	% de Umidade (B.U)
1	22,91	27,31	26,77	0,54	13,99	12,27
2	22,73	28,13	27,43	0,69	14,80	12,89
3	21,79	27,82	27,00	0,81	15,67	13,55
Média					14,82	12,90
Desvio Padrão					0,80	0,61

Observa-se que a umidade dos grãos, tanto com o uso do controle de temperatura *on/off* quanto PID, não diferiu de forma significativa, mostrando portanto que em ambos os tipos de controle é possível atingir a umidade final desejada e recomendada para armazenamento. Esta comparação foi possível pois a umidade inicial dos grãos antes dos teste foi próxima.

A partir deste peso é possível determinar a influência de outras propriedades físicas em uma quantidade maior de grãos, tornando os resultados mais compatíveis com a realidade proposta, que é um secador com capacidade nominal de 50 kg de produto.

Na amostra retirada do produto utilizado no teste definitivo para determinar o peso de mil grãos os valores de tara antes e depois da secagem foram 18,2701 e 18,2591g, respectivamente, os resultados estão mostrados nas Tabelas 5.14 e 5.15, respectivamente.

Tabela 5.14- Peso de mil grãos antes e após a secagem do produto (teste definitivo)

Amostras	Peso amostra (g)		Peso Mil Grãos (g)	
	Antes da secagem	Após a secagem	Antes da secagem	Após a secagem
1	42,27	41,75	251,25	260,98
2	44,54	43,67	258,08	258,25
3	45,20	44,60	282,87	260,32
4	45,78	44,86	274,28	260,37
5	41,08	41,00	250,25	260,58
6	46,80	43,54	275,36	253,03
7	48,91	45,82	288,25	240,36
8	44,71	43,37	285,58	2770,3
	Média		270,74	258,87
	Desvio Padrão		14,43	9,47

Tabela 5.15 - Peso Hectolitro (peso específico aparente) calculado antes e após a secagem (teste definitivo)

Amostras	Peso Hectolitro Amostra		Peso Hectolitro Grãos	
	Antes da secagem	Após a secagem	Antes da secagem	Após a secagem
1	80,70	96,70	65,50	81,80
2	80,70	96,80	64,30	81,60
3	80,50	96,80	65,70	82,10
4	80,30	97,10	65,80	82,30
5	80,90	97,20	65,90	81,20
	Média		65,44	81,8
	Desvio Padrão		0,58	0,38

Assim como no teste preliminar, determinou-se o peso específico real para o produto antes e após a secagem, com controle do tipo PID atuando sobre a temperatura. A Tabela 5.16 mostra esses resultados.

Tabela 5.16 - Peso específico real antes e após a secagem (teste definitivo)

Amostras	Peso (g)		Volume alcançado (ml)		Peso Específico Real (g.ml ⁻¹)	
	Antes da secagem	Após a secagem	Antes da secagem	Após a secagem	Antes da secagem	Após a secagem
1	75,20	75,10	210,00	210,00	0,40	0,40
2	75,30	75,30	210,00	210,01	0,40	0,40
3	75,00	75,10	210,10	210,00	0,40	0,40
4	75,10	75,10	209,00	209,10	0,40	0,40
5	75,10	75,00	209,00	209,10	0,40	0,40
		Média	209,60	209,60	0,40	0,40
		Desvio Padrão	0,50	0,40	0	0

O ângulo de talude foi determinado antes e após a secagem, com o secador operando com controle PID. Como indicado nas tabelas anteriores não houve grande influência do processo de secagem sobre o ângulo de talude. Os resultados aparecem na Tabela 5.17 e 5.18.

Tabela 5.17 - Ângulo de talude antes da secagem (teste definitivo)

Repetições	Ângulo de Talude (°)			
1	30	32	33	30
2	31	28	31	31
3	32	35	30	32
4	29	32	30	28
5	28	29	28	27
Média	30	31,2	30,4	29,6
	1,40	2,40	1,60	1,80
Desvio Padrão				
CV (%)	4,10	7,20	6,50	6,50

Tabela 5.18 - Ângulo de talude após a secagem (teste definitivo)

Repetições	Ângulo de Talude (°)			
1	30	32	31	32
2	31	30	28	30
3	33	30	32	30
4	28	32	32	30
5	31	28	31	31

Média	30,60	30,40	30,80	30,60
	1,60	1,50	1,40	0,80
Desvio Padrão				
CV (%)	8,90	4,30	4,30	5,10

Nas Tabelas 5.19 e 5.20 esta a classificação do feijão utilizado no teste com controle *on/off* e PID sobre a temperatura do ar de secagem.

Nas Tabelas em apêndice, A.4 e A.5, mostra-se o laudo de classificação completa do produto que foi utilizado no teste preliminar, enquanto as Tabelas A.6 e A.7 tratam da classificação do feijão usado no teste definitivo. Deve-se salientar que esta classificação do produto no caso do teste definitivo foi realizada em amostras provenientes do ensaio com controle de temperatura do tipo PID e não do tipo *on/off*. Por limitações na disponibilidade de produto que poderia ser seco e testado, o número de ensaios também se tornou limitado, mas suficiente para cumprir com os objetivos do trabalho.

Tabela 5.19 - Classificação do feijão quanto a defeitos graves e leves antes e após a secagem (teste definitivo, controle *on/off*)

Defeitos	Peso (g)	
	Antes da Secagem	Após a secagem
Defeitos Graves		
Matérias Estranhas e Impurezas	0,75	0,47
Ardidos	6,32	7,31
Germinados	0,00	0,00
Mofados	0,00	0,00
Carunchados + Atacados por Lagartas das Vagens	0,00	0,00
Defeitos Leves		
Amassados	1,75	1,50
Danificados	1,32	0,79
Imaturos	0,86	0,35
Partidos e Quebrados	2,47	2,68

Tabela 5.20 - Classificação do feijão quanto a defeitos graves e leves antes e após a secagem (teste definitivo, controle PID)

Defeitos	Peso (g)	
	Antes da Secagem	Após a secagem
Defeitos Graves		
Matérias Estranhas e Impurezas	0,78	0,49
Ardidos	6,52	6,88
Germinados	0,00	0,00
Mofados	0,00	0,00
Carunchados + Atacados por Lagartas das Vagens	0,00	0,00
Defeitos Leves		
Amassados	1,79	1,59
Danificados	1,52	0,71
Imaturos	0,83	0,37
Partidos e Quebrados	2,52	1,79

Entre os defeitos graves, aquele que mais aparece é a quantidade de grãos ardidos, os quais aumentaram após a secagem do produto. Entretanto, os defeitos leves diminuiram após a secagem, não pelo processo de secagem, mas por não constarem na amostra analisada, mesmo esta sendo representativa do lote processado.

A classificação por tipo é avaliada pelo item que apresentar menor qualidade. A primeira amostra, utilizada no teste preliminar antes do processo de secagem, apresentou tipo 2, porém após passar pelo processo de secagem caiu para o tipo 3, devido ao aumento do peso de ardidos. No caso do produto usado para o teste definitivo com controle PID de temperatura a classificação do feijão foi do tipo 2 tanto antes quanto após a secagem. Mesmo com este resultado não é possível afirmar que o uso do controle PID foi o responsável por manter o padrão do produto, mais testes deveriam ser feitos para avaliar de maneira contundente a influência do tipo de controle sobre a qualidade do produto. Os grãos adotados para o processo de secagem são provenientes apenas da extração de sua vagem após a colheita e não passaram por um sistema de beneficiamento. Portanto, estes fatores promovem alteração na classificação dos grãos e avaliação dos danos mecânicos, os quais podem se apresentar antes do processo de secagem.

De acordo com os dados apresentados, os fatores que mais implicam nas consequências da secagem artificial são: o teor de umidade, quantidade de ardidos na classificação do produto e

danos mecânicos. Os demais não sofreram alteração significativa antes e após a secagem, apenas comprovam a redução da quantidade de água do produto, como é o caso tanto do peso específico aparente quanto do real e a porosidade. O ângulo de talude não também não sofreu alteração significativa nas duas condições, antes e após a secagem.

Na classificação do produto, não foram encontrados grãos mofados, germinados ou carunchados devido ao pequeno tempo entre a colheita e secagem, e esta e os testes de qualidade, o produto não passou por um sistema de armazenamento. O defeito que mais aparece é o ardido, o que mostra que alguns grãos, provavelmente aqueles mais próximos ao fundo falso do secador, sofreram algum dano em função da temperatura, ainda assim este dano não é tão significativo quando analisado a qualidade do produto como um conjunto de fatores.

5.4 Conclusões

A partir dos dados obtidos durante a secagem do produto e os demais valores resultantes de análises realizadas sobre o produto no Laboratório de Pós-Colheita da Faculdade de Engenharia Agrícola, conclui-se que o secador pode ser empregado na retirada de água livre contida em grãos de feijão sem causar-lhe danos, proporcionando redução em sua umidade a níveis considerados adequados para seu armazenamento. O secador poderia ainda ser empregado na secagem de grãos com características físicas similares a do feijão, respeitando as especificações e recomendações de temperatura e tempo de exposição do produto de acordo com seus fins.

Assim como ocorreu no teste preliminar, o ângulo de talude teve pequena variação antes e após o processo de secagem. As maiores variações apresentadas se devem a possíveis erros experimentais de abertura da moega e dimensionamento do equipamento utilizado. Os grãos antes da secagem não apresentaram nenhum dano mecânico, enquanto que após a secagem, nos testes preliminares, cerca de 10% deles tiveram algum dano que possivelmente esta ligado ao processo de secagem.

5.5 Sugestões de trabalhos futuros

O sistema de secagem desenvolvido e validado para secagem de grãos possui versatilidade para ser utilizado com diferentes configurações. As propostas de futuros trabalhos seguindo a mesma linha de pesquisa estão listados a seguir:

- Criar um sistema de reaproveitamento do calor do ar de saída;
- Aumentar a potência térmica do secador para que possa operar sob limites mais abrangentes de temperatura;
- Substituir o ventilador por outro de maior capacidade tornando o secador mais robusto;
- Secar diversos tipos de grãos e frutas.

5.6 Referências Bibliográficas

BENEDETTI, B C. **Influência do teor de umidade sobre as propriedades físicas de vários grãos**. 1987. 1 v. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1987.

BENEDETTI, B C. Influência do teor de umidade sobre o ângulo de talude de vários grãos. **Ciência e Cultura**, Campinas, v. 2, n. 39, p.189-192, 1987.

BRASIL, **Instrução Normativa N°12 de 28 de Março de 2008**, Brasília, 2008.

BRASIL, **Regras para Análise de Sementes**, Brasília, 1992.

APÊNDICE

A.1 Testes livres

Os gráficos a seguir correspondem a diversos testes livres realizados com o secador com a finalidade de avaliar seu comportamento em relação a temperatura do ar (PV). A figura A.1 ilustra o comportamento da temperatura do ar de secagem (PV) com o uso de controle proporcional ($k_p=3$), observa-se a instabilidade da resposta ao se utilizar apenas o ganho k_p .

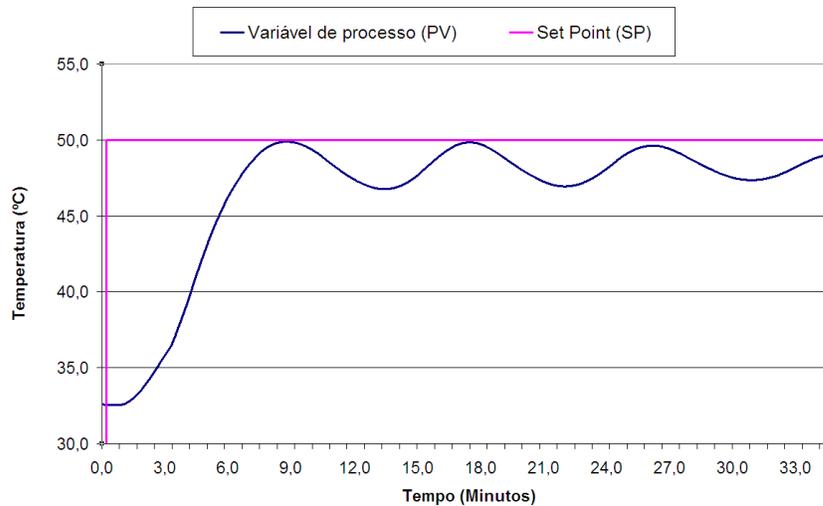


Figura A.1 – Comportamento da temperatura do ar utilizando ganho proporcional $k_p=3$

A figura A.2 mostra o comportamento da variável de processo quando o ganho k_p foi reduzido de 3 para 2,6, com isso o erro tornou-se menor que no caso anterior mas ainda mantendo-se instável.

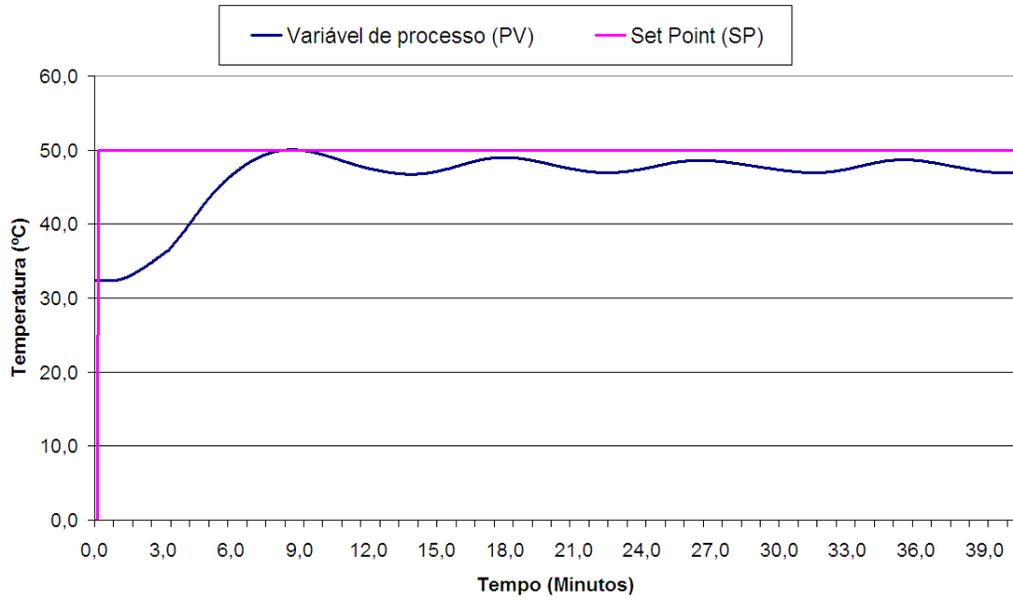


Figura A.2 - Comportamento da temperatura utilizando ganho proporcional $k_p=2,6$

A figura A.3 ilustra a utilização do controle de temperatura do tipo PI, com $k_p=2,3$ e $k_i=6,9$, verificou-se redução no erro e comportamento próximo a estabilidade, os ganhos na figura A.4 foram $k_p=2,6$ e $k_i=6,6$

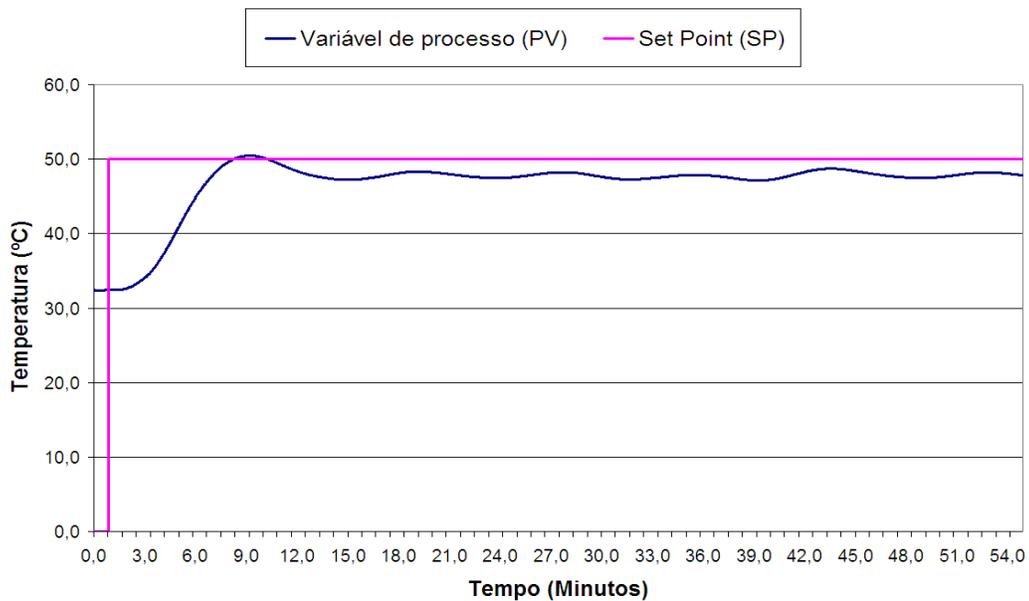


Figura A.3 – Comportamento da temperatura utilizando ganho proporcional $k_p=2,3$ e $k_i=6,9$

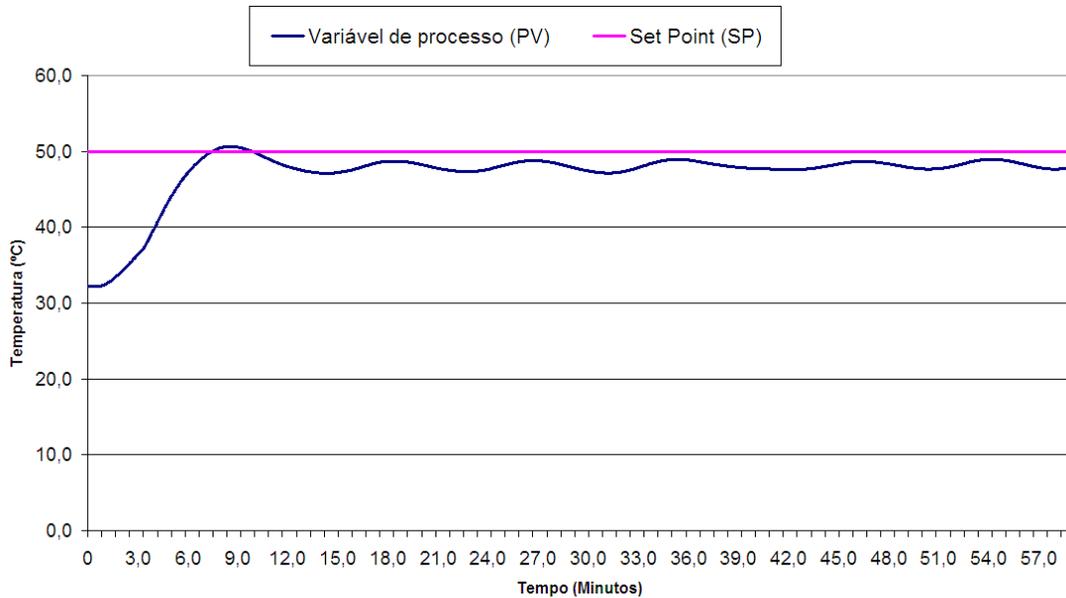


Figura A.4 – Comportamento da temperatura utilizando $k_p=2,6$ e $k_i=6,6$

A figura A.5 Representa a temperatura do ar de secagem na entrada do secador quando é utilizado um controle do tipo *on/off*, neste tipo de controle ocorre uma oscilação constante em torno do *set point*.

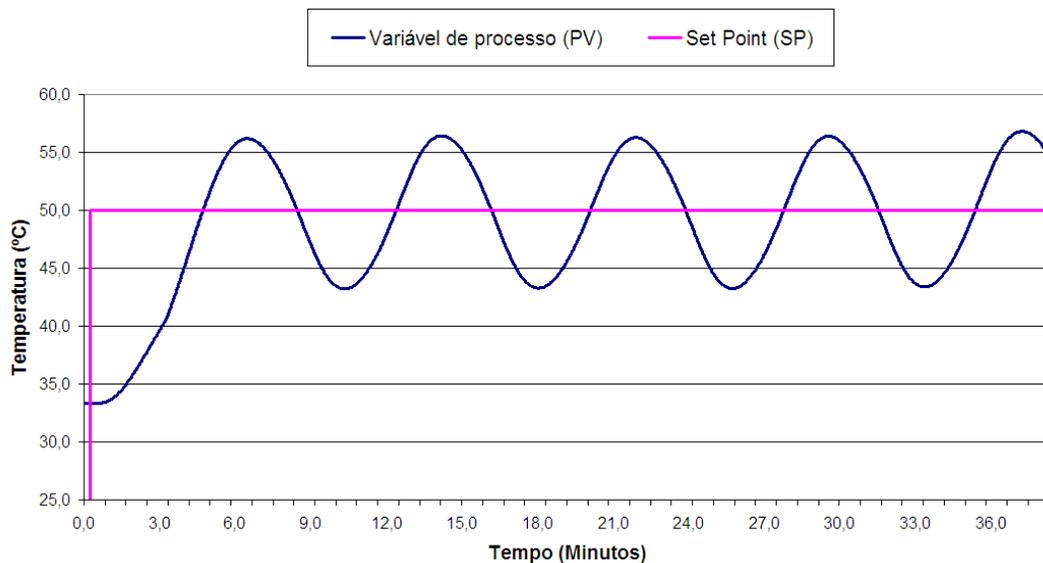


Figura A.5 - Comportamento da temperatura com uso do controle *on/off*

A.2 Calibração dos Pt 100

As Tabelas A.1 e A.2 se referem aos dados de calibração dos sensores tipo Pt 100.

Tabela A.1 - Valores ascendentes de temperatura na calibração dos Pt100

Xv (°C)	Xm (°C)			Erro Absoluto (°C)		
	Pt100 1	Pt100 2	Pt100 3	Pt100 1	Pt100 2	Pt100 3
20	19,54	19,74	19,62	0,46	0,26	0,38
25	24,50	24,66	24,58	0,50	0,34	0,42
30	29,48	29,64	29,54	0,52	0,36	0,46
35	34,46	34,61	34,52	0,54	0,39	0,48
40	39,54	39,63	39,56	0,46	0,37	0,44
45	44,46	44,58	44,53	0,54	0,42	0,47
50	49,53	49,67	49,56	0,47	0,33	0,44
55	54,67	54,67	54,57	0,33	0,33	0,43
60	59,69	59,74	59,64	0,31	0,26	0,36
65	64,74	64,74	64,64	0,26	0,26	0,36
70	69,72	69,66	69,66	0,28	0,34	0,34
75	74,74	74,67	74,68	0,26	0,33	0,32
80	79,70	79,67	79,72	0,30	0,33	0,28
			Média	0,40	0,33	0,40

Tabela A.2 - Valores descendentes de temperatura na calibração dos Pt100

Xv (°C)	Xm (°C)			Erro Absoluto (°C)		
	Pt100 1	Pt100 2	Pt100 3	Pt100 1	Pt100 2	Pt100 3
80	79,84	79,73	79,69	0,16	0,27	0,31
75	74,81	74,70	74,57	0,19	0,30	0,43
70	69,99	69,81	69,72	0,01	0,19	0,28
65	64,82	64,80	64,68	0,18	0,20	0,32
60	59,91	59,84	59,76	0,09	0,16	0,24
55	54,69	54,72	54,60	0,31	0,28	0,40
50	49,60	49,67	49,54	0,40	0,33	0,46
45	44,59	44,68	44,54	0,41	0,32	0,46
40	39,53	39,66	39,52	0,47	0,34	0,48
35	34,59	34,68	34,54	0,41	0,32	0,46
30	29,56	29,71	29,60	0,44	0,29	0,40
25	24,55	24,77	24,61	0,45	0,23	0,39
20	19,58	19,79	19,64	0,42	0,21	0,36
			Média	0,30	0,26	0,38

Os gráficos das figuras A.6, A.7 e A.8 representam as curvas de calibração dos sensores de temperatura Pt 100 usados.

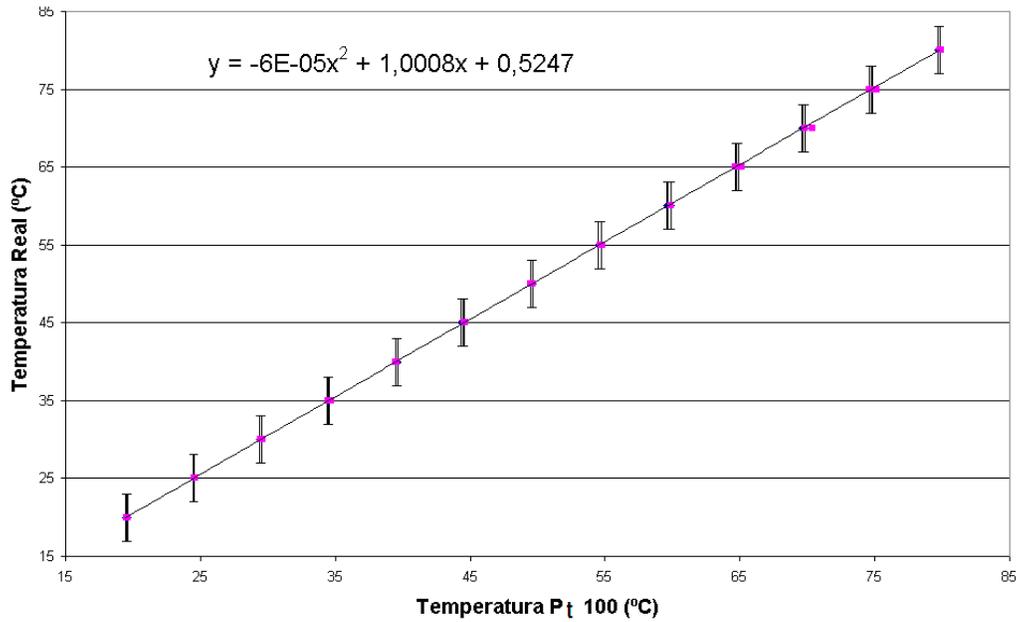


Figura A.6 – Curva de calibração do Pt100 1

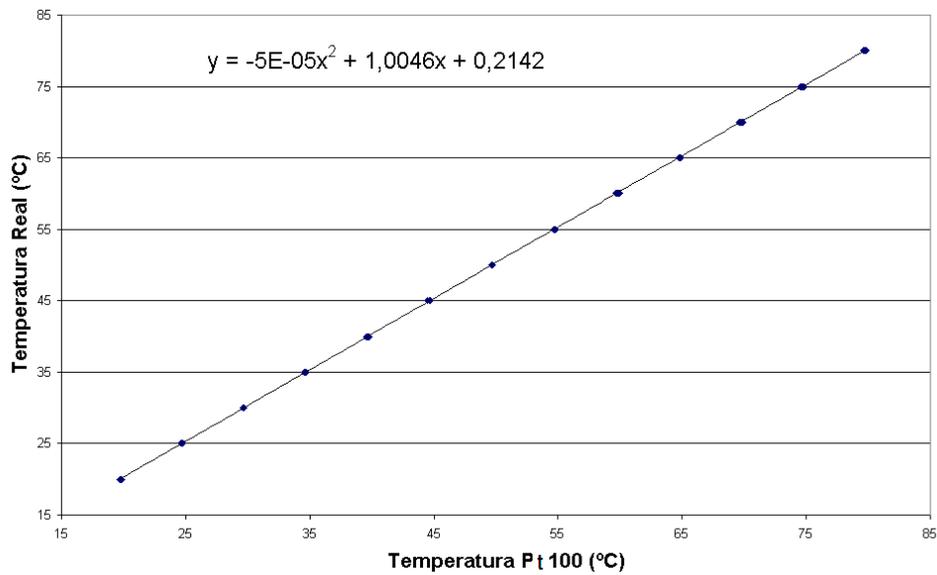


Figura A.7 – Curva de calibração do Pt 100 2

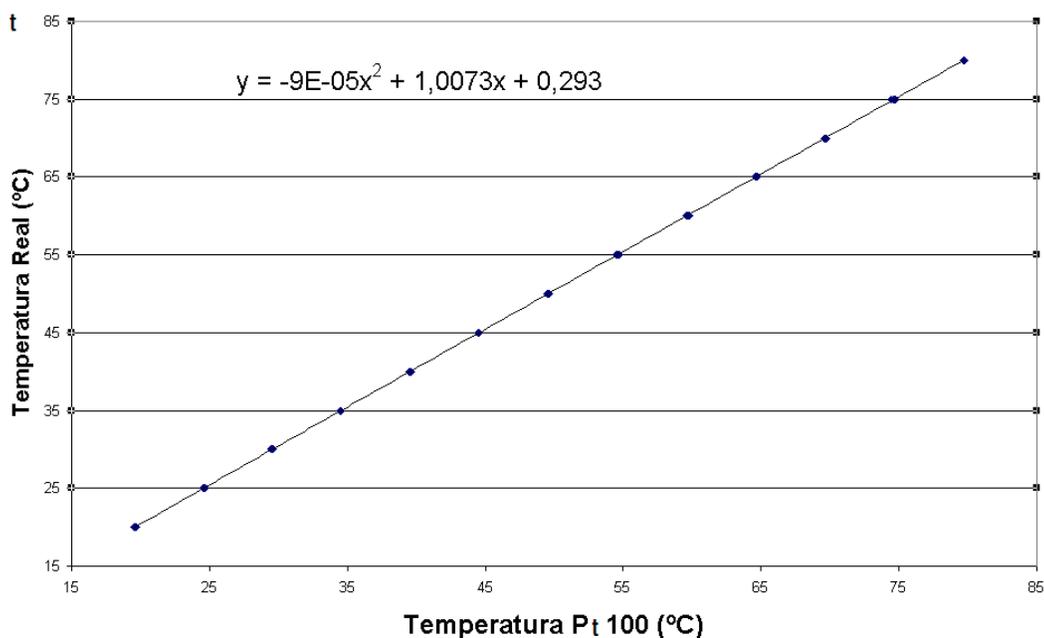


Figura A.8 – Curva de calibração do Pt 100 3

As Tabelas A.3 e A.4 mostra o laudo de classificação do produto antes e após a secagem do produto usado no teste preliminar.

Tabela A.3 - Classificação do produto (testes preliminares – Antes da secagem)

LAUDO DE CLASSIFICAÇÃO DE FEIJÃO Nº 01/2008					
AMOSTRA Nº	1	Antes da Secagem 1			
CLASSIFICAÇÃO EM	250,23 g	Norma lega utilizada: IN MAPA 12/2008			
Interessado:					
Finalidade: Avaliação da Qualidade dos Grãos antes da Secagem					
				0,00	0,00
UMIDADE: 18,55 %	APARELHO DE MEDIÇÃO:		Estufa de	Circulação	de Ar
DEFEITOS				PESO (g)	%
Defeitos Graves					TIPO
Matérias Estranhas e Impurezas - Total				0,72	0,29 1
- Insetos mortos				0,00	0,00 1
Mofados + Ardidos + Germinados				7,05	2,82 2
Carunchados + Atacados por Lagartas das vagens					1

Defeitos Leves (Danificados + Amassados + Partidos e Quebrados + Imaturos)			
Total de defeitos leves	7,90	3,16	2

CLASSES (Determinar em uma subamostra de 100 gramas)								
GRUPO I - FEIJÃO COMUM				GRUPO I - FEIJÃO COMUM				
BRANCO	0,00	g	0,00	%	BRANCO	0,0 g	0,00%	
PRETO	0,00	g	0,00	%	PRETO	0,0 g	0,00%	
CORES	248,23	g	99,20	%	CORES	0,0 g	0,00%	
Total de outras classes diferentes da predominante					0,00	g	0,00	%
Cultivar predominante dentro da classe cores					250,23	g	100,00	%
Total de outras cultivares da classe cores					0,00	g	0,00	%

CONCLUSÃO

GRUPO	CLASSE	TIPO
1	Cores	2
OBSERVAÇÃO: Não há.		
Local:	Laboratório de Análise de Sementes (FEAGRI)	Data: 17/10/2008

TABELA DE TOLERÂNCIAS MÁXIMAS PERCENTUAIS PARA O FEIJÃO

Tipo	DEFEITOS GRAVES (%)				Total de Defeitos Leves (%)
	Matérias Estranhas e Impurezas		Total de Mofados, Ardidos e Germinados	Total de Carunchados e Atacados por Lagartas das Vagens	
	TOTAL	Insetos Mortos (*)			
1	0 a 0,5	0 a 0,1	0 até 1,5	0 até 1,5	0 até 2,5
2	>0,5 até 1,0	>0,1 até 0,2	>1,5 até 3,0	>1,5 até 3,0	>2,5 até 6,5
3	>1,0 até 2,0	>0,2 até 0,3	> 3,0 até 6,0	> 3,0 até 6,0	>6,5 até 16,0
F.T.	>2,0 até 4,0	>0,3 até 0,6	>6,0 até 12,0	>6,0 até 12,0	>16,0
DES	>4,0	>0,6	>12,0	>12,0	-

(*) Máximo de Insetos Mortos permitidos dentro do total de matérias estranhas e impurezas

Tabela A.4 - Classificação do produto (teste preliminar – Após a secagem)

LAUDO DE CLASSIFICAÇÃO DE FEIJÃO Nº 02/2008

AMOSTRA Nº	1	Após a Secagem 1
CLASSIFICAÇÃO EM	250,22 g	Norma lega utilizada: IN MAPA 12/2008

Interessado:

Finalidade: Avaliação da Qualidade dos Grãos antes da Secagem

UMIDADE:	14,59 %	APARELHO DE MEDIÇÃO:	Estufa de Circulação de Ar
-----------------	---------	-----------------------------	----------------------------

DEFEITOS	PESO (g)	%	TIP O
Defeitos Graves			
Matérias Estranhas e Impurezas - Total	0,50	0,20	1
- Insetos mortos	0,00	0,00	1
Mofados + Ardidos + Germinados	7,56	3,02	3
Carunchados + Atacados por Lagartas das vagens	0,00	0,00	1
Defeitos Leves (Danificados + Amassados + Partidos e Quebrados + Imaturos)			
Total de defeitos leves	5,14	2,05	1

CLASSES (Determinar em uma subamostra de 100 gramas)							
GRUPO I - FEIJÃO COMUM				GRUPO I - FEIJÃO COMUM			
BRANCO	0,00	g	0,00	%	BRANCO	0,0 g	0,00 %
PRETO	0,29	g	0,12	%	PRETO	0,0 g	0,00 %
CORES	248,22	g	99,20	%	CORES	0,0 g	0,00 %
Total de outras classes diferentes da predominante					0,29	g	0,12 %
Cultivar predominante dentro da classe cores					250,23	g	100,00 %
Total de outras cultivares da classe cores					0,00	g	0,00 %

CONCLUSÃO

GRUPO	CLASSE	TIPO
1	Cores	3
OBSERVAÇÃO: Não há.		
Local:	Laboratório de Análise de Sementes (FEAGRI)	Data: 17/10/2008

TABELA DE TOLERÂNCIAS MÁXIMAS PERCENTUAIS PARA O FEIJÃO

Tipo	DEFEITOS GRAVES (%)				Total de Defeitos Leves (%)
	Matérias Estranhas e Impurezas		Total de Mofados, Ardidos e Germinados	Total de Carunchados e Atacados por Lagartas das Vagens	
	TOTAL	Insetos Mortos (*)			
1	0 a 0,5	0 a 0,1	0 até 1,5	0 até 1,5	0 até 2,5
2	>0,5 até 1,0	>0,1 até 0,2	>1,5 até 3,0	>1,5 até 3,0	>2,5 até 6,5
3	>1,0 até 2,0	>0,2 até 0,3	> 3,0 até 6,0	> 3,0 até 6,0	>6,5 até 16,0
F.T.	>2,0 até	>0,3 até	>6,0 até 12,0	>6,0 até 12,0	>16,0

	4,0	0,6			
DES	>4,0	>0,6	>12,0	>12,0	-
(*) Máximo de Insetos Mortos permitidos dentro do total de matérias estranhas e impurezas					

As Tabelas A.5 e A.6 mostram os laudos de classificação do produto usado no teste definitivo, com controle de temperatura PID, antes e após a secagem.

Tabela A.5 - Classificação do produto (teste definitivo – Antes da secagem)

LAUDO DE CLASSIFICAÇÃO DE FEIJÃO Nº 03/2009

AMOSTRA Nº	1	Antes da Secagem 2	
CLASSIFICAÇÃO EM	249,93 g	Norma lega utilizada: IN MAPA 12/2008	

Interessado:	
Finalidade:	Avaliação da Qualidade dos Grãos antes da Secagem

UMIDADE		APARELHO DE MEDIÇÃO:	
:	19,55 %		Estufa de Circulação de Ar

DEFEITOS	PESO (g)	%	TIPO
Defeitos Graves			
Matérias Estranhas e Impurezas - Total	0,73	0,27	1
- Insetos mortos	0,00	0,00	1
Mofados + Ardidos + Germinados	7,10	2,92	2
Carunchados + Atacados por Lagartas das vagens	0,00	0,00	1
Defeitos Leves (Danificados + Amassados + Partidos e Quebrados + Imaturos)			
Total de defeitos leves	7,83	3,13	2

CLASSES (Determinar em uma subamostra de 100 gramas)								
GRUPO I - FEIJÃO COMUM				GRUPO I - FEIJÃO COMUM				
BRANCO	0,00	g	0,00	%	BRANCO	0,0	g	0,00%
PRETO	0,00	g	0,00	%	PRETO	0,0	g	0,00%
CORES	248,57	g	99,4	%	CORES	0,0	g	0,00%
Total de outras classes diferentes da predominante					0,00	g	0,00	%
Cultivar predominante dentro da classe cores					249,93	g	100,00	%
Total de outras cultivares da classe cores					0,00	g	0,00	%

CONCLUSÃO

GRUPO	CLASSE	TIPO
1	Cores	2
OBSERVAÇÃO: Não há.		
Local:	Laboratório de Análise de Sementes (FEAGRI)	Data: 23/1/2009

TABELA DE TOLERÂNCIAS MÁXIMAS PERCENTUAIS PARA O FEIJÃO

Tipo	DEFEITOS GRAVES (%)				Total de Defeitos Leves (%)
	Matérias Estranhas e Impurezas		Total de Mofados, Ardidos e Germinados	Total de Carunchados e Atacados por Lagartas das Vagens	
	TOTAL	Insetos Mortos (*)			
1	0 a 0,5	0 a 0,1	0 até 1,5	0 até 1,5	0 até 2,5
2	>0,5 até 1,0	>0,1 até 0,2	>1,5 até 3,0	>1,5 até 3,0	>2,5 até 6,5
3	>1,0 até 2,0	>0,2 até 0,3	> 3,0 até 6,0	> 3,0 até 6,0	>6,5 até 16,0
F.T.	>2,0 até 4,0	>0,3 até 0,6	>6,0 até 12,0	>6,0 até 12,0	>16,0
DES	>4,0	>0,6	>12,0	>12,0	-

(*) Máximo de Insetos Mortos permitidos dentro do total de matérias estranhas e impurezas

Tabela A.6 - Classificação do produto (teste definitivo – Após a secagem)

LAUDO DE CLASSIFICAÇÃO DE FEIJÃO Nº 04/2009

AMOSTRA Nº		1	Após a Secagem 2		
CLASSIFICAÇÃO EM		250,35 g	Norma lega utilizada: IN MAPA 12/2008		
Interessado:					
Finalidade: Avaliação da Qualidade dos Grãos após da Secagem					
UMIDADE :		13,9 %	APARELHO DE MEDIÇÃO: Estufa de Circulação de Ar		
DEFEITOS			PESO (g)	%	TIPO
Defeitos Graves					
Matérias Estranhas e Impurezas - Total			0,75	0,29	1
- Insetos mortos			0,00	0,00	1
Mofados + Ardidos + Germinados			7,05	2,82	2
Carunchados + Atacados por Lagartas das vagens			0,00	0,00	1
Defeitos Leves (Danificados + Amassados + Partidos e Quebrados + Imaturos)					
Total de defeitos leves			7,80	3,1	2
CLASSES (Determinar em uma subamostra de 100 gramas)					
GRUPO I - FEIJÃO COMUM			GRUPO I - FEIJÃO COMUM		
BRANCO	0,00 g	0,00 %	BRANCO	0,0 g	0,00%
PRETO	0,00 g	0,00 %	PRETO	0,0 g	0,00%
CORES	249,31 g	99,58 %	CORES	0,0 g	0,00%
Total de outras classes diferentes da predominante			0,00 g	0,00 %	
Cultivar predominante dentro da classe cores			250,35 g	100,00 %	
Total de outras cultivares da classe cores			0,00 g	0,00 %	

CONCLUSÃO					
GRUPO		CLASSE		TIPO	
1		Cores		2	
OBSERVAÇÃO: Não há.					
Local:	Laboratório de Análise de Sementes (FEAGRI)		Data:	25/1/2009	
TABELA DE TOLERÂNCIAS MÁXIMAS PERCENTUAIS PARA O FEIJÃO					
Tipo	DEFEITOS GRAVES (%)				Total de Defeitos Leves (%)
	Matérias Estranhas e Impurezas		Total de Mofados, Ardidos e Germinados	Total de Carunchados e Atacados por Lagartas das Vagens	
	TOTAL	Insetos Mortos (*)			
1	0 a 0,5	0 a 0,1	0 até 1,5	0 até 1,5	0 até 2,5
2	>0,5 até 1,0	>0,1 até 0,2	>1,5 até 3,0	>1,5 até 3,0	>2,5 até 6,5