



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
ALIMENTOS

TITO NAHUN MANCILLA JOAQUIN

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM SECADOR INTERMITENTE DE FLUXOS
CONTRACORRENTES PARA FRUTOS DO CAFEIEIRO**

ALEGRE – ES
2015

TITO NAHUN MANCILLA JOAQUIN

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM SECADOR INTERMITENTE DE FLUXOS
CONTRACORRENTES PARA FRUTOS DO CAFEIRO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos.

Orientador: Prof. DSc. Luís César da Silva

ALEGRE – ES

Abril – 2013

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

J62m Joaquin, Tito Nahun Mancilla, 1977-
 Modelagem e simulação de um secador intermitente de fluxos contra /
 Tito Nahun Mancilla Joaquin. – 2015.
 106 f. : il.

Orientadora: Luís César da Silva.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) –
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias.

1. Modelagem. 2. Simulação. 3. Café – Secagem. 4. Secagem
intermitente. 5. Fluxos contracorrentes. I. Silva, Luís César da.
II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias. III.
Título.

CDU: 664

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM SECADOR INTERMITENTE DE FLUXOS CONTRACORRENTES PARA FRUTOS DO CAFEIEIRO

Tito Nahun Mancilla Joaquin

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciência e Tecnologia de alimentos.

Aprovada em 16 de abril de 2015:

Prof. DSc. Aldemar Polonini Moreli
(Membro externo)
Instituto Federal do Espírito Santo

Prof. DSc. Sérgio Henriques Saraiva
(Membro interno)
Universidade Federal do Espírito Santo –
Centro de Ciências Agrárias

Prof. DSc. Luís César da Silva
(Orientador)
Universidade Federal do Espírito Santo –
Centro de Ciências Agrárias

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo que tens feito e por tudo virás a fazer.

Ao Brasil, ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos do CCA-UFES e a CAPES pela oportunidade.

A os meus professores pelos conhecimentos compartilhados, em especial ao professor Luís César da Silva pela orientação, e generosidade mostrada nos momentos de dificuldade.

A minha família pelo amor incondicional, em especial minha mãe, Flora, meu pai, Gastón.

A Mariza Sessa, e ao casal Antônio e Marisilca de Paula, pela atenção brindada em momentos de necessidade.

A meu amigo Ezequiel David Calderón Pastor, pela sua disposição de me apoiar na execução de tarefas acadêmicas.

A meus amigos Zabdi Josue Joyo Ginez, Rigoberto Malca La Rosa e Leonel Ruíz Leal, pela amizade e afeto prestados mesmo à distância.

Fico muito grato!

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Cenários relativos à alteração dos ciclos de operação aos tempos de movimentação e de parada da circulação da massa de grãos.....	56
Tabela 2.	Cenários relativos à alteração das dimensões da altura das câmaras de secagem e câmara de descanso de grãos em secador.....	56
Tabela 3.	Condições operacionais de secagem fixadas para experimentações.....	57
Tabela 4.	Comparação dos valores experimentais e simulados de teor de umidade final.....	59
Tabela 5.	Comparação dos valores experimentais e simulados de consumo de lenha.....	63
Tabela 6.	Parâmetros de comparação do produto observados nos cenários simulados para as temperaturas de ar de secagem de 60, 80 e 100 °C, alterando os tempos do ciclo de operação.....	65
Tabela 7.	Variação do consumo específico de energia simulado do cenário COI em temperatura de ar de secagem de 100 °C, alterando teor de água final do produto.....	70
Tabela 8.	Parâmetros de comparação do produto observados nos cenários simulados para as temperaturas de ar de secagem de 60, 80 e 100 °C, alterando as alturas das câmaras de secagem e de descanso.....	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Curvas de secagem, taxa de secagem e temperatura da massa de grãos, considerando as condições do ar de secagem constantes.....	25
Figura 2.	Modalidades de fluxo de ar em secadores.....	29
Figura 3.	Protótipo idealizado por Farkas e Rendik (1997) para secagem de camada delgada de grãos.....	32
Figura 4.	Ilustração de um leito composto por uma série de camadas delgadas (T e RM são temperatura e razão de mistura do ar de secagem, respectivamente) de Morey et al. (1978).....	33
Figura 5.	Modelo conceitual das variações decorrentes do processo de secagem uma camada delgada de grãos durante um intervalo de tempo Δt	35
Figura 6.	Visualização de um sistema quando da estruturação de modelos aplicados à simulação.....	37
Figura 7.	Representação esquemática do secador de fluxos contracorrentes, projetado e avaliado experimentalmente por Silva (1991).....	40
Figura 8.	Janela principal do modelo desenvolvido.....	42
Figura 9.	Janela de diálogo do bloco “Secador”.....	44
Figura 10.	Representação das camadas delgadas na câmara de secagem do secador modelado.....	46

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1.	Comportamento das curvas de secagem experimentais e simuladas para temperatura do ar de secagem de 60 °C.	60
Gráfico 2.	Comportamento das curvas de secagem experimentais e simuladas para temperatura do ar de secagem de 80 °C.....	61
Gráfico 3.	Comportamento das curvas de secagem experimentais e simuladas para temperatura do ar de secagem de 100 °C.....	62
Gráfico 4.	Variação das amplitudes dos parâmetros temperatura final (ΔT_g) e teor de água (ΔU) do produto segundo o tempo de movimentação da massa de grãos.....	66
Gráfico 5.	Tempo movimentação versus número de circulações.....	66
Gráfico 6.	Tempo de secagem simulado alterando os tempos do ciclo de operação.....	67
Gráfico 7.	Consumo de lenha simulado alterando os tempos do ciclo de operação.....	68
Gráfico 8.	Consumo de lenha versus tempo de secagem.....	68
Gráfico 9.	Consumo específico de energia simulado alterando os tempos do ciclo de operação.....	69
Gráfico 10.	Capacidade de secagem simulada alterando os tempos do ciclo de operação.....	71
Gráfico 11.	Temperaturas médias da massa simuladas alterando os tempos do ciclo de operação.....	73
Gráfico 12	Curvas de secagem simuladas alterando os tempos do ciclo de operação.....	75
Gráfico 13	Variação das amplitudes dos parâmetros temperatura final (ΔT_g) e teor de água final (ΔU) do produto segundo a altura da câmara de secagem.....	78
Gráfico 14	Tempo de secagem simulados alterando as alturas das câmaras de secagem e de descanso.....	79
Gráfico 15	Consumo de lenha simulada alterando as dimensões das câmaras de secagem e de descanso.....	80

Gráfico 16	Consumo específico de energia simulado alterando as dimensões das câmaras de secagem e de descanso.....	80
Gráfico 17	Capacidade de secagem simulada alterando as dimensões das câmaras de secagem e de descanso.....	81
Gráfico 18	Temperaturas médias da massa simuladas alterando as dimensões das câmaras de secagem e de descanso.....	82
Gráfico 19	Curvas de secagem simuladas para alterando as dimensões das câmaras de secagem e de descanso.....	84

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.	Temperatura do ar ambiente.....	43
Equação 2.	Umidade relativa do ar ambiente	43
Equação 3.	Valor do incremento de tempo.....	45
Equação 4	Razão das quantidades massas de matéria seca do produto e ar seco	47
Equação 5.	Entalpia específica para café em coco	48
Equação 6.	Temperatura de equilíbrio para o café em coco.....	49
Equação 7.	Umidade relativa para condição de equilíbrio.....	49
Equação 8.	Teor de água para condição de equilíbrio.....	49
Equação 9	Umidade relativa para condição de equilíbrio higroscópico..	50
Equação 10	Tempo equivalente.....	50
Equação 11.	Razão de umidade final.....	51
Equação 12.	Teor de água final.....	51
Equação 13.	Razão de mistura final.....	51
Equação 14.	Entalpia específica de vaporização da água do produto.....	52
Equação 15.	Temperaturas finais do ar e da massa de produto.....	52
Equação 16.	Razão de mistura final.....	53
Equação 17.	Teor de água final corrigido.....	53
Equação 18.	Desvio médio absoluto	55
Equação 19.	Erro relativo.....	55
Equação 20.	Erro médio relativo	55

SUMARIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 CAFÉ.....	18
2.2 TEORIA DE SECAGEM DE GRÃOS	20
2.2.1 Processos adsorção e dessorção	20
2.2.2 Umidade de equilíbrio	21
2.2.3 Difusão	22
2.2.4 Déficit de pressão de vapor e diferencial interno de pressão de vapor	22
2.2.5 Transferência de calor e massa	23
2.2.6 Fases do processo de secagem	23
2.3 MÉTODOS DE SECAGEM.....	25
2.3.1 Secagem artificial	26
2.3.2 Secadores	29
2.3.3 Secagem em fluxos contracorrentes	30
2.4 MODELOS PARA SIMULAÇÃO DE SECAGEM DE GRÃOS	31
2.4.1 Modelo para secagem de camada delgada	32
2.4.2 Modelo e simulação de secagem em um leito de grãos	33
2.4.3 Modelo de Thompson	34
2.5 MODELAGEM DE SIMULAÇÃO DE SISTEMAS	36
2.5.1 A Linguagem de simulação EXTEND™	39
3 MATERIAL E MÉTODOS	40
3.1 DESENVOLVIMENTO DO MODELO	41
3.1.1 Bloco “Ar Ambiente”	42
3.1.2 Bloco “Gerador de Calor”	43
3.1.3 Bloco “Secador”	44
3.1.4 Bloco “Elevador”	53
3.1.5 Bloco “Ar de Exaustão”	54
3.2 VALIDAÇÃO DO MODELO	54
3.3 EXPERIMENTAÇÃO COM MODELO	55
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	58
4.1. VALIDAÇÃO DO MODELO	58
4.1.1 Teor de água final do produto	58
4.1.2 A Curvas de secagem	59
4.1.3 A Consumo de lenha	62
4.2. EXPERIMENTAÇÃO COM O MODELO	63
4.2.1 Avaliação de cenários relacionados aos tempos de movimentação e de parada.	63
4.2.2 Avaliação de cenários relacionados às dimensões das câmaras de secagem e descanso	76

5. CONCLUSÕES	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86
APÊNDICE.....	93

RESUMO

JOAQUIN, Tito Nahun Mancilla. **Modelagem e simulação de um secador intermitente de fluxos contracorrentes para frutos do cafeeiro**. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre- ES. Orientador: Prof. Dr. Luís César da Silva.

Este trabalho foi realizado com o objetivo de desenvolver um modelo computacional para simular a secagem de frutos café em um secador intermitente de fluxos contracorrente, empregando a linguagem de simulação EXTEND™ e o Modelo de Thompson (THOMPSON; PEART; FOSTER, 1968). Para validação do modelo desenvolvido foram utilizados dados experimentais obtidos por Silva (1991), em que foram empregados três níveis de temperatura do ar de secagem de 60, 80 e 100 °C. O modelo desenvolvido foi validado, sendo constatados desvios absolutos de 1,8% b.u e 1,1 kg e erros relativos de 11% e 1,6% na previsão dos parâmetros teor de água final e consumo de lenha, respectivamente. O modelo validado foi empregado na condução de experimentos tipo comparação de cenários. O primeiro experimento refere a alterações do ciclo operacional em que foram alterados os tempos de movimentação e de parada do fluxo da massa de grãos. E o segundo refere à alteração da configuração do secador quanto às alturas das câmaras de secagem e descanso. O ciclo operacional com os tempos de movimentação de um minuto e de parada de dezesseis minutos, para a temperatura do ar de secagem de 100 °C, proporcionou o melhor desempenho, sendo constatado tempo secagem de 12,3 h, consumo de lenha de 109,5 kg, consumo específico de energia de 7660 kJ.kg⁻¹ de água evaporada, e capacidade de secagem de 87,86 kg.h⁻¹. Quanto à configuração do secador, o melhor desempenho ocorreu para altura da câmara de secagem de 2,3 m usando a temperatura do ar de secagem de 100 °C, em que foram simulados tempo de secagem de 12,0 h, consumo de lenha de 106,5 kg, consumo específico de energia, de 7433 kJ.kg⁻¹ de água evaporada, e capacidade de secagem de 90 kg.h⁻¹. Desse modo, na condução da secagem de frutos de café em um secador intermitente de fluxos contracorrentes é recomendado o ciclo operacional com tempos de movimentação de um minuto e o de parada de dezesseis minutos, e não empregar a câmara de descanso. Essa conclusão está fundamentada em índices de

desempenho do secador. Ressalta-se que não foram simulados os impactos nos parâmetros de qualidade.

Palavras-chave: modelagem e simulação, café, secagem de café, secagem intermitente, fluxos contracorrentes, comparação de cenários.

ABSTRACT

JOAQUIN, Tito Nahun Mancilla. **Modeling and simulation of an intermittent counter-flow dryer for coffee fruits**. In 2015. Dissertation (MSc in Food Science and Technology) - Federal University of Espírito Santo, Alegre-ES. Advisor. Dr. Luís César da Silva.

This work was carried out in order to develop a computer model to simulate the drying of coffee fruits in an intermittent counter-flow dryer, using the Extend™ simulation language and Thompson Model (THOMPSON; PEART; FOSTER, 1968). For model validation were used experimental data obtained by Silva (1991), that worked with three air drying temperatures 60, 80 and 100 °C. The model was validated with absolute deviation of 1,8% b.u. and 1,1 kg and relative error of 11% and 1,6% for predicting final water content and firewood consumption, respectively. The validated model was employed in simulation experiments type scenario comparison. The first experiment concerns to operating cycle considering changes in handling and stop times of grain mass flow. The second relates to dryer configuration considering different heights of drying and tempering sections. The operating cycle with handling time of one minute and stop time of sixteen minute, using drying air temperature of 100 °C, results in the best performance of the dryer, with drying time of 12.3 h, firewood consumption of 109.5 kg, specific energy consumption of 7,660 kJ per kg of evaporated water, and drying capacity of 87.86 kg per hour. In relation to the dryer configuration, the best performances occurred for drying chamber with height of 2.3 m, using drying air temperature of 100 °C, when it was simulated drying time 12.0 h, firewood consumption 106.5 kg, specific energy consumption 7,433 kJ per kg of evaporated water and drying capacity of 90 kg per hour. Thus, for drying coffee fruits using an intermittent counter-flow dryer, it is recommended operating cycle with handling time of one minute and stop time of sixteen minute, and not to use the tempering sections. This conclusion is based on dryer performance parameters. It is important to highlight that impact on quality parameters was not simulated.

Key-words: modeling and simulation, coffee, coffee drying, intermittent drying, counter-flow, scenario comparison.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor e exportador mundial de café, bem como, o segundo maior consumidor. A produção total, espécies arábica e robusta, em 2015 foi estimada entre 44,11 e 46,61 milhões de sacas de 60 kg de café beneficiado. Respondem por aproximadamente 86,7% dessa produção os estados de Minas Gerais, Espírito Santo e São Paulo (CONAB, 2015).

A preservação da qualidade do café está, principalmente, associada, às práticas adotadas no processamento. E dentre essas práticas, a secagem destaca-se pelo forte potencial de depreciação dos atributos de qualidade desejáveis no produto final. Além disso, a secagem representa os maiores custos energéticos e operacionais em relação às demais operações. Sendo assim, os princípios para o desenvolvimento de secadores devem ser a preservação da qualidade do produto e otimização do desempenho.

Para o desenvolvimento e avaliação de secadores podem ser utilizados protótipos ou modelos de simulação, que são empregados na condução de experimentos, que permitem avaliar os impactos sobre a qualidade do produto e o desempenho.

O uso de protótipos, além dos custos construtivos, requer matéria prima e mão de obra e ocorre o consumo energia elétrica e calorífica. Portanto, a restrição da quantidade de matéria prima e os custos incorridos podem limitar o número de ensaios. Nesse caso, o emprego de modelos de simulação apresenta-se como solução, pois é possível reduzir os custos com ensaios e conduzir experimentos como análise de sensibilidade, comparação de cenários, otimização e simulação de Monte Carlo.

O uso de simulação proporciona melhor compreensão do processo de secagem, desse modo, modelos construídos podem ser usados na proposição de novas concepções de secadores e promover o uso mais eficiente dos mesmos.

Especificamente, para modelagem e simulação da secagem de grãos são amplamente difundidos os Modelos de Hukill, Thompson, Morey e de Michigan.

O modelo de Thompson (THOMPSON; PEART; FOSTER, 1968), é um dos mais empregados para modelagem e simulação da secagem de grãos em altas temperaturas, por apresentar baixa exigência de recursos computacionais e ser preciso na estimativa das variáveis de saída. No modelo de Thompson o leito de grãos é dividido em camadas, sendo para cada uma delas, a cada incremento de tempo, simulados balanços de massa e de calor para a massa de grãos e o ar.

Para o desenvolvimento de modelos em computadores podem ser utilizadas linguagens de programação, linguagens de simulação ou pacotes dedicados.

Dentre as linguagens de simulação, destaca-se o EXTENDTM que é utilizada no desenvolvimento de modelos estático ou dinâmico, determinísticos ou estocásticos, e discretos ou contínuos, ou ainda a combinação destes. Por exemplo, ao utilizar EXTENDTM para implementar o Modelo de Thompson, o modelo computacional desenvolvido poderá ser classificado como dinâmico e contínuo, e se for considerado algum fator estocástico, o modelo passará ser estocástico, dinâmico e contínuo.

Portanto, considerando os benefícios da modelagem e simulação da secagem de grãos, a potencialidade do Modelo de Thompson e os benefícios do emprego da linguagem de simulação EXTENDTM, foram estabelecidos como objetivos deste trabalho empregar a linguagem de simulação EXTENDTM para modelar e simular a secagem de frutos do cafeeiro em um secador intermitente de fluxos contracorrentes desenvolvido por Silva (1991), validar o modelo empregando dados experimentais obtidos por Silva (1991), conduzir experimentos tipo comparação de cenários: (i) alterando ciclos de operação (intervalos de tempo de movimentação e de parada do fluxo de grãos); e (ii) alterando as alturas das câmaras de secagem e de descanso.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CAFÉ

O café foi introduzido no Brasil no século XVIII, iniciando-se, desde então, uma história de sucesso. A cafeicultura brasileira foi durante varias décadas, a atividade econômica mais importante da nação (PIMENTA, 2001), hoje em dia o Brasil apresenta-se como primeiro produtor, exportador e segundo consumidor mundial de café (BRASIL, 2015). A produção nacional de café na safra 2014 foi de 45,34 milhões de sacas de 60 quilos de café beneficiado que inclui a espécie arábica e robusta, com destaque para Minas Gerais, que respondeu por 49,93% da produção nacional, seguido do Espírito Santo, São Paulo, Bahia, Rondônia e Paraná (BRASIL, 2015; CONAB, 2015).

Atualmente o parque cafeeiro é estimado em 2.256 milhões de hectares e cerca de 287 mil produtores em aproximadamente 1.900 municípios de quinze Estados (BRASIL, 2015), estima-se que a cadeia produtiva de café é responsável pela geração de mais de oito milhões de empregos no país, sendo ainda uma atividade de grande importância socioeconômica para o desenvolvimento do Brasil (BANDEIRA, 2010; BRASIL, 2015; DONZELES et al., 2010)

Os maiores importadores mundiais de café são os países industrializados, como Estados Unidos, Alemanha, França, Itália e Japão (ABIC, 2014; OIC, 2014), a qualidade do café beneficiado é que define o nível de aceitação do produto no mercado externo, como também, estabelece o valor na comercialização. Existe uma tendência na redução desse mercado para produtores que produzem café de baixa qualidade. Desse modo, busca-se o constante aprimoramento no processamento definindo assim novas tecnologias (SILVA; BERBERT, 1999).

Na colheita, os frutos de café apresentam com alto teor de água (60 a 70% em base úmida), o que propicia o desenvolvimento de microrganismos e o aumento da taxa de respiração, resultando na elevação da temperatura da massa dos grãos. Portanto, logo após a colheita, o café deve ser submetido ao processo de secagem

imediatamente, para reduzir o teor de água inicial dos frutos, de aproximadamente 60 a 70% b.u. (SILVA; NOGUEIRA; MAGALHÃES, 2008), para valores na faixa de 10 a 12% b.u., o que é considerado técnica e economicamente viável para armazenagem por longos períodos de tempo (PARRA; ROA; OLIVEROS, 2008). O tempo de armazenagem segura dependerá do teor de água e da temperatura da massa de grãos, pois para valores acima de 12% o risco de desenvolvimento de fungos é alto (DÍAZ, 2011; PARRA; ROA; OLIVEROS, 2008).

Segundo Hernández Díaz et al. (2008), Pimenta (2001), Souza, Queiroz e Lacerda Filho (2002), a secagem é a principal etapa do processamento do café, e se não conduzida apropriadamente impacta negativamente a qualidade final, como também, comparativamente é a etapa com maior grau de dificuldade de execução em relação a outros produtos. Além do elevado teor de açúcar presente na mucilagem, o teor de água, geralmente ao redor de 60% b.u., faz com que a taxa de deterioração, logo após a colheita, seja alta devido à potencialização para proliferação de microrganismos. Desse modo, conforme Silva e Berbert (1999), qualquer que seja o método utilizado deve-se ressaltar os seguintes aspectos para que se tenha êxito no preparo do café:

- a. evitar fermentações indesejáveis antes e durante a secagem;
- b. evitar temperaturas da massa de grãos excessivamente altas;
- c. secar os grãos no menor espaço de tempo possível até o teor de água desejada, na faixa de 10- 12% b.u.; e
- d. procurar obter um produto com coloração, tamanho e massa específica unitária uniformes.

No Brasil, utilizam-se, fundamentalmente, dois métodos para secagem de café: secagem em terreiro e secagem em secadores. Na secagem em terreiros com pisos em concreto, tijolos, asfalto ou chão batido o produto é esparramado para exposição à radiação solar, que promove o aquecimento do produto, e, conseqüentemente, a evaporação de parte da água dos grãos, que migra para superfície, sendo então, transferida ao ar ambiente (SILVA; BERBERT, 1999). Quanto à secagem em secadores, esta consiste no emprego de meios como ventiladores, aquecedores, revolvedores e transportadores de grãos com a

finalidade de acelerar o processo (SILVA, AFONSO; DONZELES, 2008). Estas modalidades de secagem são descritas com maior aprofundamento no item 2.2.

2.2 TEORIA DE SECAGEM DE GRÃOS

2.2.1 Processos adsorção e dessorção

Os grãos são materiais higroscópicos, portanto a água presente está sujeita a fenômeno de sorção, em que simultaneamente atuam dois processos: absorção e adsorção. Absorção refere-se à retenção da água na forma líquida no interior da estrutura sólida do grão, enquanto a adsorção está relacionada à força de adesão entre estrutura sólida do grão e a água de superfície (DÍAZ, 2011). A adsorção de água por um material capilar poroso como grão deve-se a uma combinação de mecanismos físicos como condensação capilar, adsorção cinética e potencial de campo de força (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992).

Na secagem de grãos a água contida deve ser dessorvida. Dessorção ocorre quando as forças que fazem a água migrar para fora do grão são mais forte que as forças de sorção. No processo de secagem de grãos com o ar, as forças de sorção e dessorção estão relacionadas a uma série de fatores como a temperatura, pressão, estrutura de grãos, teor de água dos grãos, condições psicrométrica do ar e velocidade do ar (AGUERRE; SUAREZ, 2004; KAYMAK-ERTEKIN; GEDIK, 2004; MARTINEZ-VERA et al., 1995; SAMAPUNDO et al., 2007).

Segundo Brooker, Bakker-Arkema e Hall (1992) para determinados valores da temperatura e umidade relativa, os valores da umidade de equilíbrio (UE) para a dessorção e adsorção são diferentes, o que é definido como efeito histerese. Segundo Kraemer e Taylor (1931, apud BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992), explicaram o efeito de histerese adotando uma figuração em que comparam os capilares que compõe a estruturas dos grãos como sendo os frascos tinteiros.

Assim, como os frascos tinteiros, os capilares dos grãos apresentam gargalos com diminutos diâmetros nas extremidades junto à superfície.

Desse modo, durante o processo de dessecção os gargalos regulam o esvaziamento dos capilares, o que caracteriza a secagem do produto. Já no processo de adsorção, considerando uma mesma temperatura e umidade relativa do ar empregada no processo de dessecção, os gargalos dos capilares restringem a entrada da mesma quantidade de água quantificada na dessecção.

2.2.2 Umidade de equilíbrio

Segundo Brooker, Bakker-Arkema e Hall (1992) o conceito de umidade de equilíbrio (UE) é importante no estudo de secagem de grãos, pois corresponde ao teor de água mínimo que o produto atingirá sob uma determinada condição de secagem.

A UE pode ser definida como o teor de água de um material após de ter sido exposto a um ambiente por um longo período de tempo (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992), ou a condição em que as forças de sorção de dessecção são iguais e o teor de água permanece constante (SAMAPUNDO et al., 2007). Descrito de outra forma, a UE é o teor de água atingido por um produto higroscópico quando pressão de vapor interna alcança o equilíbrio com o ar circunvizinho, sendo a umidade relativa do ar denominada umidade relativa de equilíbrio (URE). As variações do valor da UE estão relacionadas à composição química do grão, a espécie e variedade, o grau de maturação e da evolução do ciclo do cultivo. (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992; PARRY, 1985).

Segundo Brooker, Bakker-Arkema, Hall, (1992) e Parry (1985), para determinação da UE e da umidade relativa de equilíbrio podem ser empregados métodos estáticos e dinâmicos. Nos métodos estáticos o ar circunvizinho da amostra de grãos, contida em um recipiente, tem a umidade relativa definida pelo emprego de soluções salinas saturadas a uma dada temperatura, sendo possível definir

condições em que a umidade relativa do ar varie de 0% a 100%. Já no método dinâmico, uma camada delgada de grãos é exposta a um fluxo de ar com condições psicrométricas fixas, até que não ocorra redução da massa da camada delgada, para essa condição ocorre o equilíbrio higroscópico, sendo então determinado a UE e a URE (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992; PARRY, 1985)

2.2.3 Difusão

No processo de secagem a água distribuída no interior do grão deve atingir superfície para então ser transferida ao ar. Esse processo é chamado de difusão e o mesmo é influenciado pela natureza do material, do teor de água e dos tipos de ligação das moléculas de água (AGUERRE; SUAREZ, 2004). Mediante, a uma diferença de pressão parcial de vapor, ocorre à difusão, sendo a água na forma de vapor movimentada das zonas de pressões altas para as de pressões baixas. Quando a umidade relativa do ar ambiente é menor que a umidade relativa do ar da superfície dos grãos, o vapor de água sobre a superfície do grão migra para o ar e internamente no grão é estabelecido um gradiente de pressão parcial do vapor de água (DÍAZ, 2011).

2.2.4 Déficit de pressão de vapor e diferencial interno de pressão de vapor

O déficit de pressão de vapor do ar (DPV) é um fator chave na secagem de grãos (FENTON, 1941) por está associado às quantidades vapor no ar em um dado momento em relação estado de saturação (PRENGER; LING; 2000). Quanto maior é o DVP maior é o potencial de secagem do ar (PRENGER; LING; 2000). E o diferencial interno de pressão de vapor (DIPV) corresponde à diferença da pressão de vapor de água estabelecida no interior do grão. O DIPV promove os fenômenos

migratórios descrito pela Lei de Fick da Difusão (GUNASEKARAN; THOMPSON, 1986). A velocidade em que um grão ganha ou perde água é aproximadamente proporcional à magnitude do DIPV. Essa velocidade é afetada pela resistência ao movimento do vapor de água criada por camadas superficiais de grãos (FENTON, 1941).

Segundo Díaz (2011) não é possível de mensurar o valor real do DIPV, pois atualmente não há como medir a pressão de vapor no interior dos grãos; no entanto, DPV pode ser mensurado e calculado, e os maiores valores implicam em aumento da transferência de vapor de água entre grão e o ar circunvizinho.

2.2.5 Transferência de calor e massa

Na secagem de grãos, o ar é empregado para o transporte de calor e de massa de vapor de água, como também, está envolvido no processo de trocas de calor e massa de vapor entre produto e ar. Esses fenômenos ocorrem simultaneamente e de forma continuada (PUTRANTO et al., 2011; SILVA; NOGUEIRA; MAGALHÃES, 2008).

Desse modo, durante a secagem, o ar de secagem transporta calor até os grãos e transfere calor aos mesmos, para então promover a mudança de estado da água de líquido para vapor. Assim, pelo processo de difusão, as massas de vapor das camadas internas do grão chegam à superfície, onde ocorre troca de massa com o ar, que transporta a massa de vapor para o ambiente, sendo denominado ar de exaustão (AGUERRE; SUAREZ, 2004; DÍAZ, 2011; PARK et al., 2007).

2.2.6 Fases do processo de secagem

Segundo Park et al., (2007) o processo de secagem de produtos agrícolas apresenta três fases distintas, conforme representado na Figura 01, em para cada uma das fases ocorrem comportamentos distinto quanto ao formato da curva de

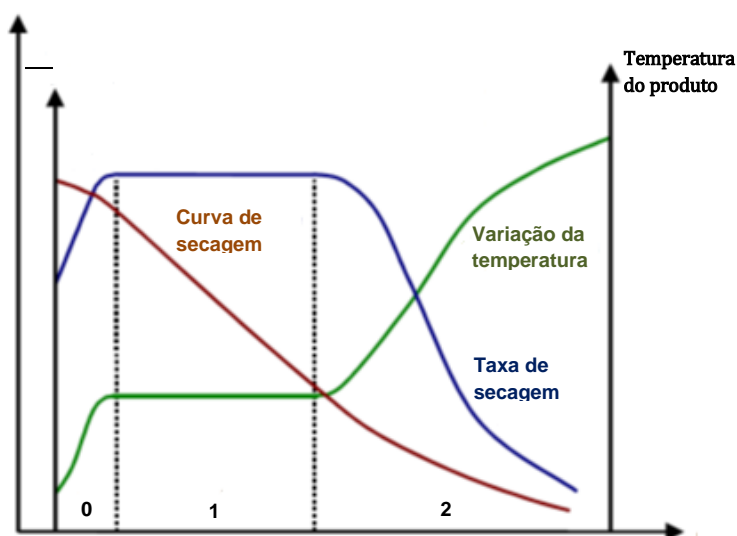
secagem, a variação da taxa de secagem e variação da temperatura da massa de grãos.

Na Fase 0 - Indução, o produto no início da secagem, normalmente, apresenta temperatura menor do que a do ar e o gradiente de pressão de vapor na superfície do produto em relação ao ar é pequeno, conseqüentemente, a transferência de massa e a taxa de secagem são baixas. Ao receber o aporte de calor proveniente do ar de secagem, a temperatura e a pressão de vapor na superfície do produto elevam o que faz aumentar a taxa de secagem. Esta situação permanece até que a transferência de calor compense exatamente a transferência de massa. Se a temperatura do ar for inferior a do produto, esta última diminuirá até atingir o estado de equilíbrio. A duração deste período é insignificante em relação ao período total de secagem.

Na Fase 1 - Taxa de secagem constante, nesta fase, como na zero, constata-se alto teor de água do produto, o que facilita a difusão do vapor no interior dos grãos, de tal modo que a pressão de vapor na superfície do produto permanece constante. A temperatura do produto, também permanece constante com valor próximo a temperatura de bulbo úmido, o que é característico em situações quando as transferências de calor e de massa são compensadas. Essa fase transcorre enquanto a difusão de vapor de água do interior até a superfície do produto for suficiente para repor a transferência de massa feita ao ar.

E por fim, a Fase 2 - Taxa de secagem decrescente, que corresponde ao período em que a difusão de vapor de água do interior até a superfície do produto passa restringir a transferência de massa. Pontos de inflexão ao longo da curva de secagem são indicativos da redução da taxa de secagem. Desse modo, durante esta fase a troca de calor não é mais compensada, conseqüentemente, a temperatura do produto aumenta com tendência a aproximar a temperatura do ar de secagem. Essa fase encerra quando ocorre o equilíbrio higroscópico e o teor de água observado é denominado umidade de equilíbrio (UE).

Figura 01 - Curvas de secagem, taxa de secagem e temperatura da massa de grãos, considerando as condições do ar de secagem constantes.



Fonte: Park et al. (2007, p. 50).

2.3 MÉTODOS DE SECAGEM

Segundo Afonso Júnior e Corrêa (1999), Peinado et al. (2011), Queiroz et al., (1986) e Silva (1991), a secagem de produtos agrícolas é uma operação que visa a remoção do excesso de água por meio de evaporação empregando correntes convectivas de ar que tem por finalidade transportar calor e massa de vapor de água e trocar calor e massa de vapor com os grãos. A remoção de água é promovida até o nível adequado para o beneficiamento, armazenagem e, ou comercialização.

Como método de conservação de alimentos, a secagem, normalmente, propicia a conservação por longo período de tempo, é de custo menor e apresenta facilidade de execução (PARRA; ROA; OLIVEROS, 2008; SILVA, 1991; SOUZA; QUEIROZ; LACERDA FILHO, 2002). Para o processo de secagem de frutos do cafeeiro, busca-se chegar ao teor de água final de entre 10 e 12% b.u., a fim de inviabilizar a ação de fungos e conseqüentemente a produção de micotoxinas (PARRA; ROA; OLIVEROS, 2008). Atualmente vários pesquisadores na área de café escolhem empregar valores de teor de água final entre 11 e 11,5% b.u. na

execução do seus trabalhos experimentais (ALVES et al., 2013; CAIXETA; GUIMARÃES; MALTA, 2013; CORADI; BOREM, OLIVEIRA, 2008; CORRÊA et al., 2010; ISQUIERDO et al., 2012; REINATO et al., 2012; RESENDE et al., 2011; SOUSA et al., 2013; TAVEIRA et al., 2012)

A secagem de grãos é conduzida de forma natural ou artificial, e segundo Silva (1991) e Silva e Berbert (1999) a escolha de um desses métodos depende das características da unidade produtiva e do fim ao que se destina o produto.

Dalpasquale (1984), Moraes e Rodrigues (2006), e Putranto et al. (2011) definem secagem natural, como o processo em que consiste na exposição do produto à radiação solar, sendo realizada na própria planta, ou em estruturas como terreiros ou barcaças. Complementam que essa modalidade de secagem tem por vantagens o baixo custo, as menores ocorrências de danos mecânicos, no entanto, apresentam como desvantagens a dependência das condições climáticas, a dificuldade de controle, exigência de grande área para execução como nos terreiros e altos riscos de infestação de insetos, fungos e outras contaminações.

2.3.1 Secagem artificial

A secagem artificial é largamente utilizada no processamento de produtos agrícolas por agilizar a redução do teor de água sob condições controladas, o que pode levar a obtenção de um produto final mais homogêneo (PARRY, 1985; PUTRANTO et al., 2011; SILVA; BERBERT, 1999). Segundo Brooker, Bakker-Arkema e Hall (1992), Silva e Berbert (1999), e Silva, Correa e Martins (1988), a condução da secagem artificial implica no emprego de secadores que pode dispor de fornalhas para o aquecimento do ar de secagem, utilizar ventilação natural ou forçada por meio de ventiladores, ou ainda de equipamentos para movimentação e, ou revolvimento da massa de grãos.

A secagem artificial pode ser conduzida a baixa ou a alta temperatura. A secagem em baixa temperatura caracteriza-se por empregar como ar de secagem o

ar ambiente ou este aquecido em até 10 °C, sendo essa secagem conduzida em silos de fundo perfurado, por onde o ar é insuflado por meio de ventiladores (SILVA; BERBERT, 1999; SILVA 1991)

Secagem em altas temperaturas utiliza ar aquecido a mais de 10 °C acima da temperatura ambiente. Dessa forma, o ar de secagem deve receber aporte de calor, levando ao aumento da temperatura e redução da umidade relativa, o que caracteriza o aumento do potencial de secagem do ar (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992). Ao passar pela camada de grãos, o ar de secagem cede calor aos grãos e recebe massa de água na forma de vapor, conseqüentemente o ar de exaustão tem menor temperatura e maior umidade relativa quando comparado ao ar de secagem (SILVA; BERBERT, 1999).

De acordo com Brooker, Bakker-Arkema e Hall (1992), Dalpasquale (1984), Putranto et al. (2011), Queiroz (2002) e Silva e Berbert (1999), a secagem de grãos pode ser conduzida como: secagem intermitente ou contínua, secagem combinada e seca-aeração. Na secagem intermitente o produto recircula pelo secador varias vezes até ser atingida a condição final desejada, enquanto na secagem continua ocorre um fluxo continuo de produto pela câmara de secagem e ao sair do secador o produto apresenta o teor de água final desejado.

A secagem intermitente promove a difusão branda e equilibrada da água do centro para a periferia do grão e a evaporação da água superficial (FAGUNDES; ELIAS, BARBOSA, 2005; FERRARI FILHO; GOTTARDI; DIONELLO, 2010). Normalmente, os secadores intermitentes são constituídos de duas câmaras: uma de secagem, na qual ocorrem as trocas de energia e de massa durante o contato dos grãos com o ar aquecido e outra de descanso, em que os grãos permanecem em repouso, sem que haja passagem de um fluxo de ar de secagem. Na câmara de secagem o ar cede energia térmica aos grãos, e absorve na forma de vapor, a água periférica que evapora dos grãos do produto. Na câmara de descanso, ocorre a migração da água mais interna do grão para superfície, predominantemente por meio da difusão (ELIAS et al., 2010, apud MENEGHETTI et al., 2012).

Putranto et al. (2011) destaca como vantagens da secagem intermitente o menor custo de energia por causa da redução do tempo de aquecimento e os menores efeitos sobre a qualidade e os compostos nutricionais.

A secagem combinada consiste no emprego de duas ou mais modalidades de secagem no processamento, como por exemplo, o descrito por Silva et. al. (2001a), Silva, Ruffato e Precci (2000), em que é recomendado secar o café até o estado de meia-seca (35 a 40% b. u.), em terreiros ou em secadores de leito fixo, e em seguida complementar a secagem empregando secadores mecânicos até o ponto de tulha, ou ainda, secar o café até o teor de água de 22%, e complementar a secagem em silos equipados com ventiladores, até que atinja o teor de água ideal para comercialização. Ressaltando, que o secador de leito fixo pode ser empregado em qualquer um dos estágios.

A seca-aeração (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992; DALPASQUALE, 1984; SILVA, 2005) consiste em transferir o produto quente e com teor de água de 15 a 16% para um silo ou uma tulha, onde o produto será deixado em descanso por quatro a doze horas. Decorrido esse tempo, procede-se a insuflação de ar ambiente com umidade relativa de 60 a 70%, recomendando-se um fluxo de ar 1 a 3 m³ de ar.min⁻¹ por tonelada de produto até que o teor de água final do grão atinja ao nível desejado.

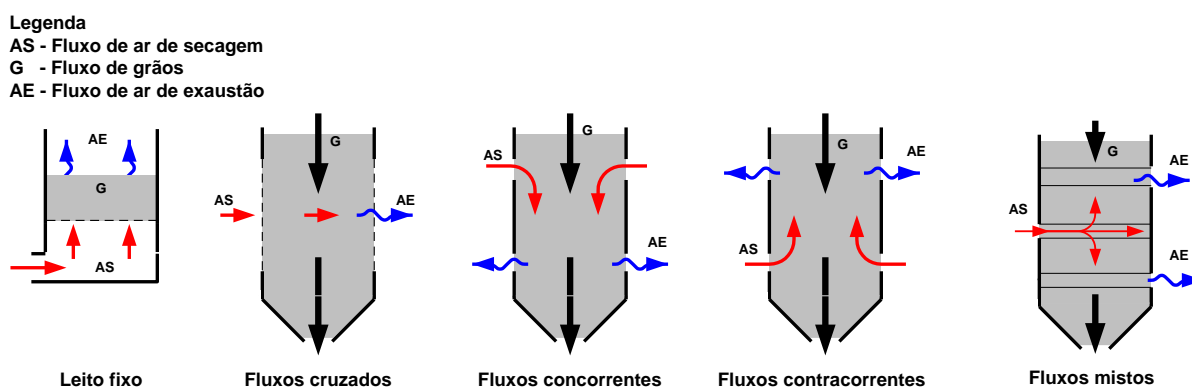
Para Putranto et al. (2011) a secagem artificial convectiva é o método adequado para remover o excesso de teor de água em grãos, porém necessita ser conduzida em condições ótimas para alcançar uma taxa elevada de secagem, preservando a qualidade do produto. Para Parry (1985), a taxa de secagem e a eficiência estão relacionadas à temperatura e umidade relativa do ar de secagem. Silva e Berbert (1999) e Parry (1985) destacam que a secagem artificial com temperaturas elevadas é uma opção de bons resultados, no entanto, Parry (1985) adiciona que muitas vezes isto é acompanhada por perda de qualidade, como por exemplo, a redução do índice de germinação em sementes.

2.3.2 Secadores

Os secadores quanto à forma de operação são classificados em contínuos ou intermitentes, exceto os secadores de leito fixo (BROOKER; BAKKER-ARKEMA, HALL, 1992).

Segundo Brooker, Bakker-Arkema e Hall (1992), e Parry (1985) os secadores de grãos quanto aos sentidos de deslocamento do ar de secagem em relação à massa de grãos podem ser classificados em secadores de fluxos cruzados, fluxos concorrentes, fluxos contra correntes e fluxos mistos (Figura 02).

Figura 02 – Modalidades de fluxo de ar em secadores.



Fonte: Silva (2013, p. 11).

Os secadores de leito fixo têm por característica a não movimentação da camada de grãos durante a secagem, o que pode levar a maior redução do teor de água das camadas mais próximas à entrada de ar de secagem, assim, para minimizar esse efeito alguns modelos contam com revolvedores (BROOKER; BAKKER-ARKEMA, HALL, 1992).

Nos secadores de fluxos cruzados, a camada de grãos flui em sentido descendente e o ar de secagem cruza sob um ângulo de 90° na câmara de secagem. Já nos secadores de fluxos contracorrentes os fluxos ocorrem em sentidos contrários, e nos secadores concorrentes os fluxos ocorrem no mesmo sentido (BROOKER; BAKKER-ARKEMA, HALL, 1992; QUEIROZ, 2002; SILVA; BERBERT, 1999).

Em um secador de fluxo misto, o ar de secagem entra por um duto e cruza a coluna do secador e como as opções de saída do fluxo são os sentidos ascendente ou descendente, ocorrendo então simultaneamente fluxos de ar em sentido concorrente contracorrente e cruzado, sendo que a intensidade do fluxo cruzado é relativamente pequena em relação aos fluxos concorrentes e contracorrentes (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992; BORTOLAIA, 2011, apud LIMA, 2014).

Segundo Silva e Berbert (1999), além do consumo de energia e o rendimento operacional do secador, deve ser também avaliados sobre a qualidade do produto, fato que têm despertado interesse de pesquisadores, processadores e fabricantes de equipamentos, destacando que os parâmetros que afetam a taxa de secagem e o desempenho de um secador são:

- a. temperatura e umidade relativa do ar ambiente;
- b. temperatura e vazão do ar de secagem;
- c. propriedades físicas do produto;
- d. teores de água inicial e final do produto;
- e. tipo e fonte de energia;
- f. velocidade do fluxo de grãos pelo secador; e
- g. sistema de movimentação dos grãos.

A monitoração do teor de água do produto durante a secagem é importante, por ser um fator diretamente relacionado à viabilidade econômica do sistema, pois se o teor de água final dos grãos não estiver dentro das especificações, o produto poderá deteriorar durante a armazenagem, como também, não apresentar as características desejáveis na comercialização (SILVA; BERBERT, 1999).

2.3.3 Secagem em fluxos contracorrentes

Autores citam que o emprego de secadores de fluxo contracorrente tem aplicação limitada em razão da sensibilidade dos grãos a exposição a altas temperaturas, uma vez que à medida que a massa de grãos escoar ao longo da

câmara de secagem a temperatura do produto aumenta gradativamente, atingindo a temperatura máxima próximo ao ponto da entrada do ar de secagem (LIMA, 2014; PARK et al., 2007; SILVA et al., 2001b). No entanto, Silva (1991) utilizando um protótipo de secador de fluxos contracorrentes adaptado à realidade brasileira, constatou que a utilização de temperatura de 100 °C não tem efeito sobre a qualidade da bebida café. Segundo Nellist (1982, apud PARK et al., 2007), em um fluxo contracorrente, operando em equilíbrio, os grãos deixariam o secador à mesma temperatura do ar de entrada, Desse modo, em alguns secadores as câmaras de resfriamento operam em fluxos contracorrentes.

Nos Estados Unidos, a secagem em fluxos contracorrentes é realizada em silos secadores. Neste sistema, a massa de grãos desce à medida que a camada de grãos secos junto à base silo é removida do secador, promovendo o movimento das camadas mais úmidas para baixo. Assim, à medida que a massa de grãos vai descendo, ocorre elevação da temperatura do produto a níveis próximos a temperatura do ar de secagem, que normalmente é próxima de 70 °C. Aproximadamente, a uma altura de 0,50 metros é instalado um termostato, que ao constatar temperatura próxima de 70 °C aciona o sistema de descarga do silo secador, removendo a camada de grãos que está seca (BROOKER; BAKKER-ARKEMA, HALL, 1992; SILVA et al., 2000, apud SILVA; et al., 2001b).

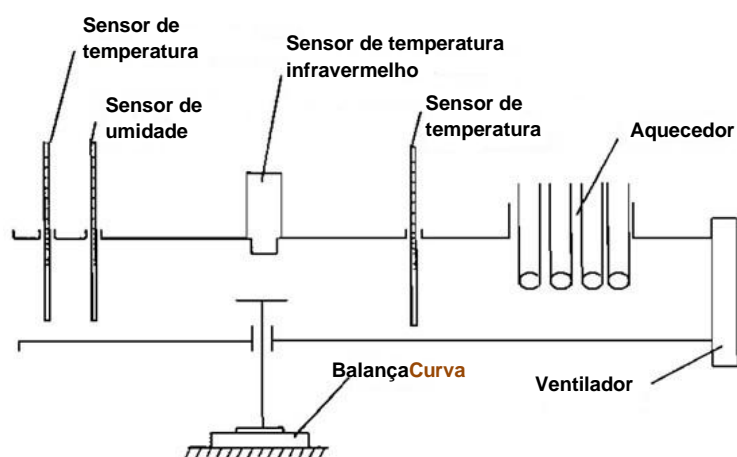
Estudos realizados por Thompson, Peart e Foster (1968) ao simular o funcionamento dos secadores de fluxos cruzados, concorrentes e contracorrentes, considerando um mesmo fluxo de ar e espessura de camada de milho, concluíram que são os de fluxos contracorrentes que apresentam maior capacidade de secagem. E as secagens em fluxos contracorrentes conduzidas em silos caracterizam por haver baixa perda de energia caso a espessura da camada de grãos seja suficiente para absorver o potencial de secagem do ar (BROOKER; McKENZIE; JOHNSON, 1978).

2.4 MODELOS PARA SIMULAÇÃO DE SECAGEM DE GRÃOS

2.4.1 Modelo para secagem de camada delgada

Díaz (2011), Farkas e Rendik (1997) ao descreverem os procedimentos experimentais de secagem em camada delgada, ressalta que o fluxo do ar de secagem, que cruza a camada com profundidade equivalente a um grão, deve possuir intensidade e condições psicrométricas constantes. Durante o experimento a massa e o teor de água da amostra, assim como, a vazão e as condições psicrométricas devem ser monitorados. Farkas e Rendik (1997) idealizaram o protótipo esquematizado na Figura 03 para condução desse tipo de experimento.

Figura 03 – Protótipo idealizado por Farkas e Rendik (1997) para secagem de camada delgada de grãos



Fonte: Díaz (2011, p. 31).

Por meio desse experimento é possível elaborar curvas de secagem, taxa de secagem e temperatura dos grãos (Figura 01), como também, a determinação das constantes das equações empíricas e semi-empíricas utilizadas na previsão da UE e URE (BROOKER; BAKKER-ARKEMA, HALL, 1992, DÍAZ, 2011).

As curvas de secagem em camada delgada variam conforme a espécie, variedade, condições ambientais, métodos de preparo pós-colheita, entre outros fatores. Nesse sentido, diversos modelos matemáticos têm sido utilizados para descrever o processo de secagem de produtos agrícolas, embora, na maioria das

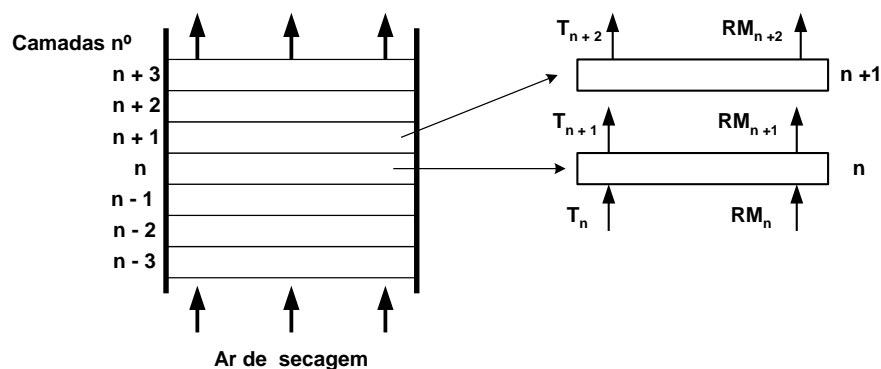
vezes, as relações semi-empíricas e empíricas têm-se mostrado como melhores opções para prever a secagem de grãos e sementes, apesar da validade das mesmas estar restritas às condições sob as quais os dados experimentais foram obtidos (BROOKER; BAKKER-ARKEMA, HALL, 1992).

Segundo Resende et al. (2010), as equações semi-empíricas têm como base a lei de resfriamento de Newton para transferência de calor por convecção, presumindo-se que, durante a secagem, as condições sejam isotérmicas e que a transferência de água seja restrita à superfície do produto.

2.4.2 Modelo e simulação de secagem em um leito de grãos

Segundo Gunasekaran e Thompson (1986), Misra e Brooker (1980) e Thompson, Peart, Foster (1968), na modelagem de um leito de grãos este pode ser tratado como formado por uma série de camadas delgadas sobrepostas (Figura 04). Dessa forma, o ar de secagem ao passar por uma das camadas delgadas terá as condições psicrométricas alteradas e a apenas a primeira camada receberá um fluxo de ar invariável.

Figura 04 - Ilustração de um leito composto por uma série de camadas delgadas (T e RM são temperatura e razão de mistura do ar de secagem, respectivamente) de Morey et al. (1978).



Fonte: Adaptado de Morey et al. (1978).

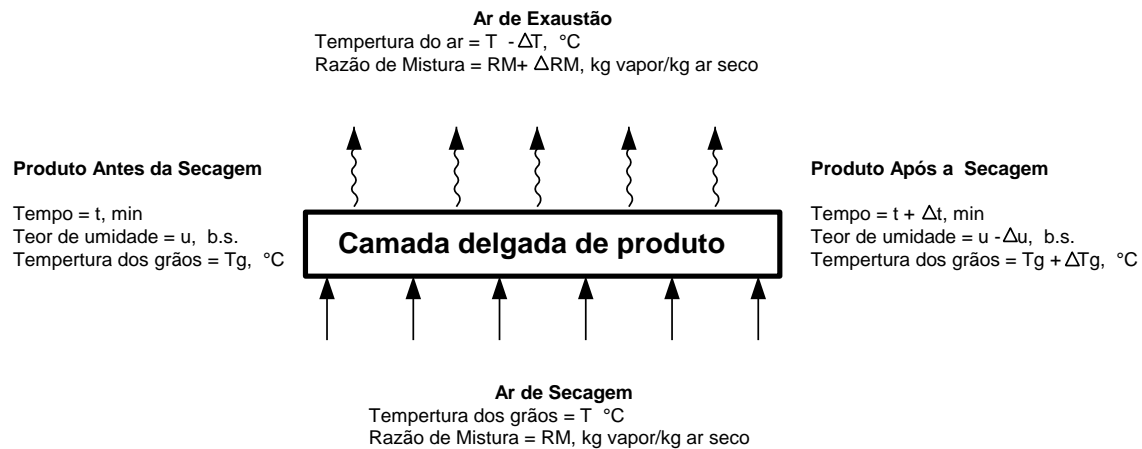
Para modelar as curvas de secagem de produtos em camada delgada, normalmente, são empregados modelos empíricos, como os modelos: Exponencial, Henderson e Pabis, Wang e Sing, Lewis, Page (ALVES et al., 2013; PARRA, 2015; RODRIGUES et al., 2008; RESENDE et al., 2010; QUEIROZ et al., 1986). Esses modelos, geralmente, são influenciados por variáveis externas ao produto, como a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem. Entretanto, não fornecem indicações sobre os fenômenos de transporte de energia e de água no interior dos grãos e consideram que todo o processo de secagem ocorre somente no período de taxa decrescente (RESENDE et al., 2010).

2.4.3 Modelo de Thompson

Thompson, Peart e Foster (1968) propôs um modelo matemático analítico para a simulação de secagem milho, caracterizado como semi-empírico ou semi-teórico por empregar equações termodinâmicas para descrever as trocas de calor e massa entre os grãos e o ar de secagem e uma equação empírica que descreve a curva de secagem em camada delgada (Figura 05) (QUEIROZ et al., 1986; PARRA; ROA; OLIVEROS, 2008, DALPASQUALE et al., 2007, apud VALENTE et al, 2012).

Conforme a Figura 05, ao ocorrer o incremento de tempo (Δt), para o ar será observado o decréscimo da temperatura de T para $T - dT$ e o aumento da razão de mistura de RM para $RM + dRM$. E para massa de grãos têm-se o aumento da temperatura de Tg para $Tg + dTg$ e a redução do teor de água de U para $U - dU$.

Figura 05 – Modelo conceitual das variações decorrentes do processo de secagem uma camada delgada de grãos durante um intervalo de tempo Δt .



Fonte: Thompson, Peart e Foster (1968, p. 1).

Esta metodologia de simulação de secagem leva em conta as condições do ar de secagem, os fluxos do ar e secagem e de grãos, as dimensões do secador o teor de água inicial do produto, e a simulação da secagem leva em conta a condução de vários pequenos processos, conforme o modelo conceitual de camada delgada (Figura 05). Para utilizar o modelo de Thompson, o leito de grãos é dividido em camadas delgadas, e para cada uma delas são promovidos dois balanços de massa e dois balanços de calor para as massas de grãos e de ar, a cada incremento de tempo Δt , até ser atingida a condição de parada, que poderá ser o teor de água final do produto ou o tempo de secagem (ALVES et al., 2013; DANTAS, 2007; PARRA; ROA; OLIVEROS, 2008; SILVA, 1991; VALENTE et al., 2012)

O modelo é flexível e permite integrar variáveis e parâmetros necessários para expressar o processo de secagem. O modelo completo é especialmente útil para o estudo dos diferentes sistemas de secagem e para projetar novos equipamentos (PARRA; ROA; OLIVEROS, 2008).

No desenvolvimento do modelo, Thompson, Peart, Foster (1968) tomaram por pressuposto: a secagem de uma camada delgada de produto pode ser descrita por uma equação obtida empiricamente; a temperatura do produto é igual à temperatura do ar que o envolve, após os balanços de energia, que consideram o resfriamento proveniente da evaporação da água do produto e das temperaturas da massa de

grãos e do ar; o teor de água de equilíbrio dos grãos depende da temperatura e da umidade relativa do ar nas vizinhanças destas; a entalpia de vaporização da água nas sementes depende da temperatura e do teor de água destas; a entalpia específica das sementes depende do teor de água (SOUZA; QUEIROZ; LACERDA FILHO, 2002). Para o caso da simulação de secagem de café arábica em coco, estas suposições são desenvolvidas no item 3.1.3.

2.5 MODELAGEM DE SIMULAÇÃO DE SISTEMAS

Para Law e Kelton (1991) um modelo aplicado à simulação visa replicar com precisão o comportamento de um sistema.

Para Law e Kelton (1991) e Silva (2002), o emprego da modelagem e simulação propicia: (a) projetar e analisar sistemas industriais, (b) prever resultados na execução de uma determinada ação, (c) reduzir riscos na tomada decisão, (d) identificar problemas antes das ocorrências, (e) eliminar procedimentos em arranjos industriais que não agregam valor à produção, (f) realizar experimentos, (g) reduzir custos com o emprego de recursos (mão de obra, energia, água e estrutura física), (h) revelar a integridade e viabilidade de projetos em termos técnicos e econômicos e (i) poder levar em conta a influência de fatores de comportamento aleatório.

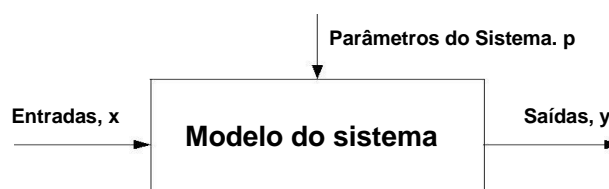
Os modelos podem ser físicos, como no caso do emprego de protótipos, ou simbólicos, que podem ser matemáticos ou não matemáticos. Os modelos não matemáticos apresentam como: (i) a descrição linguística do sistema, exemplo: memorial descritivo de um projeto elétrico; (ii) a elaboração de um gráfico, por exemplo: o fluxograma operacional de uma agroindústria (LAW; KELTON, 1991).

Quanto aos modelos matemáticos podem apresentar soluções analíticas ou soluções numéricas. A solução analítica, normalmente, emprega uma equação para descrever um processo, como por exemplo, as equações de regressão linear. Enquanto, às soluções numéricas requerem um conjunto de equações que são repetidamente recalculadas para descrição de um determinado processo, sendo

nesse caso recomendado o desenvolvimento de modelos computacionais empregando linguagens de programação como FORTRAN, C, Visual Basic™ e PASCAL, linguagens de simulação, como ARENA™, POWERSIM™ e EXTEND™, ou pacotes aplicativos - @RISK™, LINDO™ (LAW e KELTON, 1991; SILVA, 2002).

Na estruturação de modelos matemáticos aplicados a simulação, o sistema modelado deve se visualizados conforme a Figura 6, em que uma função f que produz as variáveis de saída y , a partir de variáveis de entrada x e os parâmetros do sistema p . Assim $y = f(x, p)$. Os parâmetros y , x e p podem ser uma única variável, ou um vetor ou ainda uma matriz.

Figura 6 - Visualização de um sistema quando da estruturação de modelos aplicados à simulação



Fonte: Menner (1995, p.7-13, apud FERNANDEZ, 2005, p. 12).

Segundo Begoña, 2012, Fernandes (2005), Law e Kelton, 1991, Silva, 2002, Silva et al. (2012); Urquía; (2008), os modelos aplicados a simulação podem ser classificados segundo: (i) o tipo das variáveis – determinístico ou estocástico – os estocásticos envolvem pelo menos uma variável aleatória, enquanto, os determinísticos não contem variáveis aleatórias; (ii) a variável tempo – estáticos e dinâmicos - os modelos dinâmicos descrevem as alterações de estado do sistema ao longo do tempo, enquanto, os estáticos são aplicados para prever os estado do sistema para um dado momento; e (iii) se dinâmicos, conforme o valor do incremento de tempo os modelos podem ser discretos ou contínuos. No modelo discreto o avanço de tempo dá-se mediante a ocorrência de um evento, enquanto nos modelos contínuos o avanço ocorre em incrementos Δt com valor fixo.

Segundo Fernandes et. al (2005), Silva, (2002), Urquía; (2008) quanto da implementação de modelos aplicados a simulação devem ser observadas as etapas:

- a. Reconhecimento do problema – consiste em identificar aspectos da realidade que constituem o sistema objeto de estudo.
- b. Formulação do problema – implica definir o porquê o sistema deve ser estudado e quais são os objetivos prosseguidos, selecionar os elementos do sistema relacionado ao objeto de estudo, delimitar o alcance do sistema, selecionar as variáveis de saída e entrada, determinar o horizonte temporal e definir os anseios do usuário final.
- c. Obtenção e analisar dados do sistema - implica em coletar parâmetros do sistema, valores das variáveis de entrada e saída, analisar as variáveis estatisticamente e definir as distribuições que as melhor representam as variáveis que fossem aleatórias.
- d. Formulação e desenvolvimento do modelo - Consiste em descrever as partes e funcionamento do sistema empregando um modelo conceitual, por exemplo, fluxogramas operacionais. Logo o modelo conceitual deve ser transcrito para a forma de modelo computacional usando linguagens de simulação. Desse modo, o modelo fica pronto para executar simulações.
- e. Verificação e validação do modelo – consiste em executar procedimentos a fim de verificar se o modelo opera apropriadamente e se a saída do modelo é acreditável e representativa do comportamento do sistema. Tanto na verificação como na validação, normalmente, é empregada a estatística descritiva e inferencial.
- f. Definição dos tipos de experimentos – em seguida da validação do modelo este pode ser empregado na condução de experimentos que forneçam a informação necessária para contestar as perguntas planteadas para o estudo, como: comparação de cenários, otimização, análise de sensibilidade e simulação de Monte Carlo. O experimento. Comparação de cenário quando o modelo simula vários cenários a serem comparados. Otimização ao selecionar um cenário que atenda ao critério ou critérios definidos pelo tomador de decisão como sendo o de condição ótima. Análise de sensibilidade quando é estudado o impacto sobre o desempenho do sistema ao serem alteradas uma ou mais variáveis de entrada ou parâmetro do sistema. E a simulação de Monte Carlo aplica-se aos modelos estocásticos, em que os valores das variáveis de saída são expressos segundo as

probabilidades de ocorrência. Normalmente o experimento consiste em certo número de réplicas da simulação conduzidas em condições bem estabelecidas.

- g. Estabelecimento das condições de uso – os valores simulados tem confiabilidade para situações específicas, em razão que o modelo é desenvolvido para simular sob determinadas condições e aspectos objetos de estudo, por tanto, não cabe utilizar o modelo para fazer extrapolações.

2.5.1 A Linguagem de simulação EXTEND™

O EXTEND™ é uma linguagem de simulação tipo orientada a objeto, desenvolvida pela empresa *Imagine That Inc.*, aplicado ao desenvolvimento de modelos discretos e contínuos (SILVA, 2002).

O usuário do EXTEND™ pode empregá-lo para rodar modelos desenvolvidos, criar os próprios modelos a partir de blocos padrões disponibilizados ou programar novos blocos ou modificar os códigos dos blocos existentes (FERNANDES, 2005; SILVA, 2002).

Os blocos podem ser programados para simular um processo, proceder a cálculos, enviar informações e criar gráficos. Sendo uma linguagem de simulação orientada ao objeto, o objeto é composto por: (i) o bloco que trata-se de um objeto que tem a aparência na tela do computador determinado por um ícone, (ii) as janelas de diálogo permitem ao usuário inserir dados ou acessar aos resultados (iii) conectores que possibilitam conectar dos blocos, a fim de repassar informações segundo estabelecido no código fonte (SILVA, 2002).

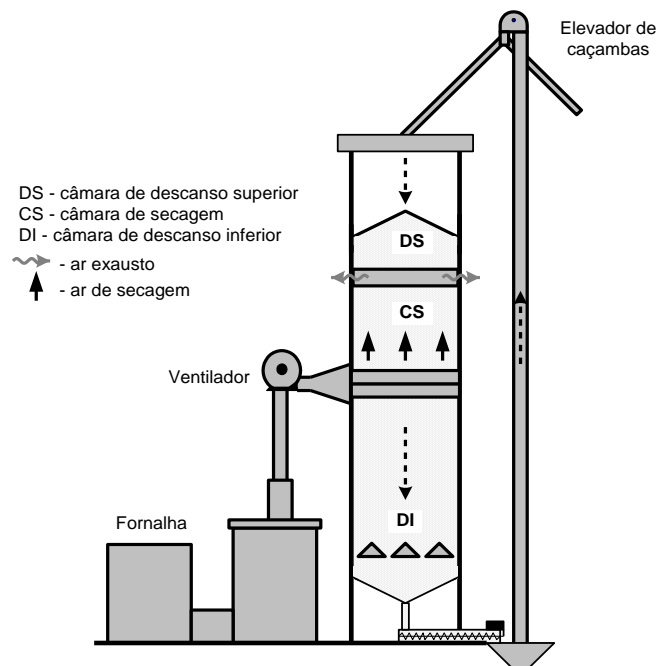
3 MATERIAL E MÉTODOS

Foi desenvolvido um modelo computacional para simular a secagem de café em coco em um secador intermitente de fluxos contracorrentes projetado, construído e avaliado experimentalmente por Silva (1991).

O secador (Figura 7) possuía capacidade estática de $2,7 \text{ m}^3$ de produto, correspondendo aproximadamente a 1.000 kg de café em coco com o teor de água próximo de 30%.

Conforme o desenho esquemático (Figura 7), o secador constitui-se de uma coluna em alvenaria, com seção interna quadrática de um metro quadrado ($1,0 \text{ m} \times 1,0 \text{ m}$). No sentido vertical a coluna é dividida em três câmaras. As câmaras de descanso inferior e superior possuem alturas de 1,2 e 0,3 m, respectivamente, enquanto a câmara de secagem 1,0 m.

Figura 7 – Representação esquemática do secador de fluxos contracorrentes, projetado e avaliado experimentalmente por Silva (1991).



Fonte: Silva (1991, p. 18)

Para o aquecimento do ar de secagem, emprega-se uma fornalha a lenha tipo fogo direto, que apresenta o consumo horário médio de 5,5; 7,5 e 8,9 kg de lenha por hora, para as temperaturas do ar de secagem de 60, 80 e 100 °C, respectivamente. Para os consumos citados implica na geração de 86.460, 117.900 e 139.908 kJ por hora (24,02; 32,75 e 38,86 kW), respectivamente. Isso ao considerar o poder calórico inferior igual a 15.591 kJ por kg de lenha de eucalipto (SILVA, 1991).

A insuflação do ar secagem é feita por meio de um ventilador centrifugo com capacidade de aplicar uma vazão de 18,50 m³ de ar por hora. E o sistema de movimentação de grãos conta com um transportador helicoidal localizada à base do secador, e um elevador de caçambas. Esses transportadores têm por finalidade promover a carga, descarga e recirculação do produto. A capacidade dos transportadores é de 0,13 m³ de produto por hora (SILVA, 1991).

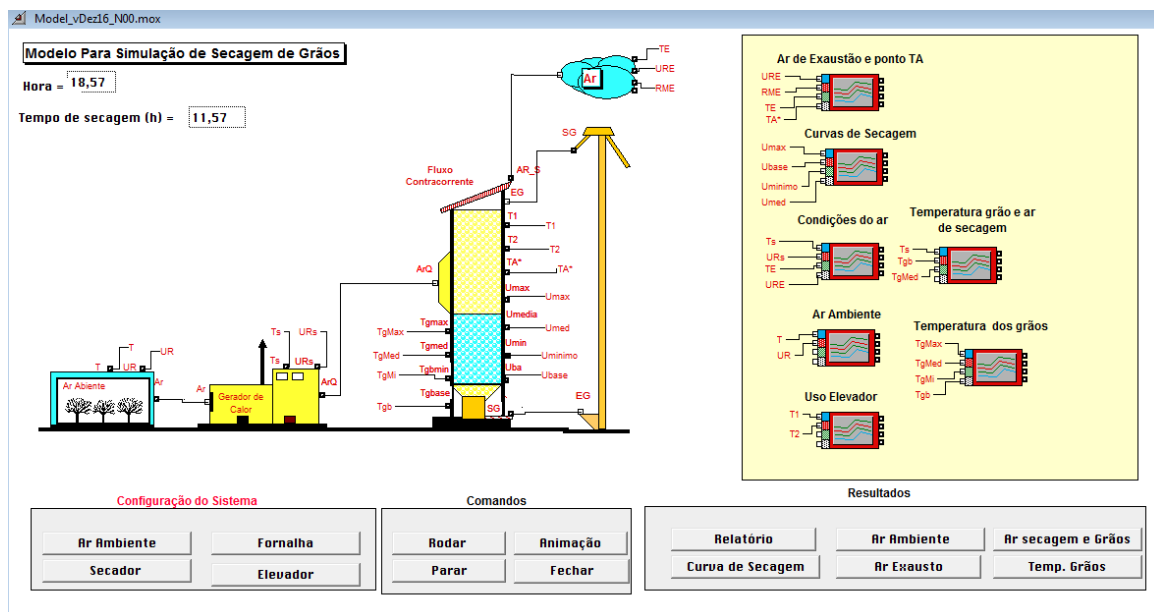
3.1 DESENVOLVIMENTO DO MODELO

Para o desenvolvimento do modelo computacional (Figura 8), foi empregado o programa EXTENDTM, que trata-se de uma linguagem de simulação, aplicada ao desenvolvimento de modelos discretos ou contínuos.

O modelo desenvolvido é classificado como determinístico, dinâmico e contínuo: determinístico por não envolver variáveis aleatórias; dinâmico por considerar a variável tempo e contínuo pelo fato da atualização do estado do sistema durante a simulação ser feito a cada incremento de tempo (Δt) com o valor fixo.

Conforme a Figura 8, na estruturação no modelo foram criados cinco blocos: “Ar Ambiente”, “Gerador de Calor”, “Secador”, “Elevador” e “Ar de Exaustão”.

Figura 8 – Janela principal do modelo desenvolvido.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.1.1 Bloco “Ar Ambiente”

Neste bloco são simulados os valores da temperatura e umidade relativa do ar ambiente durante o período de funcionamento do secador. Os valores simulados são calculados a cada Δt ao longo tempo de secagem simulado. Para o cálculo da temperatura e umidade relativa do ar ambiente foram empregadas as Equações 1 e 2, respectivamente. Essas equações foram obtidas por meio de regressões estatísticas considerando dados reais levantados por Silva (1991), em que os coeficientes de determinação (R^2) foram 0,76 e 0,80, respectivamente. Os dados reais correspondem aos valores de temperatura e umidade relativa do ar ambiente obtidos durante as realizações dos testes experimentais.

O dado de entrada do bloco “Ar Ambiente” é a hora em que foi iniciada a operação do secador.

$$Ta = \cos \frac{Hd.3,14}{24} + 0,95^3 + \sin \frac{Hd.3,14}{24} + 0,53^3 \quad (1)$$

$$URa = \cos \frac{Hd.3,14}{24} + 0,36^3 + \sin \frac{Hd.3,14}{24} + 0,84^3 \quad (2)$$

Em que:

- Ta - temperatura do ar ambiente, °C;.
- URa - umidade relativa do ar ambiente, %; e
- Hd - hora do dia, h.

Os valores da temperatura e da umidade relativa do ar ambiente são repassados por meio de conectores de linha ao bloco “*Gerador de Calor*” empregando um vetor com duas componentes.

3.1.2 Bloco “*Gerador de Calor*”

Neste bloco é simulado o processo de aquecimento do ar de secagem. Sendo necessário informar a temperatura do ar de secagem e o poder calorífico inferior do combustível utilizado.

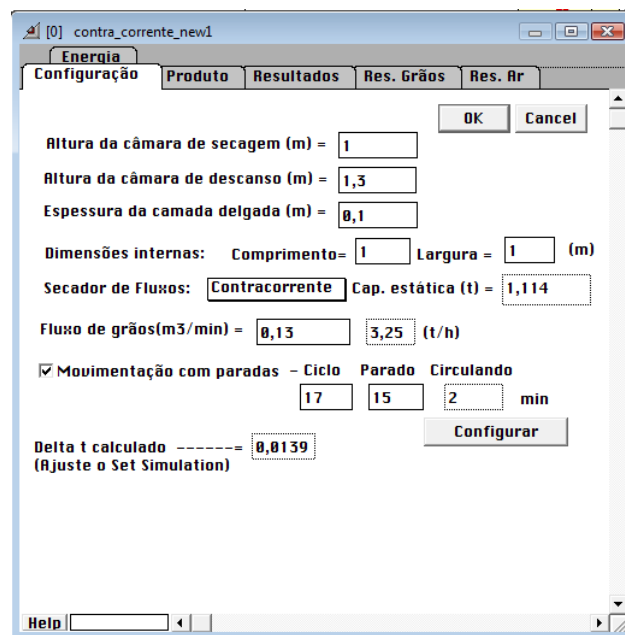
Tomando os dados informados e os repassados pelo bloco “*Ar Ambiente*” são calculadas para o ar de secagem: vazão mássica, umidade relativa, razão de mistura, pressão atmosférica. Esses valores calculados, e mais os valores da temperatura do ar de secagem e do poder calorífico inferior do combustível constituem um vetor repassado ao bloco “*Secador*” por meio de conectores e linha, (Figura 8).

3.1.3 Bloco “Secador”

O bloco “Secador” disponibiliza o acesso a seis janelas de diálogo (Figura 9), sendo duas para entrada de dados, “Configuração” e “Produto”, e quatro de saída de dados.

Por meio da janela de diálogo “Configuração” (Figura 9), promove-se a entrada de dados referentes às dimensões do secador e a vazão de produto. Nessa janela o usuário também configura o ciclo operacional. Esse ciclo tem a duração de dezessete minutos e compreende os tempos de movimentação e de parada do fluxo de produto pelo secador. Silva (1991) nos ensaios experimentais configurou o ciclo operacional em dois minutos de movimentação e quinze minutos de parada

Figura 9 – Janela de diálogo do bloco “Secador”.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por meio da janela de diálogo “Produto”, são definidas as condições iniciais do produto, como: teor de água, massa específica, quantidade e temperatura. Outro

fator a ser definido pelo usuário é a condição de parada da simulação, que pode ser: o teor de água final do produto ou o tempo de secagem.

Nas janelas de diálogo de apresentação de resultados, são disponibilizadas as seguintes informações: teores de água máximo, médio e mínimo do produto na câmara de secagem e na coluna do secador; perfis teor de água, temperatura e razão de umidade do produto ao longo da coluna do secador; perfis de temperatura, razão de mistura e umidade relativa do ar que percorre a extensão da câmara de secagem; consumos de lenha e energia calorífica; consumo específico de energia; taxa de secagem; tempo de secagem; e número de recirculação de produto pelo secador. Partes dessas informações são também disponibilizadas em conectores, que podem ser conectados a blocos geradores de gráficos e relatórios (Figura 8).

O código do bloco “*Secador*” foi transcrito considerando o Modelo de Thompson (THOMPSON; PEART; FOSTER, 1968). Desse modo, a coluna de grãos foi dividida em vinte e três camadas delgadas com 1,0 m de largura, 1,0 m de comprimento e 0,10 m de altura (Δx), correspondendo a 0,1 m³ de produto, aproximadamente 45 kg de café em coco. Das vinte e três camadas dez estão situadas na câmara de secagem e treze nas câmaras de descanso (Figura 10).

O Modelo de Thompson é dinâmico e contínuo, desse modo, para o modelo desenvolvido, o incremento fixo de intervalo de tempo Δt é calculado por meio da Equação 3.

$$\Delta t = \frac{\Delta x \cdot l \cdot c}{vg} \quad (3)$$

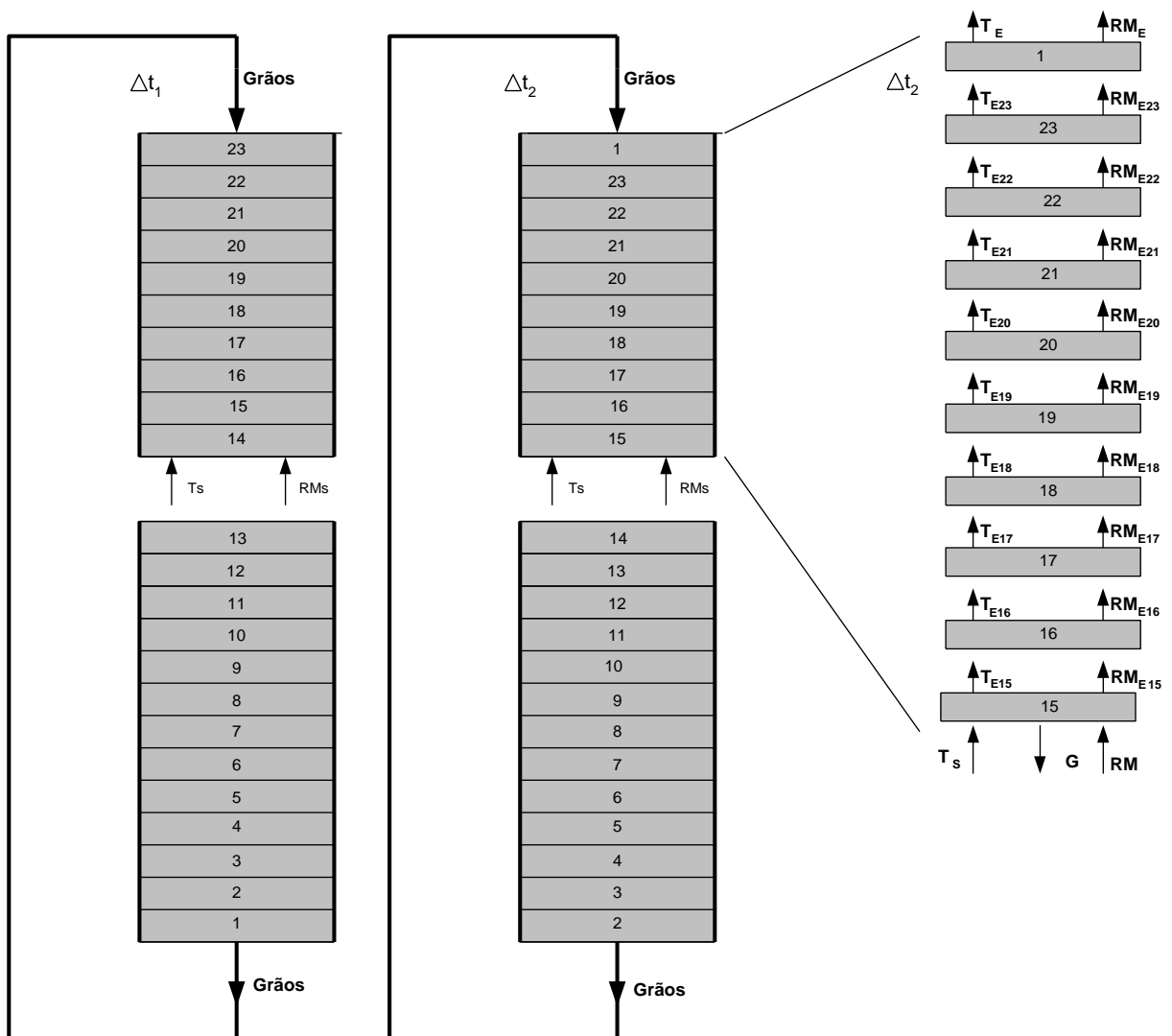
em que:

- Δt - valor do incremento de tempo, h;
- Δx - altura da camada delgada, m;
- l - largura da camada de grãos, m;
- c - comprimento da camada de grãos, m; e
- vg - vazão de grãos; m³ de produto. h⁻¹.

A cada Δt são simulados em cada camada delgada os balanços de massa e calor, conforme preconizado por Thompson, Peart e Foster (1968). Desses balanços, são definidas as temperaturas e os teores de água dos grãos; e as temperaturas e razão de mistura do ar exaurido de cada uma das camadas (Figura 10).

O ar exaurido de uma camada delgada é o ar de secagem da camada superior. As exceções são as camadas inferior e superior da câmara de secagem. Na camada inferior o ar de secagem tem as condições psicrométricas definidas pelo sistema de geração de calor. E para camada superior o ar exaurido corresponde ao ar de exaustão do secador.

Figura 10 – Representação das camadas delgadas na câmara de secagem do secador modelado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Também a cada Δt é verificado se ocorrerá à movimentação das camadas delgadas. Se confirmado, a camada delgada posicionada na base do secador é transportada para parte superior, e cada uma das demais camadas delgadas toma uma posição inferior, correspondente ao deslocamento descendente em Δx metros.

Definidos o número e as dimensões das camadas e o valor de Δt , os próximos cálculos referem aos balanços de calor e massa. Desse modo, considerando o Modelo de Thompson (THOMPSON; PEART; FOSTER, 1968), a configuração do secador empregado e o produto frutos do cafeeiro foi elaborado o seguinte algoritmo de cálculos:

Cálculo 1 – Razão das quantidades massas de matéria seca do produto e ar seco

A cada Δt , para cada uma das camadas de delgadas de grãos (Figura 06), é calculada a razão das quantidades massas de matéria seca do produto e de ar seco (Equação 4).

$$R = \frac{Me \cdot Ve \cdot A \cdot \Delta x}{Q \cdot \Delta t \cdot 60 \cdot (1 + U)} \quad (4)$$

em que:

- R = razão das quantidades massas de matéria seca do produto e de ar seco, kg de matéria seca do produto . kg^{-1} de ar seco;
- Me = massa específica aparente do produto, kg de produto . m^{-3} ;
- Ve = volume específico do ar, m^3 de ar . kg^{-1} de ar seco;
- A = área da camada delgada, m^2 ;
- Δx = espessura da camada delgada, m;
- Q = vazão do ar de secagem, $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$;
- Δt = incremento de tempo de secagem, h; e
- U = teor de água no tempo t da camada de café em coco, decimal base seca.

Cálculo 2 – Entalpia específica para café em coco (TASCON, 1984).

$$Eeg = 1,674 + 2,510 \frac{U}{U+1} \quad (5)$$

em que:

Eeg - entalpia específica do café em coco, $\text{kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Cálculo 3 – Temperatura de equilíbrio

Para a condição de equilíbrio, as temperaturas dos grãos e do ar tornam-se iguais, passando a ser denominada temperatura de equilíbrio. Nesse caso, é necessário proceder ao balanço de calor entre as massas de ar e de grãos, conforme proposto por Thompson, Peart e Foster (1968):

$$\begin{array}{l} \text{Balanço} \\ \text{de} \\ \text{Energia} \end{array} = \begin{array}{l} \text{Energia contida} \\ \text{na massa de ar} \\ \text{seco} \end{array} + \begin{array}{l} \text{Energia contida na} \\ \text{fração vapor de} \\ \text{água} \end{array} + \begin{array}{l} \text{Energia contida na} \\ \text{massa do produto} \end{array}$$

$$E = 0,24 \cdot T + 588 + 0,45 \cdot T \cdot RM + Eeg \cdot R \cdot 1 + U \cdot Tg$$

Portanto, ao proceder ao balanço antes e após o equilíbrio tem-se:

$$\begin{aligned} 0,24 \cdot T + 588 + 0,45 \cdot T \cdot RM + Eeg \cdot R \cdot 1 + U \cdot Tg \\ = 0,24 \cdot Te + 588 + 0,45 \cdot Te \cdot RM + Eeg \cdot R \cdot 1 + U \cdot Te \end{aligned}$$

em que:

- T = temperatura do ar na entrada da camada delgada, $^\circ\text{C}$;
 RM = razão de mistura do ar na entrada da camada delgada, kg de vapor / kg de ar seco;
 Tg = temperatura da massa de grãos, $^\circ\text{C}$; e
 Te = temperatura de equilíbrio, $^\circ\text{C}$.

E para determinar a temperatura de equilíbrio chega-se a Equação 6.

$$T_e = \frac{0,24 + 0,45.RM . T + Eeg.R. 1 + U . Tg}{0,24 + 0,45.RM + Eeg.R. 1 + U} \quad (6)$$

Cálculo 4 – Umidade relativa para condição de equilíbrio

Conforme a Equação 7 a umidade relativa para condição de equilíbrio é calculada em função da razão de mistura e da pressão de vapor no estágio de saturação calculada em função da temperatura de equilíbrio (THOMPSON; PEART; FOSTER, 1968).

$$UR = \frac{100.Patm.RM}{0.622 + RM . PVS} \quad (7)$$

em que:

- UR* - umidade relativa do ar, %;
- Patm.* - pressão atmosférica, Pa;
- RM* - razão de mistura do ar, kg de vapor. kg⁻¹ ar seco; e
- PVS* - pressão de vapor no estágio de saturação, à temperatura de equilíbrio, Pa.

Cálculo 5 – Teor de água para condição de equilíbrio (ARTEAGA, 1986).

$$U_e = 1,1298 \frac{-\ln(1 - UR)^{0,5405}}{T_e + 40,535} \quad (8)$$

em que:

- U_e* - teor de água do café em coco na condição de equilíbrio higroscópico, decimal de base seca;
- UR* - umidade relativa para condição de equilíbrio, decimal; e
- T_e* - temperatura do ar na condição de equilíbrio higroscópico, °C.

Cálculo 5 – Umidade relativa para condição de equilíbrio higroscópico

Deduzida da Equação 8.

$$UR_e = 1 - \text{Exp} -0.8851(T_e + 40,535)U_e^{1,85} \quad (9)$$

em que:

UR_e - umidade relativa para condição de equilíbrio higroscópico, decimal.

Cálculo 6 – Tempo equivalente

O tempo equivalente corresponde ao tempo de secagem necessário para alçar a razão de umidade atual (RU) se deste o início do processo de secagem condições do ar de secagem fossem as definidas pela temperatura de equilíbrio e razão de mistura. A equação 10, proposta por Pereira (1990), descreve empiricamente a secagem de uma camada delgada de café em coco e permite calcular o tempo equivalente.

$$t_{eq} = \frac{-\ln(RU)}{a \text{ Exp} \frac{-c}{T_{abs}}} \quad (10)$$

em que:

RU - razão de umidade atual, decimal;

t_{eq} - tempo equivalente para o café em coco, min;

T_{abs} - temperatura do ar na condição de equilíbrio higroscópico, K; e

a, b, c - constantes.

Os valores das constantes a , b e c são:

- Para o teor de água do café em coco entre 44 e 28% b.u.

$$a = 173.705;$$

$$b = 0,73681; e$$

$$c = 5.533,11.$$

- Para o teor de água do café em coco menor ou igual a 28% b.u.

$$\begin{aligned} a &= 105,756; \\ b &= 0,60564; \\ c &= 2.751,51. \end{aligned}$$

Cálculo 8 – Razão de umidade final

A nova razão de umidade do produto, após secagem para condições do ar T_e e RM , durante um Δt , é calculada por meio da Equação 11, deduzida da Equação 10.

$$RUf = \text{Exp}^{-a t_{eq}^b} \text{Exp}^{\frac{-c}{T_{abs}}} \quad (11)$$

em que:

RUf - razão de umidade final, decimal.

Cálculo 9 – Teor de água final

Trata-se o teor de água do produto decorrido o tempo de secagem $t + \Delta t$

$$Uf = RUf \cdot Uo - Ue + Ue \quad (12)$$

em que:

Uf - teor de água final, decimal base seca.

Cálculo 10 – Razão de mistura final

Corresponde ao valor da razão de mistura do ar após receber o aporte de água proveniente do produto decorrido o intervalo de tempo Δt .

$$RMf = RM + (Uo - Uf)R \quad (13)$$

em que:

RMf - razão de mistura final, kg de vapor/kg de ar seco.

Cálculo 11 – Entalpia específica de vaporização da água do produto, Silva (1991).

$$E_{evap} = 3.109,4 - 2,38 T_{abs} + 0,369 T_{abs}^2 U_e^{1,85} \frac{1 - UR_e}{UR_e} \quad (14)$$

em que:

E_{evap} - entalpia específica de vaporização de água do produto, kJ kg^{-1} .

Cálculo 12 – Temperaturas finais do ar e da massa de produto

Após a troca de massa entre o produto e o ar é feito um novo balanço de energia, sendo então, calculada a temperatura final do produto (Equação 15).

$$\begin{aligned} 0,24 \cdot T_e + 588 + 0,45 \cdot T_e \cdot RM + E_{eg.R.} \cdot 1 + U \cdot T_e + RM_f - RM \cdot T_e \\ = 0,24 \cdot T_f + 588 + 0,45 \cdot T_e \cdot RM_f + E_{eg.R.} \cdot 1 + U \cdot T_f \\ + RM_f - RM_o \cdot E_{evap} \end{aligned}$$

$$T_f = \frac{0,24 + 0,45 \cdot RM \cdot T_e + 588 + E_{evap} - T_e \cdot RM_f - RM + E_{eg.R.} \cdot 1 + U \cdot T_e}{0,24 + 0,45 \cdot RM_f + E_{ep.R.} \cdot 1 + U} \quad (15)$$

em que:

T_f = temperatura final do ar e da massa de grãos, °C.

Cálculo 13 – Análise da consistência do ar de exaustão

Pode ocorrer que para as condições psicrométricas definidas pela temperatura e razão de mistura final resulte no cálculo do valor da umidade relativa superior a 100%, sendo necessário ajustá-lo a 100%. Para essa correção da procede-se um novo balanço de energia, conforme descrito abaixo, sendo os valores

da temperatura e razão de mistura final ajustado (Tf' e RMf') por meio de um processo iterativo.

$$\begin{aligned} 0,24 \cdot Tf + 588 + 0,45 \cdot Tf \cdot RMf + Eeg \cdot R \cdot 1 + U \cdot Tf + RMf' - RMf \cdot Tf \\ = 0,24 \cdot Tf' + 588 + 0,45 \cdot Tf' \cdot RMf' + Eeg \cdot R \cdot 1 + U \cdot Tf' \end{aligned}$$

em que:

Tf' = temperatura final ajustada, °C; e

RMf' = razão de mistura final ajustada, kg de vapor. kg^{-1} de ar seco.

O processo iterativo empregado foi baseado no método de interpolação linear, em que incrementos positivos ou negativos foram feitos em Tf' e os valores de RMf' calculados por meio da Equação 16. O que foi feito até que os de Tf' e RMf' obtidos estivessem ajustados para a situação de umidade relativa 100%.

$$RMf' = \frac{0,24 \cdot Tf - Tf' + 588 - 0,55 \cdot Tf \cdot RMf + Eep \cdot R \cdot 1 + U \cdot (Tf - Tf')}{588 + 0,45 \cdot Tf' - Tf} \quad (16)$$

Após o ajuste de consistência, o excesso de água repassado ao ar deve ser reincorporado a massa de grão, conforme a Equação 17

$$Uf' = Uf - \frac{(RMf' - RMf)}{R} \quad (17)$$

3.1.4 Bloco “Elevador”

Este bloco foi desenvolvido para gerar relatórios quanto à movimentação de produto pelo secador durante a operação. Desse modo, a cada incremento de tempo Δt são reportados: o número de camadas e a quantidade de produto movimentada, o fluxo horário e o tempo de funcionamento do transportador.

3.1.5 Bloco “Ar de Exaustão”

Neste bloco são calculadas (ASAE, 1979) e reportadas propriedades psicrométricas do ar de exaustão em função da temperatura e razão de mistura do ar exaurido da camada superior do secador.

3.2 VALIDAÇÃO DO MODELO

Nos estudos de validação foram comparados dados obtidos experimentalmente por Silva (1991) e dados gerados pelo modelo desenvolvido.

Os procedimentos experimentais de Silva (1991) referem-se à condução de doze testes de avaliação do secador, utilizando temperaturas do ar de secagem de 60, 80 e 100 °C, sendo realizados quatro testes por nível de temperatura do ar de secagem. Os dados obtidos estão reportados na seção Apêndice.

Especificamente na validação foram comparados os seguintes parâmetros: teor de água final do produto, % b.u.; curvas de secagem; e consumo de lenha, kg.

Para comparação dos dados dos parâmetros teor de água final e o consumo de lenha, foi calculados: (i) o desvio absoluto médio (Equação 18), empregado por Silva (1991) para validação de modelagem de simulação de secagem de grãos café; (ii) o erro relativo (Equação 19) e o erro relativo médio (Equação 20), empregado por Dantas (2007), Rodrigues (2008), Silva (1991), Souza, Queiroz e Lacerda Filho (2002) para validar modelos de simulação de secagem de sementes, abacaxi em fatias, café e milho, respectivamente. As curvas de secagem foram comparadas observando os coeficientes de correlação (r).

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i - Y| \quad (18)$$

$$Er = \frac{Y - Y}{Y} \quad (19)$$

$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Y_i - Y|}{Y} \quad (20)$$

em que:

- D - desvio médio absoluto;
- Er - erro relativo, decimal; e
- P - erro médio relativo, decimal.
- n - número de observações;
- Y - valor real obtido; e
- Y - valor simulado;

3.3 EXPERIMENTAÇÃO COM O MODELO

Com a finalidade de avaliar os tempos de movimentação e de paradas adequados para cada nível de temperatura do ar de secagem e por outro lado a combinações da altura da câmara de secagem e altura da câmara de descanso, foi proposta a condução de experimentações com o modelo validado. Os experimentos referem a: (i) a comparação de vinte sete cenários correspondentes a três temperaturas do ar de secagem 60, 80 e 100°C versus nove combinações de tempos de movimentação e de paradas (Tabela 1) e, (ii) a comparação de dezoito cenários correspondentes a três temperaturas do ar de secagem 60, 80 e 100°C versus seis combinações da altura da câmara de secagem e altura da câmara de descanso (Tabela 2).

Tabela 1 – Cenários relativos à alteração dos ciclos de operação aos tempos de movimentação e de parada da circulação da massa de grãos.

Cenários	Tempo de movimentação (min)	Tempo de parada (min)	Parâmetros comparados
CO-I	1	16	▪ Tempo de secagem, h;
CO-II	3	14	▪ Consumo de lenha, kg;
CO-III	5	12	▪ Consumo específico de energia;
CO-IV	7	10	kJ.kg ⁻¹ de água evaporada;
CO-V	9	8	▪ Curvas de temperatura da massa de
CO-VI	11	6	grão; e
CO-VII	13	4	▪ Curvas de secagem
CO-VIII	15	2	
CO-IX	17	0	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 2 – Cenários relativos à alteração das dimensões da altura das câmaras de secagem e câmara de descanso de grãos em secador.

Cenários	Altura da câmara de secagem (m)	Altura da câmara de descanso (m)	Parâmetros comparados
CONF-I	1,0	1,3	▪ Tempo de secagem, h;
CONF-II	1,3	1,0	▪ Consumo de lenha, kg;
CONF-III	1,6	0,7	▪ Consumo específico de energia;
CONF-IV	1,9	0,4	kJ.kg ⁻¹ água evaporada;
CONF-V	2,2	0,1	▪ Curvas de temperatura da massa de
CONF-VI	2,3	0,0	grão; e
			▪ Curvas de secagem

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 3 apresenta os valores dos dados de entrada para condução dos experimentos de comparação de cenários, os mesmos foram fixados para configurar as mesmas condições operacionais.

Os dados de entrada referentes ao produto foram definidos considerando as propriedades físicas dos grãos de café observadas na região de Viçosa, empregados por Silva (1991).

Para serem simuladas a temperatura ambiente e umidade relativa do ar ambiente, fixou-se a hora de início da operação no bloco “*Ar ambiente*” secador. No bloco “Gerador de Calor” foi informado os dados de entrada: altitude e poder calorífico inferior do combustível, considerando-se a altitude da região de Viçosa e o poder calorífico inferior médio obtido nos experimentos conduzidos por Silva (1991).

Tabela 3 – Condições operacionais de secagem fixadas para experimentações.

Entrada de dados	Valores
Ar	
▪ Início da operação	9:30 h
▪ Altitude	620 m
Secador	
▪ Temperatura do ar de secagem	60, 80 e 100 °C
▪ Fluxo de grãos	0,13 m ³ de produto min ⁻¹ .m ⁻²
▪ Vazão de ar	18,50 m ³ de ar.h ⁻¹
▪ Poder calorífico do combustível	15.591 kJ.kg ⁻¹
▪ Ciclo operacional ⁽¹⁾	17 min (15 min movimentando e 2 min parado)
Produto	
▪ Massa da carga	1.080 kg
▪ Massa específica inicial	415 kg m ⁻³
▪ Temperatura inicial da massa de grãos	22,2 °C
▪ Teor de água inicial	30 % b.u.
▪ Teor de água final	12 % b.u.

Fonte: Elaborado pelo autor.

(1) Condição operacional fixada exclusivamente para o experimento 2 (alteração das dimensões da altura das câmaras de secagem e câmara de descanso de grãos em secador).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. VALIDAÇÃO DO MODELO

Para a validação do programa desenvolvido, foram simulados os doze testes experimentais conduzidos por Silva (1991). Como ocorreram interrupções nos testes 10 e 11, optou-se por partilha-los em: 10A e 10B; e 11A, 11B e 11C.

Nos ensaios experimentais identificados como testes 1, 2, 3 e 4, foi empregada a temperatura do ar de secagem de 60 °C; para os 5, 6, 7 e 8, 80 °C; e para os 9, 10A, 10B, 11A, 11B e 11C e 12, a 100 °C.

4.1.1 Teor de água final do produto

Conforme dados da Tabela 4, observa-se que os dados simulados para o teor de água final do produto assemelham aos dados experimentais. Especificamente, para os estratos de temperaturas do ar secagem de 60, 80 e 100 °C foram constatados desvios absolutos médio de 1,94, 1,75 e 2,95% b.u., respectivamente. E para o total dos testes o erro absoluto médio de 1,8% b.u., considerado satisfatório por Silva (1991); e um erro relativo médio de 11%, inferior ao considerado como satisfatório por Dantas (2007), Rodrigues (2008), Silva (1991), Souza, Queiroz e Lacerda Filho (2002), que é de no máximo 20%.

De modo geral pode-se verificar que os resultados simulados foram superiores aos experimentais. Os fatores de variabilidade das condições ambientais e operacionais ocorridas durante as experimentações conduzidas por Silva (1991), ou ainda da inadequação do escopo paramétrico, ou seja, coeficientes não representativos do processo, utilizados nas equações de camada delgada e de umidade de equilíbrio higroscópico dos produtos podem ter contribuído para que os

resultados simulados diferissem dos experimentais, situação observada nos testes 2, 8, 10A e 12 com erros relativos médios de 21, 26, 18 e 32, respectivamente.

Tabela 4 – Comparação dos valores experimentais e simulados de teor de umidade final.

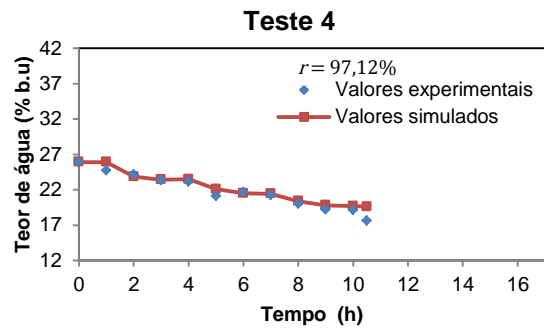
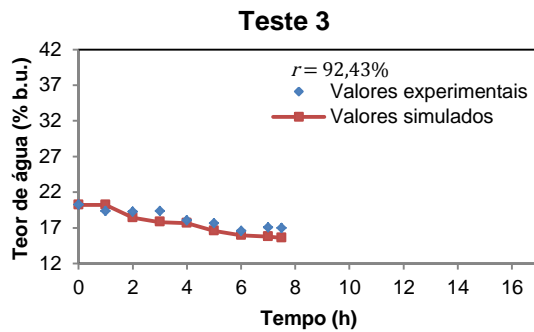
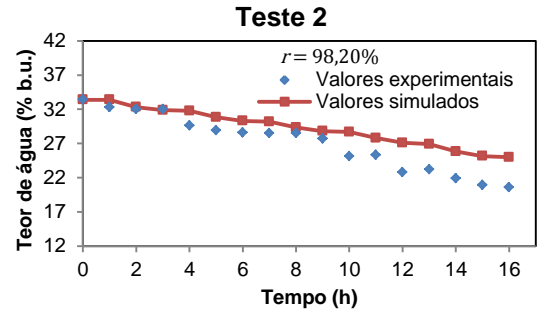
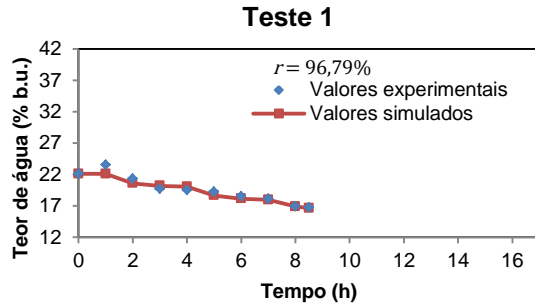
Temperatura de secagem (°C)	Teste	Teor de água (% b. u.)		Desvio Absoluto (%b.u)	Erros relativos (%)
		Experimental	Simulado		
60	1	16,7	16,6	0,1	00
	2	20,6	25,0	4,4	21
	3	16,9	15,6	1,3	08
	4	17,6	19,6	2,0	11
80	5	15,8	17,0	1,2	07
	6	14,4	16,2	1,8	12
	7	14,6	15,3	0,7	05
	8	13,0	16,4	3,4	26
100	9	15,6	16,4	0,8	05
	10A	25,1	29,7	4,6	18
	10B	15,8	14,6	1,2	08
	11A	26,8	25,9	0,9	03
	11B	19,2	19,2	0,0	00
	11C	12,7	12,6	0,1	01
	12	12,9	17,0	4,1	32
Valores médios:				1,8	11

Fonte: Dados de pesquisa

4.1.2 A Curvas de secagem

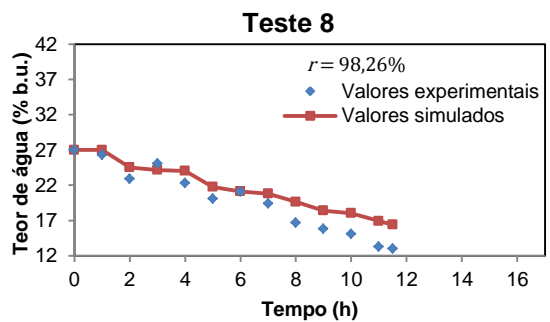
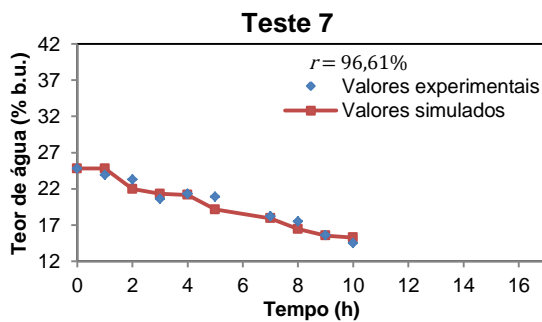
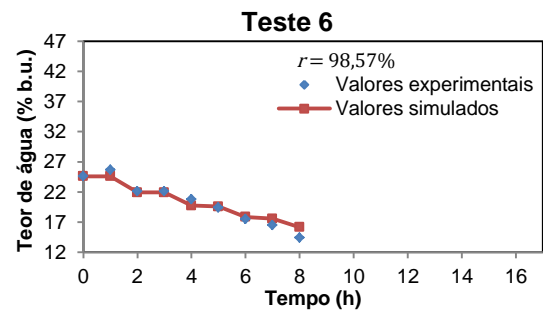
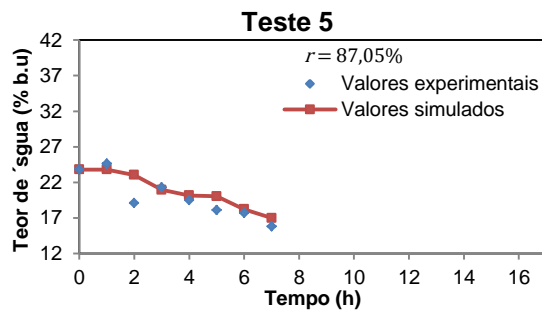
Nos Gráficos 01, 02 e 03 são apresentadas as curvas de secagem simuladas e os respectivos valores experimentais, e os coeficientes de correlação (r). Os valores dos teores de água do produto simulados e experimentais referem ao ponto de coleta de amostras localizado à saída do transportador helicoidal instalado na base do secador. Os valores de r foram entre 92,43% a 98,20% para temperatura do ar de secagem de 60 °C, entre 87,05% a 98,20% para 80°C e entre 95,84% a 99,96% para 100 °C. Valores que confirmam a boa precisão do modelo na previsão do teor de água do produto durante a condução do processo de secagem.

Gráfico 1 – Comportamento das curvas de secagem experimentais e simuladas para temperatura do ar de secagem de 60 °C.



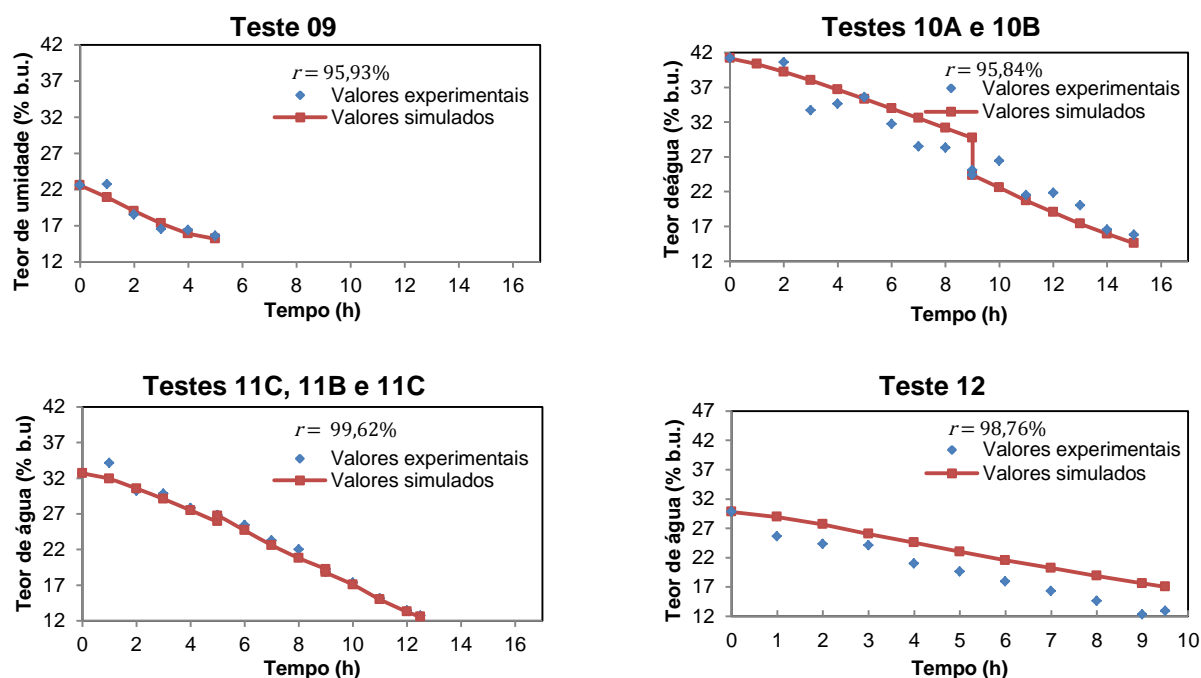
Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 2 – Comportamento das curvas de secagem experimentais e simuladas para temperatura do ar de secagem de 80 °C.



Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 3 – Comportamento das curvas de secagem experimentais e simuladas para temperatura do ar de secagem de 100 °C.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.3 A Consumo de lenha

Na validação do consumo de lenha os testes 10 e 11 não foram considerados devidos às interrupções durante a condução dos ensaios de campo. Desse modo, não houve como definir os dados de entrada a cada reinício dos processos secagem, fato que impossibilitou a simulação fidedigna do consumo de lenha.

Conforme o apresentado na Tabela 5 note-se que os dados simulados ajustam aos obtidos experimentalmente, sendo que as comparações de dados para as temperaturas de secagem de 60, 80 e 100 °C apresentam desvios absolutos médio de 1,20; 0,85 e 1,30 kg de lenha, respectivamente; e para o total de testes: o erro absoluto médio e o erro relativo médio foram 1,1 kg de lenha e 1,6%, respectivamente. Conforme as considerações de avaliação observadas para o parâmetro estudado no item 4.1.1, estes valores são satisfatórios para considerar o

modelo de simulação validado para prever o consumo de lenha, podendo assim ser utilizado em experimentos e processos de toma de decisão.

Tabela 5 – Comparação dos valores experimentais e simulados de consumo de lenha.

Temperatura de secagem (°C)	Teste	Teor de água (% b. u.)		Desvio Absoluto (%b.u)	Erros relativos (%)
		Experimental	Simulado		
60	1	46,8	46,72	0,1	00
	2	86,5	87,99	1,5	02
	3	41,8	41,19	0,6	01
80	4	55,1	57,70	2,6	05
	5	53,6	52,49	1,1	02
	6	59,3	60,00	0,7	01
	7	73,9	74,93	1,0	01
100	8	86,7	86,15	0,6	01
	9	40,0	40,05	0,1	00
	12	87,0	84,45	2,6	03
Valores médios:				1,1	1,6

Fonte: Dados de pesquisa

Neste caso, ao contrário do notado no parâmetro avaliado no item 4.1.1, para verificação geral dos resultados observam-se menores variabilidades, sendo as maiores obtidas para os testes 4, 12, 2 e 5, respectivamente. O que, possivelmente, é originada pelos mesmos fatores descritos para justificar as variações do parâmetro analisado no item 4.1.1.

4.2. EXPERIMENTAÇÃO COM O MODELO

4.2.1 Avaliação de cenários relacionados aos tempos de movimentação e de parada.

Considerando as especificações e parâmetros de comparação indicadas na Tabela 3, foram realizadas simulações para vinte e sete cenários para avaliar o desempenho do secador para as três temperaturas do ar de secagem variando os tempos de movimentação e parada do ciclo de operação; os resultados são apresentados na Tabela 6.

Conforme os dados (Tabela 6), é interessante ressaltar-se que os valores obtidos para o tempo de secagem, o consumo de lenha, e consumo específico de energia seguem tendências semelhantes, em que para o cenário CO-III, cinco minutos movimentando e doze minutos parado, foram constatados os maiores valores, enquanto os menores ocorrem para o cenário CO-I, um minuto movimentando e dezesseis minutos parado.

Os melhores desempenhos do sistema ocorreram para temperaturas do ar de secagem de 100 °C, pois ao aumentar a temperatura de 60 °C para 100 °C, o tempo de secagem, consumo de lenha e o consumo específico de energia reduziram de entre 58 a 64% para os cenários avaliados.

Observando as colunas dos parâmetros de teor de água e temperatura final dos grãos para as três temperaturas experimentais (Tabela 6), estes apresentam maior homogeneidade à medida que é aumentado o tempo de recirculação das camadas e é reduzida a temperatura do ar de secagem, o que é demonstrado ao serem avaliados os padrões das amplitudes, que tendem a ser menor à medida que é aumentado o tempo de recirculação e diminuída a temperatura do ar de secagem (Gráfico 4).

O número de recirculações (Tabela 6) torna-se maior à medida que se utiliza menores valores para temperatura do ar de secagem. O que está relacionado aos maiores tempos de secagem.

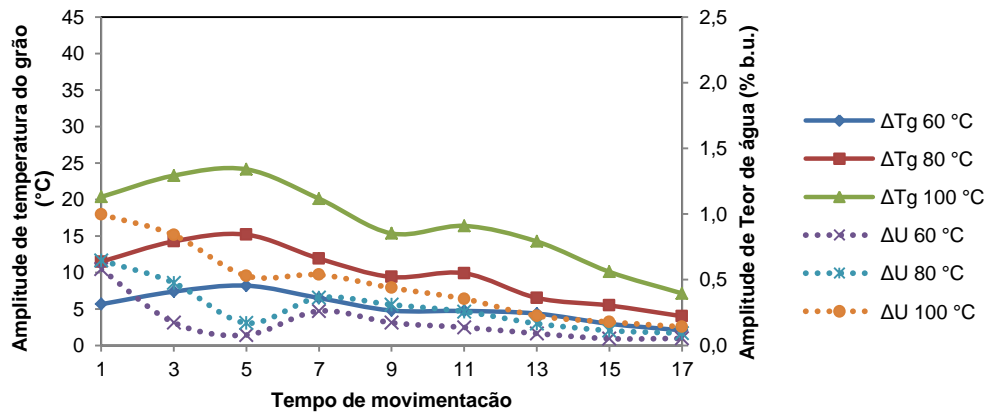
Conforme o Gráfico 5, o número de recirculação e o tempo de movimentação possui correlação positiva, e negativa em relação ao tempos de paralisação. Fatos que possivelmente influenciam os custos operacionais relativos à movimentação de grãos durante a secagem, pois quanto maior o número recirculações maior é o consumo de energia elétrica e as demandas por manutenções do elevador de caçamba e do transportador helicoidal.

Tabela 6 – Parâmetros de comparação do produto observados nos cenários simulados para as temperaturas de ar de secagem de 60, 80 e 100 °C, alterando os tempos do ciclo de operação.

Temperatura de ar de secagem (°C)	Cenário CO.	Teor de água final do produto (%)				Temperatura final do produto (°C)				Tempo de secagem (h)	Consumo de lenha (kg)	Consumo específico de energia (kJ.kg ⁻¹)	Número de recirculação do produto	Fluxo real de grãos (t/h)
		Máx.	Méd.	Mín.	Amplitude	Máx.	Méd.	Mín.	Amplitude					
60	CO-I	12,6	12,0	11,5	0,6	59,4	58,0	53,8	5,6	34,1	187,2	13211	5,6	0,19
	CO-II	12,2	12,0	11,9	0,2	59,3	56,9	52,0	7,4	40,3	221,7	15645	20,1	0,57
	CO-III	12,1	12,0	11,9	0,1	59,1	55,3	50,9	8,2	42,0	230,8	16287	34,8	0,95
	CO-IV	12,3	12,0	11,8	0,3	58,9	54,8	52,4	6,5	40,3	221,5	15631	53,5	1,33
	CO-V	12,2	12,0	11,8	0,2	58,7	55,3	53,9	4,8	38,9	214,0	15102	64,6	1,71
	CO-VI	12,1	12,0	11,9	0,1	58,5	55,2	53,8	4,7	39,4	214,0	15286	78,6	2,09
	CO-VII	12,1	12,0	11,9	0,1	57,7	54,7	53,3	4,4	40,3	221,6	15639	93,8	2,48
	CO-VIII	12,0	12,0	11,9	0,1	56,8	54,9	53,8	3,0	39,7	218,3	15406	105,6	2,86
	CO-IX	12,0	12,0	12,0	0,1	56,1	54,9	54,0	2,1	39,7	218,2	15397	112,2	3,24
80	CO-I	12,6	12,0	11,1	0,6	78,8	75,9	67,3	11,5	18,86	141,3	9959	3,1	0,19
	CO-II	12,5	12,0	11,6	0,5	78,5	73,6	64,3	14,3	22,8	171,1	12072	11,3	0,57
	CO-III	12,2	12,0	11,8	0,2	78,1	70,8	62,9	15,2	24,2	181,6	12816	20,0	0,95
	CO-IV	12,4	12,0	11,6	0,4	77,7	69,7	65,8	11,9	23,3	174,5	12314	30,9	1,33
	CO-V	12,3	12,0	11,7	0,3	77,3	70,5	67,9	9,4	22,4	168,0	11854	37,3	1,71
	CO-VI	12,3	12,0	11,7	0,3	76,9	70,4	67,0	9,9	22,8	170,8	12051	45,3	2,09
	CO-VII	12,2	12,0	11,8	0,2	73,8	69,6	67,3	6,5	23,5	176,0	12420	54,6	2,48
	CO-VIII	12,1	12,0	11,9	0,1	73,5	69,9	68,0	5,5	23,1	172,8	12195	61,3	2,86
	CO-IX	12,0	12,0	11,9	0,1	72,1	69,9	68,1	4,0	23,0	172,7	12187	65,1	3,24
100	CO-I	13,0	12,0	10,8	0,8	97,6	92,2	77,3	20,3	12,3	109,5	7660	2,0	0,19
	CO-II	12,8	12,0	11,3	0,5	97,2	89,2	73,9	23,3	15,2	135,4	9478	7,5	0,57
	CO-III	12,5	12,0	11,6	0,5	96,6	84,6	72,5	24,1	16,2	144,2	10143	13,4	0,95
	CO-IV	12,5	12,0	11,4	0,4	96,0	82,8	75,9	20,1	15,7	139,2	9820	20,7	1,33
	CO-V	12,4	12,1	11,6	0,4	95,1	83,9	79,8	15,3	15,1	134,3	9474	25,0	1,71
	CO-VI	12,3	12,0	11,6	0,4	94,6	83,8	78,3	16,4	15,4	136,9	9657	30,6	2,09
	CO-VII	12,2	12,0	11,7	0,2	92,0	82,3	77,8	14,2	5,9	141,6	9991	36,9	2,48
	CO-VIII	12,1	12,1	11,8	0,2	89,0	82,8	79,0	10,1	15,6	139,1	9814	41,5	2,86
	CO-IX	12,1	12,0	11,9	0,1	86,8	82,9	79,6	7,1	15,6	139,1	9812	44,2	3,24

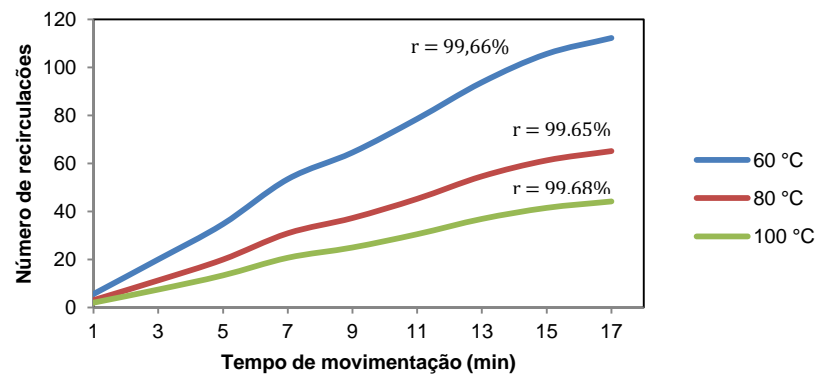
Fonte: Dados da pesquisa

Gráfico 4 – Variação das amplitudes dos parâmetros temperatura final (ΔT_g) e teor de água (ΔU) do produto segundo o tempo de movimentação da massa de grãos.



Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 5 – Tempo movimentação versus número de recirculações.



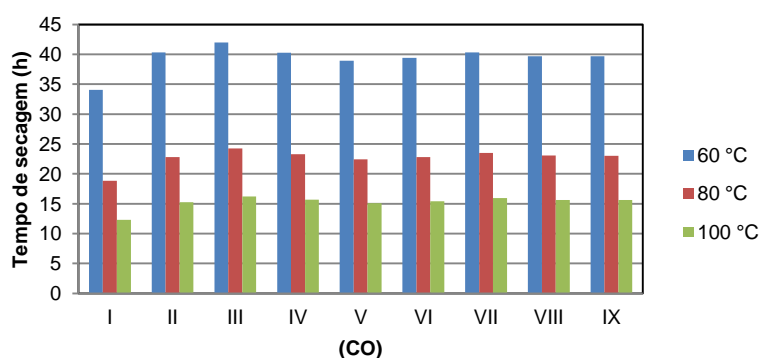
Fonte: Elaborado pelo autor

- Tempo de secagem versus cenários simulados

No Gráfico 6 é ilustrado os tempos de secagem para os nove cenários avaliados, considerando as três temperaturas do ar de secagem de 60, 80, e 100 °C. Nota-se que para o cenário CO-I, tempo de movimentação de um minuto e de

parada de dezesseis minutos, corresponde aos menores tempos de secagem e ocorre a tendência do aumento para os outros cenários, sendo os maiores valores correspondentes ao Cenário CO-III, em que o ciclo de operação corresponde a cinco minutos de movimentação e doze minutos de parada.

Gráfico 6 – Tempo de secagem simulado alterando os tempos do ciclo de operação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

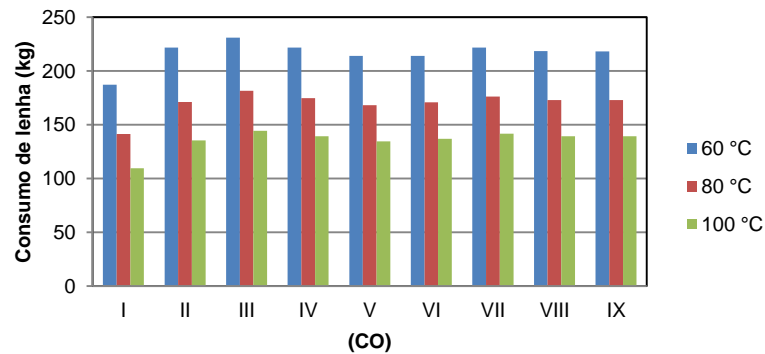
De acordo com o Gráfico 6, é evidenciada a importância da temperatura de secagem pelo forte impacto na redução do tempo de secagem, e consequentemente, nas reduções do consumo de lenha e no consumo específico de energia, (Tabela 6). Quanto à ocorrência do menor tempo de secagem (12,3 h), para a temperatura do ar de secagem de 100 °C (Cenário CO-I), isto pode ser atribuído a dois fatores, maior aporte de calor do ar de secagem e maior tempo de residência do produto na câmara de secagem (PUTRANTO et al., 2011).

O Cenário CO-V corresponde aos segundos menores tempos de secagem. Especificamente, para temperatura do ar de secagem de 100°C, contata-se para o Cenário CO-V o tempo de secagem 7% menor ao do Cenário CO-III, 16,2 h, e 20% maior ao do Cenário CO-I, 12,3 h. Neste caso, possivelmente, o maior tempo de residência dos grãos na câmara de descanso, após serem aquecidos na câmara de secagem, propiciou o desenvolvimento dos processos de difusão e migração de água no interior dos grãos facilitando a troca de massa ao ser submetido novamente ao processo de secagem. Essa é uma das vantagens da secagem intermitente ao utilizar câmara de descanso (PUTRANTO et al., 2011).

- Consumo de lenha versus cenários simulados

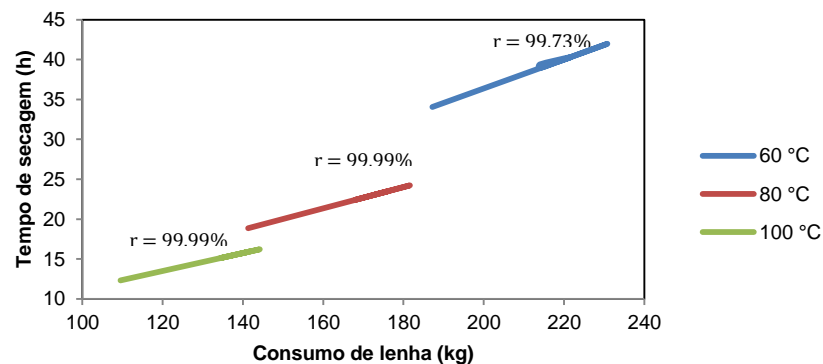
Analisando os consumos de lenha para as três temperaturas do ar de secagem, Gráfico 7 e 8, constatou-se o menor consumo para as maiores temperatura do ar de secagem, o que é resultante da ocorrência dos menores tempos de secagem, mostrando o menor consumo (109,5 kg) o cenário CO-I para a temperatura de ar de secagem de 100 °C. Para este estudo, foi constatado um r entorno de 99% entre tempo de secagem e consumo de lenha (Gráfico 8).

Gráfico 7 – Consumo de lenha simulada alterando os tempos do ciclo de operação.



Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 8 - Consumo de lenha versus tempo de secagem.



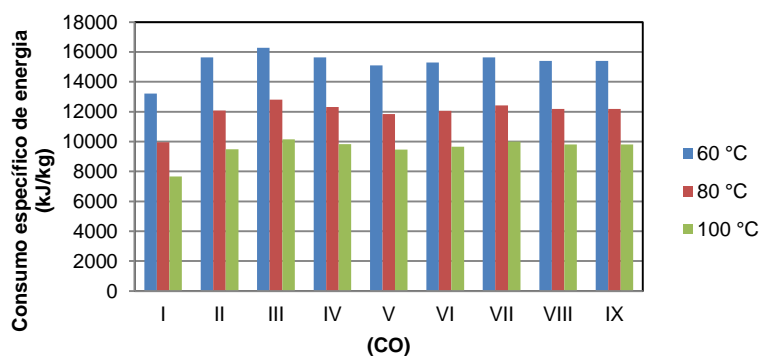
Fonte: Elaborado pelo autor

- Consumo específico de energia versus cenários simulados

O consumo específico de energia do sistema de secagem variou em função da temperatura do ar de secagem. Walker e Bakker-Arkema, (1978, apud LACERDA FILHO; SILVA, 2001) fundamenta a relação entre estes parâmetros, considerando os fluxos de ar e de grãos e mantendo determinada relação, ao se promover incrementos na temperatura do ar de secagem ocorre uma elevação na taxa de secagem.

Observe-se no Gráfico 9, uma variação mínima dentre os cenários para cada temperatura do ar estudada, sendo o cenário CO-I o que apresentou o menor consumo específico de energia para a secagem, variando dentre 7.660, 9.959 e 13.211 kJ.kg⁻¹ de água evaporada quando empregado as temperaturas do ar de secagem de 100, 60 e 60°C, respectivamente.

Gráfico 9 – Consumo específico de energia simulado alterando os tempos do ciclo de operação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Desse modo, Cenário CO-I corresponde aos melhores valores de consumo específico de energia por serem menores que os demais cenários (Gráfico 9), o que está diretamente associado aos menores tempos de secagem e consumos de lenha, efeito constatado por Walker e Bakker-Arkema, (1978, apud LACERDA FILHO; SILVA, 2001) ao conduzir experimentos de simulação de secagem de arroz em secador de fluxos concorrente.

Segundo Lacerda Filho e Silva, (2001) utilizando um protótipo de secador concorrente advertiu que a maior demanda de energia é utilizada durante a fase final de secagem. E isso foi verificado no modelo utilizando para as condições do Cenário CO-I ao ser empregada a temperatura do ar de secagem de 100 °C como é apresentado na Tabela 7,

Tabela 7 - Variação do consumo específico de energia simulado do cenário COI em temperatura de ar de secagem de 100 °C, alterando teor de água final do produto.

Teor de água final (%b.u.)	Consumo específico de energia – CEE (kJ. kg ⁻¹)	Variação do CEE (kJ. kg ⁻¹)	Variação do teor de água final (% b,u)	Razão entre variação do CEE e variação do teor de água (kJ.kg ⁻¹ .%b.u. ⁻¹)
24	6110	-	-	-
20	6272	162	4	41
16	6893	621	4	155
12	7660	767	4	192
11	7966	306	1	306
10	8305	339	1	339
9	8663	358	1	358
8	9054	391	1	391
5	11012	1958	3	653

Fonte: Dados da pesquisa,

Este fenômeno ocorre, possivelmente, em razão da maior dificuldade da migração de água no interior de grãos com teores de água menores, requerendo maior aporte de calor. Keener e Glenn (1978) ressaltam que dentre os fatores que afetam o consumo específico de energia durante a secagem, incluem-se os teores de água inicial e final do produto, a temperatura e as propriedades físicas dos grãos. Deve-se, também, considerar a temperatura e a umidade relativa do ar ambiente, a temperatura e a vazão específica do ar de secagem, a fonte de aquecimento e a resistência que os grãos oferecem à passagem do fluxo do ar de secagem.

- Capacidade de secagem versus cenários simulados

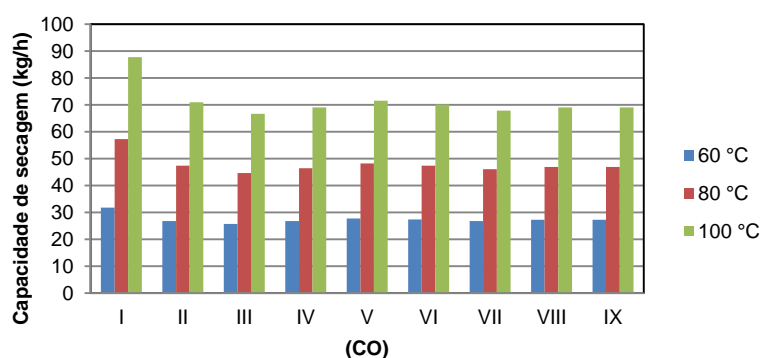
Observam-se no Gráfico 10 as capacidades de secagem para os cenários simulados. Devido à correlação direta entre tempo de secagem, foram constatados

os melhores valores para o Cenário CO-I, com 87,7; 57,3 e 31,7 kg.h⁻¹, seguido pelo Cenário CO-V com 71,5; 48,2 e 27,7 kg.h⁻¹ para as temperaturas de 100, 80 e 60 °C, respectivamente.

Comparando os valores de capacidade de secagem dos cenários CO-III e CO-I para temperaturas de 60 e 100°C, com valores de 25,7 e 68,6 kg.h⁻¹; e 31,7 e 87,7 kg.h⁻¹, respectivamente, observou-se que ao passar ao uso da temperatura do ar de secagem de 60°C para 100°C aumenta-se a capacidade de secagem em 40,8 kg.h⁻¹ para CO-III e 56,0 kg.h⁻¹ para CO-I, representando um incremento da ordem de 158,7% e 176,6%, respectivamente.

Ao considerar as temperaturas do ar de secagem de 60 a 100 °C constatou-se aumentos da capacidade de secagem de entre 153,7 – 176,4%, sendo a menor variação constatada no cenário CO-IX, 41,8 kg.h⁻¹ e a maior no cenário CO-I, 56 kg.h⁻¹.

Gráfico -10 – Capacidade de secagem simulada alterando os tempos do ciclo de operação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

- Temperatura da massa de produto versus cenários simulados

Observam-se no Gráfico 11 as curvas variação da temperatura da massa de grãos durante a secagem para os cenários simulados.

Dentre os cenários simulados, o cenário CO-I é o que apresenta os maiores valores de temperatura da massa de grãos, seguido do COI-II, resultado que pode estar associado ao maior tempo de residência na câmara de secagem. As curvas

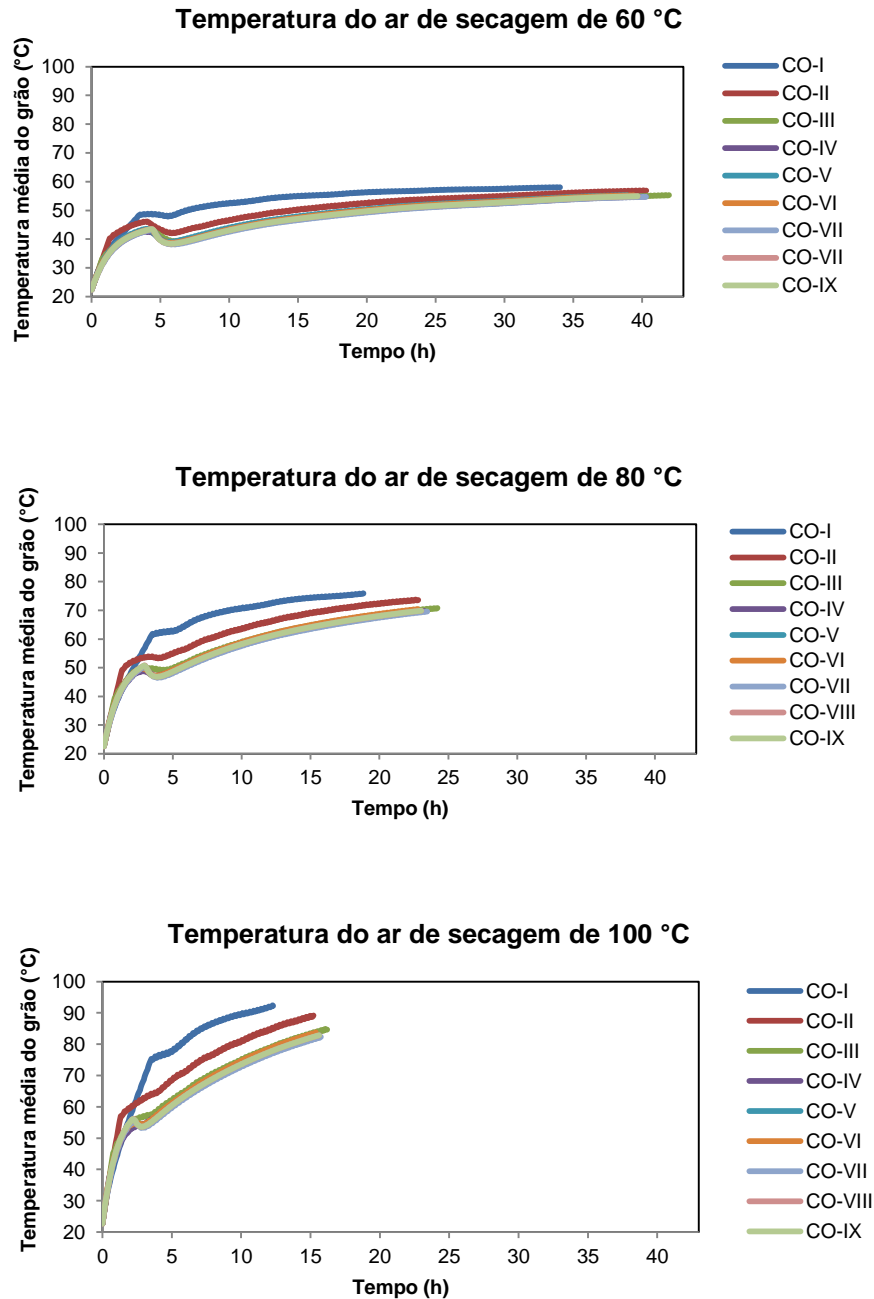
correspondentes a os demais cenários (CO-III – CO-IX) apresentam temperaturas da massa de grãos com valores próximos.

Considerando o tempo de secagem, e as três temperaturas experimentais do ar de secagem, constata-se que a temperatura da massa de grãos aumenta acentuadamente até atingir um ponto de inflexão em torno de 5,0 h, seguida de um ligeiro decréscimo até chegar ao entorno de 5,8 h, e a partir deste ponto a temperatura da massa de grãos volta a aumentar a uma taxa menor. Quanto ao formato das curvas uma possível explicação é que no início da secagem, em razão do maior teor de água as taxas de troca de calor entre o ar de secagem e os grãos são maiores, pois água tem maior condutividade térmica que a fração de matéria seca dos grãos. Assim, a temperatura da massa de grãos aumenta acentuadamente, e à medida que ocorre a redução do teor de água dos grãos o aumento da temperatura ocorre de forma menos acentuada.

A temperatura da massa de grãos demora em elevar-se, possivelmente pelo efeito da inércia térmica. Ao analisar as curvas de temperatura média da massa de grãos simulada para CO-I, observa-se que ocorreu um aumento significativo após 24,2; 14,3 e 9,6 h de secagem para as temperaturas de secagem de 60, 80 e 100 °C, respectivamente; e para o resto dos cenários esse aumento de temperatura fica entorno das faixas de 28,6 a 31,0; 17,2 a 18,6 e 11,9 a 12,7 h de secagem para as temperaturas de secagem de 60, 80 e 100 °C, respectivamente, o que correspondeu ao teor de água do produto ao redor de 15% b.u. para as duas descrições; valores que estão de acordo com Brooker, Bakker-Arkema e Hall (1992) ao assegurarem que os grãos só começam a apresentar elevação expressiva de temperatura caso o teor de água esteja ao redor de 14,5%.

Segundo Pinho et al. (2014) é possível inferir que a variação da temperatura da massa dos grãos é influenciada diretamente pela entalpia específica da água por ser maior que a do grão. Assim, para uma mesma quantidade de calor fornecida a uma massa de água e a uma massa de grãos, este última terá maior elevação da temperatura. Isso é evidenciado em grãos com alto teor de água, quanto se tem menor variação de temperatura, como na fase de taxa de secagem constante.

Gráfico- 11 – Temperaturas médias da massa simuladas alterando os tempos do ciclo de operação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

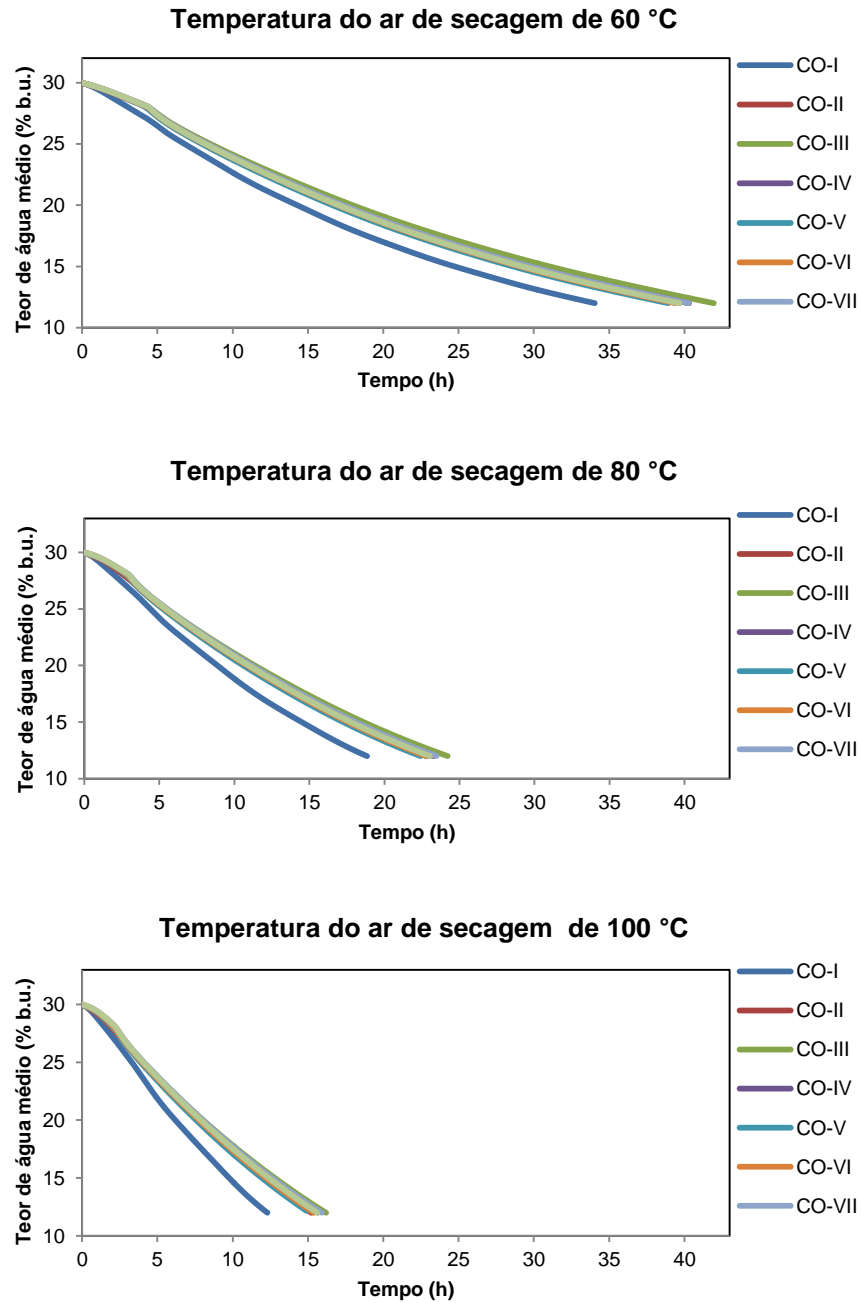
- Curvas de Secagem versus cenários simulados

Analisando as curvas de secagem para as temperaturas experimentais dos cenários simulados, é observado que a secagem do produto desenvolve a taxa de secagem decrescente, diferenciando-se os cenários CO-I em relação aos demais

cenários (CO-II – CO-IX) por proporcionar menores tempos de secagem de 12,3; 18,9 e 34,1 h para as temperaturas do ar de secagem de 100, 80 e 60 °C, respectivamente. Enquanto, nos demais cenários, para os tempos simulados para cada temperatura de secagem, foram constatado valores de teor de água final nas faixas de 13,3 a 14,0% b.u.; 13,9 a 14,8% b.u. e 14,6 a 15,5% b.u. para as temperaturas do ar de secagem de 100, 80 e 60 °C, respectivamente.

O destaque do cenário CO-I pode ser justificado pela redução do tempo de movimentação o que implica em maior tempo de residência na câmara de secagem. No entanto, isso não se aplica a todos os cenários, por exemplo, o cenário CO-V tempo de movimentação nove minutos e de parada de cinco minutos, corresponde aos segundos melhores desempenho. Desse modo, por este experimento não é possível afirmar que em razão do maior tempo de residência do produto na câmara de secagem, maiores serão as taxas de secagem, pois, possivelmente, outros fatores também influenciem na eficiência da secagem, como é a difusão da água do interior durante tempo de repouso da massa de grãos na câmara de descanso, fato ressaltado por Elias, Oliveira e Schiavon (2010, apud MENEGHETTI et al., 2012) para secagem intermitente de arroz.

Gráfico 12 – Curvas de secagem simuladas alterando os tempos do ciclo de operação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.2 Avaliação de cenários relacionados às dimensões das câmaras de secagem e descanso

Levando em conta as condições e parâmetros de comparação indicadas na Tabela 3, foram realizadas simulações para dezoito cenários a fim de avaliar o desempenho do secador para as três temperaturas do ar de secagem variando a combinação das dimensões das câmaras de secagem e descanso; os resultados são expostos na Tabela 8.

Ao analisar os dados da Tabela 8 constata-se que os valores do tempo de secagem, o consumo de lenha, o consumo específico de energia diminuem à medida que ocorre o aumento da altura da câmara de secagem. Os melhores desempenhos do secador para as três temperaturas do ar de secagem correspondem aos cenários CONF-VI, em que é suprimida a câmara de descanso, e a massa de grãos, a cada quinze minutos é movimentada por dois. Possuindo os maiores valores de eficiência o cenário CONF-VI para a temperatura de ar de secagem de 100 °C.

Como foi mencionado no item 4.2.1, o número de recirculação impacta nos custos do uso do transportador helicoidal e do elevador de caçambas. Observando os resultados (Tabela 8), pode-se notar que quanto maiores são a temperatura do ar de secagem e a altura da câmara de secagem, menor é o número de recirculações do produto, sendo que o menor número de recirculação é 3,7, correspondente ao cenário CONFIG-I, possuindo então a maior eficiência em custo de consumo de energia elétrica e demandas de manutenção do elevador de caçamba e do transportador helicoidal.

Observa-se também que para uma mesma configuração do secador, o emprego de menores temperaturas do ar de secagem implica em maiores números de recirculações o que pode ocasionar maiores índices de grãos danificados por choques mecânicos.

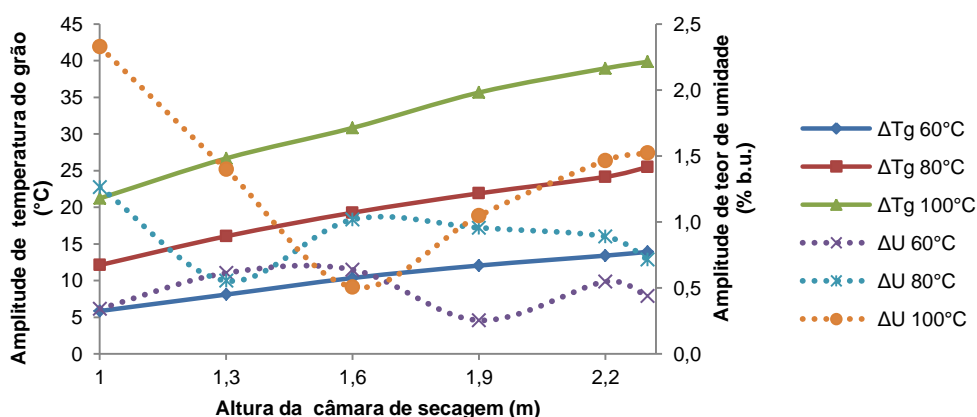
Tabela 8 – Parâmetros de comparação do produto observados nos cenários simulados para as temperaturas de ar de secagem de 60, 80 e 100 °C, alterando as alturas das câmaras de secagem e de descanso.

Temperatura de ar de secagem (°C)	Cenários CONF.	Alturas das câmaras (m)		Teor de água final do produto (%)				Temp. final do produto (°C)				Tempo de secagem (h)	Consumo de lenha (kg)	Consumo específico de energia kJ. kg ⁻¹	Número de recirculação do produto
		Secagem	Descanso	Máx.	Méd.	Mín.	Ampl.	Máx.	Méd.	Mín.	Ampl.				
60	CONF-I	1,0	1,3	12,2	12,0	11,8	0,3	59,4	57,7	53,6	5,9	37,9	208,0	14707	11,9
	CONF-II	1,3	1,0	12,3	12,2	11,7	0,6	59,4	56,7	51,3	8,1	33,0	181,5	12808	10,4
	CONF-III	1,6	0,7	12,3	12,0	11,7	0,6	59,4	55,2	49,0	10,4	30,1	165,3	11666	9,4
	CONF-IV	1,9	0,4	12,1	11,9	11,8	0,3	59,4	53,5	47,3	12,1	28,2	154,8	10925	8,9
	CONF-V	2,2	0,1	12,3	11,9	11,8	0,5	59,4	51,9	46,0	13,4	27,0	148,1	10452	8,4
	CONF-VI	2,3	0,0	12,3	11,9	11,8	0,4	59,3	51,2	45,4	13,9	26,6	146,4	10331	8,3
80	CONF-I	1,0	1,3	12,7	12,4	11,4	1,3	78,7	75,2	66,6	12,1	21,1	158,1	11149	6,6
	CONF-II	1,3	1,0	12,2	12,2	11,7	0,6	78,7	73,1	62,6	16,0	19,1	143,0	10070	6,0
	CONF-III	1,6	0,7	12,5	11,9	11,5	1,0	78,7	70,5	59,4	19,3	18,0	135,1	9512	5,7
	CONF-IV	1,9	0,4	12,5	11,8	11,5	1,0	78,7	67,8	56,8	21,9	17,3	129,5	9119	5,4
	CONF-V	2,2	0,1	12,4	11,6	11,5	0,9	77,9	64,3	53,7	24,1	16,9	126,6	8914	5,3
	CONF-VI	2,3	0,0	12,3	11,7	11,6	0,7	78,6	63,3	53,1	25,5	16,7	125,4	8830	5,2
100	CONF-I	1,0	1,3	13,1	13,0	10,8	2,3	97,7	91,7	76,5	21,2	14,0	124,7	8719	4,3
	CONF-II	1,3	1,0	12,5	12,4	11,1	1,4	97,6	87,8	70,9	26,7	13,0	116,0	8081	4,1
	CONF-III	1,6	0,7	12,2	12,1	11,7	0,5	97,3	83,7	66,5	30,8	12,6	112,0	7797	3,9
	CONF-IV	1,9	0,4	12,6	11,7	11,5	1,0	97,4	78,7	61,8	35,7	12,2	108,5	7557	3,8
	CONF-V	2,2	0,1	12,9	11,6	11,5	1,5	97,4	74,3	58,5	39,0	12,1	107,6	7491	3,7
	CONF-VI	2,3	0,0	12,9	12,0	11,4	1,5	97,0	71,7	57,1	39,8	12,0	106,7	7433	3,7

Fonte: Dados da pesquisa,

Analisando os valores dos parâmetros de teor de água e temperatura final dos grãos (Gráfico 13), observa-se que para as temperaturas do ar de secagem 60, 80 e 100°C, os valores de variação das amplitudes dos teores de água final da massa de grãos (ΔU) não possuem uma tendência definida em relação à variação da altura da câmara de secagem. No entanto, as variações das amplitudes de temperaturas finais da massa de grãos (ΔT_g) apresentam correlação positiva em relação ao aumento da altura da câmara de secagem, o que está associado ao aumento do tempo de residência, isso significa que, quanto maior altura da câmara de secagem e temperatura do ar de secagem implicaram maiores valores de amplitude de temperatura da massa de grãos.

Gráfico 13 – Variação das amplitudes dos parâmetros temperatura final (ΔT_g) e teor de água final (ΔU) do produto segundo a altura da câmara de secagem.



Fonte: Elaborado pelo autor

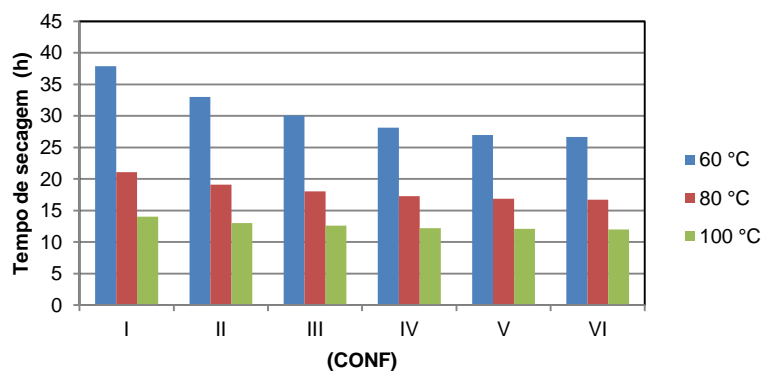
- Tempo de secagem versus cenários relativos à configuração do secador

De acordo com o Gráfico 14, nota-se correlação inversa entre os valores de tempos de secagem e a altura da câmara de secagem, ou seja, para os cenários CONF-VI; V e IV, que possuem altura da câmara de secagem de 2,3; 2,2 e 1,9 m, respectivamente, constataram-se os menores tempos de secagem para as três temperaturas do ar de secagem de 60, 80 e 90 °C, especificamente, para

temperatura do ar de secagem de 100°C os tempos de secagem foram de 12,0; 12,1 e 12,2 h, respectivamente.

Esses resultados podem ser justificados considerando o argumentado no item 4.2.1, podendo ser atribuído a dois fatores, o maior aporte de calor do ar de secagem e o maior tempo de residência na câmara de secagem de maior altura. Associa-se também a esse fato a influência do ciclo operacional com tempo de movimentação de dois minutos e de parada de quinze minutos.

Figura 14 – Tempo de secagem simulados alterando as alturas das câmaras de secagem e de descanso.



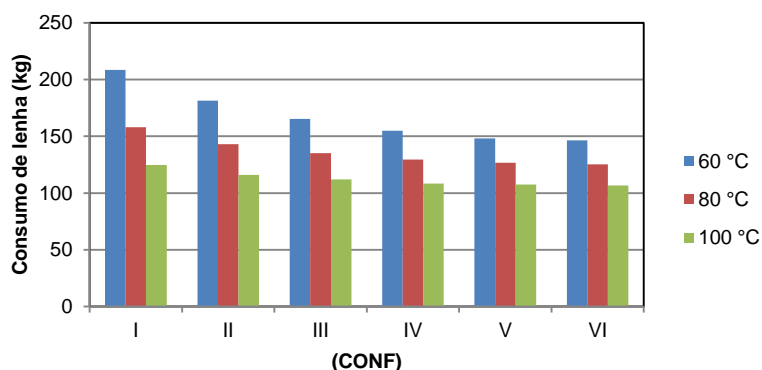
Fonte: Elaborado pelo autor.

- Consumo de lenha e consumo específico de energia versus cenários simulados.

Analisando os consumos de lenha dos cenários avaliados para as três temperaturas experimentais (Gráfico 15), observaram-se os menores consumos ocorreram para maior temperatura do ar de secagem e a maior altura da câmara de secagem. Fato evidenciando, por exemplo, para os cenários CONF-VI, V e IV, em que para a temperatura de ar de secagem de 100 °C foi constatado consumos de lenha de 106,7; 107,6 e 108,5 kg, respectivamente.

Esse fato condiz aos aumentos das taxas de secagem decorrentes dos aumentos das alturas das câmaras de secagem, cenários CONF-I ao CONF-VI (Tabela 8), para as três temperaturas do ar de secagem 60, 80 e 100 °C.

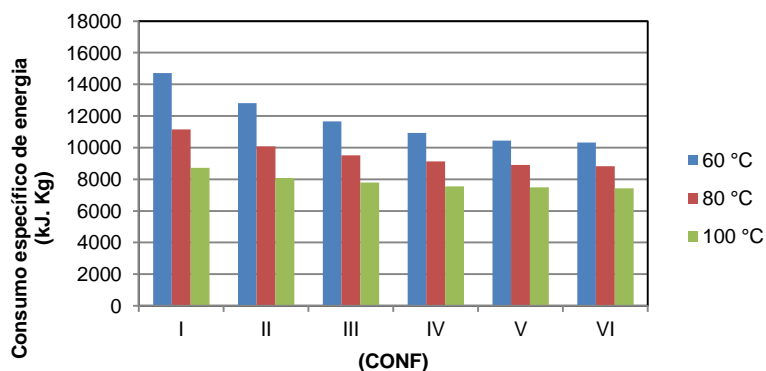
Gráfico 15 – Consumo de lenha simulada alterando as alturas das câmaras de secagem e de descanso.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Desse modo, ao associar os aumentos das taxas de secagem e menores consumos de lenha, conforme os cenários simulados constatam-se melhores desempenhos do secador quanto ao consumo específico de energia, (Gráfico 16).

Gráfico 16 – Consumo específico de energia simulado alterando as alturas das câmaras de secagem e de descanso.



Fonte: Elaborado pelo autor.

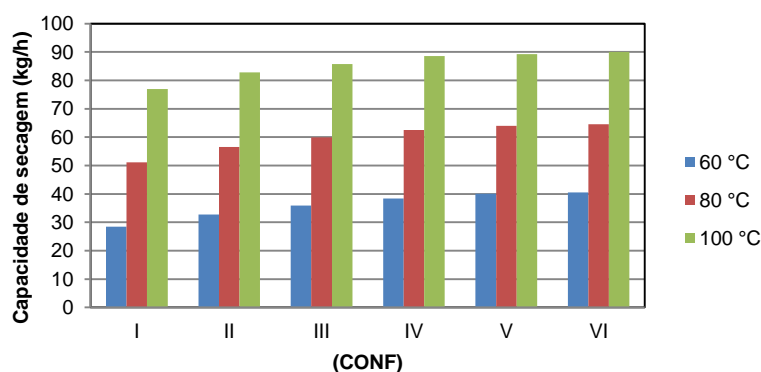
- Capacidade de secagem versus cenários relativos à configuração do secador

O aumento capacidade de secagem apresenta correlação positiva ao aumento da altura da câmara de secagem (Gráfico 17), segundo aos três níveis de temperaturas do ar de secagem de 60, 80 e 100 °C. Por tanto, os maiores valores de capacidade de secagem foram constatados para os cenários CONF-VI e dentre

estes o correspondente a temperatura do ar de secagem de 100 °C apresenta o maior valor.

Comparando os valores de capacidade de secagem dos cenários CONF-I e CONF-VI para temperaturas de 60 e 100°C, com valores de 28,5 e 77,0 kg.h⁻¹; e 40,5 e 90,0 kg.h⁻¹, respectivamente, observou-se que ao passar do uso da temperatura do ar de secagem de 60°C para 100°C aumenta-se a capacidade de secagem em 48,5 kg.h⁻¹ para CONF-I e 49,5 kg.h⁻¹ para CONF-VI, representando um incremento da ordem de 170,1% e 122,0%, respectivamente.

Gráfico 17 – Capacidade de secagem simulada alterando as alturas das câmaras de secagem e de descanso.

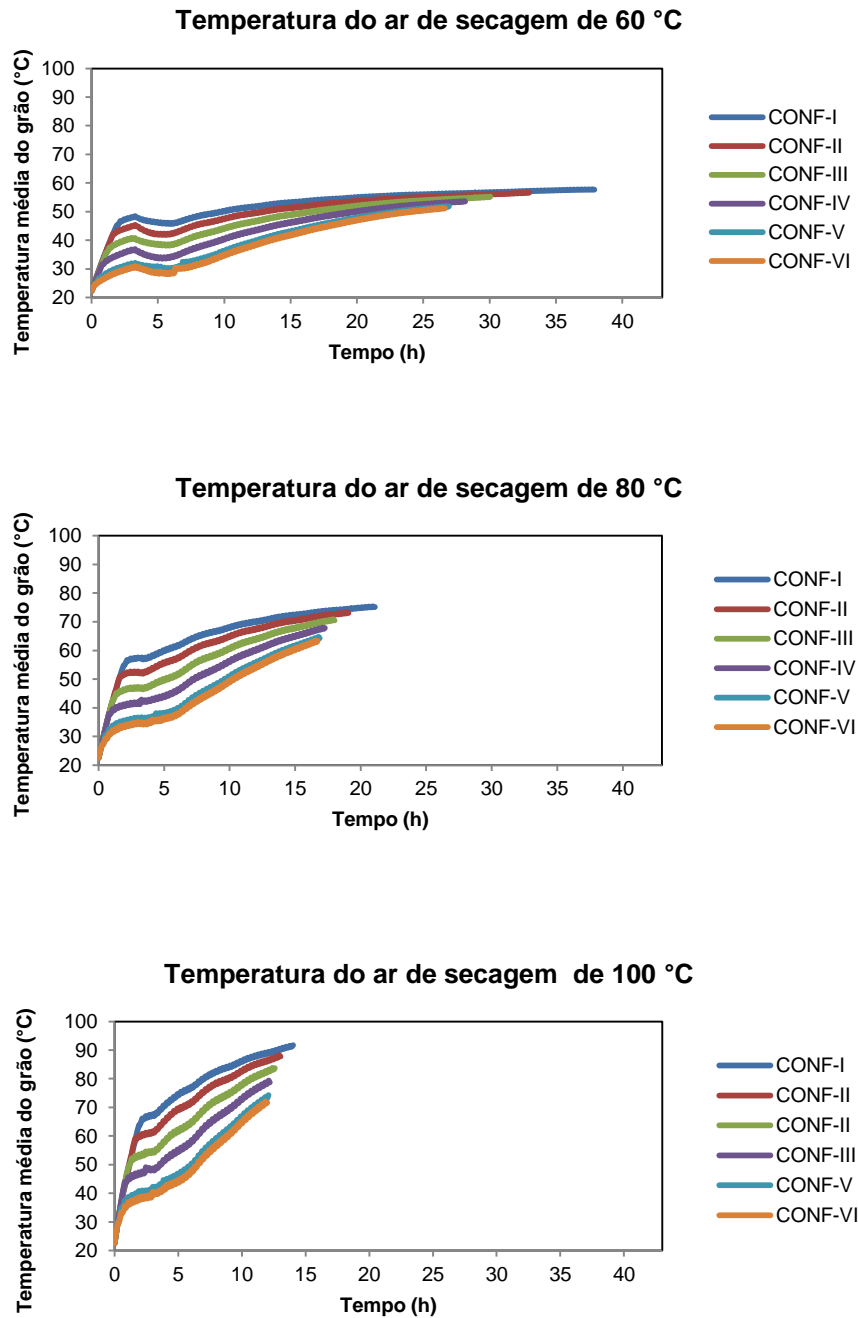


Fonte: Elaborado pelo autor.

- Temperatura da massa de produto versus cenários relativos à configuração do secador

Observa-se no Gráfico 18 as curvas de variação da temperatura da massa de grão durante a secagem para os cenários simulados, notando-se que na medida em que a altura da câmara de secagem é aumentada os valores de temperatura da massa de grãos diminuem, nesse contexto, o cenário CONF-VI apresentou os menores valores da temperatura da massa de grãos. Essa ocorrência pode estar associada aos menores tempos de secagem, o que ocasiona menores tempos de exposição da massa de grãos ao fluxo do ar de secagem.

Gráfico 18 – Temperaturas médias da massa simuladas alterando as alturas das câmaras de secagem e de descanso.



Fonte: Elaborado pelo autor.

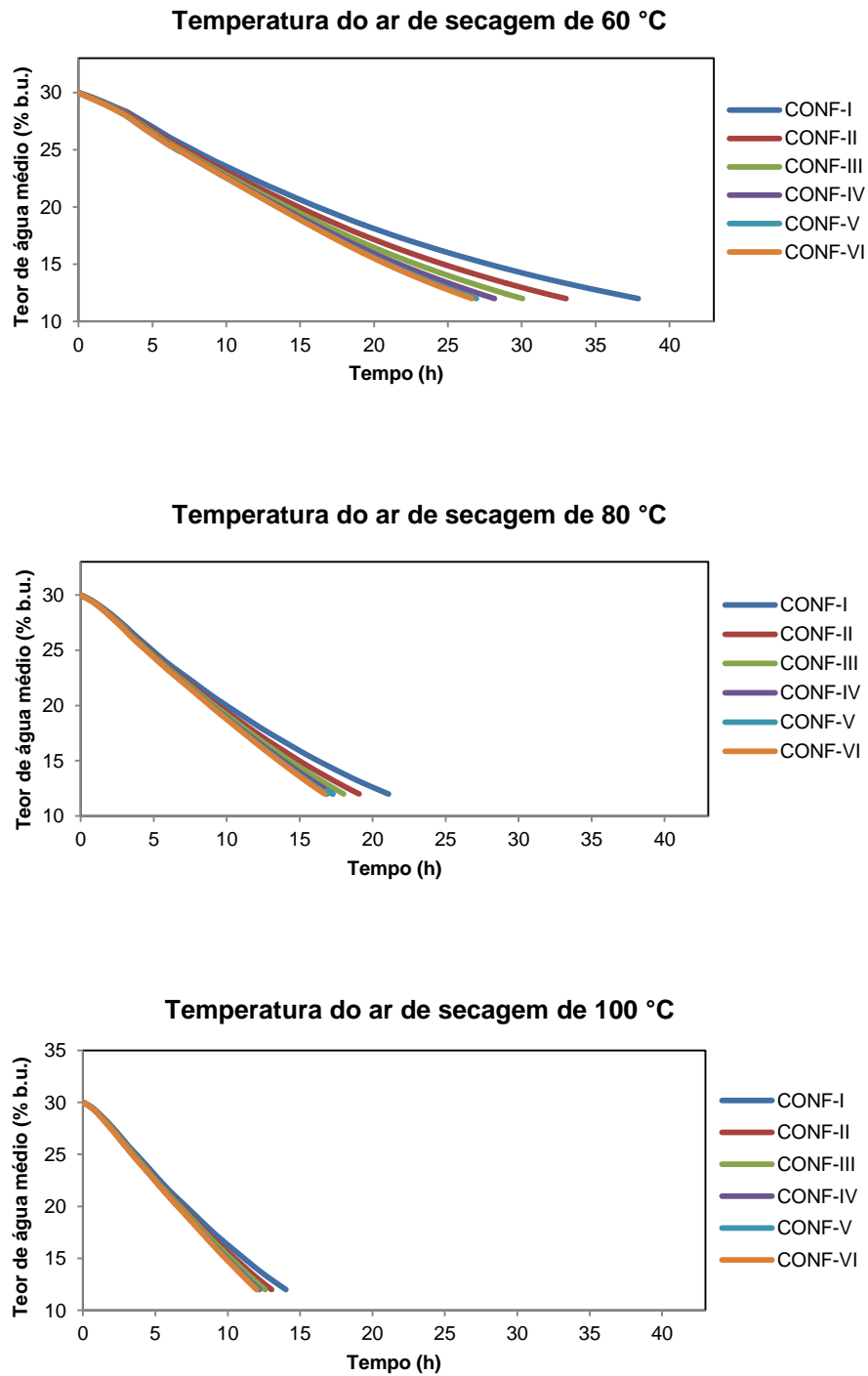
Analisando o deslocamento das curvas (Gráfico 18), é observado que para a temperatura do ar de secagem de 60°C, estas apresentam semelhanças no comportamento no início da secagem, em que a temperatura da massa de grãos

aumenta acentuadamente e seguido do leve decréscimo (observado também nos testes do item 4.2.1), para logo continuar aproximando-se a temperatura de equilíbrio com a temperatura do ar de secagem. Em razão do menor aporte de calor, para as temperaturas do ar de secagem menores, faz com que a taxa de secagem seja menor, conseqüentemente, tem-se maior tempo de secagem.

- Curvas de secagem versus cenários relativos à configuração do secador

As curvas de secagem para as temperaturas experimentais (Gráfico 19), demonstram a diferenciação dos cenários CONF-VI, V e IV em relação aos demais por apresentarem os menores valores de teor de água durante a secagem, destacando dentre eles o cenário CONF-VI para a temperatura de 100 °C, em que a curva de secagem possui as maiores taxas de secagem, conseqüentemente, promove o alcance do o teor de água final em menor tempo. Isso significa que a maior altura da câmara de secagem para ciclo operacional com tempo de movimentação de dois minutos e de parada de quinze minutos favoreceu a secagem de grãos, proporcionando uma diminuição do tempo de secagem em até 25,9 h ao se comparar com o cenário de pior desempenho, CONF-I para a temperatura do ar de secagem de 60 °C.

Gráfico 19 – Curvas de secagem simuladas para alterando as alturas das câmaras de secagem e de descanso.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5. CONCLUSÕES

O modelo computacional desenvolvido, empregando EXTEND™, e baseado no modelo de Thompson, Peart e Foster (1968), pode ser empregado para simular a secagem de frutos do cafeeiro no secador intermitente de fluxos contracorrentes, proposto.

Foram constatados desvios absolutos e erros relativos de 1,8% b.u, 11% de 1,1 kg e 1,6% na previsão dos parâmetros teor de água final e consumo de lenha, respectivamente.

Nos experimentos de alteração do ciclo operacional foram constatados os melhores desempenhos do secador ao empregar o tempo de movimentação de um minuto e o de parada de dezesseis minutos.

A temperatura do ar de secagem de 100 °C propiciou: menores tempo de secagem, consumo de lenha e consumo específico de energia e maior capacidade de secagem. Portanto, para o ciclo operacional de dezessete minutos recomenda-se o acionamento do sistema de movimentação de grãos por um minuto e o uso da temperatura do ar de secagem de 100 °C.

Quanto à comparação de cenários relativos às alterações das alturas das câmaras de secagem e de descanso constatou-se a melhor configuração empregando a altura da câmara de secagem de 2,3 m e sem câmara de descanso Isto para o ciclo operacional dois minutos movimentando e quinze minutos parado.

Os melhores dados de desempenho operacional implicaram em maiores valores de amplitude para temperatura da massa de grãos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO CAFÉ (ABIC). **Indicadores da indústria de café no Brasil - 2014** - Desempenho da Produção e do Consumo Interno. Disponível em:

<<http://www.abic.com.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?sid=61#expectativa2014.2>> Acessado em 17 abr. 2015.

AFONSO, JÚNIOR, Paulo C.; CORRÊA, Paulo C. Comparação de Modelos Matemáticos para Descrição da Cinética de Secagem em Camada Fina de sementes de feijão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v.3, n.3, p.349-353, 1999.

AGUERRE, Roberto J.; SUAREZ, Constantino. Diffusion of bound water in starchy materials: application to drying. **Journal of Food Engineering**, v.64, n.3, p.389- 395, 2004.

ALVES, Guilherme E. et al. Cinética de secagem de café natural para diferentes temperaturas e baixa umidade relativa. *Coffee Science*, Lavras, v. 8, n. 2, p. 238-247, 2013

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS (ASAE). **Standard Psychrometric Data ASAE D271**, St. Joseph, Michigan, USA, 1979.

ARTEAGA, Moisés Sánchez. Modelación del proceso de secado. In: SEMINARIO DE SECADO SOLAR, 2, 1986, **Anais**. Instituto General de Investigación, Cusco, Perú, p.51-56, abr. 1986.

BANDEIRA, Raquel Duarte da Costa Cunha. **Desenvolvimento e validação de metodologia na detecção e quantificação de ocratoxina a no café verde e torrado utilizando cromatografia líquida acoplada a espectrometria de massas aplicando os conceitos da metrologia química**. 2010. 120 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2010.

BEGOÑA, Victoriano. **Modelos y métodos de simulación estocástica - aplicación en la valoración de opciones financieras**. Facultad de Matemáticas, Departamento de Estadística e Investigación Operativa, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, Espanha, p.113, 2012.

BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Culturas: Café**. <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cafe/saiba-mais>> Acessado em: 17 mar. de 2015.

BROOKER, Donald. B.; BAKKER-ARKEMA, Fred. W. HALL, Carl. W. **Drying and storage of grain and oilseeds**. New York: An AVI Book, p.457, 1992.

BROOKER, D. B.; McKENZIE, B. A.; JOHNSON, H.K. **The present status of on-farm grain drying**. St. Joseph Michigan: ASAE, p.25, 1978.

CAIXETA, Ivan Franco; GUIMARÃES, Renato Mendes; MALTA, Marcelo Ribeiro. Qualidade da semente de café pelo retardamento do processamento pós-colheita. **Coffee Science**, Lavras, v. 8, n. 3, p. 249-255, 2013.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da Safra Brasileira – Café: Safra 2015 - Primeiro Levantamento Janeiro/2015**. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_01_14_11_57_33_boletim_cafe_janeiro_2015.pdf> Acessado em: 17 abr. 2015.

CORADI, Paulo C.; BORÉM Flávio M.; OLIVEIRA João A. Qualidade do café natural e despulpado após diferentes tipos de secagem e armazenamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.2, p.181–188, 2008.

CORRÊA, Cesar et al. Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 57, n.5, p. 595-601, set/out, 2010.

DALPASQUALE, Valdecir Antoninho. **Secagem de grãos em altas temperaturas**. CENTREINAR, Viçosa, MG, p.29, 1984.

DALPASQUALE, Valdecir Antoninho et al. Fixed-bed drying simulation of agricultural products using a new backward finite difference scheme. **Applied Mathematics and Computation**, v.200, n.02, p.590-595, 2007.

DANTAS, Luís Antônio, **Desenvolvimento de um programa computacional dinâmico para simulação de secagem de grãos e sementes**. 2007. 71 f., Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

DÍAZ MARTÍNEZ, Jorge Alonso. **Modeling of grain dryers: thin layers to deep beds**. 2011. 88f. Thesis (M.Sc) - Bioresource Engineering Department, McGill University, Montreal, Canada, 2011.

DONZELES, et al. Colheita e processamento do café arábica. In: REBELLES, R. P.; LUZ, D. R; RODRIGUEZ, C. G. **Café Arábica: da pós-colheita ao consumo**. Lavras: Ed. Empresa de Pesquisas Agropecuárias de Minas Gerais (EPAMIG), 2010. cap. 1, v.2. p. 734..

FAGUNDES, Carlos Alberto Alves; ELIAS, Moasir Cardoso; BARBOSA, Fabrizio da Fonseca. Desempenho industrial de arroz secado com ar aquecido por queima de lenha e de GLP. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v.30, p.8-15, 2005.

FARKAS, I.; RENDIK, Z. Intermittent thin layer corn drying. **Drying Technology: An International Journal**. v. 15, n.6, p.1951 – 1960, 1997.

FENTON, F. C. Storage of grain sorghums. **Agricultural. Engineering**, v.22, p.185, 1941.

FERRARI FILHO, Edar; GOTTARDI, Roberto; DIONELLO, Rafael Gomez. Custos da secagem intermitente de grãos de milho submetidos a três temperaturas do ar de secagem (60, 70 e 80 °C) **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, RS, v.16, n.1 e 2, p.17-21, 2010. Disponível em: <http://www.fepagro.rs.gov.br/upload/1398780912_art02.pdf> Acessado em: 01 abr. 2015.

FERNANDES, Carlos Aparecido. **Simulação da dinâmica operacional de uma linha industrial de abate de suínos**. 2005 57 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, PR, 2005.

GUNASEKARAN, S.; THOMPSON, T. L. Optimal energy management in grain drying. **CRC Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v.25 (1), p.1-48. 1986.

HERNÁNDEZ DÍAZ, W. N. et al. Modeling heat and mass transfer during drying of green coffee beans using prolate spheroidal geometry. **Journal of Food Engineering**, v. 86, n.1, p.1-9, 2008.

INTA. **Informe quincenal mercado de granos informe de coyuntura del mercado de granos**. 16 set. 2013. Disponível em: <<http://www.fyo.com/informe/informe-quincenal-mercado-de-granos>> Acessado em: 04 Fev. 2015.

ISQUIERDO, Eder Pedroza et al. Qualidade do café natural submetido a diferentes períodos de repouso durante a secagem. **Ciência e Agrotecnologia**, v.36, n.4, p. 439-445, 2012.

KAYMAK-ERTEKIN, Figen; GEDIK, Atil. Sorption isotherms and isosteric heat of sorption for grapes, apricots, apples and potatoes. **Lebensmittel- Wissenschaft und-Technologie**, v. 37(4), p. 429-438, 2004.

KEENER, H. M.; GLENN, T. L. Measuring performance of grain drying system. Chicago, **ASAE**, p.16, 1978. (Paper n.78-3521)

LACERDA FILHO, A. F.; SILVA, E. J. S. Secagem de café em fluxos concorrentes. Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil. 2., 2001, Vitória, **Anais**. Brasília: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Disponível em: <http://www.sapc.embrapa.br/arquivos/consorcio/spcb_anais/simposio2/poscolheita38.pdf> Acessado em: 23 fev. de 2015.

LAW, Averill. M.; KELTON, David W. **Simulation modeling e analysis**. 2 ed. New York: McGraw Hill Inc., 1991.

LIMA, Rodolfo França. **Modelagem matemática do escoamento de grãos de soja em um secador com fluxo misto usando o método dos elementos discretos**.

2014. 87 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) - Programa de Pós - Graduação em Matemática da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - Departamento de Ciências Exatas e Engenharias Ijuí, RS, 2014. Disponível em:

http://bibliodigital.unijui.edu.br:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/2159/disserta%C3%A7%C3%A3o_rodolfo_lima_versao%20final.pdf?sequence=1 Acessado em: 12 Jan. 2015.

LOPES, Daniela de C.; STEIDLE NETO, Antonio José; SANTIAGO, Jéssika. K. Comparison of equilibrio and logarithmic models for grain drying. **Biosystem Engineering**, v.118, p105-114, 2014.

MENEGHETTI, Volnei L. et al. Modelos matemáticos para a secagem intermitente de arroz em casca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.10, p.1115–1120, 2012.

MARTINEZ-VERA, C., et al. Experimental validation of a mathematical model for the batch drying of corn **Grains. Drying Technology**, v. 13, p. 333-350. 1995.

MISRA, M. K.; BROOKER, D. B. Thin-Layer Drying and Rewetting Equations for Shelled Yellow Corn. **Transactions of the ASAE**. v.23 (5). p.1254-1260. 1980

MORAES, Sergio Oliveira; RODRIGUES, Valeria C. **Secagem de alimentos**. Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, p.5, 2006.

MOREY, R. et al. The present status of grain drying simulation. **American Society of Agricultural Engineering**. St. Joseph, Michigan. paper N° 78-3309. p.25, 1978.

ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL CAFÉ (OIC) **Comercio mundial del café (1963 –2013)**: Reseña de los mercados, retos y oportunidades con que se enfrenta el sector. Londres, Reino Unido, p. 29, 2014b. Disponível em:

<http://juntadelcafe.org.pe/sites/default/files/documentos/comercio_mundial_del_cafe.pdf> Acessado em: 10 abr. 2015.

PARK, Kil Jin et al. **Conceitos de processos e equipamentos de secagem**. Campinas, 2007. Disponível em:

<<http://www.feagri.unicamp.br/ctea/projpesq.html>>. Acessado em: 08 ago. 2014.

PARRA, Alfonso C. **Modelos de simulación matemática en el secado de productos agrícolas**. Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D. C., Colômbia, 2015. Disponível em: <<http://es.scribd.com/doc/256728778/Modelos-Matematicos-en-Secado-de-Granos-02-15#scribd>> Acessado em: 26 jan. 2015.

PARRA, Alfonso C.; ROA, Gonzalo M.; OLIVEROS, Carlos E. T. SECAFÉ Parte I: Modelamiento y simulación matemática en el secado mecánico de café pergamino, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.4, p.415–427, 2008.

PARRY, J. L. Mathematical modeling and computer simulation of heat and mass transfer in agricultural grain drying: A Review. **Journal Agricultural Engineering**, v. 32, p. 1-29, 1985.

PEINADO, D. et al. Energy and energy analysis in an asphalt plant's rotary dryer. **Applied Thermal Engineering**, v. 31, p. 1039–1049, 2011.

PEREIRA, José Antonio Marques. **Equações de Page para café**. Viçosa, 1990.

PIMENTA, Carlos José. **Qualidade de café**. 1. ed. Lavras: Editora UFLA, p.297, 2001.

PINHO, S. M. et al. Secador intermitente: variação da temperatura da massa de sementes e velocidade de secagem, **Informativo ABRATES**, v. 24, n. 1, p. 27- 31, 2014.

PRENGER, Jessica J.; LING, Peter P. **Greenhouse Condensation Control-Understanding and Using Vapor Pressure Deficit (VPD)** Fact Sheet (Series) AEX-800. Columbus, OH, The Ohio State University Extension, 2000. Disponível em: <<http://ohioline.osu.edu/aex-fact/0804.html>> Acessado em: 08 dez. 2014.

PUTRANTO, A. et al. Mathematical Modeling of intermittent and convective drying of rice and coffee using the reaction engineering approach (REA), **Journal of Food Engineering**. v.105, n.4, p.638-646, 2011.

QUEIROZ, Daniel Marçal; PEREIRA José Antonio Marques; MELO Evandro de Castro. **Modelos matemáticos de simulação de secagem de grãos**. Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem. CENTREINAR, Viçosa, MG, p.55, 1986.

QUEIROZ, Daniel Marçal. **Secagem de grãos em altas temperaturas**. Viçosa, MG. p.38, 2002.

REINATO, Carlos Henrique Rodrigues et al. Qualidade do café secado em terreiros com diferentes pavimentações e espessuras de camada. **Coffee Science**, Lavras, v. 7, n. 3, p. 223-237, 2012.

RESENDE Osvaldo et al. Cinética da secagem de clones de café (*Coffea canephora* Pierre) em terreiro de chão batido. **Acta Amazonica**, v. 40, n.2, p. 247 – 256, 2010.

RESENDE Osvaldo et al. Comparação entre terreiros híbrido e de concreto na secagem do café conilon processado por via seca e úmida. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.13, n.2, p. 169-177, 2011.

RODRIGUES, E, et al. Simulação da secagem de abacaxi em fatias em secador de leito fixo. **Engenharia Agrícola**, Viçosa-MG, v. 12, n. 4, p. 381-392, 2008.

SAMAPUNDO, S. et al. Sorption isotherms and isosteric heats of sorption of whole yellow dent corn. **Journal of Food Engineering**, v.79, p.168-175, 2007.

SILVA, C. G.; CORRÊA, P. C.; MARTINS, J. H. Qualidade da bebida do café (*Coffea arabica* L.) em função da proporção de frutos verdes e da temperatura do ar de secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v.23, n.1, p. 45-48, 1998.

SILVA, Juarez de Sousa; BERBERT, Pedro A. **Colheita, secagem e armazenamento**. Viçosa: Aprenda Fácil, p.146, 1999.

SILVA, J. S.; RUFFATO, S.; PRECCI, R. L. Gerenciamento da secagem de café em sistemas combinados. In: ZAMBOLIM, L. (ed) **Café: Produtividade, qualidade e sustentabilidade**. Viçosa: UFV, Departamento de Fitopatologia, p 392, 2000.

SILVA, Juarez Sousa et al. **Preparo, Secagem e Armazenagem**. In: SILVA, Juarez de Sousa (ed). **Secagem e armazenagem de café - Tecnologias e Custos**. 1. ed. - Viçosa: Ed. Jard Editora Ltda. **2001a**. cap. 1. p. 1- 60. Disponível em: <<ftp://www.ufv.br/Dea/poscolheita/LIVRO%20SECAGEM%20E%20ARMAZENAGEM%20DE%20CAFE/capitulo1.pdf>>

SILVA, Juarez Sousa, et al. Projeto, construção e avaliação de um secador de fluxos (concorrentes/contracorrentes) para secagem de café. In: Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil. 2., **2001b**, Vitória, **Anais**. Brasília: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Disponível em: <http://www.sapc.embrapa.br/arquivos/consorcio/spcb_anais/simposio2/poscolheita34.pdf> Acessado em: 26 de fevereiro de 2015.

SILVA, Juarez de Sousa; AFONSO, Adriano D. L.; DONZELES Sergio M. L. **Secagem e secadores**. In: SILVA, Juarez de Sousa (ed). **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. 2 ed. – Viçosa: Ed. Aprenda Fácil. 2008. cap. 5. p. 109-146. Disponível em: <<http://www.agr.feis.unesp.br/defers/docentes/mauricio/pdf/Zocoler/cap5.pdf>> Acessado em: 24 Nov. 2014.

SILVA, Juarez de Sousa; NOGUEIRA, Roberta Martins; MAGALHÃES, Edney Alves. **Secagem em silos – Uma opção para café**. Viçosa: UFV/DEA, p.36, 2008.

SILVA, Luís César. **Desenvolvimento e avaliação de um secador de café (*Coffea arabica* L.) intermitente de fluxos contracorrentes**. 1991. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1991.

SILVA, Luís César. **Stochastic simulation of the dynamic behavior of grain storage facilities**. 2002. 104 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

SILVA, Luís César. **Secagem de Grãos**, Boletim Técnico: AG: 04/05, Universidade Federal do Espírito Santo - Campus de Alegre, Alegre, ES, p. 9, 2005.

SILVA, Luís César et al. A simulation toolset for modeling grain storage facilities. **Journal of Stored Products Research**, v. 48, p. 30-36. 2012.

SILVA, Luís César. **Setor secagem de grãos**. (Apresentação Power Point) Universidade Federal de Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias - Departamento de Engenharia de Alimentos. Alegre, ES p. 28, 2013

SOUZA, Antonio J. et al. Qualidade do café arborizado e a pleno sol, em manejo pós-colheita no sudoeste da Bahia. **Coffee Science**, Lavras. v. 8, n. 2, p. 109-120, 2013.

SOUZA, Cristiano Marcio Alves; QUEIROZ Marçal Daniel de; D. M.; LACERDA FILHO, Adílio Flauzino. Simulação do processo de secagem de sementes de milho em camada fixa. **Scientia Agricola**, v.59, n.4, p. 653-660, 2002.

TASCON, C. E. **Simulação de secagem de café, em camada fixa com inversão de sentido de fluxo de ar**. 1984. 64 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, p. 64,1984.

TAVEIRA, José Henrique da Silva et al. Perfis proteicos e desempenho fisiológico de sementes de café submetidas a diferentes métodos de processamento e secagem. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.47, n.10, p.1511-1517, out. 2012.

THOMAZINI, et al. Abordagem sobre qualidade da bebida no café conilon. **Enciclopédia Biosfera**, v.7, n.12, p. 1-16, 2011.

THOMPSON, T. L.; PEART, R. M.; FOSTER, G. H. **Mathematical simulation of corn drying: a new model**. Transaction of the ASAE, v.11, n.4, p. 582-586, 1968.

URQUIA MORELA, Alfonso. **Simulación**: Texto base de teoría. Universidad Nacional de Educación a Distancia, Madrid, Espanha, p.321, 2008. Disponível em: <http://www.euclides.dia.uned.es/urquia/Files/Simulacion%20Teoria%202008_09.pdf> Acessado em 24 mar.2015.

VALENTE, Domingos Sárvio Magalhães et al. LINSEC - The software for modeling and simulation of grain drying systems. Centro de Ciências Agrárias - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE **Revista Ciência Agronômica**, v.43, n.4, p. 664-673, out-dez, 2012

Tabela B- Dados simulando obtidos modelando o Teste 2

Hora	Tempo (h)	Temperatura (°C)					Umidade relativa (%)		Teor de água (% b.u.)	
		Secagem Exp.	Grãos		Ambiente		Exp.	Simulado	Exp.	Simulado
			Exp.	Simulado	Exp.	Simulado				
07:00	0,0	37,0	23,5	23,2	17,0	10,13	100	100,0	33,4	33,4
07:30	0,5	59,6	31,4	21,0	17,0	11,03	96	97,6		
08:00	1,0	60,8	36,9	21,7	17,0	11,97	95	92,2	32,3	33,4
08:30	1,5	61,2	38,8	22,6	17,0	12,92	95	86,8		
09:00	2,0	60,4	39,4	31,0	17,4	13,93	92	81,3	32,0	32,3
09:30	2,5	61,0	38,8	38,4	17,6	14,90	93	76,0		
10:00	3,0	60,0	39,6	43,5	20,0	15,89	90	70,8	32,0	31,9
10:30	3,5	60,1	39,3	33,5	20,5	16,82	89	66,0		
11:00	4,0	60,8	40,3	35,4	21,0	17,73	87	61,4	29,6	31,8
11:30	4,5	60,4	40,2	37,3	21,5	18,57	87	57,2		
12:00	5,0	60,0	41,3	39,7	22,0	19,32	75	53,6	28,9	30,8
12:30	5,5	61,3	40,0	42,8	22,0	19,99	72	50,5		
13:00	6,0	60,5	41,3	46,3	22,5	20,55	65	48,1	28,6	30,3
13:30	6,5	60,0	40,7	37,1	22,7	21,01	62	46,3		
14:00	7,0	60,1	38,3	38,3	23,1	21,34	61	45,2	28,5	30,2
14:30	7,5	60,8	44,0	39,9	23,4	21,56	61	44,8		
15:00	8,0	60,8	42,4	41,9	23,3	21,64	62	45,2	28,5	29,3
15:30	8,5	60,1	41,6	44,5	23,0	21,60	62	46,2		
16:00	9,0	59,5	41,7	47,7	23,0	21,42	64	47,9	27,7	28,8
16:30	9,5	60,9	41,8	39,2	23,0	21,13	65	50,3		
17:00	10,0	60,3	40,8	40,2	23,0	20,70	65	53,3	25,1	28,7
17:30	10,5	61,4	44,8	41,4	23,0	20,17	70	56,8		
18:00	11,0	60,0	43,4	42,3	21,0	19,53	80	61,0	25,3	27,8
18:30	11,5	60,6	42,5	43,5	20,0	18,81	85	65,4		
19:00	12,0	59,5	45,5	46,3	19,0	17,98	89	70,3	22,8	27,1
19:30	12,5	60,8	44,0	34,9	18,6	17,09	94	75,6		
20:00	13,0	60,5	43,7	35,3	18,0	16,17	100	80,8	23,2	26,9
20:30	13,5	60,6	44,3	36,6	17,5	15,19	100	86,3		
21:00	14,0	59,3	44,3	38,8	16,0	14,22	100	91,7	21,9	25,8
21:30	14,5	61,5	45,2	42,1	15,9	13,22	100	97,1		
22:00	15,0	60,2	47,7	46,2	15,5	12,26	100	100,0	20,9	25,2
22:30	15,5	60,6	44,7	36,8	15,0	11,30	100	100,0		
23:00	16,0	58,0	44,4	38,0	15,0	10,41	100	100,0	20,6	25,0
			Exp.	Simulado					Exp.	Simulado
		Água removida (kg)	180,0	128,8			Consumo de lenha (kg)		86,5	88,0
		Massa final (kg)	932,0	983,2			Consumo esp. de energia (kJ.kg ⁻¹)		7492	10648
		Massa Inicial (kg)	1112,0							

Tabela C- Dados simulando obtidos modelando o Teste 3

Hora	Tempo (h)	Temperatura (°C)					Umidade relativa (%)		Teor de água (% b.u.)	
		Secagem Exp.	Grãos		Ambiente		Exp.	Simulado	Exp.	Simulado
			Exp.	Simulado	Exp.	Simulado				
10:15	0,0	55,7	26,4	26,4	18,1	16,3	73	68,4	20,2	20,2
10:45	0,5	61,3	30,5	21,7	19,0	17,3	76	63,6		
11:15	1,0	60,2	43,1	22,7	19,5	18,2	70	59,2	19,3	20,2
11:45	1,5	60,2	44,0	23,5	20,4	19,0	68	55,3		
12:15	2,0	61,0	45,6	30,3	21,5	19,7	62	52,1	19,2	18,4
12:45	2,5	59,4	43,7	37,6	22,0	20,3	59	49,3		
13:15	3,0	60,1	43,3	43,9	21,0	20,8	57	47,1	19,3	17,8
13:45	3,5	59,8	43,8	38,7	21,0	21,2	55	45,7		
14:15	4,0	59,0	46,5	37,3	23,0	21,5	53	45,0	18,0	17,6
14:45	4,5	59,8	47,8	39,2	23,0	21,6	52	44,9		
15:15	5,0	60,0	46,6	41,5	23,0	21,6	52	45,6	17,6	16,6
15:45	5,5	59,6	46,4	44,8	23,0	21,5	53	47,0		
16:15	6,0	60,2	47,1	48,8	22,5	21,3	54	49,0	16,5	15,9
16:45	6,5	60,3	46,6	41,9	22,0	20,9	57	51,7		
17:15	7,0	60,5	49,7	43,1	20,0	20,4	60	55,0	17,0	15,8
17:45	7,5	60,9	49,6	44,7	18,9	19,9	61	58,9	16,9	15,6

	Exp.	Simulado		Exp.	Simulado
Água removida (kg)	40,0	60,2	Consumo de lenha (kg)	86,5	88,0
Massa final (kg)	968,0	947,8	Consumo esp. de energia (kJ.kg ⁻¹)	16252	10648
Massa Inicial (kg)	1112,0				

Tabela D- Dados simulando obtidos modelando o Teste 4

Hora	Tempo (h)	Temperatura (°C)					Umidade relativa (%)		Teor de água (% b.u.)	
		Secagem Exp.	Grãos		Ambiente		Exp.	Simulado	Exp.	Simulado
			Exp.	Simulado	Exp.	Simulado				
07:30	0,0	60,8	31,2	31,2	10,5	11,0	100	97,6	25,9	25,9
08:00	0,5	60,0	33,3	21,5	12,5	12,0	100	92,2		
08:30	1,0	60,9	39,3	21,1	14,0	12,9	100	86,8	24,7	25,9
09:00	1,5	60,5	39,5	22,8	17,0	13,9	90	81,3		
09:30	2,0	60,6	40,2	26,5	18,1	14,9	85	76,0	24,1	23,9
10:00	2,5	60,8	39,4	31,1	22,5	15,9	55	70,8		
10:30	3,0	59,8	38,4	34,7	23,0	16,8	50	65,9	23,3	23,4
11:00	3,5	60,2	41,0	40,1	23,5	17,7	42	61,4		
11:30	4,0	60,5	41,1	28,9	24,6	18,6	40	57,3	23,1	23,5
12:00	4,5	60,1	42,8	30,3	25,0	19,3	34	53,6		
12:30	5,0	60,6	41,2	32,4	26,0	20,0	33	50,5	21,1	22,1
13:00	5,5	60,2	41,1	34,9	26,2	20,5	32	48,1		
13:30	6,0	60,1	42,3	37,6	26,4	21,0	32	46,3	21,6	21,5
14:00	6,5	60,4	43,7	40,5	27,0	21,3	31	45,2		
14:30	7,0	61,2	43,9	44,9	27,0	21,6	31	44,8	21,2	21,4
15:00	7,5	59,8	44,4	35,0	26,5	21,6	31	45,2		
15:30	8,0	59,7	44,2	36,0	26,5	21,6	34	46,2	20,0	20,4
16:00	8,5	50,6	45,2	37,9	26,5	21,4	38	47,9		
16:30	9,0	60,8	44,0	39,7	26,5	21,1	42	50,3	19,2	19,8
17:00	9,5	60,6	46,6	41,8	26,0	20,7	58	53,3		
17:30	10,0	60,7	45,4	45,1	26,0	20,2	60	56,9	19,1	19,7
18:00	10,5	57,2	45,1	43,9	23,0	19,5	60	61,0	17,6	19,6
		Exp. Simulado						Exp. Simulado		
Água removida (kg)		117,0	99,0	Consumo de lenha (kg)		55,1	57,7			
Massa final (kg)		1049,0	1067,0	Consumo esp. de energia (kJ.kg ⁻¹)		7342	9084			
Massa Inicial (kg)		1166,0								

Tabela E- Dados simulando obtidos modelando o Teste 5

Hora	Tempo (h)	Temperatura (°C)					Umidade relativa (%)		Teor de água (% b.u.)	
		Secagem Exp.	Grãos		Ambiente		Exp.	Simulado	Exp.	Simulado
			Exp.	Simulado	Exp.	Simulado				
14:00	0,0	58,2	32,0	31,9	17,0	21,3	80	45,2	23,8	23,8
14:30	0,5	79,7	36,1	24,2	17,0	21,6	78	44,8		
15:00	1,0	80,2	46,4	24,2	17,7	21,6	78	45,2	24,6	23,8
15:30	1,5	80,0	52,1	24,9	17,0	21,6	80	46,2		
16:00	2,0	81,1	53,9	34,3	16,2	21,4	80	47,9	19,1	23,0
16:30	2,5	81,4	53,3	44,3	16,1	21,1	81	50,3		
17:00	3,0	82,4	48,8	53,4	16,0	20,7	82	53,3	21,3	20,9
17:30	3,5	80,0	48,5	40,0	16,0	20,2	84	56,9		
18:00	4,0	81,7	56,3	43,5	15,5	19,5	85	61,0	19,5	20,2
18:30	4,5	81,0	57,3	46,4	15,3	18,8	86	65,4		
19:00	5,0	81,1	59,3	49,9	15,5	18,0	88	70,3	18,1	20,0
19:30	5,5	81,9	55,6	55,2	15,0	17,1	90	75,5		
20:00	6,0	80,2	54,6	61,5	15,0	16,2	95	80,9	17,7	18,2
20:30	6,5	79,6	58,0	50,9	15,0	15,2	95	86,2		
21:00	7,0	65,2	59,9	52,9	15,0	14,2	100	91,7	15,8	17,0
		Exp. Simulado				Exp. Simulado				
Água removida (kg)		101,0	93,3	Consumo de lenha (kg)		53,6	52,5			
Massa final (kg)		950,0	957,7	Consumo esp. de energia (kJ.kg ⁻¹)		8274,0	8773,816			
Massa Inicial (kg)		1051,0								

Tabela F- Dados simulando obtidos modelando o Teste 6

Hora	Tempo (h)	Temperatura (°C)					Umidade relativa (%)		Teor de água (% b.u.)	
		Secagem Exp.	Grãos		Ambiente		Exp.	Simulado	Exp.	Simulado
			Exp.	Simulado	Exp.	Simulado				
13:30	0,0	61,7	36,8	36,6	22,0	21,01	55	46,35	24,6	24,6
14:00	0,5	80,7	37,0	24,9	23,0	21,35	55	45,23		
14:30	1,0	80,6	46,9	24,5	23,0	21,56	53	44,85	25,7	24,6
15:00	1,5	80,1	52,6	38,7	23,4	21,64	52	45,17		
15:30	2,0	81,6	50,4	50,9	23,2	21,60	53	46,20	22,1	21,9
16:00	2,5	80,1	49,8	46,4	23,0	21,43	55	47,91		
16:30	3,0	80,6	50,8	40,8	23,0	21,13	57	50,28	22,1	21,9
17:00	3,5	80,2	55,0	45,6	22,0	20,71	62	53,26		
17:30	4,0	79,0	53,9	54,3	21,5	20,16	73	56,91	20,8	19,7
18:00	4,5	80,1	54,5	64,0	19,0	19,53	80	60,97		
18:30	5,0	80,0	55,1	47,0	18,5	18,80	82	65,47	19,4	19,6
19:00	5,5	79,8	55,0	50,3	18,0	17,98	90	70,33		
19:30	6,0	80,6	58,3	56,2	17,0	17,11	94	75,46	17,5	17,8
20:00	6,5	79,5	55,2	62,5	17,0	16,18	100	80,78		
20:30	7,0	79,7	57,2	58,5	16,6	15,21	100	86,20	16,5	17,6
21:00	7,5	80,5	57,4	54,2	16,1	14,20	100	91,76		
21:30	8,0	80,1	60,8	58,0	16,0	13,22	100	97,10	14,4	16,2
		Exp. Simulado				Exp. Simulado				
Água removida (kg)		114,0	96,76	Consumo de lenha (kg)		59,3	60,0			
Massa final (kg)		838,0	855,24	Consumo esp. de energia (kJ.kg ⁻¹)		8110	9668			
Massa Inicial (kg)		952,0								

Tabela G- Dados simulando obtidos modelando o Teste 7

Hora	Tempo (h)	Temperatura (°C)					Umidade relativa (%)		Teor de água (% b.u.)	
		Secagem Exp.	Grãos		Ambiente		Exp.	Simulado	Exp.	Simulado
09:30	0,0	50,8	24,1	24,1	18,5	14,9	100	76,1	24,8	24,8
10:00	0,5	70,4	23,1	24,0	19,0	15,9	77	70,8		
10:30	1,0	80,1	40,5	24,3	19,2	16,8	77	65,9	23,9	24,8
11:00	1,5	80,8	47,8	24,1	19,9	17,7	75	61,3		
11:30	2,0	80,2	47,8	33,0	21,0	18,6	75	57,3	23,3	22,0
12:00	2,5	81,6	49,5	42,6	21,4	19,3	65	53,6		
12:30	3,0	80,1	49,8	52,1	21,8	20,0	60	50,6	20,6	21,3
13:00	3,5	80,5	49,9	38,6	22,0	20,6	59	48,1		
13:30	4,0	80,9	50,7	42,2	23,0	21,0	55	46,4	21,3	21,2
14:00	4,5	80,7	50,9	45,1	24,0	21,3	50	45,2		
14:30	5,0	80,0	51,8	48,7	24,3	21,6	49	44,8	20,9	19,2
15:00	5,5	80,9	54,1	54,1	25,0	21,6	45	45,2		
15:30	6,0	79,9	54,1	60,7	25,0	21,6	50	46,2	19,0	18,2
16:00	6,5	81,5	54,1	49,7	23,0	21,4	50	47,9		
16:30	7,0	81,5	56,0	51,7	24,0	21,1	50	50,3	18,2	17,9
17:00	7,5	80,3	56,5	53,8	23,0	20,7	51	53,3		
17:30	8,0	81,0	58,2	56,4	22,0	20,2	50	56,8	17,5	16,5
18:00	8,5	80,7	55,2	60,3	20,0	19,5	57	60,9		
18:30	9,0	81,6	57,8	65,4	19,5	18,8	59	65,5	15,6	15,5
19:00	9,5	80,7	61,0	57,0	17,0	18,0	62	70,4		
19:30	10,0	72,6	62,3	58,5	16,5	17,1	63	75,4	14,5	15,3

	Exp.	Simulado		Exp.	Simulado
Água removida (kg)	124,0	120,17	Consumo de lenha (kg)	73,9	74,9
Massa final (kg)	897,0	900,83	Consumo esp. de energia (kJ.kg ⁻¹)	5144	9722
Massa Inicial (kg)	1021,0				

Tabela I- Dados simulando obtidos modelando o Teste 9

Hora	Tempo (h)	Temperatura (°C)					Umidade relativa (%)		Teor de água (% b.u.)	
		Secagem Exp.	Grãos		Ambiente		Exp.	Simulado	Exp.	Simulado
			Exp.	Simulado	Exp.	Simulado				
16:00	0,0	76,7	29,6	29,6	25,5	21,4	52	47,9	22,6	22,57
16:30	0,5	100,0	32,1	27,8	25,3	21,1	52	50,3		
17:00	1,0	100,0	43,4	27,6	25,0	20,7	54	53,3	22,7	21,25
17:30	1,5	99,1	54,5	27,6	24,6	20,2	54	56,8		
18:00	2,0	100,5	59,9	38,9	22,0	19,5	70	61,0	18,5	19,78
18:30	2,5	99,5	61,3	51,5	22,0	18,8	80	65,4		
19:00	3,0	98,5	61,5	63,4	18,0	18,0	95	70,3	16,5	18,32
19:30	3,5	101,3	62,5	47,0	17,9	17,1	100	75,5		
20:00	4,0	99,1	60,1	51,9	17,0	16,2	100	80,8	16,4	18,07
20:30	4,5	91,6	60,6	56,0	17,0	15,2	100	86,3	15,6	16,40
			Exp.	Simulado					Exp.	Simulado
Água removida (kg)			88,0	83,0	Consumo de lenha (kg):				40	40,0
Massa final (kg):			1031,0	1036,0	Consumo esp. de energia (kJ kg ⁻¹)				6299	7526
Massa Inicial (kg) :			1119,0							

Tabela J- Dados simulando obtidos modelando o Teste 10A

Hora	Tempo (h)	Secagem Exp.	Temperatura (°C)				Umidade relativa (%)		Teor de água (% b.u.)	
			Grãos		Ambiente		Exp.	Simulado	Exp.	Simulado
			Exp.	Simulado	Exp.	Simulado				
14:15	0,0	67,0	24,9	25,1	20,0	21,47	38	44,96	41,2	41,2
14:45	0,5	88,7	25,5	34,8	20,0	21,62	38	44,92		
15:15	1,0	97,1	41,4	43,0	20,0	21,64	45	45,60	42,7	40,4
15:45	1,5	100,2	45,2	50,8	20,0	21,53	48	46,98		
16:15	2,0	100,1	43,5	56,8	19,8	21,29	55	49,03	40,6	39,2
16:45	2,5	100,3	47,5	58,1	19,0	20,93	58	51,71		
17:15	3,0	96,1	69,4	59,6	18,5	20,45	65	54,98	33,7	38,0
17:45	3,5	100,2	63,0	61,2	18,0	19,87	72	58,80		
18:15	4,0	99,6	47,7	62,7	15,0	19,17	80	63,20	34,6	36,7
18:45	4,5	99,2	47,8	64,0	15,0	18,39	83	67,89		
19:15	5,0	100,0	49,4	65,2	14,0	17,55	86	72,89	35,6	35,3
19:45	5,5	101,6	49,5	65,9	13,9	16,64	86	78,13		
20:15	6,0	99,7	56,3	66,3	13,0	15,69	95	83,51	31,7	34,0
20:45	6,5	99,9	57,5	67,3	12,9	14,72	92	88,94		
21:15	7,0	100,5	51,1	68,4	13,0	13,73	92	94,34	28,5	32,6
21:45	7,5	102,7	51,8	69,5	13,0	12,72	94	99,73		
22:15	8,0	100,5	50,1	70,4	12,0	11,76	100	100,00	28,3	31,1
22:45	8,5	102,7	51,8	70,9	11,5	10,84	100	100,00		
23:15	9,0	94,6	57,2	71,4	11,0	9,98	100	100,00	25,1	29,7

	Exp.	Simulado		Exp.	Simulado
Água removida (kg)		190,0	Consumo de lenha (kg)	128,0	80,1
Massa final (kg):	850,0	999,9	Consumo esp. de energia (kJ.kg ⁻¹)	6061	6570
Massa Inicial (kg) :	1190,0				

Tabela K- Dados simulando obtidos modelando o Teste 10B

Hora	Tempo (h)	TEMPERATURA (°C)					Umidade relativa (%)		Teor de água (% b.u.)	
		Secagem Exp.	Grãos		Ambiente		Exp.	Simulado	Exp.	Simulado
			Exp.	Simulado	Exp.	Simulado				
08:15	9,0	62,4	31,8	31,9	10,9	12,4	98	89,6	24,4	24,4
08:45	9,5	81,9	33,7	44,6	11,0	13,4	90	84,0		
09:15	10,0	96,4	44,1	57,6	12,0	14,4	87	78,7	26,4	22,6
09:45	10,5	101,7	48,8	65,9	12,4	15,4	80	73,4		
10:15	11,0	100,9	54,7	69,0	15,0	16,4	75	68,3	21,5	20,7
10:45	11,5	100,4	54,6	73,1	16,0	17,3	65	63,6		
11:15	12,0	99,7	50,8	76,6	17,0	18,2	65	59,2	21,8	19,0
11:45	12,5	100,6	52,7	78,3	18,0	18,9	63	55,4		
12:15	13,0	100,5	56,0	79,4	19,0	18,2	58	59,2	20,0	17,4
12:45	13,5	101,5	59,5	81,0	19,4	20,3	55	49,3		
13:15	14,0	100,8	61,8	82,7	19,9	20,8	55	47,1	16,5	15,9
13:45	14,5	100,5	59,5	84,4	20,0	21,2	53	45,7		
14:15	15,0	91,6	57,3	85,1	19,9	21,5	55	45,0	15,8	14,6
			Exp.	Simulado					Exp.	Simulado
	Água removida (kg)		89,0	97,8		Consumo de lenha (kg)			127,0	53,3
	Massa final (kg):		761,0	752,2		Consumo esp. de energia (kJ.kg ⁻¹)			6061	8507
	Massa Inicial (kg) :		850							

Tabela L- Dados simulando obtidos modelando o Teste 11A

Hora	Tempo (h)	Temperatura (°C)					Umidade relativa (%)		Teor de água (% b.u.)	
		Secagem m Exp.	Grãos		Ambiente		Exp.	Simulado	Exp.	Simulado
			Exp.	Simulado	Exp.	Simulado				
07:50	0,0	71,3	18,0	18,5	7,5	11,6	100	94,1	32,7	32,7
08:20	0,5	94,3	30,7	35,6	10,0	12,6	100	88,5		
08:50	1,0	98,8	42,4	49,8	11,0	13,6	98	83,1	34,1	31,9
09:20	1,5	100,3	47,0	59,2	11,5	14,6	70	77,7		
09:50	2,0	100,5	49,6	61,6	14,5	15,6	65	72,5	30,2	30,6
10:20	2,5	99,1	48,7	64,4	15,5	16,5	55	67,5		
10:50	3,0	101,7	49,3	66,2	16,0	17,4	47	62,9	29,8	29,1
11:20	3,5	100,4	49,7	67,5	17,1	18,3	40	58,6		
11:50	4,0	100,3	50,1	67,9	17,8	19,1	40	54,7	27,8	27,5
12:20	4,5	99,9	53,3	69,2	18,0	19,8	40	51,5		
12:50	5,0	99,3	49,8	70,4	18,0	20,4	42	48,9	26,8	25,9
		Exp.		Simulado				Exp.		Simulado
		Água removida (kg)		94,0		Consumo de lenha (kg)		133,0		44,5
		Massa final (kg)		753,0		Consumo esp. de energia (kJ.kg ⁻¹)		9274		7375
		Massa Inicial (kg)		978,0						

Tabela M- Dados simulando obtidos modelando o Teste 11B

Hora	Tempo (h)	Temperatura (°C)					Umidade relativa (%)		Teor de água (% b.u.)	
		Secagem Exp.	Grãos		Ambiente		Exp.	Simulado	Exp.	Simulado
			Exp.	Simulado	Exp.,	Simulado				
14:45	5,0	79,1	44,5	43,9	18,0	-	40	-	26,8	26,7
15:15	5,5	100,1	46,1	49,4	18,0	-	40	-		
15:45	6,0	100,2	51,8	57,8	19,0	21,5	40	47,0	25,4	24,7
16:15	6,5	102,7	51,2	65,6	19,4	21,3	40	49,0		
16:45	7,0	100,7	52,2	71,0	19,0	20,9	42	51,7	23,23	22,6
17:15	7,5	103,8	54,6	73,0	18,0	20,5	47	55,0		
17:45	8,0	99,5	53,1	75,8	17,8	19,9	55	58,8	22	20,8
18:15	8,5	103,2	56,2	79,1	14,0	19,2	67	63,2		
18:45	9,0	97,3	59,5	81,1	13,5	18,4	73	67,9	19,2	19,2
		Exp.		Simulado				Exp.		Simulado
		Água removida (kg)		84,4		Consumo de lenha (kg)		133,0		35,6
		Massa final (kg)		753,0		Consumo esp. de energia (kJ.kg ⁻¹)		9274		6568
		Massa Inicial (kg)		978,0						

Tabela N- Dados simulando obtidos modelando o Teste 11C

Hora	Tempo (h)	Temperatura (°C)					Umidade relativa (%)		Teor de água (% b.u.)	
		Secagem Exp.	Grãos		Ambiente		Exp.	Simulado	Exp.	Simulado
			Exp.	Simulado	Exp.	Simulado				
07:45	9,0	68,5	22,5	23,0	6,9	11,5	100	95,0	18,8	18,8
08:15	9,5	103,2	44,2	42,7	9,5	12,5	100	89,5		
08:45	10,0	101,3	49,9	58,1	11,0	13,4	95	84,0	17,3	17,0
09:15	10,5	101,4	58,6	71,7	12,3	14,4	85	78,6		
09:45	11,0	102,2	59,5	80,4	13,9	15,4	72	73,4	15,1	15,0
10:15	11,5	100,8	63,1	82,9	15,0	16,4	62	68,3		
10:45	12,0	103,5	62,3	85,5	15,1	17,3	62	63,6	13,4	13,3
11:15	12,5	102,2	68,9	87,6	15,5	18,1	60	59,3	12,7	12,6
		Exp.		Simulado				Exp.		Simulado
Água removida (kg)				57,4		Consumo de lenha (kg)		133,0		31,1
Massa final (kg)		753,0		737,6		Consumo esp. de energia (kJ.kg ⁻¹)		9258		8452
Massa Inicial (kg)		978,0								

Tabela F- Dados simulando obtidos modelando o Teste 12

Hora	Tempo (h)	Temperatura (°C)					Umidade relativa (%)		Teor de água (% b.u.)	
		Secagem Exp.	Grãos		Ambiente		Exp.	Simulado	Exp.	Simulado
			Exp.	Simulado	Exp.	Simulado				
08:10	0,0	78,3	19,1	19,6	8,0	12,3	100	90,5	29,8	29,8
08:40	0,5	102,2	36,7	34,4	8,5	13,3	100	84,9		
09:10	1,0	99,6	48,1	45,7	10,0	14,3	95	79,5	25,6	28,9
09:40	1,5	100,3	49,2	56,1	14,5	15,2	82	74,3		
10:10	2,0	103,7	48,4	63,5	16,5	16,2	80	69,2	24,3	27,7
10:40	2,5	98,7	48,1	65,1	16,7	17,1	77	64,3		
11:10	3,0	102,5	48,7	65,5	18,0	18,0	70	59,9	24,1	26,1
11:40	3,5	100,8	50,4	67,4	19,0	18,8	62	56,0		
12:10	4,0	102,1	52,5	69,5	20,9	19,6	52	52,5	21,0	24,6
12:40	4,5	101,5	54,6	71,6	20,3	20,2	51	49,7		
13:10	5,0	100,6	55,1	73,7	20,0	20,7	50	47,4	19,6	23,0
13:40	5,5	99,8	52,9	74,3	20,0	21,1	50	45,9		
14:10	6,0	100,8	54,5	75,2	19,5	21,4	47	45,0	17,9	21,5
14:40	6,5	99,4	59,0	76,9	20,0	21,6	47	44,9		
15:10	7,0	100,1	59,5	78,8	19,5	21,6	50	45,4	16,3	20,2
15:40	7,5	99,6	59,7	80,2	19,0	21,6	51	46,7		
16:10	8,0	100,7	61,0	80,9	19,0	21,3	52	48,7	14,6	18,9
16:40	8,5	101,0	63,0	81,5	18,0	21,0	54	51,2		
17:10	9,0	102,0	66,0	82,4	17,0	20,5	55	54,4	12,3	17,6
17:40	9,5	100,1	63,2	84,0	16,0	20,0	56	58,2	12,9	17,0
		Exp. Simulado				Exp. Simulado				
Água removida (kg)		176,0		Consumo de lenha (kg)		87,0		84,5		
Massa final (kg)		897,0		Consumo esp. de energia (kJ.kg ⁻¹)		6251		7479		
Massa Inicial (kg)		1114,0								