



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA**

**PATRICK ARAUJO DE JESUS**

**SÍNTESE E ANÁLISE DO PROCESSO DE SECAGEM  
ARTIFICIAL DE AMÊNDOAS DE CACAU**

SÃO MATEUS – ES

2015

PATRICK ARAUJO DE JESUS

**SÍNTESE E ANÁLISE DO PROCESSO DE SECAGEM  
ARTIFICIAL DE AMÊNDOAS DE CACAU**

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-graduação em Energia do Centro Universitário do Norte do Espírito Santo da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do grau de Mestre em Energia na Área de concentração Interdisciplinar em Engenharia, Tecnologia e Gestão.

Orientador: Leonardo da Silva Arrieche.

Coorientador: Marcelo Silveira Bachelos.

SÃO MATEUS – ES

2015

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Divisão de Biblioteca Setorial do CEUNES - BC, ES, Brasil)

---

- J58s Jesus, Patrick Araujo de, 1977-  
Síntese e análise do processo de secagem artificial de amêndoas de cacau / Patrick Araujo de Jesus. – 2015.  
91 f. : il.
- Orientador: Leonardo da Silva Arrieche.  
Coorientador: Marcelo Silveira Bachelos.  
Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Universitário Norte do Espírito Santo.
1. Eficiência energética. 2. Secagem. 3. Equipamento de secagem. 4. Cacau. I. Arrieche, Leonardo da Silva. II. Bachelos, Marcelo Silveira. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Universitário Norte do Espírito Santo. IV. Título.

CDU: 620.9

# **SÍNTESE E ANÁLISE DO PROCESSO DE SECAGEM ARTIFICIAL DE AMÊNDOAS DE CACAU**

**PATRICK ARAUJO DE JESUS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energia, para obtenção do título de Mestre em Energia.

Aprovada: 23/09/2015.

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Margarete Martins Pereira  
Ferreira  
Universidade Federal de Goiás  
Examinadora Externa

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Taisa Shimosakai de Lira  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Examinadora Interna

---

Prof. Dr. Marcelo Silveira Bacelos  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Examinador Interno

---

Prof. Dr. Leonardo da Silva Arrieche  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Orientador

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus, pela oportunidade de desenvolver essa dissertação e que me proporciona a cada dia crescer e amadurecer para essa longa jornada que é a vida.

Aos meus pais José Carlos de Jesus e Meirijones Araujo de Jesus. Obrigado por todo amor que vocês me dedicaram, por todo incentivo, pelas orações e conselhos, por todos os sonhos que vocês me ajudaram a realizar.

Aos meus irmãos Franco Araujo de Jesus, Priscylla Araujo de Jesus e aos familiares, pela convivência e que indiretamente me ajudaram nessa caminhada.

A minha esposa Sara Oliveira Corsini Araujo e ao meu filho João Carlos Corsini Araujo, por todo amor, carinho e compreensão nos momentos difíceis.

Ao meu orientador Prof. Dr. Leonardo da Silva Arrieche, pela competência em transmitir o conhecimento, profissionalismo, pela paciência durante os meus momentos difíceis entre o trabalho e os estudos. Foi de suma importância a sua orientação para a conclusão do trabalho e para meu crescimento profissional e pessoal. Muito obrigado por acreditar em mim.

Aos professores do PGEN/UFES, em especial aos professores: Marcelo Silveira Bachelos, Taisa Shimosakai de Lira e Thiago Padovani Xavier. Obrigado pela dedicação e amizade.

## RESUMO

A secagem solar das amêndoas de cacau está sujeita ao clima, o que pode reduzir sua qualidade. Assim, avaliou-se o melhor tipo de secador convectivo, por meio de árvores de estado e heurísticas, visando à eficiência energética e à qualidade do produto. Determinou-se a evolução de forma das amêndoas com o tempo de secagem, bem como a eficiência energética. A cinética em camada fina foi investigada para o secador de leito fixo selecionado na síntese, com ar nas velocidades de 1,0 a 3,0m/s e temperaturas de 60 a 80°C. Analisou-se as equações de Lewis (1921), Brooker et al. (1974), Henderson e Henderson (1968), Page (1949) e Overhults et al. (1973), utilizando a discriminação de modelos com base em medidas de não linearidade. Pelas medidas de curvatura de Bates e porcentagem de vício de Box foi constatado que o modelo Overhults representa a cinética de secagem das amêndoas de cacau. Para a temperatura de 80°C a eficiência energética máxima do processo foi de 28%.

Palavras chave: Regra Heurística, Leito fixo, Eficiência energética.

## **ABSTRACT**

Solar of cocoa almonds is subject to climate drying, What CAN YOUR Collect Quality. SO, we evaluated the best kind of convective dryer, By State Trees medium and heuristics, aimed at Energy Efficiency and Product Quality. It was determined a form of evolution of almonds with the rate of drying, As Well As Energy Efficiency. The kinetic Thin Layer was investigated for the fixed bed dryer selected in Synthesis with IN air velocities of 1.0 to 3.0m / s and temperatures from 60 to 80°C was analyzed as Lewis Equations (1921), Brooker et al. (1974) and Henderson (1968), Page (1949) and Overhults et al. (1973) using a discrimination models based on measures Not linearity. By Bates curvature measures and Box addiction percentage was found que Overhults the representation model one drying kinetics of cocoa almonds. For a temperature of 80°C to Process Efficiency Maximum was 28%.

Keywords: Heuristic Rule, Fixed Bed, Energy Efficiency.

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_s$	Área superficial do grão	[ m <sup>2</sup> ]
$N_w$	Taxa de secagem	[ - ]
$\frac{dX}{dt}$	Taxa de variação da umidade em relação ao tempo	[kg água/ kg sólido seco * s]
$m_a$	Massa de água contida no produto	[ Kg ]
$m_{ss}$	Massa de sólido seco	[ Kg ]
$v_{ar}$	Velocidade do ar	[ m.s <sup>-1</sup> ]
$A_w$	Atividade de água	[ - ]
$k$	Constante de secagem	[ - ]
$M$	Umidade em base seca em um determinado instante	[ - ]
$M_0$	Umidade inicial em base seca	[ - ]
$M_{eq}$	Umidade de equilíbrio	[ - ]
$T_g^E$	Temperatura do ar na entrada do secador	[ K ]
$T_g^S$	Temperatura do ar na saída do secador	[ K ]
$T^{sat}$	Temperatura do ar saturado na saída do secador	[ K ]
$T_a$	Temperatura do ar ambiente	[ K ]
$E$	Eficiência energética	[ % ]
$\Delta H_v$	Entalpia de vaporização da água na saída do secador	[ kJ.kg <sup>-1</sup> ]
$A_t$	Área da seção transversal da tubulação de ar do secador	[ m <sup>2</sup> ]
$\varepsilon$	Eficiência energética acumulativa em um dado intervalo de tempo	[ % ]

$\eta_E$	Eficiência térmica	[ %]
$c_p$	Capacidade calorífica específica	[kJ.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$Q$	Vazão volumétrica	[ m <sup>3</sup> /min ]
$f$	frequência	[ Hz ]

### Subscritos

0	inicial
a	Ambiente
E	Entrada
g	Fase fluida, gasosa
S	Saída

$A, B, C \text{ en}$	Adimensionais a serem estimados	[ - ]
$MR$	Umidade adimensional	[ - ]
$P$	Pressão de vapor	[ kPa ]
$P^0$	Pressão de vapor da água pura	[ kPa ]
$T$	Temperatura do ar	[ K ]
$t$	Tempo de secagem	[ s ]
$U$	Umidade em base úmida	[kg água / kg massa úmida ]
$X$	Umidade em base seca	[kg água / kg massa seca]

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1 - Etapas do processo produtivo do chocolate .....	22
Figura 2. 2 - Umidade versus atividade de água.....	32
Figura 2. 3 - Esquema de quatro tipos básicos de secadores convectivos .....	35
Figura 2. 4 - Classificação dos secadores baseado no método de operação e na escala de produção .....	37
Figura 2. 5 - Curvas de secagem adimensionalizadas.....	41
Figura 2. 6 - Vista em corte transversal de uma amêndoa de cacau .....	43
Figura 2. 7 - Performance energética característica de um secador de leito fixo .....	47
Figura 2. 8 - Performance energética característica de um secador rotativo .....	47
Figura 3. 1 - Rotas para o subsistema de separação de polpa .....	50
Figura 3. 2 - Algoritmo de Van't Land para a seleção de secadores em batelada (S: sim; N: não).....	51
Figura 3. 3 - Esquema do aparato experimental .....	53
Figura 3. 4 - Leito fixo.....	54
Figura 3. 5 - Sistema de iluminação para obtenção de imagens digitais.....	55
Figura 4. 1 - Árvore de estados do processamento de secagem das amêndoas de cacau .....	62
Figura 4. 2 - Resultado típico de velocidade do ar na região de secagem, com $VA = 1 \pm 0,1$ m/s.....	65
Figura 4. 3 - Resultado típico da temperatura do ar na região de secagem, com $TA = 70,0 \pm 0,25$ °C.....	66
Figura 4. 4 - Análise de imagem das amêndoas de cacau no início do processo .....	67

Figura 4. 5 - Decréscimo do volume da amêndoa de cacau em relação ao tempo e da temperatura do ar de 60, 70 e 80 °C parametrizado na velocidade do ar de 1,0 m/s (a) e 3,0 m/s (b). .....	68
Figura 4. 6 - Ajuste do volume ao modelo do encolhimento.....	69
Figura 4. 7 - Densidade de fluxo de massa em relação à umidade em base seca e da temperatura do ar de 60, 70 e 80 °C parametrizado na velocidade do ar de 1,0 m/s (a) e 3,0 m/s (b). .....	70
Figura 4. 8 - Adimensional de umidade em função do tempo e da temperatura do ar de 60, 70 e 80 °C parametrizada na velocidade do ar de 1,0 m/s (a) e 3,0 m/s (b). .....	70
Figura 4. 9 - Adimensional de umidade em função do tempo e da velocidade do ar de 1 e 3,0 m/s, parametrizada na da temperatura do ar de 60°C (a), 70°C (b) e 80°C (c).....	71

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1 - Concentração de flavanols em diferentes alimentos .....	21
Tabela 2. 2 - Principais secadores que já foram empregados na secagem de produtos sólidos .....	36
Tabela 2. 3 - Critérios para a classificação de secadores .....	38
Tabela 2. 4 - Equações de cinética de secagem utilizadas para materiais orgânicos.....	40
Tabela 3. 1 - Especificações de medidas do telescópio HOTWIRE .....	54
Tabela 4. 1 - Dimensões de uma amostra de amêndoas obtidas no início do processo.....	67
Tabela 4. 2 - Dimensões de uma amostra de amêndoas obtidas no final do processo.....	67
Tabela 4. 3 - Desvio percentual entre médias das dimensões de duas amostras de amêndoas obtidas no início e final do processo em relação às médias iniciais.....	68
Tabela 4. 4 - Valores dos parâmetros e do coeficiente de correlação para a equação do encolhimento .....	69
Tabela 4. 5 - Parâmetros estimados e medidas de curvatura .....	72
Tabela 4. 6 - Eficiência de secagem nas temperaturas de 60, 70 e 80°C parametrizada na velocidade do ar de 3,0 m/s.....	75

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	Motivação a Pesquisa.....	16
1.2	Colocação do Problema em Estudo .....	17
1.3	Objetivo.....	19
1.4	Etapas.....	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	20
2.1	O cacau .....	20
2.1.1	Aspectos Introdutórios do Processo de Secagem. ....	27
2.1.2	Mecanismos de Transporte de Umidade no Interior de Sólidos .....	28
2.1.3	Umidade .....	29
2.2	Secagem.....	29
2.2.1	Atividade de Água.....	30
2.2.2	Transferência de Massa e Calor na Secagem de Grãos.....	32
2.2.3	Encolhimento .....	33
2.3	Equipamentos.....	34
2.4	Cinética de Secagem.....	39
2.5	Importância dos Parâmetros de Processo .....	42
2.6	Aspectos Energéticos e Performance de Secadores.....	43
2.7	ENGENHARIA DE PROCESSOS .....	48
2.7.1	Análise e Síntese de Sistemas .....	48
2.7.2	Método Heurístico.....	48
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	49

3.1	Material .....	49
3.2	Escolha do tipo de secador.....	49
3.2.1	Subsistema de Separação da Polpa.....	50
3.2.2	Subsistema de Secagem.....	51
3.3	Determinação da Árvore de Estados e do Fluxograma Base .....	52
3.4	Unidade Experimental de Secagem Convectiva .....	52
3.5	Câmara de Secagem .....	53
3.6	Caracterizações Físicas.....	55
3.7	Encolhimento .....	57
3.8	Cinética de Secagem.....	58
3.9	Procedimento Experimental.....	58
3.10	Análise da Eficiência Energética.....	59
3.11	Procedimento de Análise dos Dados.....	59
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	61
4.1	ÁRVORE DE ESTADOS.....	61
4.2	REGRAS HEURÍSTICAS E FLUXOGRAMA BASE.....	62
4.2.1	Subsistema de Separação de Polpa.....	63
4.2.2	Subsistema de Secagem.....	63
4.2.3	Fluxograma Base.....	64
4.3	Câmara de Secagem .....	65
4.4	Caracterizações Físicas.....	66
4.5	Encolhimento do Material .....	68
4.6	Cinética de Secagem.....	69
4.7	Análise da Eficiência Energética.....	74

5	CONCLUSÕES.....	77
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	78
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	79
	APÊNDICE A.....	89

# 1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados a motivação da pesquisa para o desenvolvimento do processo de secagem, o problema específico abordado, o objetivo do trabalho e as etapas.

## 1.1 Motivação a pesquisa

A secagem tradicional do cacau ainda é realizada em áreas cimentadas, ou assoalhadas, bandejas, ou no próprio solo (NASCIMENTO, 2010). No Brasil, o cacau é predominantemente seco em barcaças, este processo apresenta as seguintes desvantagens: está sujeito a variações climáticas e o elevado custo com a mão-de-obra.

Segundo Nascimento (2010), devido ao reduzido controle em relação ao tempo de fermentação e secagem, ocasiona-se uma baixa qualidade das amêndoas. Como consequência, uma porção importante das amêndoas não desenvolverá o sabor característico no processo de torra, reduzindo a qualidade do chocolate produzido.

Além disso, o cacau possui grande importância na economia do norte do Espírito Santo, tendo em vista que a maior parte da produção é utilizada para a fabricação do chocolate. O Estado figura-se entre os principais produtores do Brasil e, nesta região, encontra-se a cidade de Linhares, a qual conquistou o Certificado de Indicação Geográfica do cacau, concedido pelo Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), o que confere ao cacau da região maior valor de mercado, uma identidade própria e renome internacional (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, 2014).

Devido à posição no cenário brasileiro da cidade de Linhares e a grande geração de recursos na agricultura, na indústria, no comércio e na prestação de serviços, é necessário que as cooperativas do Estado mantenham - se competitivas no mercado nacional, isto pode ser atingido através de uma secagem controlada e eficiente das amêndoas do cacau.

Neste sentido, estudos são necessários para obtenção das amêndoas de cacau via secagem artificial com e sem fermentação prévia, bem como, uma avaliação dos chocolates produzidos a partir de destas amêndoas. Estima-se que o chocolate

produzido nestas condições exija menor tempo nas etapas de torra, conchagem e refino para eliminação de contaminantes microbiológicos e acidez (HOSKIN; DIMICK, 1980).

A existência de diversos métodos de secagem, bem como critérios de desempenho para uma grande diversidade de secadores artificiais, tem sido alvo de estudos por vários pesquisadores no âmbito nacional, destacando-se as pesquisas realizadas por (BACELOS, 2004; ALMEIDA, 2009; GONELI, 2011; SANTOS, 2013). No âmbito internacional também se encontra as pesquisas de (NISHIYAMA, 2006; TARIGAN, 2007; COLAK et al. 2009; HACIHAFIZOGLU, 2008; MUJUMDAR *et al.* 2010; MORAES, 2012).

Nestes trabalhos foram realizados estudos sobre a secagem de diferentes tipos de grãos e pastas, estabelecendo condições ótimas de operação e proposição de modificações no processo de modo a melhorar a sua eficiência energética. Tanto no âmbito nacional como no internacional, são vários os trabalhos na literatura sobre a secagem em termos de eficiência energética, por exemplo, (FRANCO, 2001; PAVANELLI, 2003; KUDRA, 2004; FERNANDES, 2005; BACELOS, 2009; BORTOLAIA, 2011).

O processo de secagem do cacau, amêndoa objeto de estudo neste trabalho, em secador convectivo, apresenta algumas exigências: deve ser eficiente, onde uma quantidade prescrita de água necessita ser retirada para que o grão atinja o teor de umidade adequado ao armazenamento; deve ser seguro, visto que o grão não pode sofrer danos que prejudiquem sua finalidade futura; e deve ser econômico, sendo realizado com o mínimo custo operacional.

O exposto justifica a importância da pesquisa e desenvolvimento tecnológico nos processos de secagem para a região Norte do Estado do Espírito Santo, que contempla a produção agrícola do cacau.

## **1.2 Colocação do problema em estudo**

A secagem é uma operação unitária complexa que envolve processos de transferência em conjunto com mudanças físicas, químicas e bioquímicas que, em

troca, podem conduzir a variações nos mecanismos de transferência de calor e massa. Por outro lado, o conhecimento sobre os processos de transporte e ciência de materiais relacionados às operações de secagem não é completo. Há uma necessidade crescente por compreensão fundamental e também por projetos de equipamentos em escala industrial. Com o entendimento mais aprofundado dos processos de secagem, esta operação pode se tornar mais confiável e lucrativa em termos industriais (MUJUMDAR, 2010).

Além da complexidade que a secagem oferece, outras dificuldades podem ser encontradas, como a diversidade e a heterogeneidade das amêndoas de cacau. Diante destas particularidades, não existe um único método de secagem que possa ser recomendado para a secagem de todos os tipos de amêndoas. Assim como na secagem de materiais tradicionais, a escolha adequada do tipo de técnica e do equipamento para a secagem de produtos sólidos está intimamente relacionada às características do material a ser seco, do produto final desejado, eficiência energética e dos custos operacionais. A definição da escolha adequada exige estudos específicos dos fenômenos de transferência (de calor e massa) e suas implicações sobre a qualidade requerida do produto.

De uma maneira geral, o processo de secagem envolve o transporte de líquido através da matriz sólida e o transporte de vapor na superfície do material que está sendo seco e em seus interstícios mediante a vaporização da água líquida. A evaporação da água deve-se ao calor suprido ao sistema pelo ar aquecido, por exemplo, em que energia térmica é transportada da fase gasosa para a fase sólida primeiramente por convecção (considerando o “modelo” da camada limite) e, posteriormente, por condução através do sólido.

A condução de calor através do sólido, por sua vez, é dependente da umidade e da porosidade do material (KEEY, 1978). A umidade pode migrar para a superfície devido à diferença de concentração de líquido e vapor e devido à diferença de pressão. Em outras palavras, o transporte de umidade no interior do sólido pode ocorrer por difusão e por relações complexas entre difusão e capilaridade.

As principais razões para uma baixa eficiência energética e deterioração da estrutura física da amêndoa, é decorrente de uma secagem excessiva ou insuficiente. A secagem excessiva pode causar o encolhimento do produto,

promover perda de características requeridas, acarretar alto consumo energético, provocar degradação térmica, tornando-o instável e quebradiço. A secagem insuficiente pode favorecer a proliferação de fungos e bactérias, transformando a amêndoa em um produto tóxico, sendo esses efeitos indesejáveis (ARRIECHE, 2003).

### **1.3 Objetivo**

O objetivo desse trabalho foi selecionar o melhor tipo de secador convectivo e estudar a secagem da amêndoa do cacau, visando analisar a eficiência energética do processo, bem como a qualidade do produto final.

### **1.4 Etapas**

Para atingir o objetivo deste trabalho, foram realizadas as seguintes etapas.

Estabelecimento do problema de síntese:

- determinação da estrutura viável para o processo de secagem;

Realização de experimentos:

- reconhecimento da unidade experimental;
- preparação das amostras;
- determinação de propriedades físicas das amêndoas de cacau;
- condução de testes;

Análise da secagem:

- análise dos dados experimentais e desempenho energético do processo.

Estas etapas foram detalhadas na metodologia. A seguir será dado o embasamento teórico e avanços no tema desta pesquisa, bem como a necessidade de novos estudos com foco em produtos regionais, como o cacau.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Apresenta-se neste capítulo a revisão bibliográfica dos temas abordados nesta dissertação, consistindo do estudo geral sobre o processo e os mecanismos de secagem de grãos, dos equipamentos de secagem, os secadores e as equações matemáticas de secagem de grãos em camada fina.

Pretendeu-se dar uma visão concisa dos fenômenos envolvidos no problema em questão, citando-se trabalhos relacionados com o tema desta pesquisa e a forma de abordagem do problema em estudo, utilizada por diversos autores. No final do capítulo, conclui-se, com base na revisão bibliográfica, sobre os desafios adicionais para o entendimento e desenvolvimento da proposta.

### 2.1 O cacau

O cacau é um fruto muito popular, pois a partir de suas amêndoas é obtido um dos alimentos mais conhecidos e apreciados: o chocolate. Seu sabor é condicionado não apenas a atributos genéticos do cacauzeiro (variedade), como também a modificações que ocorrem durante seu beneficiamento. Basicamente, após a colheita do cacau, são efetuadas as operações de abertura dos frutos, fermentação das amêndoas junto à polpa que as envolve, secagem e torração para obtenção da massa ou liquor de cacau, que será utilizado na obtenção de manteiga e pó de cacau, além de chocolates e produtos análogos (BECKETT, 1994).

Durante essas etapas são gerados não apenas os precursores do sabor característico dos produtos de cacau, como também compostos que não mais sofrerão modificações e que contribuirão para esse sabor. No entanto, concomitantemente, segundo relatos de diversos autores, nas etapas de fermentação e secagem, ocorrem as maiores perdas de compostos fenólicos presentes naturalmente e em elevadas quantidades nas amêndoas de cacau.

Descobertas sobre os efeitos benéficos desses compostos à saúde humana têm provocado interesse em mantê-los durante o processamento dos produtos obtidos do cacau, sem prejuízo do sabor (KEALEY *et al.* 1998; KEALEY *et al.* 2004; EFRAIM, 2004; RIZO, 2006). Um crescente número de estudos tem evidenciado

diversos efeitos benéficos à saúde proporcionados pelos flavonóides, na prevenção e atenuação do risco de contração de determinadas doenças, especialmente em relação à saúde cardiovascular (SANBONGI et al. 1998; WOLLGAST; ANKLAN, 2000; MAO *et al.* 2000; REIN et al. 2000; STEINBERG; BEARDEN; KEEN, 2003; VINSON *et al.* 2006); prevenção de cânceres; atividade anti-inflamatória e melhoria das funções endoteliais e das funções vasculares (SIES et al. 2005).

Independentemente do processo de fabricação aplicado e matéria-prima utilizada para produzir o chocolate, o flavanol é o flavonóide mais abundante presente no chocolate, além de ser um dos alimentos fontes deste flavonóide, como mostrado na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1** - Concentração de flavanols em diferentes alimentos

<b>Fonte alimentar</b>	<b>Flavonol (mg/Kg/mg/l)</b>
Chocolate	460 - 610
Feijão	350 - 550
Cereja	50 - 220
Pêssego	50 - 140
Amora	130
Maçã	20 - 120
Chá verde	100 - 800
Chá preto	60 - 500
Vinho tinto	80 - 300

**Fonte:** adaptado de Fraga et al. 2011.

### **- Etapas do processo produtivo**

Após o plantio e a colheita, as amêndoas de cacau têm características muito bem definidas, como cor púrpura, sabor amargo e odor adstringente, porém na forma em que se encontram não possuem valor comercial (OETTERER *et al.* 2006). Segundo Lopes (2000), a produção do chocolate se divide em duas fases: o pré processamento e o processamento propriamente dito, conforme ilustra a Figura 2.1.

A fim de se obter as amêndoas secas, de boa qualidade e com características e composições diferentes das amêndoas frescas, e aumentar seu valor agregado, as

etapas de préprocessamento são realizadas. São elas: fermentação e secagem (OETTERER *et al.* 2006; CARVALHO *et al.* 2008).

Após o primeiro processamento das amêndoas, para o processo de obtenção das matérias-primas, etapas adicionais são necessárias para se alcançar um produto final de boa qualidade, é o processamento propriamente dito (LOPES, 2000). O processo de manufatura deve ser adequado visando a obtenção de um produto homogêneo a partir da mistura de massa de cacau, açúcar, manteiga de cacau, aromatizantes e emulsificantes (OETTERER *et al.*, 2006). Para esta parte do processamento, as etapas são torrefação, conchagem, temperagem, refino e moldagem.



**Figura 2. 1** - Etapas do processo produtivo do chocolate  
**Fonte:** Nascimento, 2014.

### - Fermentação

Existem dois tipos básicos de processos fermentativos: a fermentação submersa e a fermentação em estado sólido. A primeira é um processo que disponibiliza os nutrientes – peptonas, açúcares e substâncias complexas – para os microrganismos em meio líquido, seja água ou soluções tampão. Devem ser mantidas sob agitação constante para que o sistema fermentativo esteja sob aeração adequada e disponibilidade de nutrientes (OLIVEIRA *et al.* 2012).

A fermentação em estado sólido é definida como uma técnica que envolve o crescimento e o metabolismo de microrganismos na ausência ou quase ausência de água livre, empregando um substrato sólido ou suporte; ou seja, o microrganismo cresce em partículas de um substrato sólido orgânico, com mínimo de água livre nos espaços entre as partículas. Processos que utilizam substratos sólidos são economicamente importantes, pois podem ser utilizados como matérias-primas de baixo custo. Esta técnica tem muitas vantagens sobre a fermentação submersa incluindo altos rendimentos e baixo consumo de energia (FERNANDES, 2007; DAMASO *et al.* 2008).

A fermentação das amêndoas de cacau facilita a separação da polpa, produzindo os precursores de sabor e aroma. As amêndoas são empilhadas em montes ou em cochos. Em ambos os casos, elas são revolvidas de tempos em tempos. No processo tradicional, a massa de cacau é coberta com sacos de juta ou folhas de bananeira a fim de reduzir perdas de calor e consequente ressecamento da camada superficial. A polpa vai se desintegrando, fica líquida e é escoada pelo fundo das caixas de fermentação. O processo é exotérmico e conforme a temperatura aumenta, pode ocorrer a germinação de algumas amêndoas; porém, ao atingir por volta de 35 a 40 °C não há mais germinação, e no fim de quatro a cinco dias, não existem mais amêndoas vivas (LOPES, 2000; OETTERER *et al.* 2006).

A primeira etapa é anaeróbica e as leveduras se multiplicam produzindo álcool etílico. Entretanto, o próprio álcool produzido inibe o crescimento das leveduras e este é oxidado a ácido acético e dióxido de carbono. A segunda fase é aeróbica e ocorre via acetobactérias que oxidam o ácido acético até a formação de água e dióxido de carbono. Sabor e aroma só aparecem devido à ação das enzimas provenientes das leveduras.

Como apresentado, a fermentação das amêndoas é um processo dinâmico e dura aproximadamente oito dias. Períodos mais longos provocam a decomposição das proteínas e a consequente liberação de amônia. Ao fim da fermentação, o teor de umidade está entre 50 e 60% e os polifenóis próximos a 2% (OETTERER *et al.* 2006).

## **- Secagem**

Tradicionalmente, a secagem das amêndoas de cacau é feita por exposição ao sol em barcaças de madeira. Nesta fase, os processos de desenvolvimento de sabor e escurecimento das amêndoas continuam e adstringência, amargor e acidez são diminuídos. A temperatura de secagem é importante na qualidade final das amêndoas; o ideal está na faixa de 35 a 40 °C, pois esta é a faixa em que as enzimas responsáveis por catalisarem as reações químicas de cura tem ação otimizada. A secagem tem um tempo ótimo para ocorrer, de 4 a 5 dias, se encerrando quando 8% de umidade são atingidos (OETTERER *et al.* 2006; RODRIGUEZ-CAMPOS *et al.* 2012).

Como alternativa a este método, emprega-se a secagem artificial. O cacau seco artificialmente possui acidez mais elevada comparado ao seco ao sol; além disso, a redução de ácidos graxos voláteis é menor. A temperatura mais comumente utilizada está na faixa de 40 a 60 °C, embora, nas fazendas produtoras de cacau que utilizam secagem artificial, a temperatura empregada seja maior; fato que diminui a qualidade do produto seco, já que a temperatura mais alta pode inativar as enzimas responsáveis pelos precursores de sabor (OETTERER *et al.* 2006).

Além do já exposto, a secagem artificial requer instalações mais caras. Neste caso, recomenda-se o uso da secagem mista, em que, durante três dias realiza-se a secagem de exposição ao sol e depois se complementa o processo com a secagem artificial. A secagem, por ser uma etapa primordial na qualidade do produto final, deve ser bem conduzida, pois, se lenta, pode favorecer o surgimento de fungos e conseqüente sabor desagradável, e se rápida, pode influenciar nas características do produto final (OETTERER *et al.* 2006; EFRAIM *et al.* 2010; RODRIGUEZ-CAMPOS *et al.* 2012).

## **- Torrefação**

A torrefação é um tratamento térmico fundamental na obtenção das características do chocolate. As reações que ocorrem nesta etapa dependem de fatores como tempo, temperatura, umidade, pH e concentração de precursores aromáticos

(LOPES, 2000). É também a operação principal do beneficiamento, pois as amêndoas perdem água e traços de ácido acético por evaporação.

No processamento tradicional, a torrefação é realizada numa torre pela qual ar aquecido passa do fundo para o topo, enquanto as amêndoas secas são colocadas no alto da torre e vão caindo. O calor exerce efeito catalítico nos precursores de sabor presentes após fermentação e secagem, principalmente pela reação de Maillard (OETTERER *et al.* 2006).

Além disso, segundo Queiroz (1999), há o desenvolvimento da cor típica, redução de ácidos voláteis, inativação de enzimas que degradam a manteiga de cacau, redução do teor de água e mudança na textura dos cotilédones.

### **- Conchagem**

Esta etapa consiste em um processo mecânico responsável por transformar o pó refinado em uma suspensão fluida de partículas de açúcar, cacau e leite em pó na fase gordurosa líquida. Na conchagem, o chocolate é exposto a intensa agitação e cisalhamento, durante várias horas, sob temperatura na faixa de 60 a 70 °C. Os principais objetivos dessa fase são a remoção dos voláteis indesejados, redução da viscosidade e, principalmente, o desenvolvimento do sabor (LUCCAS, 2001; COHEN, 2003).

### **- Temperagem**

Este processo consiste na cristalização controlada do chocolate, a fim de alcançar a forma cristalina mais estável, uma vez que a manteiga de cacau apresenta características polimórficas e cristaliza de diferentes formas dependendo das condições de resfriamento. Na prática, a temperagem é o resfriamento do chocolate, da temperatura que sai da conchagem até 28 °C, ponto de solidificação da manteiga de cacau (LUCCAS, 2001; OETTERER *et al.* 2006).

Três parâmetros devem ser considerados: tempo, velocidade de agitação e temperatura. O chocolate é aquecido até que ocorra a fusão completa da fase gordurosa, entre 40 e 45 °C, e em seguida passa por um resfriamento lento, com movimento constante, até a temperatura de cristalização. Em seguida, um novo aquecimento é realizado, a fim de eliminar os possíveis cristais instáveis; neste caso, a temperatura não pode ultrapassar a temperatura de fusão dos primeiros cristais, por volta de 31°C. No final, o chocolate apresenta o dobro da viscosidade quando comparado às condições iniciais (HARTEL, 2001; SCHENK & PESCHAR, 2004).

#### **- Refino**

Nesta etapa ocorre a redução da granulometria da massa, com a finalidade de que 90% das partículas sólidas estejam com tamanho máximo em torno de 20 a 25 µm. Chocolates com partículas muito pequenas são mais cremosos, porém sua viscosidade tende a ser maior, o que pode ocasionar problemas no processamento posterior, já que aumentam as propriedades reológicas e o limite de escoamento. Já os produtos com tamanhos de partícula maiores que 25 µm podem apresentar percepção arenosa durante a degustação (ITAL, 1998; OLIVEIRA *et al.* 2007).

#### **- Moldagem**

Na moldagem, a massa fluida é colocada em moldes a uma temperatura entre 30 e 40 °C. Os moldes podem ser metálicos ou plásticos, a fim de economizar energia e manter a higiene e devem ser previamente aquecidos para que não ocorra arrefecimento drástico da massa ao entrar em contato com o molde. Esse aquecimento deve ser uniforme, para evitar pontos quentes ou frios localizados e a temperatura usada deve ser próxima à temperatura de temperagem (MINIFIE, 1983).

### 2.1.1 Aspectos introdutórios do processo de secagem.

A higroscopia caracteriza a capacidade que o grão possui de ceder ou absorver umidade do ar e representa uma das mais importantes características físicas dos grãos. Também determina a sua capacidade de estar em permanente troca de água com o ar circundante. A intensidade e o sentido dessa troca são determinados pelo gradiente de potencial hídrico existente entre o grão e o ar, ocorrendo do maior para o menor potencial até que seja atingido o equilíbrio higroscópico. No citado equilíbrio a transferência de água entre a amêndoa e o ar é nula (VIEIRA-JUNIOR, 1999).

As amêndoas, encontrando-se em um determinado teor de umidade, são compostos por matéria seca e úmida, sendo que a água (parte úmida) pode se apresentar de várias formas. Existem três formas básicas:

1. Umidade superficial: é a umidade localizada na parte externa da amêndoa e que se encontra no estado líquido. Caracteriza-se pela fácil remoção através da vaporização;
2. Umidade intersticial: é a umidade livre no interior das amêndoas, nos denominados canais intersticiais. Na secagem é estabelecido um gradiente de pressão osmótica entre as partes interna e externa da amêndoa, forçando o aumento da pressão interna e a saída da umidade do mesmo. Esta umidade é também de remoção relativamente fácil;
3. Umidade de constituição: localizada nas células, encontra-se quimicamente ligada aos componentes dos grãos (vitaminas, proteínas, carboidratos, enzimas e gorduras). Não é removida durante a secagem.

Na secagem consegue-se remover a umidade superficial e reduzir a intersticial, permanecendo a umidade de constituição, que representa cerca de 8 a 10 % da umidade total (WEBER, 2005).

Segundo Pereira (1995), apresenta a água contida nos grãos em quatro categorias principais, sendo:

1. Água ligada ou de constituição: formada por uma camada monomolecular ligada à matéria biológica. Pode ser removida do grão somente através da aplicação de condições rigorosas de temperatura e longo período de tempo;

2. Água adsorvida: constituída por uma camada polimolecular que se adere sobre a camada monomolecular precedente. Água não solvente e fortemente adsorvida;
3. Água líquida sob pressão osmótica: é água solvente que retém substâncias no material biológico. É retirada do grão com certa dificuldade;
4. Água absorvida: é a água livre nos poros dos grãos, mantida fracamente por forças capilares. É fácil de ser retirada.

A secagem é o processo que consiste na retirada de umidade (água) dos grãos por evaporação até um nível que possibilite a armazenagem com conservação segura.

### **2.1.2 Mecanismos de transporte de umidade no interior de sólidos**

Durante o processo de secagem ocorre o transporte de água, nas formas de líquido e vapor, do interior para a superfície do grão (PARRY, 1985, PARK et al. 2007). Os principais mecanismos de transporte de água nos grãos, nas condições consideradas nesse trabalho, são:

1. Difusão líquida: é o transporte líquido devido à existência de gradientes de concentração de umidade, ou seja, transporte molecular;
2. Difusão de vapor: é o transporte de vapor devido ao gradiente de pressão de vapor provocado pelo gradiente de temperatura necessário para vaporizar a água líquida contida no grão;
3. Transporte de líquido e vapor: ocorre devido à diferença de pressão total e capilaridade.

A secagem envolve dois processos fundamentais e simultâneos: a transferência de calor e a transferência de massa. O calor é transferido do ar para o grão elevando a temperatura do mesmo e evaporando a água. A transferência de massa ocorre como líquido ou vapor dentro do grão e como vapor na sua superfície. No decorrer da secagem, as variações das transferências de calor e de massa caracterizam a ocorrência de dois ou mais períodos distintos de secagem (PARK et al. 2007; PARRY, 1985).

### 2.1.3 Umidade

Um dos importantes parâmetros do material que será seco é a umidade do produto. Sendo este a proporção entre a massa de água presente no material e a massa de matéria, e pode ser expresso de duas maneiras (BROD, 2003):

- ✓ Base Seca ( $X$ ) – Em relação à massa seca do produto (kg água / kg massa seca).

$$X = \frac{m_a}{m_{SS}} \quad (2.1)$$

Sendo  $m_{SS}$  a massa sólido seco;  $m_a$  a massa de água contida no produto.

- ✓ Base Úmida ( $U$ ) – Em relação à massa total do produto (kg água / kg massa úmida).

$$U = \frac{m_a}{(m_a + m_{SS})} \quad (2.2)$$

Segundo Harrington (1972), o excesso de umidade nas amêndoas é o principal causador da perda de matéria-prima, pois proporciona altas taxas de respiração e promove o aparecimento de fungos e bactérias. Com o intuito de minimizar esta água excedente, o homem desenvolveu métodos que promovessem tal efeito gerando condições desfavoráveis ao desenvolvimento de microrganismos no produto e pela quase total eliminação de suas atividades metabólicas; e hoje o método industrial mais aplicado é o processo de secagem.

## 2.2 Secagem

A secagem é uma das mais antigas e usuais operações unitárias aplicadas nos mais diversos processos usados em indústrias agrícolas, cerâmicas, químicas, alimentícias, farmacêuticas, de papel e celulose, mineral e de polímeros. É também uma das operações mais complexas, devido à dificuldade e deficiência na descrição matemática dos fenômenos envolvidos de transferência simultânea de calor, massa e quantidade de movimento. Assim a secagem é um conjunto de ciência, tecnologia

e arte, ou seja, um *know-how* baseado em extensiva observação experimental e experiência operacional (MUJUMDAR, 2006).

Keey (1972) define a secagem como sendo a remoção de uma substância volátil (comumente, mas não exclusivamente, água) de um produto sólido, isto é, a operação na qual a atividade de água de um alimento é diminuída pela remoção da água por vaporização. A água presente no sólido é denominada de umidade. Portanto, a secagem é caracterizada pela evaporação da água do material biológico.

Durante a secagem é necessário fornecimento de calor para evaporar a umidade do material e também deve haver um sorvedor de umidade para remover o vapor d'água, proveniente do material a ser seco. Na secagem de grãos, normalmente utiliza-se o ar na transferência calor para o material úmido com a finalidade de evaporar e remover a umidade (sorvedor) da superfície do material na forma de vapor de água. A secagem de alimentos é uma operação complexa que envolve a transferência de calor e massa em uma matriz que apresenta higroscopicidade e encolhimento (SFREDO, 2006).

Para a secagem de amêndoas, BAUDET *et al.* (1999) e OHJA (1974) se referem à secagem como um processo de extrema importância para o armazenamento de amêndoas; é também o processo comercial mais utilizado para preservação, pois permite a redução do teor de água em níveis adequados mantendo a qualidade fisiológica, química, a boa aparência e a qualidade inicial nutritiva do grão.

Na secagem por convecção três importantes coeficientes podem ser determinados: o convectivo de transferência de calor, o de transferência de massa e o de difusão da umidade no interior do sólido (SFREDO, 2002).

### **2.2.1 Atividade de Água**

Como visto anteriormente, a umidade é um dos principais fatores que afetam o armazenamento; entretanto, nem toda a umidade do grão colabora para sua deterioração. A água existente nas amêndoas pode ser dividida em duas formas através de outro conceito, a atividade de água.

A atividade de água ( $A_w$ ) faz referência ao quão disponível esta água está no alimento, ou seja, é a força com que a água se liga a diferentes componentes da substância, podendo encontrar-se livre, permitindo o crescimento dos microorganismos e reações químicas, ou estar ligada, mais difícil de ser eliminada e que não é utilizada como solvente não estando relacionada ao desenvolvimento de microorganismos.

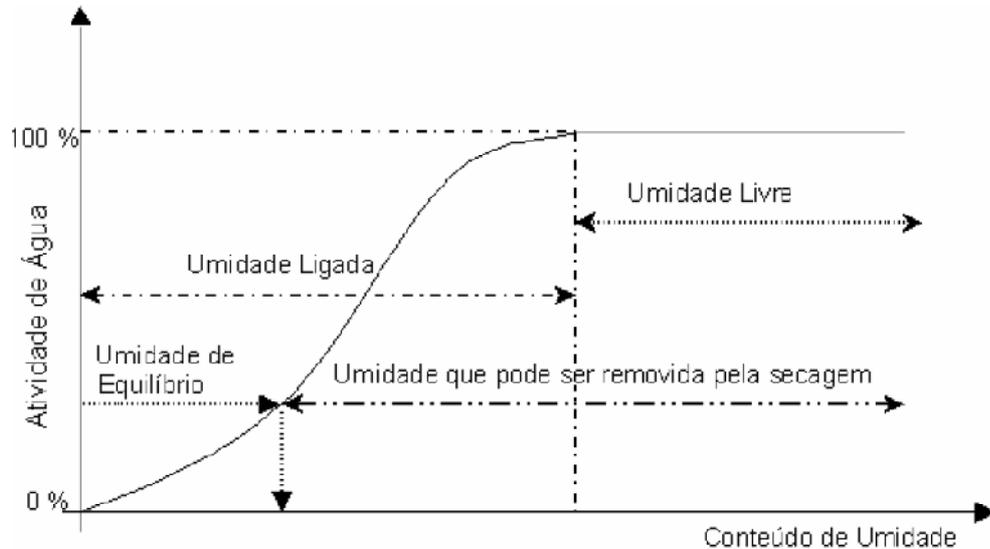
Segundo ORDÓÑEZ (2005), a água ligada interage de maneira diferente na matéria, pois, não atua como solvente e “não” atua como reagente. O crescimento e a atividade metabólica dos microorganismos exigem a existência de água disponível e a medida mais comum utilizada para expressar este nível de água livre, denomina-se Índice de Atividade de Água,  $A_w$ , medida esta que está intimamente ligada ao conceito de estabilidade do alimento.

A atividade de água é determinada pela Equação 2.1:

$$A_w = \frac{P}{P^0} \quad (2.3)$$

e define-se como a relação existente entre a pressão de vapor ( $P$ ) de uma solução ou de um material (é específico para alimento) com relação à pressão de vapor da água pura ( $P^0$ ) à mesma temperatura. Portanto, a água presente no material exerce uma pressão que depende da quantidade de água, da concentração de solutos na água e da temperatura.

Matematicamente, a atividade de água é sempre inferior a um, pois uma solução sofre abaixamento da pressão de vapor (propriedades coligativas) e esta somente atingirá o valor de um quando for apenas água. Logo, a diferença da umidade inicial do material e o conteúdo da umidade de equilíbrio, representa a força motriz para a secagem. A Figura 2.2 ilustra a retenção de umidade em função de conteúdo de umidade versus atividade de água.



**Figura 2. 2 - Umidade versus atividade de água**  
**Fonte:** Park e Nogueira (1992)

### 2.2.2 Transferência de Massa e Calor na Secagem de Grãos

Os períodos de secagem são descritos em função do tempo necessário para que esse processo ocorra. Inicialmente tem-se o aquecimento do grão até a entrada em regime de secagem propriamente dito, visto que o grão está inicialmente mais frio que o ar de secagem. Na seqüência, os períodos são definidos como período de taxa de secagem constante e período de taxa de secagem decrescente.

No período de taxa de secagem constante existe grande disponibilidade de água dentro do grão na forma de água livre, e o movimento de migração de umidade do interior para a superfície do grão é suficiente para manter uma condição saturada na superfície do mesmo. Dessa forma a taxa de transferência de massa e a taxa de transferência de calor são constantes, e a temperatura do grão e a taxa de secagem permanecem igualmente constantes.

O próximo período se caracteriza como período de taxa de secagem decrescente. Inicia-se no ponto designado de teor de umidade crítico, onde termina o período de taxa de secagem constante. A superfície do grão não é mais mantida na condição saturada pelo movimento de migração da umidade dentro do grão, reduzindo a transferência de massa. A transferência de massa não é mais compensada pela transferência de calor e a taxa de secagem decresce a partir da superfície do grão.

A temperatura do produto aumenta e tende a atingir a temperatura do ar. O processo é finalizado quando o grão atinge a umidade de equilíbrio com o ar de secagem.

Para qualquer período de secagem a transferência de massa da água evaporada na superfície do sólido para o gás em escoamento pode ser quantificada da seguinte forma (DISSA et al. 2010):

$$N_w = -\frac{M_{SS}}{A_s} \cdot \frac{dX}{dt} \quad (2.4)$$

Sem do  $N_w$  a taxa de secagem,  $M_{SS}$  é a massa do sólido seco,  $A_s$  é a área superficial do material que varia com o encolhimento do sólido e  $t$  o tempo.

Quando um sólido úmido é seco unicamente por convecção, o calor é fornecido somente pelo calor sensível do gás de secagem e o líquido evaporado é removido como vapor inserido no gás de secagem em escoamento.

### 2.2.3 Encolhimento

O encolhimento é um fenômeno físico comumente observado durante os diversos processos de desidratação de alimentos existentes. Essa mudança afeta a qualidade do produto e deve ser levado em consideração na modelagem e simulação do processo de desidratação do produto (MAYOR, 2004).

Diversas maneiras de levar em conta o encolhimento no modelo de secagem são encontradas na literatura. A estratégia mais simples e mais frequente consiste em considerar que o encolhimento ocorre devido apenas à remoção de água líquida e formular uma expressão para uma ou mais dimensões materiais em função do teor de umidade, que pode ser puramente empírica ou possuir algum fundamento físico (KATEKAWA, 2006).

Alguns autores consideram o encolhimento linearmente proporcional (KECHAOU, 1990; MOREIRA, 2000; YUCEF-ALI *et al.* 2001; AZZOUZ *et al.* 2002; ROMEROPEÑA, 2003) ao volume de água removido durante o processo de secagem, ou seja, o encolhimento é livre, sem nenhuma restrição mecânica. Outros

autores já atribuem na modelagem do encolhimento às forças mecânicas intercelulares, além da redução do volume devido à perda de umidade.

Katekawa (2006) e Iglesias *et al.* (1993) estudaram o processo de encolhimento e deformação durante a secagem, com ênfase na análise das influências das condições de processo sobre a redução de volume da amostra.

Janjai (2010) considerou as seguintes hipóteses no desenvolvimento do modelo matemático utilizado em seu trabalho:

- a mudança do volume do material que está sendo seco é igual ao volume de água evaporado;
- no início da secagem os poros do material são ocupados pela água e tem densidades iguais a da água.

Sfiredo (2006) obteve uma correlação do diâmetro do fruto de café em função da umidade do fruto para cada experimento realizado. Em seus experimentos as medidas foram feitas em três dimensões. A partir destas dimensões foi possível calcular o volume dos frutos de café pela equação do volume da elipse. Igualou-se o volume da elipse ao volume da esfera, obtendo assim o diâmetro da esfera de mesmo volume.

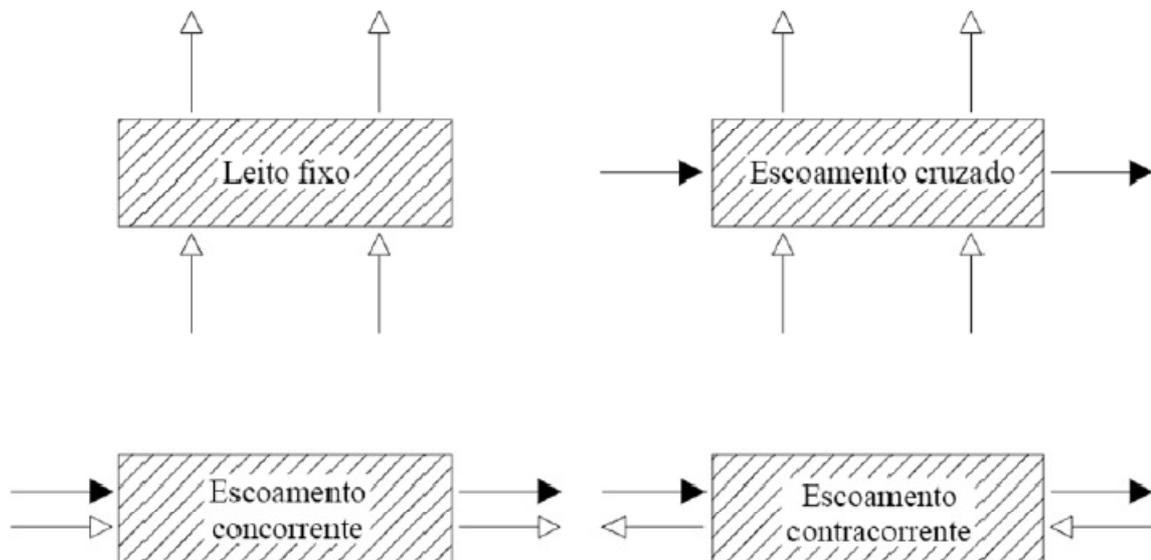
### **2.3 Equipamentos**

A classificação de secadores e a seleção do método adequado para a secagem de produtos sólidos consistem em outros dentre os vários desafios que este tema oferece. Esta classificação varia consideravelmente devido à grande diversidade de produtos a serem secos e à dificuldade típica de se trabalhar com sistemas não-uniformes. De maneira geral, os secadores podem ser classificados de acordo com o método de transferência de calor para o sólido úmido e com relação às características físicas do material a ser seco.

Mujumdar (2006) ainda classifica os secadores de acordo com o meio de transporte do material para o interior da câmara de secagem e com relação aos valores de pressão e temperatura de operação. Em se tratando da secagem de produtos

sólidos, aspectos relacionados à eficiência térmica e energética do processo e custos operacionais também devem ser considerados. Visando este aspecto, o método de secagem a ser escolhido é aquele que proporciona o melhor contato entre a superfície do sólido e a fase gasosa e um melhor grau de mistura entre ambas.

Vários tipos de secadores são utilizados para a secagem de grãos. O tipo de secador mais empregado faz uso do escoamento de ar através do leito. Os secadores convectivos são classificados em duas categorias: secadores de batelada e secadores contínuos. Os secadores de escoamento contínuo são usualmente classificados de acordo com as direções relativas do escoamento, como ilustra a Figura 2.3, dos grãos (seta cheia) e do ar (seta vazia): escoamento cruzado, escoamento concorrente e escoamento contracorrente. Nos secadores de escoamento cruzado, o escoamento do ar é perpendicular ao escoamento dos grãos (PARRY, 1985).



**Figura 2. 3** - Esquema de quatro tipos básicos de secadores convectivos  
Fonte: Sfredo, 2002.

A operação de secagem, juntamente com outras operações unitárias, pode constituir os conhecidos dos sistemas de secagem. Constitui um sistema de secagem uma série de equipamentos além do secador, como silos de armazenamento, sistemas de mistura e alimentação de sólido e de gás, sistema de transporte, conjunto de peneiras, sistemas de controle de emissão de particulados para a atmosfera, sistemas para pré-secagem do produto, entre outros. A Tabela 2.2

mostra os principais secadores que já foram empregados na secagem de produtos sólidos.

**Tabela 2. 2** - Principais secadores que já foram empregados na secagem de produtos sólidos

Referências	Secador	Descrição
Devahastin e Mujumdar, (2006)	Leito Fixo	Engloba os secadores de bandeja e os de camada delgada; utilizado em operações de pequena escala; baixo custo de construção e manutenção e ser de fácil operação; vácuo pode ser aplicado à câmara de secagem para um incremento na remoção de umidade quando são utilizados materiais termicamente sensíveis.
Bacelos et al., (2009)	Rotativo	Constituído basicamente por um tambor cilíndrico munido internamente de suspensores; possui as vantagens de permitir a secagem de materiais de diferentes formas, tamanhos e área superficial.
Freire e Freire, (2009)	Leito Fluidizado	A flexibilidade nas condições de operação do leito fluidizado é realizada pela variação na velocidade do gás, relação gás/combustível, tipo e tamanho do material do leito, taxa de remoção de calor e recirculação de sólidos. Trabalha com materiais de diferentes características.
Freire et al., (2011)	Leito de Jorro	A formação do jorro é um fenômeno visível, que ocorre a partir de um valor definido de velocidade do ar para uma dada combinação de gás, sólidos e configuração do equipamento. Durante o regime de jorro ocorre o movimento cíclico das partículas, o que possibilita a formação de três regiões distintas no interior do leito, sendo estas denominadas de região de jorro, fonte e região anular. É comumente aplicado na secagem de efluentes líquidos

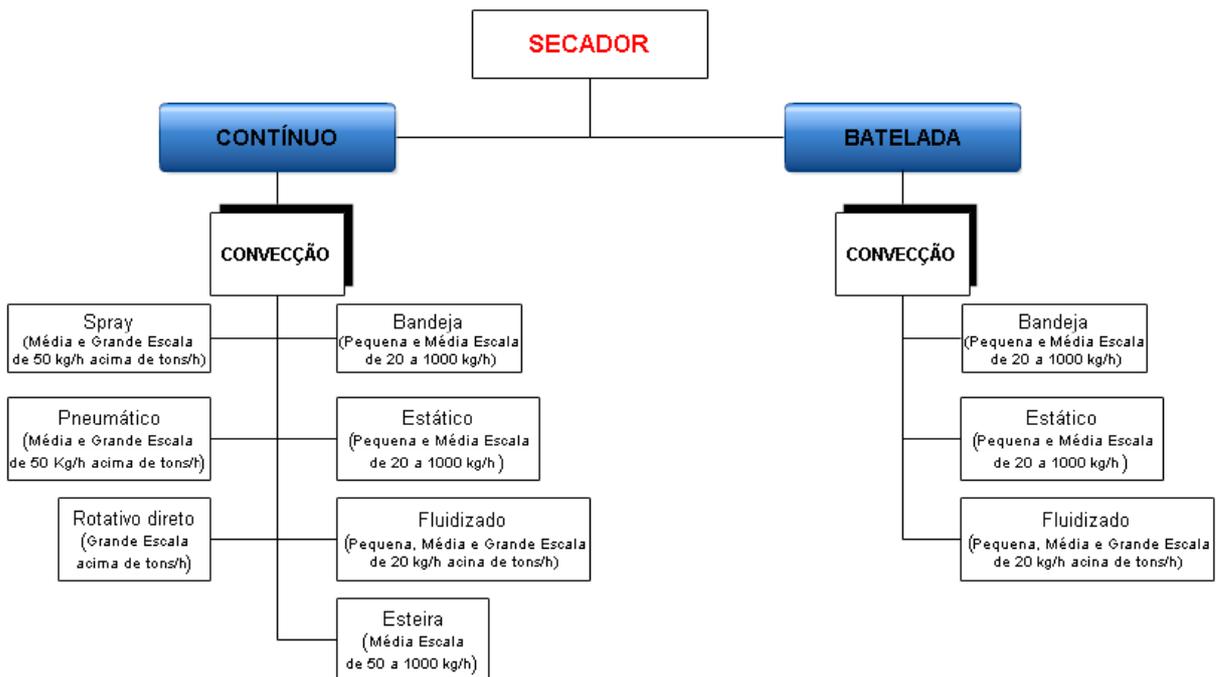
**Fonte:** adaptado de Freire et al., 2014.

Segundo Resende, 2012; uma seleção preliminar do secador usualmente recai sobre alguns fatores:

- Manipulação do material – fixo, móvel, por gravidade, etc;

- Modo de operação – contínuo ou descontínuo;
- Modo de aquecimento – por contacto ou diretamente por convecção e radiação;
- Restrições específicas impostas pela natureza do material;

Nonhebel e Moss, 1971, classificaram os secadores convectivos segundo o método de operação, o tipo de secador e a escala de produção, como ilustra a Figura 2.4.



**Figura 2. 4** - Classificação dos secadores baseado no método de operação e na escala de produção  
**Fonte:** adaptado de Nonhebel e Moss, 1971.

Van't Land, 1991, analisa em detalhes cada opção de diversos tipos de secadores convectivos em relação às propriedades do material, possuindo o diâmetro com a mesma área de projeção da esfera:

- Leito Estático – ideal para a secagem de sólidos fibrosos. Estes materiais retêm uma grande quantidade de água, mas secam com relativa facilidade. Mesmo quando reduzidos ou floculados são de difícil ou impossível fluidização. Utilizado quando as partículas são largas, diâmetro maior do que 100  $\mu\text{m}$  (0,1 mm);
- Leito Fluidizado – o uso do leito fluidizado é possível se a partícula é maior que 100  $\mu\text{m}$  (0,1mm);

- Esteiras – é preferida quando as partículas são largas entre 100 e 1000  $\mu\text{m}$  (0,1 a 1mm);
- Spray-Dryers – tipicamente o tamanho das partículas fica entre 50 e 200  $\mu\text{m}$  (0,05 e 0,2 mm);
- Pneumático – neste caso a secagem deve ser rápida (menos de 10s), a remoção da água ligada é difícil. Partícula é maior que 100  $\mu\text{m}$  (0,1mm);
- Bandejas – é o mais simples, porém o produto possivelmente terá de ser quebrado para diminuir a aglomeração, partículas acima de 1500  $\mu\text{m}$  (1,5 mm);
- Rotativo direto – para partículas acima de 300 $\mu\text{m}$  (0,3 mm);

Park et al. 2007, considerou a grande diversidade de produtos a serem secos e a dificuldade típica de se trabalhar com sistemas não-uniformes. De maneira geral, os secadores podem ser classificados de acordo com o método de transferência de calor para o sólido úmido e com relação às características físicas do material a ser seco, conforme a Tabela 2.3.

**Tabela 2. 3 - Critérios para a classificação de secadores**

<b>Critério para classificação</b>	<b>Tipo de operação</b>
Pressão no secador	Atmosfera ou vácuo;
Método de operação	Contínua ou em batelada;
Método de suprir o calor	Convecção, contato, infravermelho, dielétrico e sublimação;
Tipo de agente de secagem	Ar quente, vapor superaquecido, líquidos aquecidos e gases rejeitados;
Direção do fluxo de calor e sólidos	Co-corrente, contracorrente e fluxo cruzado;
Método do carregamento da umidade	Com agente externo de secagem, com gás inerte, com absorção química da umidade;
Forma do material úmido	Líquidos, granulares, pós, pastas, camadas finas, lama;
Escala de operação	De 10 kg/h até 100 ton/h;
Construção do secador	Bandejas, túnel, esteira tambor, rotatório, leito Fluidizado e muitos outros;

**Fonte:** adaptado de Strumillo e Kudra (1986).

Atualmente, perante a literatura consultada não há um consenso para classificações específicas de secadores para a secagem de produtos sólidos. Entretanto, a

determinação das propriedades físicas do material a partir das técnicas de caracterização e a obtenção de dados experimentais preliminares de cinética de secagem em camada delgada, permitem obter informações importantes com o objetivo de auxiliar na escolha do equipamento de camada espessa mais apropriado para o tratamento térmico do material. Maiores detalhes sobre os equipamentos de secagem, podem ser encontrados nos trabalhos de (FOUST et al. (1982), MCCORMICK, (1983) e MUNJUMDAR (2006)).

## **2.4 Cinética de Secagem**

Segundo Strumillo e Kudra (1986), a cinética de secagem está associada a mudança da umidade e temperatura média do material úmido com o tempo. A cinética de secagem permite a determinação da quantidade de água evaporada, tempo de secagem, consumo de energia, etc.

O estudo da cinética de secagem é de grande importância para o dimensionamento do secador, pois o tempo de secagem determina o tempo de residência do material no seu interior. Os dados para a determinação da curva cinética são geralmente obtidos em laboratório. Medindo a variação da massa e a temperatura do material com o tempo, utilizando o ar aquecido como agente secante (STRUMILLO e KUDRA, 1986).

Existem na literatura, inúmeros modelos cinéticos de secagem que visam representar e pré-dizer o comportamento de diferentes produtos durante a secagem. A maior parte das equações cinéticas de secagem apresentadas na literatura não são lineares, o que dificulta a estimação de parâmetros. O conhecimento da cinética para a secagem de materiais orgânicos nas mais variadas condições é de extrema importância para o design do equipamento e modelagem do processo (BARROZO *et al.* 1995). A Tabela 2.4 apresenta algumas destas equações encontradas na literatura.

**Tabela 2. 4** - Equações de cinética de secagem utilizadas para materiais orgânicos

Referência	Equação
Lewis (1921)	$MR = \exp(-K.t) \quad (2.5)$ $\text{sendo } K = A. \exp\left(\frac{-B}{T}\right)$
Brooker et al. (1974)	$MR = C. \exp(-K.t), \quad (2.6)$ $\text{sendo } K = A. \exp\left(\frac{-B}{T}\right)$
Henderson e Henderson (1968)	$MR = C. \left[ \exp(-K.t) + \frac{1}{9}. \exp(-9.K.t) \right] \quad (2.7)$ $\text{sendo } K = A. \exp\left(\frac{-B}{T}\right)$
Page (1949)	$MR = \exp(-k.t^n) \quad (2.8)$ $\text{sendo } K = A. \exp\left(\frac{-B}{T}\right)$
Overhults et al. (1973)	$MR = \exp[(-k.t)^n] \quad (2.9)$ $\text{sendo } K = A. \exp\left(A + \frac{B}{T}\right)$

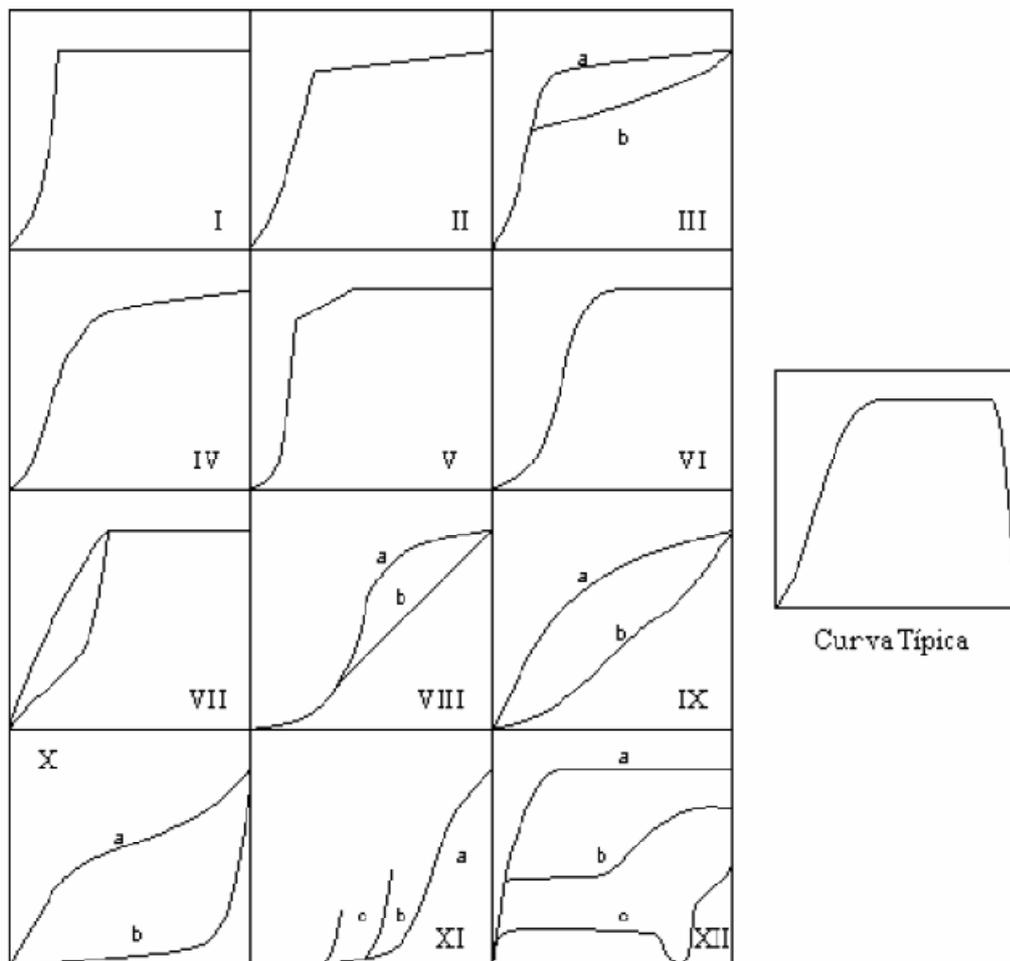
**Fonte:** Barrozo *et al.* (1995).

em que:  $T$  a temperatura do ar (K),  $t$  é o tempo de secagem (s) e  $A$ ,  $B$ ,  $C$  e  $n$  adimensionais a serem estimados,  $K$  é a constante de secagem.  $MR$  é o adimensional de umidade pela Equação (2.10).

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \quad (2.10)$$

em que:  $M$  é a umidade em base seca em um dado instante,  $M_0$  e  $M_{eq}$  são, respectivamente, as umidades em base seca inicial e de equilíbrio (CHEN *et al.* 2013).

VAN BRACKEL (1980) resumiu e classificou em doze categorias, um grande número de curvas experimentais de taxa de secagem, publicadas na literatura. A Figura 2.5 ilustra a diversidade das formas das curvas de secagem em relação aos casos típicos.



**Figura 2. 5 -** Curvas de secagem adimensionalizadas  
**Fonte:** Van Brackel, 1980.

Onde:

- I. e II.** Leito de bolas de vidro, de areia, de argila, de areia com argila, de calcário, de silicagel;
- III.** Evaporação de um líquido orgânico a partir de um leito bolas de vidro a) benzeno, b) n-pentanol;
- IV.** Leito de bolas de poliestireno;
- V.** Areia, argila com plástico, cerâmica, lactose;
- VI.** Particulados (casos especiais de I);
- VII.** caso (I) com diferentes curvaturas no período decrescente, exemplo: silicato de alumínio para diferentes temperaturas ou areia e papel para diferentes espessuras.
- VIII.** Madeira,

**IX.** a) papel, lã, estearato de alumínio, b) batata, tapioca, farinha;

**X.** a) pão de centeio, fermento (leveduras), b) manteiga, margarinas;

**XI.** a) grãos de trigo, b) e c) continuação da secagem depois de uma interrupção;

**XII.** a) calcário impregnado de água, b) de água e sal, c) tijolo de argila;

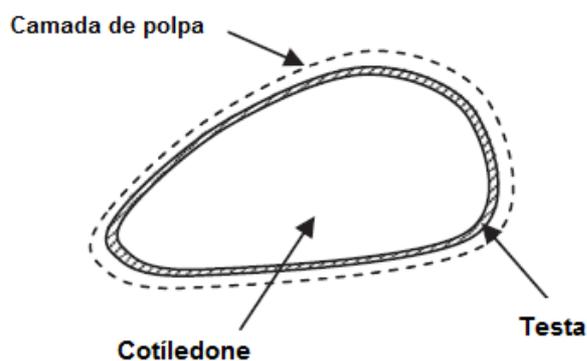
Para ajustar os dados experimentais a equações de cinética de secagem serão realizadas regressões não lineares, sendo os parâmetros estimados pela minimização dos quadrados dos resíduos.

## **2.5 Importância dos Parâmetros de Processo**

Vários parâmetros têm influência na qualidade da secagem e também estão relacionados a custos de operação. Estes parâmetros modificam diretamente o tempo necessário para reduzir a umidade das amêndoas ao nível seguro para armazenamento. Os principais fatores a considerar são: temperatura, umidade relativa, vazão do ar, umidade inicial e final, tipo de grão, altura da camada de produto, entre outros.

Páramo *et al.* (2010), secaram as amêndoas de cacau com temperaturas de 50, 60 e 70 °C e velocidade do ar de 1,28 e 0,75 m.s<sup>-1</sup>, concluindo que a difusividade efetiva aumentou com maiores temperaturas e constatou que a velocidade do ar tem pouca influência sobre a cinética de secagem.

Hii *et al.* 2013, variaram três diferentes níveis de velocidade do ar (1,0; 1,5 e 2,0 m.s<sup>-1</sup>) com diferentes temperaturas (35, 50 e 65 °C) e obtiveram curvas de secagem da amêndoa de cacau. Os autores constataram que, para um mesmo tempo de processo, a temperatura exerce maior influência do que a velocidade do ar de secagem. No entanto, a alta temperatura de secagem (> 60 ° C) e taxas de secagem rápidas não são favoráveis para o desenvolvimento do sabor e retém uma quantidade excessiva de ácidos dentro do cotilédone de cacau devido a uma evaporação insuficiente, conforme ilustra a Figura 2.6.



**Figura 2. 6** - Vista em corte transversal de uma amêndoa de cacau  
**Fonte:** Hii et al. 2009.

Ndukwu (2009) estudou o efeito dos parâmetros temperatura e velocidade do ar em relação à taxa de secagem e também a constante de secagem das amêndoas de cacau. Elaborou uma equação empírica para o cálculo da constante de secagem durante o decréscimo do período da cinética de secagem e concluiu que a temperatura tem o maior efeito quando comparada com os outros parâmetros avaliados.

## **2.6 Aspectos Energéticos e Performance de Secadores**

Com a crescente preocupação com a degradação ambiental, é desejável diminuir o consumo de energia em todos os setores. Os processos de secagem é uma das operações que mais consomem energia no setor industrial. Condições ou equipamentos de secagem podem ser modificados para aumentar a sua eficiência global. Há diversos debates sobre como definir a eficiência energética na secagem. Algumas técnicas para determinar a eficiência podem ser enganosas quando o objetivo é ter uma abordagem holística para a determinação do consumo de energia.

De acordo com Brooker *et al.* (1992), a secagem é uma operação crítica na sequência, colheita - secagem - armazenamento - processamento - transporte, onde requer um elevado consumo de energia. A fim de garantir um produto final seco com a umidade final desejado, a secagem via ar necessita que as propriedades do ar ambiente sejam alteradas, tais como a umidade e a temperatura.

Estes processos geralmente requerem elevados valores de temperatura e vazão de ar, não somente para o aquecimento e redução da umidade da fase gasosa, mas também “carregar” o vapor do material, cuja atividade demanda uma significativa quantidade de energia. Dependendo do material a ser seco, elevadas temperaturas do ar de secagem necessitam ser utilizadas para a evaporação da água existente no sólido e, além disso, elevadas vazões de gás por serem caracterizados como higroscópicos, possuem água ligada à sua estrutura (KUDRA, 2004).

O custo operacional da secagem, dessa forma, poderá ser bastante elevado para resíduos sólidos higroscópicos, uma vez que um maior potencial de secagem é necessário, ou seja, elevada temperatura de entrada de ar e baixa umidade absoluta do ar, demandando maior energia no sistema. Mesmo que o material a ser seco seja caracterizado como não higroscópico, caso sua umidade inicial seja muito elevada, elevadas temperaturas são necessárias, bem como maior vazão de gás de secagem, pois na remoção da água superficial, a temperatura do ar se iguala à temperatura de bulbo úmido e a secagem ocorre na temperatura de saturação adiabática (MUJUMDAR, 2010).

A necessidade da eficiência do processo de secagem, em termos energéticos, torna-se indispensável para a otimização dos custos operacionais. Técnicas que visam minimizar os gastos energéticos são recomendadas não somente para aspectos econômicos, mas também para evitar que energia seja dissipada no meio ambiente (STRUMILLO *et al.*, 2006). Para que a secagem de resíduos sólidos seja viável, por sua vez, custos operacionais devem ser avaliados, fazendo-se presentes, neste aspecto, os custos energéticos.

A análise da viabilidade da secagem de produtos sólidos é totalmente direcionada aos custos operacionais, podendo ser avaliada através de estudos que dizem respeito à eficiência energética do processo, principalmente. O desempenho energético de um secador e do processo de secagem pode ser avaliado frente a diferentes parâmetros, tais como a taxa volumétrica de evaporação de umidade, a perda de energia para o ambiente, o consumo de vapor (quando utilizado), o consumo de calor por unidade de produto, a eficiência energética e a eficiência de secagem (KUDRA, 2004).

Dentre estes, segundo Menshutina et al. (2004), a eficiência energética e a eficiência de secagem são os parâmetros mais frequentemente utilizados em especificações técnicas. Estes parâmetros são variáveis indiretas, sendo estimadas a partir de dados de temperatura, umidade e capacidade calorífica que são obtidos experimentalmente. A eficiência energética de um secador pode ser definida como a relação entre a energia requerida para a evaporação da mistura fluida e a energia total requerida para o funcionamento do secador.

Kudra (1998) analisou a eficiência energética em um leito fixo, um vibro-fluidizado e um secador rotativo utilizando a Equação (2.11).

$$E = \frac{\text{Energia usada na evaporação}}{\text{Energia fornecida ao sistema}} \quad (2.11)$$

Integrando a Equação (2.11) para obter a eficiência energética acumulativa em um intervalo de tempo, obtemos a Equação (2.12).

$$\varepsilon = \frac{1}{t} \int_0^t E(t) dt \quad (2.12)$$

Segundo Kudra (2004), o desempenho energético de um secador em processos adiabáticos é considerar somente o transporte de calor, sendo esta uma maneira simplificada de se avaliar este parâmetro. Logo, a eficiência energética do sistema é obtida por

$$\eta_E = \frac{T_g^E - T_g^S}{T_g^E - T_a} \quad (2.13)$$

A eficiência térmica máxima alcançada por um processo de secagem é aquela obtida pela seguinte relação (STRUMILLO e KUDRA, 1986):

$$\eta_E = \frac{T_g^E - T_g^S}{T_g^E - T_a} \quad (2.14)$$

Segundo Bacelos *et al.* (2009), a eficiência da secagem pode ser definida como a relação entre a energia utilizada na evaporação da água presente no produto sólido pela diferença de energia na entrada e na saída do secador:

$$\eta_S = \frac{m_{ss} \cdot \frac{dX}{dt} \cdot \Delta H_V}{\dot{m}_g \cdot (Cp_g^E \cdot T_g^E - Cp_g^S \cdot T_g^S)} \cdot 100 \quad (2.15)$$

em que:

$T_g^E$  - temperatura do ar na entrada do secador(K);

$T_g^S$  - temperatura do ar na saída do secador(K);

$\Delta H_{vap}$  - entalpia de vaporização da água na temperatura de saída do secador (kJ/kg água); (Tabelas – Shapiro – Apêndice B, 2013);

$\frac{dX}{dt}$  – taxa de variação da umidade pelo tempo (kg água/ kg sólido seco \* s);

$m_{ss}$  – massa de sólido seco (kg sólido seco);

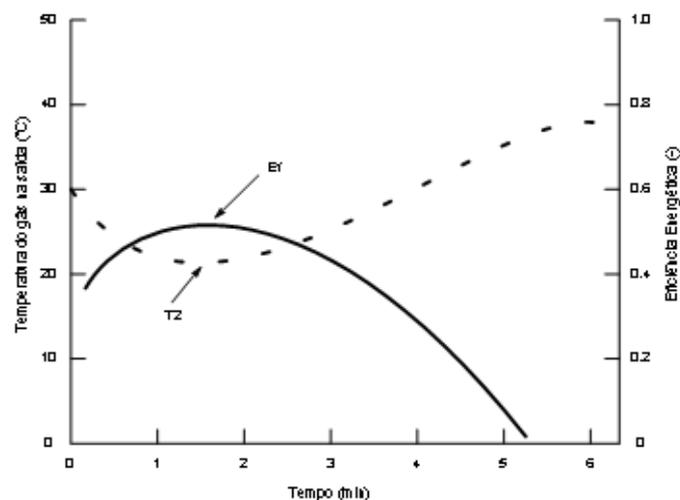
$C_p^E$  – capacidade calorífica do ar na temperatura de entrada e saída (kJ/kg\*K);

Onde:

$$C_p = 1,05 - 0,365 \cdot \left(\frac{T}{1000}\right) + 0,85 \cdot \left(\frac{T}{1000}\right)^2 - 0,39 \cdot \left(\frac{T}{1000}\right)^3 \quad (2.16)$$

Em que T é a temperatura do ar (K) (Van Wylen, 2003).

A performance energética característica de um secador de leito fixo é representada por dois períodos distintos, primeiro, quando a eficiência energética se estabiliza em um valor máximo no período da taxa constante de secagem e segundo, à medida que a temperatura de saída do gás ( $T_2$ ) aumenta a eficiência energética ( $E_f$ ) diminui, devido ao calor latente ser utilizado para superaquecer o material e retirar a água contida no interior do sólido, como ilustra a Figura 2.7.

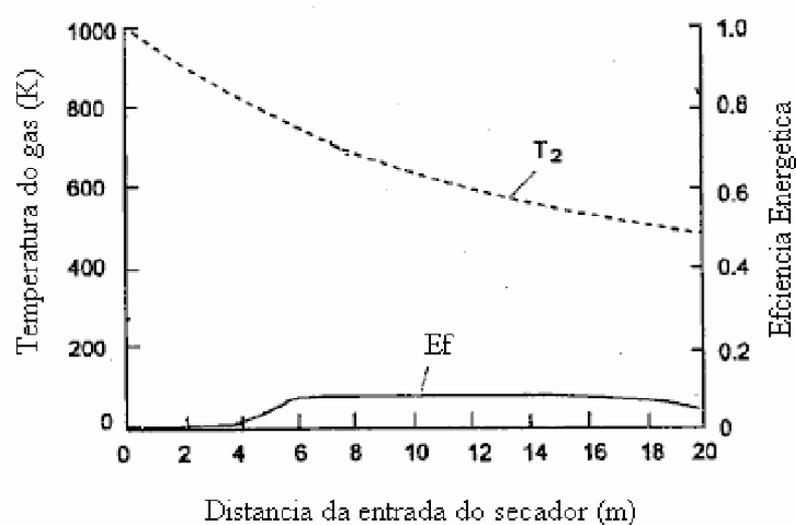


**Figura 2. 7** - Performance energética característica de um secador de leito fixo  
**Fonte:** Kudra (1998).

Uma maneira alternativa de reduzir o consumo energético do processo é trabalhar com baixa umidade absoluta do ar de secagem. Isso pode ser conseguido usando-se colunas de adsorção, recheadas com material poroso adsortivo, acopladas ao sistema de alimentação de fluido do secador (FREIRE *et al.*, 2014).

De acordo com Strumillo *et al.* (2006), o potencial de economia de energia estimado na secagem deve estar entre 25 e 30% do total da energia total empregada na secagem e poderá ser atingido adotando um método adequado de secagem, modificando o projeto do secador, ou, simplesmente, utilizando outras condições operacionais de processo.

A figura 2.8 mostra a performance energética obtido para um secador rotativo.



**Figura 2. 8** - Performance energética característica de um secador rotativo  
**Fonte:** Kudra (1998).

A eficiência energética (Ef) instantânea possui o valor zero, devido a não evaporação, pois, o calor é utilizado somente para aquecer o material. À medida que a temperatura do gás na saída (T2) diminui a eficiência energética aumenta.

Através da revisão bibliográfica pode-se notar que existe uma preocupação crescente em estabelecer condições ideais de operação dos secadores no sentido de diminuir seu consumo energético e conseqüentemente aumentar a eficiência energética dessa operação. Neste sentido, a eficiência energética do secador de

leito fixo também deve ser investigada. A escolha da equação para a estimativa da eficiência energética depende do enfoque dado na análise.

## **2.7 ENGENHARIA DE PROCESSOS**

### **2.7.1 Análise e Síntese de Sistemas**

Sistemas são criados para a execução de tarefas novas ou para a execução mais eficiente de tarefas já conhecidas. A criação de um sistema compreende um número considerável de operações que, no seu conjunto, recebem o nome de projeto. A sistematização do projeto inicia com o seu equacionamento sob a forma de um problema, que consiste em determinar a melhor estrutura para um sistema destinado a cumprir a finalidade desejada. Este problema é constituído dos seguintes subproblemas: geração do conjunto de estruturas viáveis para o sistema e previsão e avaliação do desempenho de cada estrutura gerada. O primeiro subproblema é chamado de síntese e o segundo de análise (PERLINGEIRO, 2005).

A síntese é a etapa criativa do projeto, que trata da sua concepção. Ela segue a seleção da rota química e consiste na escolha dos equipamentos e na definição de um fluxograma para concretizá-la. Os equipamentos são escolhidos de acordo com as funções exigidas no processo. A Síntese é um problema essencialmente combinatório, caracterizado pela multiplicidade de soluções: vários tipos de equipamentos podem ser escolhidos para uma mesma função, e eles podem ser interligados de diversas maneiras. Basta trocar um elemento ou uma corrente para se obter um processo diferente, com um desempenho também diferente (PERLINGEIRO, 2005).

### **2.7.2 Método Heurístico**

Consiste na reunião de regras práticas, baseadas na experiência acumulada em projetos e na bibliografia científica sobre o assunto. Aplica-se em cada estado, a partir da raiz, a regra heurística que se mostra mais apropriada nas situações em vigor naquele estado, resultando no estado seguinte. Desta forma, a busca

heurística resulta em apenas um fluxograma a analisar. A solução obtida não é necessariamente a ótima, mas, dependendo da qualidade das regras utilizadas, ela pode estar próxima da ótima (PERLINGEIRO, 2005).

Os métodos baseados nas regras heurísticas proporcionam um meio rápido, fácil e simples de seleção. Entretanto, pode ocorrer durante a aplicação do método, contradição entre as decisões tomadas. Deve-se, portanto, optar pela decisão que parecer mais conveniente, tendo como base os princípios teóricos. A aplicação dessa prática, utilizando somente uma regra heurística, leva a resultados muito distantes da solução ótima. Por isso, é sugerido que se faça uso do método ordenado, que emprega uma sequência hierárquica pré-definida para a síntese do processo global (CARVALHO, 1995).

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 Material**

Optou-se pelo cacau, *Theobroma cacao L.*, fruto do cacauzeiro, árvore da família das esterculiáceas, colhido no município de São Mateus - ES, como material deste trabalho, devido à importância econômica desta amêndoa para o norte do Estado do Espírito Santo. Grande parte dessa produção é utilizada para a fabricação do chocolate e seus derivados.

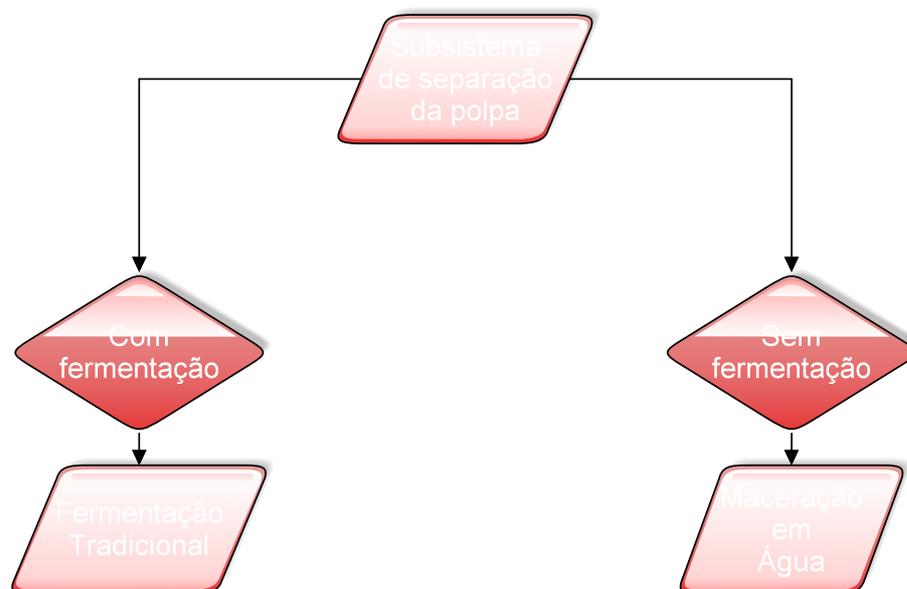
#### **3.2 Escolha do Tipo de Secador**

O processamento das amêndoas de cacau em liquor e, daí, em chocolate pode ser desempenhado por diversas estruturas de processo. A estruturação do projeto inicia pela organização das suas ações segundo os seus subsistemas: a) separação da polpa; b) secagem; c) torrefação; d) moagem das amêndoas; e) conchagem e refino; f) temperagem e moldagem. No presente estudo, foi dado ênfase somente aos subsistemas de separação da polpa e de secagem.

Esses subsistemas são sistematizados através de uma árvore de estados considerando diversos equipamentos e métodos de secagem. A escolha do equipamento adequado é de suma importância para o sucesso do beneficiamento da matéria-prima. Um dos maiores problemas envolvidos na seleção de secadores é a grande variedade de equipamentos e processos na secagem para se obter um produto de qualidade requerida. Assim é necessária uma metodologia para selecionar o ramo mais promissor da árvore de estados. O método heurístico foi considerado neste trabalho, conforme apresentado a seguir.

### 3.2.1 Subsistema de Separação da Polpa

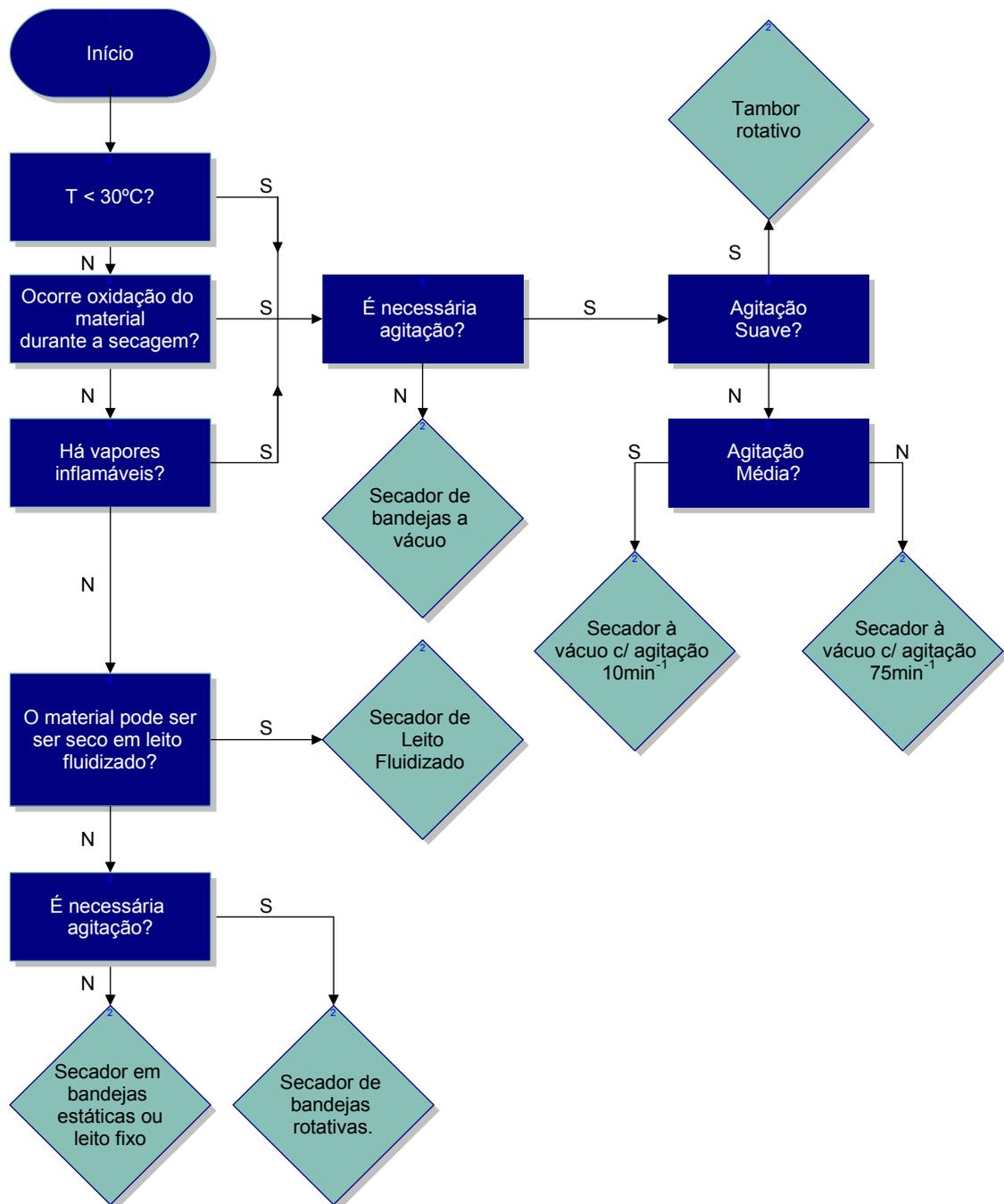
No procedimento tradicional, a separação da polpa do cacau das amêndoas é realizada pela fermentação. Entretanto, nessa etapa do processamento ocorrem grandes perdas dos compostos fenólicos e, associada a essa perda, tem-se o desenvolvimento do sabor e aroma agradáveis do produto final. Foi proposta uma rota de fermentação, conforme Nascimento (2014), apresentadas na Figura 3.1.



**Figura 3. 1** - Rotas para o subsistema de separação de polpa  
**Autor:** Adaptado de Nascimento (2014).

### 3.2.2 Subsistema de Secagem

A secagem do cacau no método tradicional é realizada em batelada, levando em consideração os equipamentos que precedem esta etapa. Segundo Van't Land (1991), apud Alonso e Park (2007), apresenta um algoritmo, com base no equipamento, para a seleção do secador apropriado, conforme ilustrado na Figura 3.2.



**Figura 3. 2** - Algoritmo de Van't Land para a seleção de secadores em batelada (S: sim; N: não)  
**Fonte:** adaptado de Alonso & Park (2007).

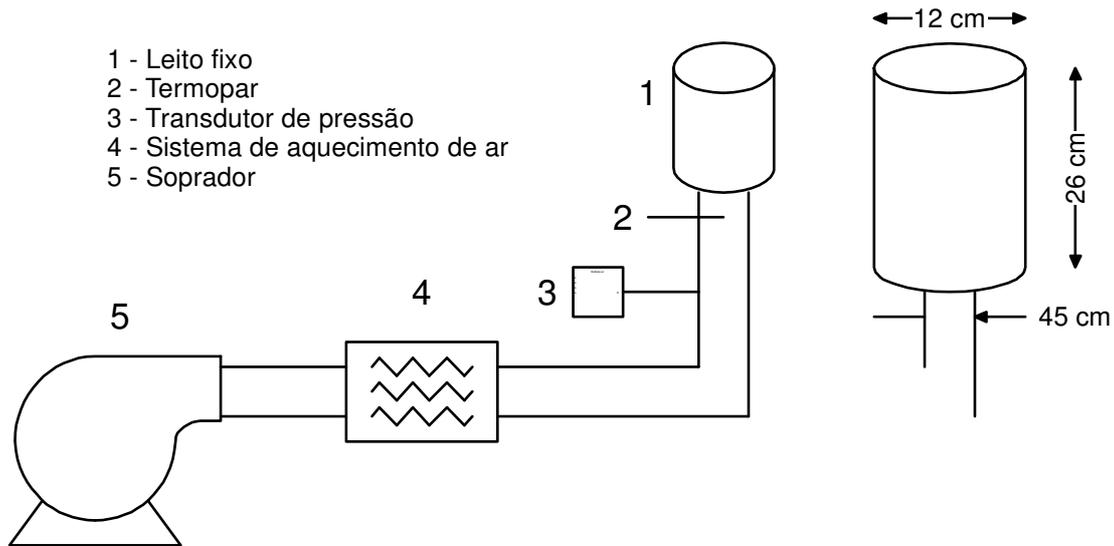
### **3.3 Determinação da Árvore de Estados e do Fluxograma Base**

A partir da enumeração de equipamentos para cada subproblema, determinaram-se os fluxogramas plausíveis para a obtenção do produto final. Na etapa de análise, cada fluxograma foi avaliado para fins de comparação com os demais. A análise começou pela identificação dos equipamentos e da estrutura do fluxograma, prosseguindo com a previsão e a avaliação do seu desempenho atribuindo-lhe um índice de mérito, que serve de critério de comparação. Pela aplicação das regras heurísticas, determinou-se o fluxograma base.

### **3.4 Unidade Experimental de Secagem Convectiva**

Os ensaios foram realizados em uma unidade experimental instalada existente no Laboratório de Eficiência Energética do PGEN/CEUNES/UFES. A Figura 3.3 apresenta um esquema do aparato experimental, composto de um leito fixo e seus periféricos.

O ar é fornecido por um soprador tipo centrífugo da marca IBRAM, com capacidade de fornecer até 4,5 m<sup>3</sup>/min. de ar e uma potência de 2,0 cv. O aquecimento do ar é realizado por meio de resistências elétricas e o controle de temperatura é do tipo PID. A vazão volumétrica de ar é medida em um medidor Venturi. Um transdutor de pressão instalado na tubulação de entrada do ar, 15 cm abaixo da base cônica do leito, e um termopar (para medir a temperatura de entrada do ar) encontram-se acoplados ao leito. As informações sobre a queda de pressão no leito, a velocidade e a temperatura de ar injetado foram obtidas diretamente no painel de controle do equipamento.



**Figura 3.3** - Esquema do aparato experimental  
**Fonte:** o autor.

A vazão de ar do soprador foi determinada por meio de um medidor Venturi padrão e ajustada por um inversor de frequência da marca WEG, modelo CFW-08. A medida de vazão de ar do soprador e o ajuste do inversor de frequência foram feitos pela empresa fabricante do equipamento, a Labmaq do Brasil Ltda. A seguir, apresenta-se a equação de ajuste do inversor de frequência que relaciona a vazão de ar do soprador com a frequência do inversor.

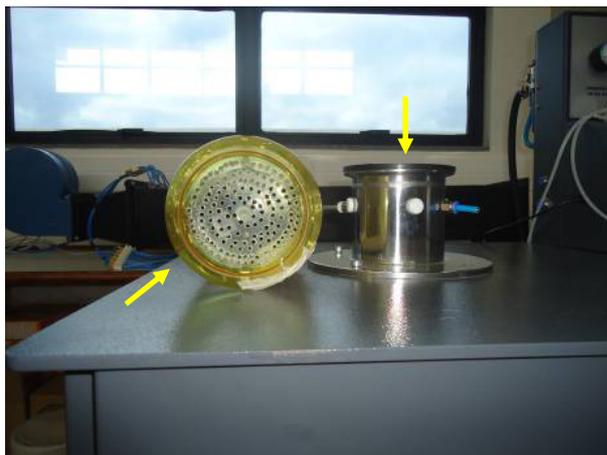
$$Q = 0,0419 \cdot f \quad (3.1)$$

sendo: Q é a vazão volumétrica ( $\text{m}^3/\text{min.}$ ) e f (Hz) é frequência do inversor de frequência.

O monitoramento da velocidade e temperatura do ar de entrada e saída do leito foi realizado por um termoanemômetro manual da marca KIMO instruments.

### 3.5 Câmera de Secagem

Uma célula de secagem cilíndrica de acrílico com 12 cm de diâmetro, 26 cm de altura e com 200 furos de diâmetro 0,05cm foi construída para a distribuição do ar e foi acoplada na região de saída do ar do equipamento, conforme ilustrada na Figura 3.4, de forma a facilitar a sua retirada.



**Figura 3. 4 - Leito fixo**  
**Fonte:** o autor

Com base nos testes dinâmicos e térmicos, realizados por Cassandre *et al.* (2001), foi verificada a uniformidade das distribuições de temperatura e velocidade do ar na região de secagem das amostras. Através das diferenças entre os valores de temperatura e as diferenças entre os valores de velocidade do fluido, em relação aos seus respectivos erros prováveis de medidas.

Através do telescópio HOTWIRE da marca KIMO instruments foram obtidas as variações das medidas de temperatura e velocidade para o escoamento do fluido. Os experimentos foram realizados com temperatura de 70°C e velocidade de 1,0 m/s e os dados estão representados no Apêndice A. As especificações de medidas estão apresentadas na Tabela 3.1.

**Tabela 3. 1 - Especificações de medidas do telescópio HOTWIRE**

<b>Especificações</b>	<b>Unidade de medição</b>	<b>Gamas de medição</b>	<b>Exatidão</b>	<b>Resolução</b>
Velocidade do ar	m/s	de 0,15 a 3 m/s	±3% da leitura ± 0,1 m/s	0,01 m/s
Temperatura	°C	de -20 a +80°C	±0,3% da leitura ±0,25°C	0,1 °C

### 3.6 Caracterizações Físicas

Foi projetado um equipamento com dimensões 25x30x15, contendo em sua parte superior vidro jateado e em seu interior 4 lâmpadas fluorescentes com potência de 5 W cada, tendo como objetivo, a obtenção de uma melhor qualidade das imagens digitais das sementes, que posteriormente foram utilizadas para obtenção de suas caracterizações físicas, como mostra a Figura 3.5.



**Figura 3. 5** - Sistema de iluminação para obtenção de imagens digitais  
**Fonte:** o autor

As propriedades físicas das amêndoas de cacau foram determinadas ao longo do processo em função da umidade e as dimensões e o encolhimento das amêndoas através da análise das imagens digitais. Os dados determinados foram:

**Área:** área projetada das partículas  $\text{cm}^2$ ;

**Perímetro:** o comprimento do limite da área projetada selecionada, em mm;

**Circularidade:** razão entre a área projetada medida e a área do círculo do mesmo perímetro da área projetada. O valor unitário indica um círculo perfeito. À medida que o valor aproxima-se de zero, indica o aumento da forma alongada;

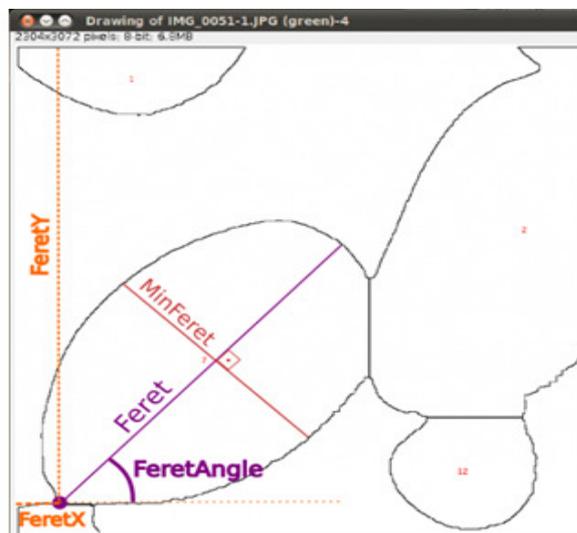
**Diâmetro de Feret:** a distância mais longa entre quaisquer dois pontos ao longo do limite de seleção, também conhecido como diâmetro calibrador máximo. Usa-se a denominação Feret. O ângulo (0-180 graus) do diâmetro do Feret é exibido como FeretAngle, como também o diâmetro calibrador mínimo (MinFeret). As coordenadas de início do diâmetro de Feret (FeretX e FeretY) também são exibidas;

**Relação de Aspecto (AR):** a relação de aspecto da elipse ajustada à partícula, por exemplo. Se a elipse de ajuste for selecionada na análise de imagens, os eixos principal e secundário são exibidos, denominados AR;

**Esfericidade (Roundness):** Definida como ou o inverso da Relação de Aspecto. Usa a denominação Round;

**Solidez (Solidity):** é a razão entre a área projetada medida e a área convexa aproximada da partícula;

A representação do diâmetro de Feret e suas derivações estão ilustradas na Figura 3.6.



**Figura 3. 6** - Esquema dos resultados mostrados pelo ImageJ, relativos ao diâmetro de Fret  
**Fonte:** Gomes (2001)

O grau de esfericidade é um índice que mensura o quão o formato da partícula se aproxima ao formato de uma esfera. Quanto mais próximo o grau de esfericidade estiver de um, mais esférica será a partícula. Assim, o grau de esfericidade pode ser dado pelo inverso da Relação de Aspecto (PEÇANHA & MASSARANI, 1986).

A área da partícula (S) projetada, diâmetro da esfera com a mesma área de projeção da partícula, é representada pela Equação (3.2).

$$S = \frac{\pi \cdot d_{ES}^2}{4} \quad (3.2)$$

onde,  $S$  é área da partícula em  $\text{mm}^2$ ;  $\pi$  é o valor numérico 3,1415926;  $d_{ES}$ , diâmetro da esfera.

WADELL (1933) introduziu o “grau de circularidade” ( $\phi$ ), parâmetro adimensional. Ao contrário da esfericidade, que consta de uma relação entre áreas superficiais, o grau de circularidade  $\phi$ , pode ser determinado via observação fotográfica, através da área e do perímetro projetados da amostra, conforme definido pela Equação (3.3):

$$\phi = \frac{P_{ES}}{P_P} = \pi \cdot \frac{D_{EQ}}{P_P} \quad (3.3)$$

Onde,  $P_{ES}$  é o perímetro da esfera equivalente à área projetada,  $P_P$  o perímetro projetado da amostra e  $D_{EQ}$  o diâmetro da esfera equivalente à área projetada. O perímetro e a área projetados são obtidos através da análise de imagens e a circularidade ( $\phi$ ) calculada é utilizada para avaliar a evolução da forma da amostra durante o processo.

### 3.7 Encolhimento

A equação do encolhimento linear, utilizada no estudo de Iglesias et al. (1993), foi empregada para descrever o encolhimento da semente de cacau. Desta forma, o volume da amêndoa de cacau é representado pela equação:

$$V_s = V_{s0} \cdot (1 + \varepsilon \cdot X_{BS}) \quad (3.4)$$

Em que,

$$V_s = V_a + V_{ss} \quad (3.5)$$

$$V_{s0} = V_{a0} + V_{ss} \quad (3.6)$$

Onde  $V_s$  é o volume do produto,  $V_{s0}$  é o volume inicial do produto,  $\varepsilon$  é o coeficiente de encolhimento,  $X_{BS}$  é a umidade em base seca do material (b.s.). Sendo que  $V_a$  é o volume da água nos poros,  $V_{a0}$  é o volume inicial da água nos poros e  $V_{ss}$  é o volume do material seco.

### 3.8 Cinética de Secagem

Os dados de cinética de secagem foram analisados através de curvas de densidade de fluxo de massa, construídas com auxílio dos programas ORIGIN® 8.0 versão demonstração, sendo a umidade da amostra ao longo do processo expressa em base seca. A densidade de fluxo de massa é determinada conforme a equação a seguir:

$$R = - M_{SS} \frac{d(X_{BS})}{dt} \frac{1}{A_{ES}} \quad (3.7)$$

onde,  $\frac{d(X_{BS})}{dt}$  é a taxa de secagem,  $X_{BS}$ , a umidade média em base seca,  $M_{SS}$ , a massa de sólido seco,  $A_{ES}$ , a área da esfera equivalente à área projetada e  $R$ , a densidade de fluxo de massa.

### 3.9 Procedimento Experimental

#### - Obtenção das Curvas de Secagem

Os experimentos foram realizados seguindo procedimento que se encontra detalhados a seguir:

Ligava-se o equipamento. Ajustava-se a vazão de operação e, em seguida, a temperatura a ser empregada no procedimento experimental (é importante à realização nesta ordem, pois se a resistência for ligada antes, pode superaquecer e queimar os resistores).

Quando atingida as condições desejadas e estas não variavam mais, as amêndoas de cacau despolidas (maceração em água) eram colocadas dentro da célula de secagem até uma altura de 1,0 cm, correspondente a uma massa aproximadamente de 4 g de produto, mantida como padrão para todos os experimentos.

A quantificação da massa foi obtida por pesagem intermitente (BARROZO, 1995), pesadas numa balança analítica da marca Toledo, modelo Adventurer™ com

resolução de 0,0001 g. O teor de umidade final de equilíbrio foi determinado de acordo com as regras para análise de amêndoas do Ministério da Agricultura (1980), método da estufa a  $105 \pm 3^\circ\text{C}$  por 24 horas.

Ao longo dos procedimentos experimentais foram variados os parâmetros de temperatura e velocidade do ar de secagem mantendo-se altura de camada de produto constante. Assim, para a obtenção das curvas de secagem, foram utilizadas as temperaturas de 60, 70 e  $80^\circ\text{C}$  com velocidades de 1,0 e  $3,0 \text{ m.s}^{-1}$ .

### **3.10 Análise da Eficiência Energética**

A partir dos dados obtidos pelos testes de secagem, dos valores tabelados e com auxílio da Equação 2.15, pode-se determinar a eficiência de secagem das amêndoas de cacau. A capacidade calorífica do ar foi calculada através da função polinomial dependente da temperatura descrita pela equação 2.16.

### **3.11 Procedimento de Análise dos Dados**

A partir da obtenção experimental das curvas de secagem da amêndoa de cacau, ajustaram-se os dados de umidade adimensional versus o tempo com os modelos apresentados pelas Equações 2.5, 2.6, 2.7, 2.8 e 2.9.

Foram usadas medidas não lineares para avaliar a adequabilidade da aproximação linear. Através das medidas de curvatura de Bates (1988), a não linearidade de um modelo foi dividida em duas componentes: intrínseca (IN), que é uma característica do próprio modelo; e a paramétrica (PE), que está associada a não linearidade dos parâmetros presentes no modelo.

Avalia-se a significância estatística de (IN) e (PE) comparando seus valores com  $1/\sqrt{F}$ . Para valores de (IN) e (PE) menores que  $1/\sqrt{F}$ , as medidas de curvatura (IN) e (PE) não são significativas, indicando que a não linearidade é pequena.

No caso da não linearidade ligada ao efeito dos parâmetros (PE), a mesma pode ser resolvida através da reparametrização do modelo. Já no caso da não linearidade ligada ao modelo (IN) o mesmo não ocorre. Outra medida importante, é a medida de vício de box, que determina os vícios dos estimadores de mínimos quadrados de modelos não lineares. Consideram-se vícios acima de 1%, em valor absoluto, como um indicador do comportamento não linear do modelo.

A importância em se avaliar os vícios reside no fato deles indicarem qual ou quais parâmetros do modelo são os maiores responsáveis pelo comportamento distante do comportamento linear. Uma vez conhecidos esses parâmetros, pode-se buscar por uma reparametrização que possa reduzir a não linearidade. Essas medidas são as ferramentas mais utilizadas na avaliação da não linearidade de um modelo de regressão não linear. Assim, para o cálculo das medidas de curvatura de Bates e do vício de Box, foi utilizado o programa Fortran fornecido por (RATKWSKY, 1983).

Além disso, foram realizadas as seguintes análises tendo como premissa a visão dos fenômenos de transporte.

- Análise da dependência da umidade da amêndoa de cacau com os períodos de secagem.
- Através da densidade de fluxo de massa em função da umidade em base seca, foi feita a análise da migração de umidade do interior de sólidos porosos em relação aos períodos de secagem.
- Análise do encolhimento do material, através do decréscimo do volume da amêndoa em relação ao tempo.
- Análise da eficiência energética do processo de secagem da amêndoa de cacau.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

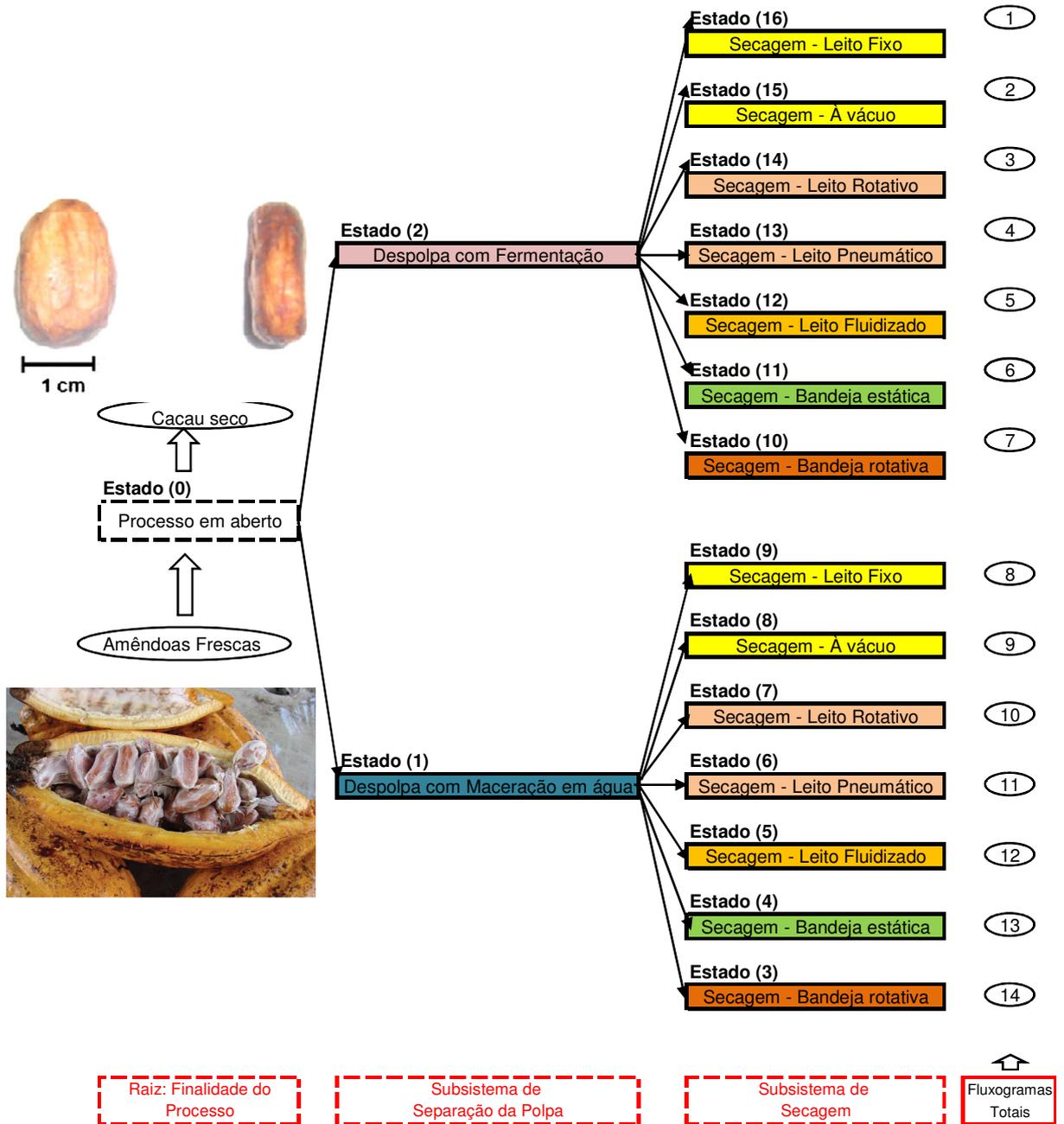
### 4.1 ÁRVORE DE ESTADOS

Tendo em vista a multiplicidade de equipamentos possíveis para a secagem da amêndoa de cacau, o problema de síntese está baseado na elaboração da árvore de estados. Cada ramo da árvore é uma rota possível de processamento e não reflete, ainda, a solução do problema.

Sendo assim, elaborou-se a árvore de estados apresentada na Figura 4.1. para o trabalho em questão, a árvore apresentada reflete o ponto de partida para o problema de síntese de processos. Os ramos foram estabelecidos tendo como base as etapas do processamento tradicional, bem como em pesquisa documental.

Ao avaliar as possibilidades dentro de cada ramo, foram mantidas as alternativas do processamento tradicional e buscou-se na literatura outras alternativas que vinham sendo estudadas e que poderiam ser agregadas a este trabalho.

Através do algoritmo de Van't Land ilustrado na Figura 3.2, determinou-se qual o equipamento de secagem seria o mais apropriado. Foi considerado que a temperatura de secagem é superior a 30 °C, a oxidação do material ocorre com mais intensidade na fermentação, não há vapores inflamáveis, não é necessário leito fluidizado e nem agitação. Assim, escolheu-se bandejas estáticas ou leito fixo como equipamento do processo de secagem.



**Figura 4. 1** - Árvore de estados do processamento de secagem das amêndoas de cacau  
**Fonte:** o autor

## 4.2 REGRAS HEURÍSTICAS E FLUXOGRAMA BASE

Para a escolha do tipo de secador para amêndoas sensíveis a temperatura e a movimentos mecânicos, como a do cacau, foi utilizado o método heurístico e tomado como referência os estudos de Nonhebel e Moss (1971); Keey, 1978; Foust *et al.*, (1982); McCormick (1983); Van't Land, (1991); Mujundar, (2006); Bachelos, (2009). Devahastin e Mujumdar, (2006); Park *et al.* (2007); Freire *et al.* (2011) e os subsistemas de polpa e secagem.

#### 4.2.1 Subsistema de Separação de Polpa

A primeira etapa do processamento do cacau corresponde à perda da polpa e às reações bioquímicas que provocam a morte do embrião, hidrólise de açúcares e proteínas, liberação de enzimas e substratos e difusão de compostos fenólicos que entram em contato com as enzimas (OETTERER *et al.* 2006; EFRAIM *et al.* 2006). Entretanto, a separação da polpa da semente pode ocorrer por um processo não fermentativo, ou seja, um processo físico, como a maceração em água, que ocorre de forma bem mais rápida do que a fermentação ideal (superior a cinco dias) (NASCIMENTO, 2014).

Desta forma, estabelece-se a primeira regra heurística para o Subsistema de Separação de Polpa.

- Regra 01: Se houver a necessidade de que a polpa seja separada imediatamente, por um processo rápido, aplicar maceração em água. Caso contrário, aplicar um processo fermentativo.

- Regra 02: Se houver a necessidade de que fermentação ocorra até, no mínimo, o quinto dia, aplicar fermentação tradicional. Caso contrário, usar inibidor químico.

#### 4.2.2 Subsistema de Secagem

Para a seleção do secador para a amêndoa de cacau foram criadas regras heurísticas específicas. A secagem é um tratamento térmico que é realizado a fim de reduzir a umidade das amêndoas, que no início é cerca de 60% até aproximadamente 7% (OETTERER *et al.*, 2006). A secagem é usualmente realizada pela exposição ao sol ou por técnicas que utilizam ar aquecido. Assim, diferentes métodos de secagem podem ser escolhidos dependendo do tipo de cacau, quantidade de amêndoas e condições climáticas (GUEHI *et al.*, 2010).

Segundo Lopes (2000) e Oetterer *et al.* (2006), a secagem deve ser muito bem desenvolvida, uma vez que se, ao final desta etapa, as sementes ainda estiverem úmidas, pode haver o desenvolvimento de mofo; e se a umidade ficar abaixo de 7%, a casca fica quebradiça e a semente adquire sabor inadequado. Ou seja, das duas maneiras, a qualidade sensorial fica comprometida.

Com base nos conhecimentos empíricos e na experiência desses autores, foram formuladas e apresentadas as regras heurísticas a serem aplicadas na árvore de estado criada para o processo de secagem do cacau.

Desta forma são apresentadas as regras heurísticas para o Subsistema de Secagem.

- Regra 01: Se houver a necessidade de que a secagem seja realizada sem interrupções, a depender dos fatores climáticos e do tipo de matéria-prima, aplicar secagem com técnicas isoladas. Caso contrário, aplicar secagem artificial.
- Regra 02: Se houver a necessidade de controle de velocidade do ar, além de controle de temperatura, usar secador convectivo como equipamento de secagem artificial. Caso contrário, usar secagem em estufa.
- Regra 03: Se houver a possibilidade de que a matéria-prima seja seca em escala de tempo maior, da ordem de semanas, usar secagem solar. Caso contrário, aplicar a Regra 02 e escolher entre as técnicas artificiais.

#### **4.2.3 Fluxograma Base**

De posse do que foi exposto, foi possível determinar o fluxograma base através das regras heurísticas aplicadas aos subsistemas de separação de polpa e de secagem.

As rotas que apontam para o secador mais apropriado para a secagem das amêndoas de cacau são:

- Subsistema de Separação de Polpa: Despolpa com maceração de água;
- Subsistema de Secagem: secagem com leito fixo;

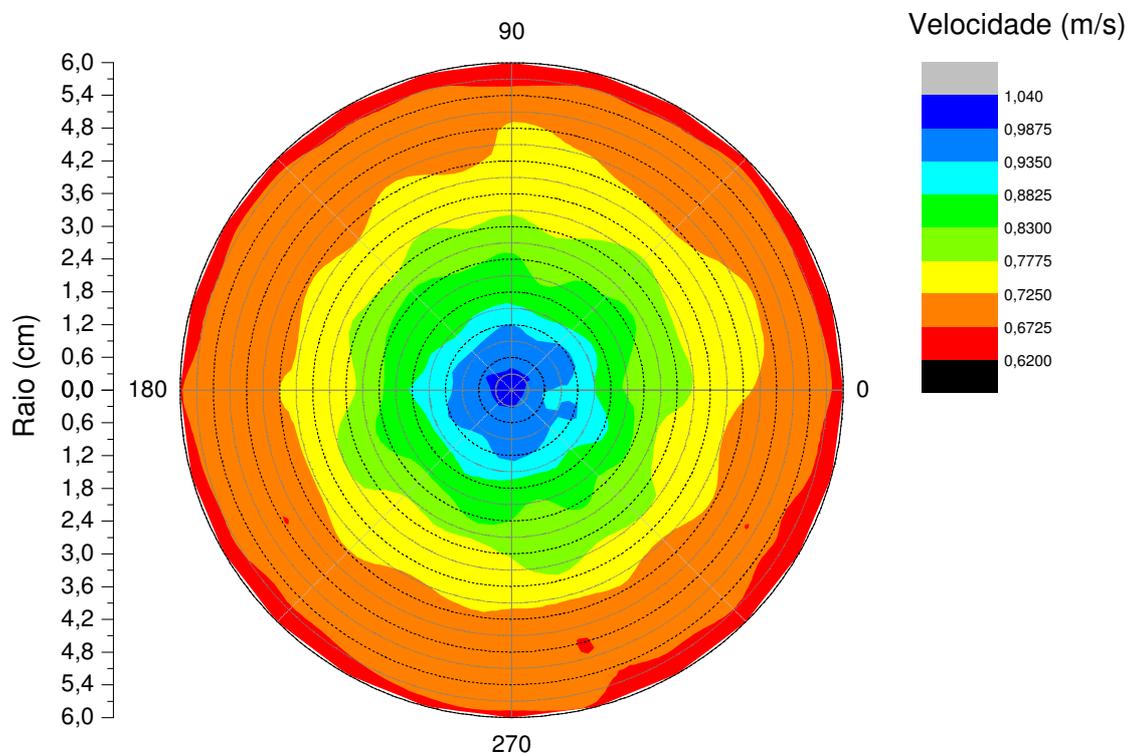
O fluxograma base do processo, ou seja, aquele que atende ao objetivo proposto, é aquele representado na Figura 4.1 pelos números 08 e 13.

O secador de leito fixo com ar percolado foi selecionado por constituir um volume de controle onde é possível estudar de forma científica os fenômenos de transferência de calor e massa, encolhimento e possibilita uma boa aquisição de medidas experimentais de temperatura, velocidade, pressão, umidade, dimensões, seja do

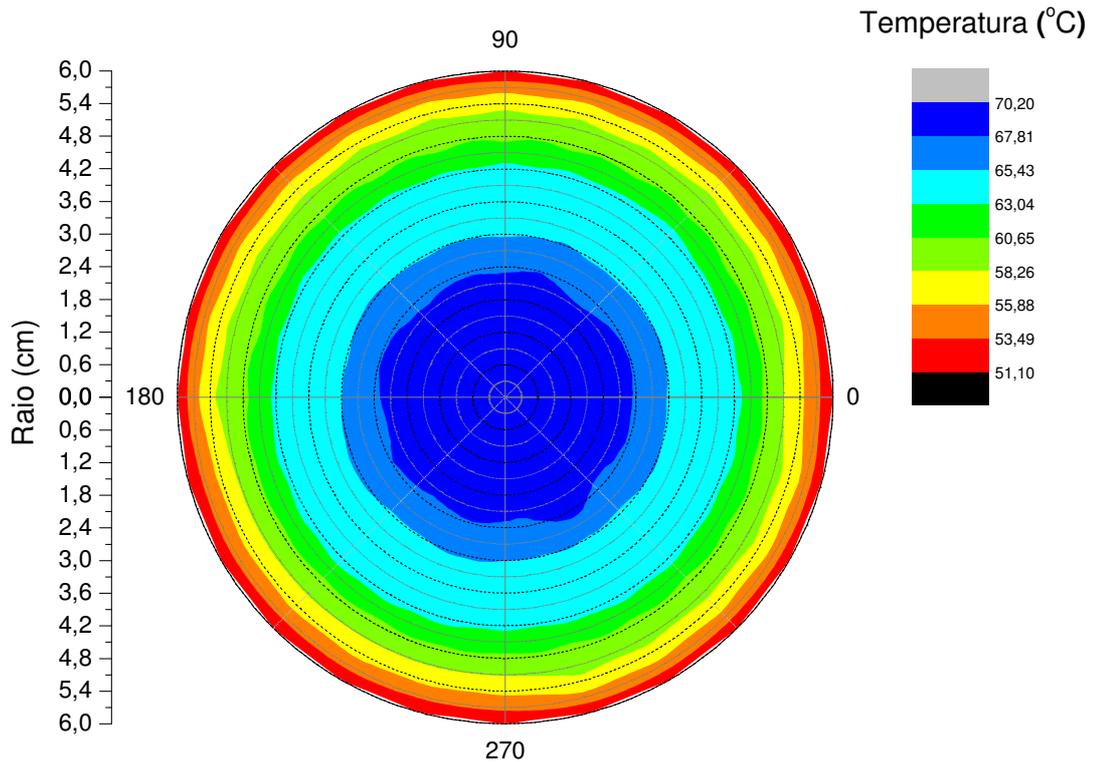
material particulado, seja do ar que percola o leito. Esses estudos também são prontamente aplicados para projeto de secadores industriais.

### 4.3 Câmera de Secagem

Como as variações experimentais ao longo do raio e as variáveis operacionais são menores que os erros de medidas dos instrumentos. Pode-se concluir que a região central do leito onde se processou a secagem apresenta distribuições uniformes de velocidade e temperatura do ar, como pode ser visualizado nas distribuições típicas das Figuras 4.2 e 4.3, respectivamente.



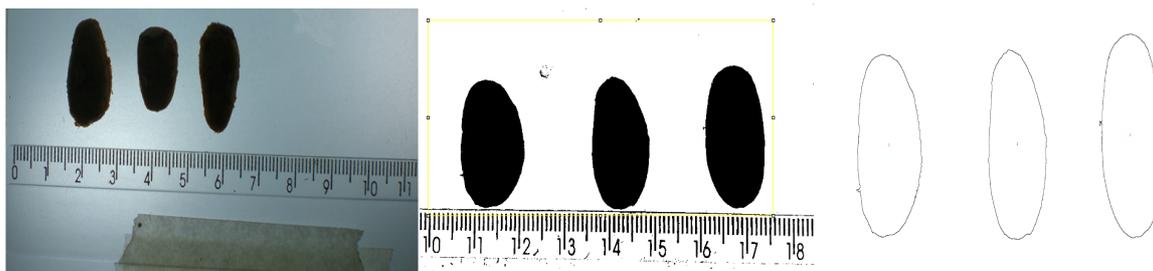
**Figura 4. 2** - Resultado típico de velocidade do ar na região de secagem, com  $VA = 1 \pm 0,1$  m/s e  $TA = 70,0 \pm 0,25^\circ C$   
**Fonte:** o autor



**Figura 4.3** - Resultado típico da temperatura do ar na região de secagem, com  $TA = 70,0 \pm 0,25^\circ\text{C}$  e  $VA = 1 \pm 0,1 \text{ m/s}$   
**Fonte:** o autor.

#### 4.4 Caracterizações Físicas

Os dados apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2 mostram as dimensões e forma de amostras das partículas no início e no final do processo com a velocidade em  $1 \text{ m.s}^{-1}$  e a temperatura a  $70^\circ\text{C}$ , obtidos através da análise de imagem digital como ilustra a Figura 4.4. O desvio percentual entre médias das dimensões e formas de duas amostras de amêndoas, obtidas no início e final do processo, em relação às médias iniciais são apresentadas na Tabela 4.3.



**Figura 4. 4 -** Análise de imagem das amêndoas de cacau no início do processo

**Fonte:** O autor

Na tabela 4.3, nota-se que as dimensões das amêndoas apresentaram alterações, como por exemplo, a área, com redução de 25,0%. Além disso, a sua forma foi alterada, a esfericidade apresenta desvio de 1,96% e a solidez de 0% em relação às médias iniciais.

**Tabela 4. 1 -** Dimensões de uma amostra de amêndoas obtidas no início do processo

	Área	Perim.	Maior	Menor	Ang.	Circ.	Feret	Feret X	Feret Y	Feret Angle	Mini Ferret	AR	Esfericidade	Solidez
1	2,98	7,38	2,84	1,34	93,59	0,69	2,78	9,97	6,01	92,33	1,35	2,12	0,47	0,98
2	2,61	6,71	2,6	1,28	94,05	0,73	2,6	7,28	6,23	95,24	1,29	2,04	0,49	0,99
3	2,8	6,95	2,51	1,42	91,62	0,73	2,5	4,45	8,79	88,96	1,43	1,77	0,57	0,98
<b>Média</b>	2,8	7,01	2,65	1,34	93,09	0,72	2,63	7,23	7,01	92,18	1,36	1,98	0,51	0,98
<b>Desv. Pad.</b>	0,19	0,34	0,17	0,07	1,29	0,02	0,14	2,76	1,54	3,14	0,07	0,18	0,05	0
<b>Desv. Pad. %</b>	6,67	4,8	6,29	5,41	1,39	3,28	5,49	38,21	22,02	3,41	5,48	9,33	9,77	0,36

**Tabela 4. 2 -** Dimensões de uma amostra de amêndoas obtidas no final do processo

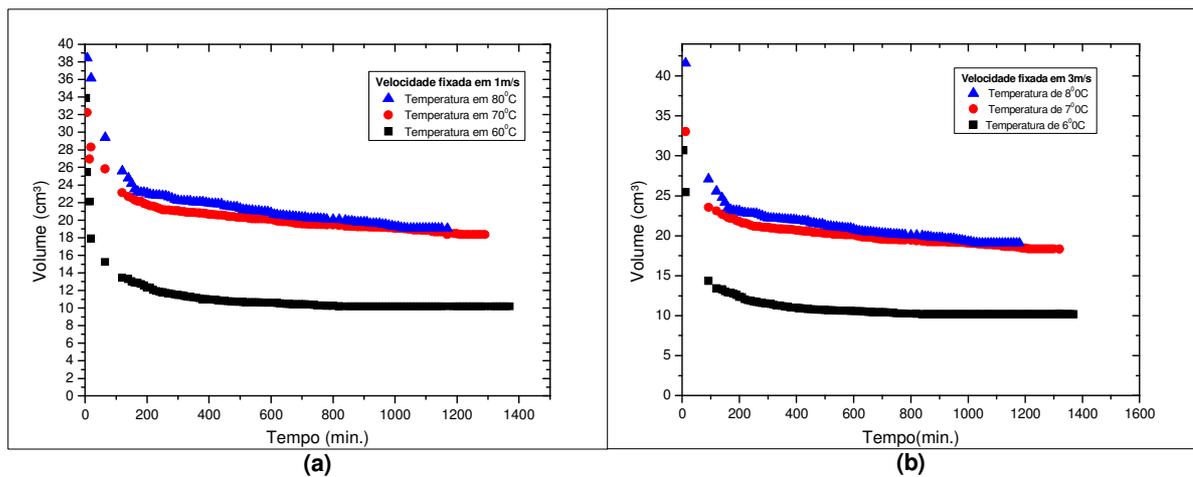
	Área	Perim.	Maior	Menor	Ang.	Circ.	Feret	Feret X	Feret Y	Feret Angle	Mini Ferret	AR	Esfericidade	Solidez
1	2,24	8,26	2,27	1,26	87,80	0,41	2,28	11,36	7,53	88,07	1,33	1,81	0,55	0,96
2	2,00	6,27	2,29	1,11	95,82	0,64	2,28	5,51	5,27	93,86	1,13	2,07	0,48	0,98
3	2,07	6,24	2,39	1,10	100,28	0,67	2,36	8,52	5,30	96,68	1,12	2,16	0,46	0,98
<b>Média</b>	2,10	6,93	2,32	1,16	94,63	0,57	2,31	8,46	6,03	92,87	1,20	2,01	0,50	0,98
<b>Desv. Pad.</b>	0,12	1,16	0,06	0,09	6,32	0,14	0,04	2,92	1,30	4,39	0,12	0,18	0,05	0,01
<b>Desv. Pad. %</b>	5,92	16,72	2,57	7,42	6,68	24,39	1,90	34,53	21,53	4,72	9,98	8,98	9,31	1,10

**Tabela 4. 3** - Desvio percentual entre médias das dimensões de duas amostras de amêndoas obtidas no início e final do processo em relação às médias iniciais.

	Área	Perim.	Maior	Menor	Ang.	Circ.	Feret	Feret X	Feret Y	Feret Angle	Mini Ferret	AR	Esfericidade	Solidez
Desv. %	25,00	1,14	12,45	13,43	1,65	20,83	12,17	17,01	13,98	0,75	11,76	1,51	1,96	0,00

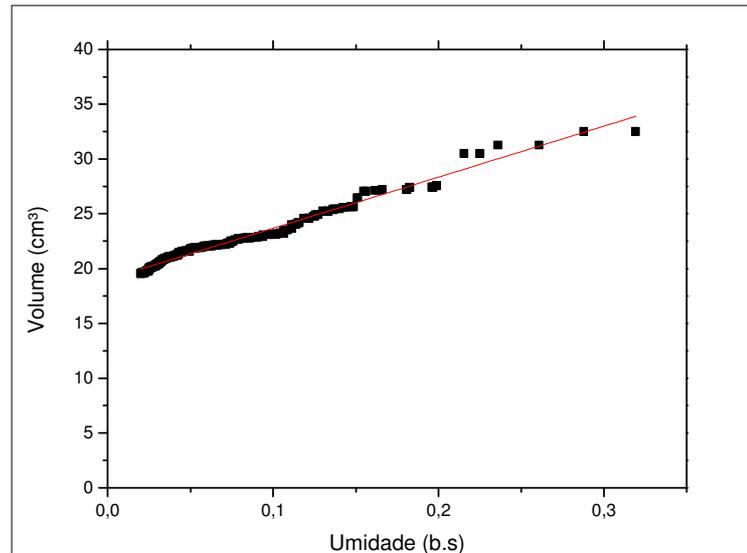
#### 4.5 Encolhimento do material

Os dados apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2 mostram as dimensões, com os dados da análise de imagem e considerando o diâmetro equivalente da amêndoa de cacau igual à de uma esfera, foi possível verificar o decréscimo do volume da amêndoa em relação ao tempo como mostra a Figuras 4.5 (a) e (b).



**Figura 4. 5** - Decréscimo do volume da amêndoa de cacau em relação ao tempo e da temperatura do ar de 60, 70 e 80 °C parametrizado na velocidade do ar de 1,0 m/s (a) e 3,0 m/s (b).

A Equação 3.4 do encolhimento linear, utilizada no estudo de Iglesias et al. (1993), foi aplicada aos dados da secagem para diferentes velocidades e foram agrupados e analisados conjuntamente, fornecendo uma estimativa única de parâmetros. A equação descreve que o volume de água evaporada, corresponde ao volume de amêndoa que se contrai. O ajuste do volume ao modelo do encolhimento linear foi satisfatório, como é ilustrado na Figura 4.6 e a Tabela 4.4.



**Figura 4. 6 -** Ajuste do volume ao modelo do encolhimento

**Tabela 4. 4 -** Valores dos parâmetros e do coeficiente de correlação para a equação do encolhimento

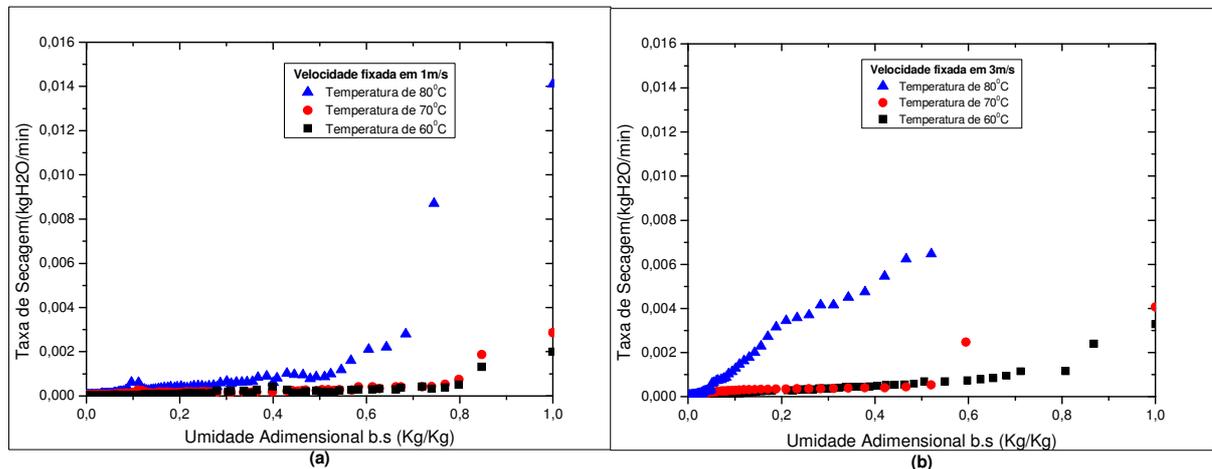
Parâmetros	Valor	Erro Padrão	R <sup>2</sup>
Vs0 (cm <sup>3</sup> )	19,02	0,03	0,98
ε	1,03	0,02	

#### 4.6 Cinética de secagem

Os experimentos foram iniciados com amostras de amêndoas de cacau após a etapa da retirada da polpa através de maceração com água. Podemos notar que o período decrescente é predominante e onde há migração de umidade do interior de sólidos porosos, influenciada por vários mecanismos internos de transferência, como o escoamento capilar do líquido, a difusão do vapor devido à diferença de concentração, a difusão térmica do vapor, entre outras (BARROZO, 1995).

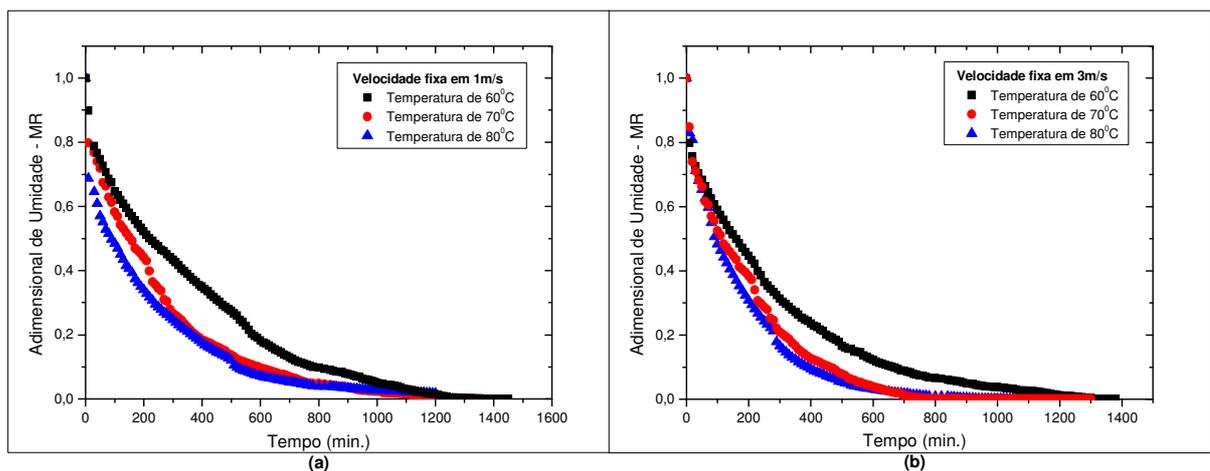
A partir da Figura 4.7 pode-se observar que o período de taxa de secagem decrescente é a fase crucial do processo, onde a evolução da forma, a degradação das amostras e a resistência difusiva à transferência de massa possuem as suas maiores variações, em comparação com a pequena quantidade de água que é removida do material durante este período.

Pode-se, então, afirmar que o período de taxa decrescente é a etapa mais crítica do processo de secagem por convecção forçada, e a que mais requer pesquisas para o desenvolvimento dos processos de secagem, para que se possa obter produtos com o mínimo de deterioração da sua integridade física.



**Figura 4.7** - Densidade de fluxo de massa em relação à umidade em base seca e da temperatura do ar de 60, 70 e 80 °C parametrizado na velocidade do ar de 1,0 m/s (a) e 3,0 m/s (b).

A Figura 4.8 ilustra os dados do adimensional de umidade em função do tempo e da temperatura do ar de secagem de 60, 70 e 80°C, parametrizado nas velocidades do ar de 1 e 3,0 m/s, respectivamente.

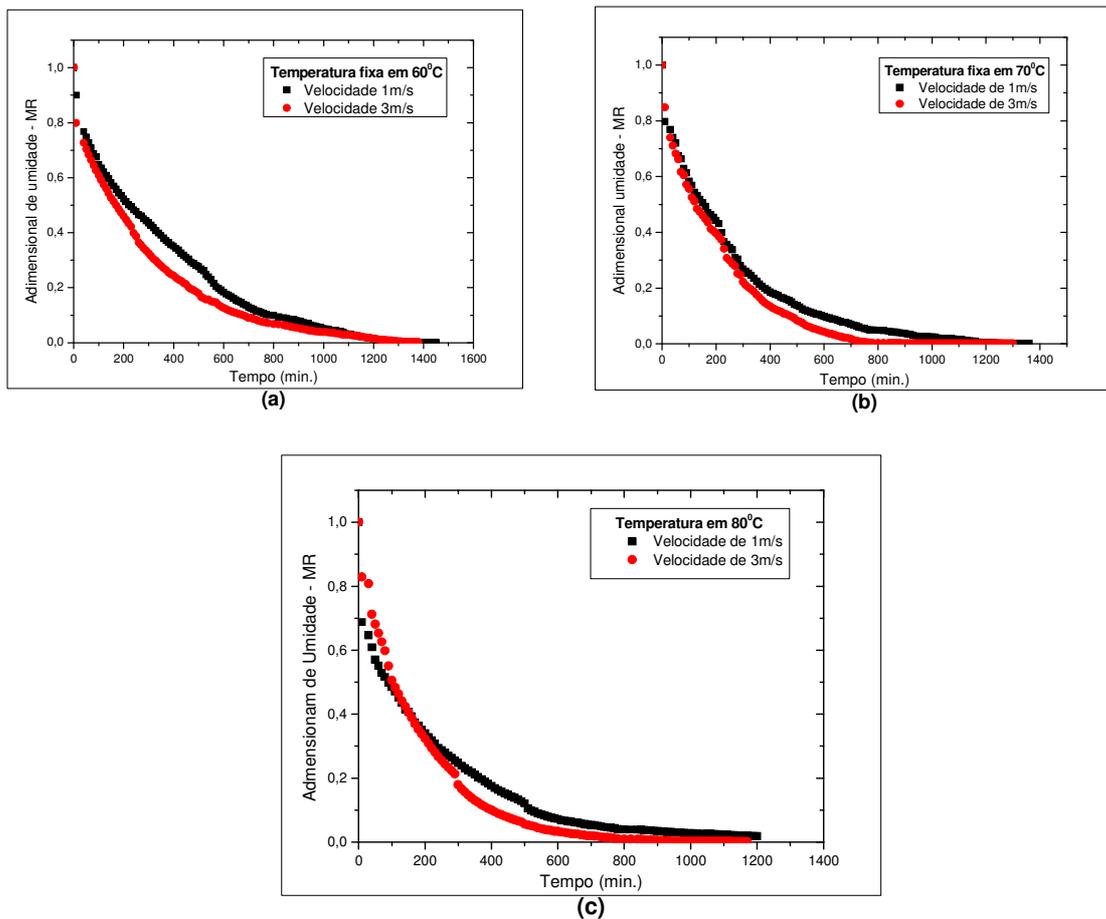


**Figura 4.8** - Adimensional de umidade em função do tempo e da temperatura do ar de 60, 70 e 80 °C parametrizada na velocidade do ar de 1,0 m/s (a) e 3,0 m/s (b).

Pode-se observar na Figura 4.8 que a influência da temperatura do ar de secagem é bem marcante para o processo. A curva da temperatura mais elevada atinge mais

rapidamente menor nível de umidade para um tempo constante do que a curva de 60°C, demonstrando uma maior variação da umidade pelo tempo.

A Figura 4.9 mostra os dados do adimensional de umidade em função do tempo e da velocidade do ar de 1 e 3,0 m/s parametrizado nas temperaturas do ar de secagem de 60, 70 e 80°C, respectivamente.



**Figura 4. 9** - Adimensional de umidade em função do tempo e da velocidade do ar de 1 e 3,0 m/s, parametrizada na da temperatura do ar de 60°C (a), 70°C (b) e 80°C (c)

Outro parâmetro estudado foi a influência da velocidade do ar de secagem. A Figura 4.9 apresenta as curvas de secagem das amêndoas de cacau (umidade adimensional versus o tempo) obtidas com duas velocidades do ar de secagem diferentes (1 e 3 m.s<sup>-1</sup>) e nas temperaturas de 60, 70 e 80°C. É possível perceber que a diferença na curva de secagem provocada pela diferença de velocidade do ar não se apresenta de forma tão pronunciada o que permite dizer que as curvas praticamente se sobrepõem. Entretanto, a partir de 80°C a umidade é retirada do interior do sólido e enviada para a superfície em maior quantidade. Assim, uma

velocidade do ar mais elevada é desejável para evaporar toda água na superfície da amêndoa, por isso na velocidade de 3m/s a taxa de secagem foi maior.

Na Tabela 4.5 estão apresentados os resultados de estimativa de parâmetros dos modelos de cinética de secagem semi-empíricos. Decorrente da baixa influência da velocidade do ar na secagem amêndoas de cacau, os dados da secagem para diferentes velocidades foram agrupados e analisados conjuntamente, fornecendo uma estimativa única de parâmetros para as equações semi-empíricas avaliadas.

**Tabela 4.5 - Parâmetros estimados e medidas de curvatura**

Referência	Variância	R <sup>2</sup>	Curvatura	Parâmetro	Valor Estimado	% de Vício de Box
Lewis*	0,0357	R <sup>2</sup> 0,9069	IN 0,0794	A	11,1530	237,6937
			PE 127,6927	B	3713,9343	0,2456
Brooker**	0,0354	R <sup>2</sup> 0,9068	IN 0,1477	A	10,9102	238,7294
				B	3707,4850	0,3096
			PE 157,2604	C	0,9946	0,0626
Henderson e Henderson**	0,035	R <sup>2</sup> 0,9068	IN 0,123	A	10,7133	163,7176
				B	3701,2848	0,1619
			PE 126,2294	C	0,9946	0,049
Page**	0,0339	R <sup>2</sup> 0,9793	IN 0,1194	A	0,1476	544,9780
				B	-373,2495	0,3798
			PE 676,9280	n	0,1945	0,4384
Overhults**	0,0143	R <sup>2</sup> 0,9793	IN 0,0690	A	-9,7529	0,0687
				B	1886,8497	0,1920
			PE 0,3009	n	0,1949	0,1461

$$* \frac{1}{\sqrt{F(2; 787; 0,95)}} = 0,5761$$

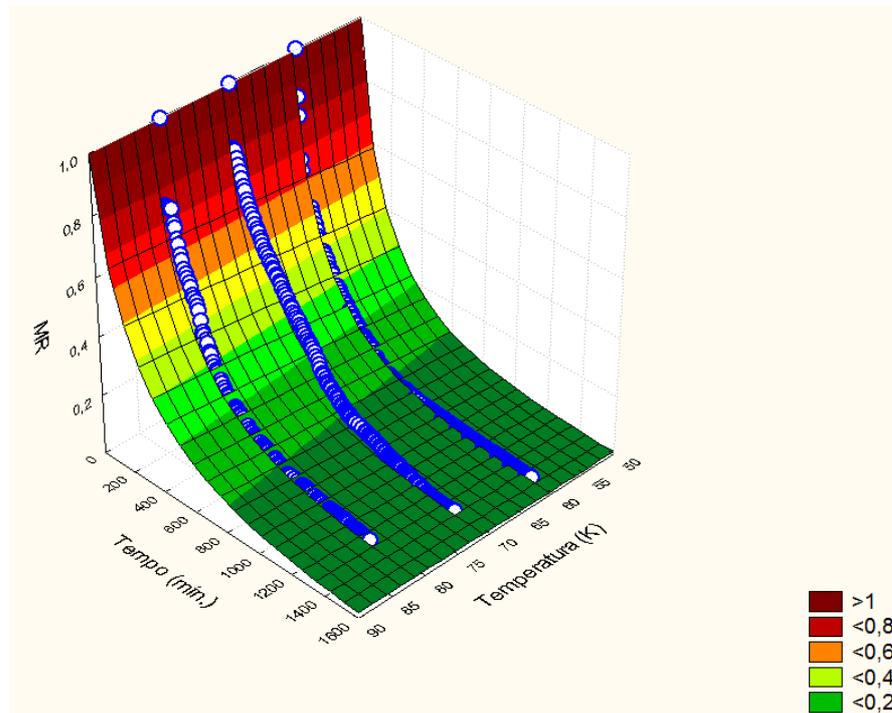
$$** \frac{1}{\sqrt{F(3; 787; 0,95)}} = 0,6176$$

Pela Tabela 4.5, nota-se que nas cinco equações a curvatura intrínseca (IN) não possui valor significativo, já que esta apresenta valores menores do que  $1/\sqrt{F}$ , sendo que na curvatura paramétrica, que é uma curvatura devido a efeitos de parâmetro, apenas a equação de Overhults possui valor menor do que  $1/\sqrt{F}$ . Nas quatro primeiras equações, como o valor da curvatura (PE) é superior a  $1/\sqrt{F}$ , pelo menos um dos parâmetros apresenta comportamento não linear. Pode-se determinar qual parâmetro apresenta este comportamento observando se a % de vício de Box de um determinado parâmetro é maior do que 1%. Como pode ser verificado na Tabela 2, o parâmetro A apresenta os maiores valores de % de vício para as quatro primeiras equações, e, portanto, este parâmetro é o responsável pelo comportamento não linear destas equações.

As equações de Page e Overhults apresentaram os maiores valores para o  $R^2$  e, portanto, melhor representaram os dados de cinética de secagem das amêndoas de cacau. Porém, como foi dito anteriormente, a equação de Page possui um comportamento não linear, ou seja,  $(PE) > 1/\sqrt{F}$ . Este comportamento deve-se a forma como a temperatura está associada ao parâmetro difusividade efetiva, que nas quatro primeiras equações é através de uma função do tipo Arrhenius e na equação de Overhults, devido a uma reparametrização, não evidenciada nas demais equações, adequou-se o parâmetro A responsável pelos desvios da linearidade para um comportamento linear e, por isso, a equação de Overhults é a que melhor descreve a cinética de secagem das amêndoas de cacau.

Os gráficos de superfície relacionando os dados experimentais com os valores preditos pelo modelos de Overhults propostos neste trabalho estão apresentados na Figura 4.10. Observa-se que a altas temperaturas, a umidade decresce de forma significativa em pouco tempo de secagem e se mantém praticamente constante.

Também podemos confirmar o exposto acima através do gráfico de superfície relacionando os dados experimentais com os valores preditos pelo modelo de Overhults propostos neste trabalho. Observa-se que na Figura 4.10 a altas temperaturas a umidade inicial decresce de forma significativa.



**Figura 4.10** - Gráfico de superfície representado pelo modelo de Overhults Adimensional de umidade em função do tempo e da temperatura do ar de 60, 70 e 80 °C parametrizada na velocidade do ar de 1,0 m/s.

#### 4.7 Análise da eficiência energética

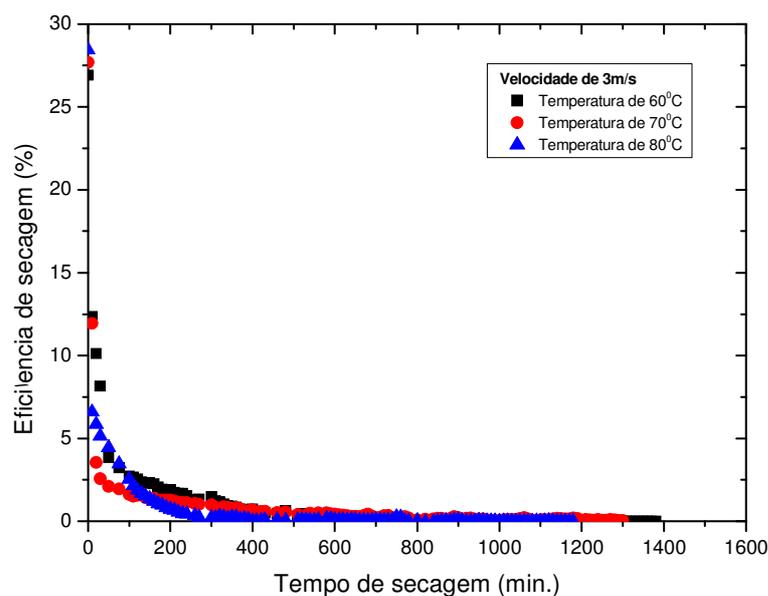
Com auxílio da Equação 2.17 obtida pelo balanço energético do processo de secagem, utilizando-se dos dados da taxa de secagem com o tempo foi possível estimar a energia necessária para realizar a evaporação da água presente e, com o controle da temperatura e velocidade do ar na saída do secador, bem como o monitoramento da temperatura do ar na entrada foi possível obter a energia necessária para aquecer o ar até a temperatura desejada.

Para o cálculo da eficiência de secagem admitiu-se que esta seria constante nos intervalos de 10 minutos, uma vez que não é possível determiná-la em períodos menores, já que a massa da amostra é tomada somente neste intervalo de tempo. A tabela 4.6 apresenta os valores da eficiência de secagem nas temperaturas de 60, 70 e 80°C parametrizada na velocidade do ar de 3,0 m/s.

**Tabela 4. 6** - Eficiência de secagem nas temperaturas de 60, 70 e 80°C parametrizada na velocidade do ar de 3,0 m/s.

Intervalo de Tempo (min.)	Eficiência de Secagem (%) com ar a 3,0 m/s		
	60°C	70°C	80°C
0	0	0	0
0 - 10	26,91	27,70	28,43
10 - 20	12,35	11,93	6,60
20 - 30	10,11	3,54	5,85
30 - 40	8,15	2,57	5,13
40 - 50	3,83	2,09	4,44
50 - 60	3,23	1,94	3,47
60 - 70	2,72	1,61	2,54
70 - 80	2,65	1,51	2,15
80 - 90	2,54	1,56	1,87
90 - 100	2,37	1,66	1,67

Notamos que próximo à entrada do leito a eficiência energética atinge o ponto máximo, devido somente a retirada de umidade na superfície do material. Porém, quando necessita-se retirar a umidade interna, mais energia foi fornecida ao sistema, acarretando o aumento de temperatura do ar de exaustão e o decréscimo da eficiência energética.



**Figura 4. 11** - Eficiência de secagem em função do tempo para a temperaturas do ar de 60,70 e 80°C parametrizada na velocidade de 3,0 m/s.

Como se observa na Tabela 4.6 e na Figura 4.11 o processo de secagem das amêndoas de cacau apresenta uma baixa eficiência energética, aproximadamente 28,43% na velocidade e temperatura mais elevada do experimento. Valor este, encontrado na literatura de diversos autores. Segundo os estudos de Grabowsk et al. (2002) e Fernandes (2007) os valores da eficiência energética se encontram na faixa de 19 a 40%. Uma vez que estes materiais são heterogêneos e o fenômeno de secagem é limitado pela transferência de massa interna. Além disso, a quantidade de água evaporada é bem inferior ao volume de ar aquecido para o processo de secagem, o que faz com que haja uma grande diferença entre a energia fornecida para aquecer o ar e a energia utilizada no processo de secagem propriamente dito.

Percebe-se, ainda, que a eficiência energética decresce com o andamento da secagem, uma vez que, a quantidade de água na amostra a ser evaporada diminui. Claramente a eficiência energética está ligada com a temperatura de saída do ar de secagem. No presente estudo, a eficiência energética diminui com o tempo de secagem devido ao crescimento da resistência interna à transferência de calor e massa.

Dessa forma, a secagem em menores temperaturas apresenta uma maior eficiência por um período de tempo mais duradouro devido a maior quantidade de água presente na amostra, se comparados com secagens com temperaturas maiores em um mesmo tempo de experimento. No entanto, inicialmente, secagem realizadas a maiores temperaturas conseguem um maior rendimento inicial visto a grande quantidade de água evaporada nos primeiros minutos de secagem e, em virtude disso, o rendimento decresce rapidamente após os primeiros minutos.

O rendimento para menores temperaturas do ar permanece mais elevado por um maior período de tempo, pois além de uma menor demanda de energia para aquecer o ar, a evaporação de água presente no interior do sólido ocorre mais lentamente e não de forma tão abrupta como nas secagens a temperaturas maiores, mantendo a razão de energia utilizada pela disponibilizada mais equilibrada.

## 5 CONCLUSÕES

Com base no objetivo proposto e diante dos resultados obtidos neste trabalho têm-se, para as condições operacionais utilizadas, as conclusões descritas a seguir:

1. A cinética de secagem das amêndoas de cacau ocorre dentro do período de taxa decrescente e a difusidade é predominante;
2. A cinética é significativamente influenciada pela temperatura do ar de secagem, entretanto a velocidade do ar é pouco significativa e pode ser desconsiderada no processo de discriminação dos modelos semi-empíricos;
3. A equação de Overhults é a equação que melhor representa a cinética de secagem das amêndoas de cacau, já que esta apresentou os maiores valores de  $R^2$ , além de ter os valores da curvatura intrínseca e paramétrica não significativos, o que indica que esta equação possui um comportamento próximo a linearidade, fato que não foi observado para as demais equações;
4. O modelo de encolhimento linear representou o volume da amostra, sendo que a avaliação estatística do ajuste evidenciou que as determinações experimentais são aleatórios, o que indica uma distribuição normal e um bom ajuste de dados ao modelo, e
5. O valor da eficiência energética do processo foi de 28,34%, sendo este valor encontrado na literatura de outros autores como Grabowsk et al. (2002) e Fernandes (2007).

Apesar da baixa eficiência de secagem, a remoção da umidade presente no material é fundamental para a qualidade dos processos de secagem da amêndoa do cacau. A eficiência de secagem pode ser melhorada avaliando-se o tempo de secagem conjuntamente com a temperatura, velocidade e energia consumida no processo.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Aqui são apresentadas algumas sugestões para a complementação futura deste trabalho:

- testar modelos matemáticos de transferência de massa e energia;
- avaliar a eficiência energética em camada delgada e por meio de outras equações para efeito de comparação.
- modificar a estrutura do aparato experimental recirculando o ar de exaustão e coletar dados experimentais. Simular a eficiência energética para essa configuração sem desprezar perdas térmicas.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, B.V.; PINHEIRO FILHO, J.B.; HARA, T.; Fortes, M. **Determinação da porosidade para cacau em amêndoas**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 9, Anais..., Campina Grande, 2009, p. 606-612.

ARRIECHE, L. S., **Evolução da forma e encolhimento de um sistema gel durante a secagem por convecção forçada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos: UFSCar, 2003.

AZZOUZ, S.; GUIZANI, A.; JOMAA, W. e BELGHITH, A. - **Moisture Diffusivity and Drying Kinetic Equation of Convective Drying of Grapes** - Journal of Food Engineering, vol. 55, pg 323-330, 2002.

BACELOS, M. S., SPITZNER NETO, P. I. SILVEIRA, A. M., FREIRE, J.T. **Analysis of draying of pastes in Spouted Beds**. Drying 2004. Proceedings of the 14th International Drying Simposium (IDS 2004). São Paulo, Brasil. Vol C. p 1537-1544.

BACELOS, M. S.; JESUS, C. D. F.; FREIRE, J. T. (2009), “**Modelling and drying of carton packaging waste in a rotary dryer**”. Drying Technology, 27, 927–937.

BARROZO, M. A. S. (1995), **Transferência de calor e massa entre o ar e amêndoas de soja em leito deslizante e escoamentos cruzados**. Tese de doutorado, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, 163p.

BATES, B.C., 1988. **Nonlinear, discrete flood event models**, 2. Assessment of statistical nonlinearity. J. Hydrol., 99: 77-89.

BAUDET, L.M.L.; VILLELA, F.A.; CAVARIANI, C. **Princípios de secagem**. Seed News, Pelotas-RS, n.10, p.20-27,1999.

BECKETT, S. T. **Industrial chocolate manufacture and use**. 2 ed. London: Chapman and Hall, 1994. 408 p.

BORTOLAIA, L. A., **Modelagem matemática e simulação do processo de secagem artificial de grãos de soja em secadores de fluxo contínuo**. 2011. 148f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre.

BROD, F. P. R. **Avaliação de um secador vibro-fluidizado**. 2003. 361f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas.

BROOKER, D.B., BAKKER-ARKEMA, F. W., HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York, AVI Book, 1992. 450p.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W., **Drying cereal grains**. The Avi Publishing Company Inc., 1974. 265p.

CARVALHO, C. A. C. **Síntese e otimização de sequencias de destilação utilizando simuladores comerciais**. 1995. 240 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP, Campinas, 1995.

CARVALHO, A. V.; GARCÍA, N. H. P.; FARFÁN, J. A. **Proteínas da amêndoa de cupuaçu e alterações devidas à fermentação e à torração**. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v. 28, p. 986-993, out.-dez. 2008.

CASSANDRE, J. E. F.; MOREIRA, M. F. P.; SARTORI, D. J. M. **Desenvolvimento de um Secador de Convecção Forçada com Reciclo de Ar**. In: 3º COBEQ-IC, 3., Belo Horizonte. Anais..., 2001.

CHEN, D, ZHENG, Y, ZHU, X. **In-depth investigation on the pyrolysis kinetics of raw biomass, Part I: Kinetic analysis for the drying and devolatilization stages**. *Bioresource Technology*, v. 131, p. 40–46, China, 2013.

COHEN, K. O. **Estudo do processo de temperagem do chocolate ao leite e de produtos análogos elaborados com líquido e gordura de cupuaçu**. 2003. 296 f. Tese (Doutorado em Tecnologia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP, Campinas, 2003.

COLAK, N., HEPBASLI, A., 2009. **A review of heat pump drying: Part 1 – Systems, Models and studies**. *Energy Conversion and Management* 50, 2180–2186.

DAMASO, M. C. T.; PASSIANOTO, M. A.; FREITAS, S. C.; FREIRE, D. M. G.; LAGO, R. C. A.; COURI, S. **Utilization of agroindustrial residues for lipase production by solid-state fermentation**. *Brazilian Journal of Microbiology*, v. 39, p. 676-681, nov. 2008.

DEVAHASTIN, S.; MUJUNDAR, A. S. **Indirect Dryers**. In: MUJUMDAR, A. S. *Handbook of Industrial Drying*, 3ª Edição. London – UK: Taylor and Francis, 137-148, 2006.

DISSA, A. O.; DESMORIEUX, H.; SAVADOGO, P.W.; SEGDA, B.G. e KOULIDIATI, J. - **Journal of Food Engineering** - Vol. 97, p. 410-418, 2010.

EFRAIM, P. **Estudo para minimizar as perdas de flavonóides durante a fermentação de cacau para produção de chocolate**. 2004. 114 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) – Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas.

EFRAIM, P.; PEZOA-GARCÍA, N. H.; JARDIM, D. C. P.; NISHIKAWA, A.; HADDAD, R.; EBERLIN, M. N. **Influência da fermentação e secagem de amêndoas de cacau no teor de compostos fenólicos e na aceitação sensorial**. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v. 30, p. 142-150, maio 2010.

FERNANDES, C. F.; “**Análise da Eficiência Energética da Secagem de Pasta em Leito de Jorro**”, Dissertação de Mestrado, UFScar, São Carlos, SP, 2005, 80 p.

FERNANDES, M. L. M. **Produção de lipases por fermentação no estado sólido e sua utilização em biocatálise**. 2007. 131 f. Dissertação (Doutorado em Química) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. (1982), **Princípios das Operações Unitárias**, 2ª Edição. LTC: Rio de Janeiro-RJ, 670 p.  
FRANCO, M. **Integração Energética de Sistemas de Evaporação Localizados Abaixo do Ponto Pinch**. Campinas, SP, FEQ/UNICAMP, 2001, 100p (Dissertação de Mestrado).

FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T. (2009), **Fluidodinâmica de reatores biológicos de leite fluidizado**. In: FREIRE, J. T.; SILVEIRA, A. M. Fenômenos de transporte em sistemas particulados: fundamentos e aplicações. São Carlos: Editora Suprema, 382-403.

FREIRE, J. T.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, F. B. (2011), **Drying of Solutions, Slurries, and Pastes**. In: EPSTEIN, N.; GRACE, J. R. Spouted and Spout-Fluid Beds. Cambridge, Canadá, 206-221.

FREIRE, J. T.; FREIRE, F. B.; PERAZZINI, H. (2014), **“On the influence of particles characteristics on moisture diffusivity during drying of granular porous media”**. Advances in Chemical Engineering and Science (artigo aceito para publicação).

GEANKOPLIS, C.J. **Transport Processes and Unit Operations**. 3ª ed, Prentice-Hall International, Inc., 1993.

GONELI, A.L.D. et al. **Contração volumétrica e forma dos frutos de mamona durante a secagem**. Acta Scientiarum. Agronomy, Maringá, v. 33, n. 1, p. 1-8, 2011.  
GUINÉ, R.P.F., AND R.M.C.

GOMES, O. F. M.. **Processamento e Análise de Imagens Aplicados à Caracterização Automática de Materiais**. 2001. 151 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Metalúrgica) – Departamento de Ciências de Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

GRABOWSKI, S., MARCOTTE, M., POIRIER, M., KUDRA, T. **Drying Characteristics of Osmotically Pretreated Cranberries – Energy and Quality Aspects**. Drying Technology. vol.20, n. 10, p.1989-2004. 2002.

GUEHI, T. S.; ZAHOUALI, I. B.; BAN-KOFFI, L.; FAE, M. A.; NEMLIN, J. G. **Performance of different drying methods and their effects on the chemical quality attributes of raw cocoa material**. International Journal of Food Science and Technology, v. 45, p. 1564-1571, 2010.

HACIHAFIZOGLU, O.; CIHAN, A.; KAHVECI, K. **Mathematical modelling of drying of thin layer rough rice**. Food and Bioproducts Processing, v. 86, n. 4, p. 268-275, 2008.

HARRINGTON, J.F. **Seed storage and longevity**. In: KOZLOWSKI, T.T. Seed biology. New York : Academic, V.3, p.145-245, 1972.

HARTEL, W. H. **Crystallization in foods**. Maryland: Aspen Publications, 2001.

HENDERSON, J.M.; HENDERSON, S.M. **A Computacional Procedure for Deep-Bed Drying Analysis**. *Journal of Agricultural Engineering Research*, v.13, p.87-95, 1968.

HII, C.L., LAW, M.C., LAW, S., 2013. **Simulation of heat and mass transfer of cocoa beans under stepwise drying conditions in a heat pump dryer** *Journal of Food Engineering* 91 (2), 276–282.

HOSKIN, J. M.; DIMICK, P. S. **Observation of chocolate during by scanning electron microscopy and viscometry**. *Journal of Foods Science*, v. 45, p.1541-1545, 1980.

IGLESIAS, O.; GARCIA, A.; ROQUES, M.; BUENO, J. L. **Drying Of Water Gels: Determination Of The Characteristic Curve Of Agar-Agar**. *Drying Technology*, New York, V. 3, N. 11, P. 571 - 587, 1993.

ITAL. **Instituto de Tecnologia de Alimentos**. Desenvolvimento de recheios para bombons: ingredientes e parâmetros de controle. Campinas, 1998.

JANJAI, S.; MAHAYOTHEE, B.; LAMLERT, N.; BALA, B. K.; PRECOPPE, M.; NAGLE, M. e MÜLLER, J. - **Diffusivity, shrinkage and simulated drying of litchi fruit (Litchi CHinensis Sonn.)**. *Journal of Food Engineering*. v. 96. pg 214-221. 2010.

KATEKAWA, M. E. - **Análise Teórico-Experimental do Encolhimento: Estudo da Secagem da Banana**. 197 f. Tese de doutorado em Engenharia Química. Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP, 2006.

KEALEY, K. S. et al. Mars Incorporated. **Method for producing fat and/or solids from beans and compositions containing polyphenols**. US Patent Application 2004/0058022, 2004.

KEALEY, K. S. et al. Mars Incorporated. **Cocoa components, edible products having enhanced polyphenol content, methods of making same medical uses**. Patent Corporation Treaty (PCT) WO 98/09533, 1998.

KECHAOU, N. e ROQUES, M. A. - **A Variable Diffusivity Model for Drying of Highly Deformable Materials**. In *Drying '89*, Eds. A. S. Mujumdar and M. Roques, hemisphere Publ. Co., New York, pp. 332-338, 1990.

KEEY, R. B. **Introduction to industrial drying operations**. Oxford: Pergamon Press, 1978, 376 p.

KUDRA, T. **Instantaneous Dryer Indices for Energy Performance Analysis**. *Inzynieria Chemiczna i Procesowa*. Vol 19, n.1 pp.163-172. 1998

KUDRA, T. (2004), **“Energy aspects in drying”**. *Drying Technology*, 22, 917-932. 325-350.

- LEWIS, W. K. **The rate of drying of solids materials**. The Journal of Industrial and Engineering Chemistry, v.13, nº 5, p.427-432, 1921.
- LOPES, A. S. **Estudo químico e nutricional de amêndoas de cacau (Theobroma cacao L.) e cupuaçu (Theobroma grandiflorum Schum) em função do processamento**. 2000. 130 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP, Campinas, 2000.
- LUCCAS, V. **Fracionamento térmico e obtenção de gorduras de cupuaçu alternativas à manteiga de cacau para uso na fabricação de chocolates**. 2001. 195 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP, Campinas, 2001.
- MAO, T. K. et al. **The effect of cocoa procyanidins on the transcription and secretion of interleukin 1 $\beta$  in peripheral blood mononuclear cells**. Life Sciences, v. 66, n. 15, p. 1377-1386, 2000.
- MAYOR, L.; SERENO, A.M. **Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review**. Journal of Food Engineering 61 (3), p. 373-386, 2004.
- MCCORMICK, P. Y. **SOLIDS drying fundamentals**. (1983) In Chemical Engineering Handbook. R. H. PERRY e C. H. CHILTON, 5ª Edição, McGraw-Hill, sec. 20-4.
- MINIFIE, B. W. **Chocolate, cocoa and confectionery: science and technology**. 2. ed. Westport: AVI, 1983.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA. **Regras para análise de amêndoas**. 1a edição, Brasília, DF, 188 p., 1980.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA. **Indicação Geográfica-IG**. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/desenvolvimento-sustentavel/indicacao-geografica>. Acesso em: 10 de mai. 2015.
- MORAES, I.R., **Estudo numérico e experimental do armazenamento de energia por calor latente em um leito fixo**. Campinas, SP: [s.n.], 2012.
- MOREIRA, M. F. P. – **Secagem de Gel Ágar**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2000.
- MUJUMDAR, A.S., LAW, C.L., 2010. **Drying technology: trends and applications in postharvest processing**. Food and Bioprocess Technology 3 (6), 843–852.
- MUJUNDAR A. S.; JUMAH R. Y; RAGHAVAN V. G. S., **Handbook of Industrial Drying**, 3<sup>th</sup> ed., 2006.
- NASCIMENTO, H. S.; **Melhoria do aroma de chocolate, por tratamento enzimático, em amêndoas de cacau de baixa qualidade**. 2010. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia). Universidade Estadual de Feira de Santana. Feira de Santana-BA, 2010.

NASCIMENTO, R. F. **Síntese da estrutura de processamento de um produto à base de cacau: maximização de componentes antioxidantes**. 2014. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Química) – Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, 2014. [Orientador: Prof. Dr. Leonardo da Silva Arrieche].

NDUKWU, M.C. 2009. **Effect of drying temperature and drying air velocity on the drying rate and drying constant of cocoa bean**. Agricultural Engineering International: CIGR Ejournal. Manuscript 1091. Vol.XI. April 2009.

NISHIYAMA, Y.; CAO, W.; LI, B. **Grain intermittent drying characteristics analyzed by a simplified model**. Journal of Food Engineering, v. 76, n. 3, p. 272-279, 2006.

NONHEBEL, M.A., Moss, A.A.H. **Drying of solids in the chemical industry**. London:Butterworth & Co., 1971, 301 p.

OETTERER, M.; REGITANO-D'ACRE, M. A. B.; SPOTO, M. H. F. **Fundamentos de ciência e tecnologia de alimentos**. Barueri-SP: Manole, 2006.

OLIVEIRA, D. T.; ESQUIAVETO, M. M. M.; SILVA JÚNIOR, J. F. **Impacto dos itens da especificação do açúcar na indústria alimentícia**. **Ciência e Tecnologia em Alimentos**, v. 27, Campinas, 2007.

OLIVEIRA, A. C. D.; WATANABE, F. M. F.; VARGAS, J. V. C.; MARIANO, A. B.; RODRIGUES, M. L. F. **Comparação entre três bioprocessos para a produção de enzimas proteolíticas utilizando resíduos agroindustriais**. Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial, Paraná, v. 06, n. 2, p. 822-831, 2012.

OHJA, T.P. **Drying of paddy in post-harvest prevention of waste and loss of food grain**. Tóquio: Asia Productivity Organization, 375 p, 1974.

ORDÓÑEZ, J.A. Tecnologia de Alimentos - **Componentes dos Alimentos e Processos**. Vol. 1. Tradução: Fátima Murad. Artmed Editora, Porto Alegre, p.25-31; 201-203. 2005.

OVERHULTS, D. G.; WHITE, G.M.; HAMILTON, H.E.; ROSS, I.J. **“Drying Soybeans with Heated Air”**. Transactions. of the American Society of Agricultural Engineer, v.16, n.2, p.195-200, 1973.

PAGE, G.E. **Factors Influencing the Maximum Rates of Air Drying Shelled Corn in Thin Layer**. 1949. Dissertação (mestrado) - Purdue University, Lafayette: Indiana, 1949.

PÁRAMO, D., García-Alamilla, P., Salgado-Cervantes, M.a., Robles-Olvera, V.J., Rodríguez-Jimenes, G.C., García-Alvarado, M.A., 2010. **Mass transfer of water and volatile fatty acids in cocoa beans during drying**. Journal of Food Engineering 99 (3), 276–283.

PARK, K.J.B.; ALONSO L.F.T.; CORNEJO, F.E.P.; FABBRO, I.M.D.; **Seleção de secadores: fluxograma**. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v.9, n.2, p.179-202, 2007.

PARK, K.J., NOGUEIRA, R.I. **Modelos de ajuste de isotermas de sorção de alimentos.** In: Engenharia Rural, Piracicaba: ESALQ/USP, 1992. v. 3, n. 1, p.81-86.

PAVANELLI, P. E. **Controle PID Aplicado à Secagem Contínua de Pasta em Leito de jorro.** São Carlos SP, PG-EQ/UFSCar, 2003, 83p. (Trabalho de Graduação).

PARRY, J. L. 1985. **Mathematical Modeling and computer Simulation of Heat and Mass Transfer in Agricultural Grain Drying: A Review,** J. Agric. Eng. Res, vol. 32, nº1, pp. 1-29, 1985.

PEÇANHA, R. P., MASSARANI, G. **Dimensão Característica e Forma de Partículas.** Anais do XIV Encontro sobre escoamento em Meios Porosos, Campinas, p.302-312, 1986.

PEREIRA, J. A. M. **Água no grão, comportamento, disponibilidade, e reação com a tecnologia de armazenagem.** Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 1995.

PERLINGEIRO, C.A.G; **Engenharia de Processos,** editora Blucher, São Paulo, 2005.

RATKOWSKY, D.A. **Nonlinear Regression Analysis.** Nova York: Marcel Dekker Inc., 1983.

RIZO, D. C. **Barry Callebaut confirma el poder de los polifenoles en el chocolate.** Dulcelandia, v. 65, n. 789, p. 33-37, 2006.

REIN, D. et al. **Epicatechin in human plasma: In vivo determination and effect of chocolate consumption on plasma oxidation status.** Journal of Nutrition, v. 130, n. 2, p. 2109S-2114S, 2000.

RODRIGUEZ-CAMPOS, J.; ESCALONA-BUENDÍA, H. B.; CONTRERAS-RAMOS, S. M.; OROZCO-AVILA, I.; JARAMILLO-FLORES, E.; LUGO-CERVANTES, E. **Effect of fermentation time and drying temperature on volatile compounds in cocoa.** Food Chemistry, v. 132, p. 277-288, 2012.

ROMERO-PEÑA, L. M. e KIECKBUSCH, T. G. - **Influência de Condições de Secagem na Qualidade de Fatias de Tomate.** Brazilian Journal of Food Technology. v.6, n.1, p.69-76, jan./jun., 2003.

SANBONGI, C. et al. **Antioxidative polyphenols isolated from Theobroma cacao.** Journal of Agricultural and Food Chemistry, v. 46, n. 2, p. 454-457, 1998.

SANTOS, D. C. et al. Cinética de secagem de farinha de grãos residuais de urucum. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** Campina Grande, v. 17, n. 2, p. 223-231, 2013.

SCHENK, H.; PESCHAR, R. **Understanding the structure of chocolate.** Radiat. Phys. Chem., Amsterdam, v. 71, n. 3/4, p. 829-835, 2004.

SIES, H. et al. **Cocoa polyphenols and inflammatory mediators. American Journal of Clinical Nutrition**, v. 81, n. 1, p. 304S-312S, 2005.

SFREDO, M. A. - **Secagem de café para obtenção de bebidas finas**, 2002. 197 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2002.

SFREDO, M. A. - **Estudo da Dispersão na Secagem de Frutos de Café em Secador de Bandejas Vibradas**. 319 f. Tese de Doutorado em Engenharia Química. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

SHAPIRO, H.N.; MORAN, M.J.. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 7ª ed., LTC, Rio de Janeiro, 2013.

STEINBERG, F. M.; BEARDEN, M. M.; KEEN, C. L. **Cocoa and chocolate flavonoids: Implications for cardiovascular health**. Journal of the American Dietetic Association, v. 103, n. 2, p. 215-223, 2003.

STRUMILLO, C., KUDRA, T. **Drying: principles, applications and design**. Switzerland: Gordon and Breach Science Publishers. 1986.

STRUMILLO, C.; JONES, P. L.; ZYLLA, R. (2006), **Energy aspects in drying**. In: MUJUMDAR, A. S. Handbook of Industrial Drying, 3ª Edição. London – UK: Taylor and Francis, 1075-1099.

TARIGAN, E. et al. Drying characteristics of unshelled kernels of candle nuts. **Journal of Food Engineering**, v. 79, n. 3, p. 828-823, 2007.

VAN BRACKEL, J. Mass Transfer in Convective Drying. In: MUJUMDAR, A. S. **Advances in Drying**, Washington: Hemisphere Publishing Corporation, 1980. p. 217-267.

VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R.E.; BORGNAKKE, C.. **Fundamentos da Termodinâmica**. 6ª ed., Edgard Blücher, São Paulo, 2003.

VAN'T LAND C.M. "**Industrial Drying Equipment: selection and application**", Marcel Dekker Inc., p.19-39, 1991.

WADELL, H., J. **Geol.**, n. 41, p. 310 - 331, 1933.

WOLLGAST, J.; ANKLAN, E. **Review in polyphenols in Theobroma cacao: changes in composition during the manufacture of chocolate and methodology for identification and quantification**. Food Research International, n. 33, p. 423-447, 2000.

WERBER, E. A. **Excelência em beneficiamento e armazenagem de grãos**. Canoas, RS: Editora Salles, 2005.

VIEIRA-JUNIOR, P., A. **Estimativas do potencial total de água em amêndoas usando modelos não lineares Revista Brasileira de Amêndoas**, Vol. 21, nº 1, p. 87 – 92, 1999.

VINSON, J. et al. **Chocolate is a powerful ex vivo and in vivo antioxidant, an antiatherosclerotic agent in an animal model and a significant contributor to antioxidants in the European and American diets.** Journal of Agricultural and Food Chemistry, v. 54, n. 21, p. 8071-8076, 2006.

YOUCEF-ALI, S.; DESMONS, J. Y.; MESSAOUDI, H. e LE RAY, M. - **Numerical and xperimental Study of the Drying of a Potato in Forced Convection in a Drier**



## APÊNDICE A

Dados de velocidade e temperatura obtidos na entrada do leito (V=1 m/s e T=70°C).

Ângulo	P1		P2		P3		P4		P5		P6		P7		P8		P9		P10		P11	
	V	T	V	T	V	T	V	T	V	T	V	T	V	T	V	T	V	T	V	T	V	T
0	0,65	51,30	0,68	56,30	0,69	59,80	0,72	63,60	0,74	64,00	0,79	65,10	0,81	67,60	0,83	68,00	0,89	68,30	0,90	68,90	0,99	69,70
	0,66	51,40	0,69	56,40	0,71	59,90	0,73	63,70	0,75	64,10	0,80	65,20	0,82	67,70	0,84	68,10	0,91	68,40	0,91	69,00	1,00	69,80
	0,67	51,50	0,70	56,50	0,72	60,00	0,74	63,80	0,76	64,20	0,81	65,30	0,83	67,80	0,85	68,20	0,92	68,50	0,93	69,10	1,10	69,90
	0,66	51,40	0,69	56,40	0,71	59,90	0,73	63,70	0,75	64,10	0,80	65,20	0,82	67,70	0,84	68,10	0,91	68,40	0,91	69,00	1,03	69,80
	0,01	0,10	0,01	0,10	0,02	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,02	0,10	0,02	0,10	0,06	0,10
15	0,63	51,30	0,69	57,50	0,71	59,90	0,73	63,50	0,74	64,10	0,77	65,30	0,81	67,70	0,84	68,30	0,93	69,10	0,96	69,70	0,99	69,80
	0,64	51,40	0,70	57,60	0,72	60,00	0,74	63,60	0,75	64,20	0,79	65,40	0,82	67,80	0,86	68,40	0,94	69,20	0,98	69,80	1,00	69,90
	0,66	51,50	0,71	57,70	0,73	60,10	0,75	63,70	0,77	64,30	0,80	65,50	0,83	67,90	0,87	68,50	0,96	69,30	0,99	69,90	1,03	70,00
	0,64	51,40	0,70	57,60	0,72	60,00	0,74	63,60	0,75	64,20	0,79	65,40	0,82	67,80	0,86	68,40	0,94	69,20	0,98	69,80	1,01	69,90
	0,02	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,02	0,10	0,02	0,10	0,01	0,10	0,02	0,10	0,02	0,10	0,02	0,10	0,02	0,10
30	0,62	51,10	0,70	57,40	0,71	59,70	0,72	63,40	0,73	64,30	0,79	65,20	0,83	67,60	0,86	68,20	0,93	68,40	0,98	69,60	1,01	69,90
	0,63	51,20	0,71	57,60	0,72	59,80	0,73	63,50	0,74	64,40	0,80	65,30	0,84	67,70	0,87	68,30	0,94	68,50	0,99	69,70	1,02	70,00
	0,64	51,30	0,72	57,80	0,73	59,90	0,74	63,60	0,75	64,50	0,81	65,40	0,85	67,80	0,89	68,40	0,95	68,60	1,00	69,80	1,04	70,10
	0,63	51,20	0,71	57,60	0,72	59,80	0,73	63,50	0,74	64,40	0,80	65,30	0,84	67,70	0,87	68,30	0,94	68,50	0,99	69,70	1,02	70,00
	0,01	0,10	0,01	0,20	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,02	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,02	0,10
45	0,64	51,20	0,70	57,70	0,70	59,90	0,71	63,90	0,75	64,10	0,80	65,10	0,82	67,30	0,84	68,10	0,93	68,30	0,96	69,70	1,03	69,70
	0,65	51,30	0,71	57,80	0,71	60,00	0,72	64,00	0,76	64,20	0,81	65,20	0,83	67,40	0,85	68,20	0,94	68,40	0,97	69,80	1,04	69,80
	0,67	51,50	0,72	57,90	0,72	60,10	0,73	64,10	0,78	64,30	0,82	65,30	0,84	67,50	0,86	68,30	0,95	68,60	0,98	69,90	1,05	69,70
	0,65	51,33	0,71	57,80	0,71	60,00	0,72	64,00	0,76	64,20	0,81	65,20	0,83	67,40	0,85	68,20	0,94	68,40	0,97	69,80	1,04	69,73
	0,02	0,15	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,02	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,06
60	0,62	51,20	0,69	57,50	0,68	59,80	0,72	63,50	0,74	64,40	0,78	65,10	0,82	67,30	0,84	68,00	0,90	68,20	0,97	69,00	0,99	69,90
	0,63	51,30	0,70	57,60	0,69	59,90	0,73	63,60	0,75	65,50	0,79	65,20	0,83	67,40	0,85	68,10	0,91	68,30	0,98	69,10	1,00	70,00
	0,64	51,40	0,71	57,80	0,70	60,00	0,75	63,70	0,76	65,60	0,80	65,30	0,84	67,50	0,86	68,20	0,93	68,40	0,99	69,20	1,02	70,20
	0,63	51,30	0,70	57,63	0,69	59,90	0,73	63,60	0,75	65,17	0,79	65,20	0,83	67,40	0,85	68,10	0,91	68,30	0,98	69,10	1,00	70,03
	0,01	0,10	0,01	0,15	0,01	0,10	0,02	0,10	0,01	0,67	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,02	0,10	0,01	0,10	0,02	0,15
75	0,62	51,30	0,70	57,70	0,70	59,80	0,74	63,60	0,74	64,30	0,76	65,30	0,80	67,70	0,83	68,40	0,91	69,10	0,95	69,60	0,99	69,80
	0,63	51,40	0,71	57,80	0,71	59,90	0,75	63,70	0,75	64,40	0,77	65,40	0,81	67,80	0,84	68,50	0,92	68,20	0,96	69,70	1,00	69,90
	0,64	51,50	0,72	57,90	0,72	60,00	0,76	63,80	0,76	64,50	0,78	65,50	0,82	67,90	0,85	68,60	0,93	69,30	0,97	69,80	1,01	70,00
	0,63	51,40	0,71	57,80	0,71	59,90	0,75	63,70	0,75	64,40	0,77	65,40	0,81	67,80	0,84	68,50	0,92	69,20	0,96	69,70	1,00	69,90
	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10
90	0,61	51,10	0,68	57,60	0,72	59,90	0,72	63,50	0,75	64,00	0,78	65,10	0,83	67,50	0,85	68,00	0,93	68,00	0,97	69,50	0,98	70,10
	0,62	51,20	0,69	57,70	0,73	60,00	0,73	63,60	0,76	64,10	0,79	65,20	0,84	67,60	0,86	68,10	0,94	68,10	0,98	69,60	1,00	70,20
	0,63	51,30	0,70	57,80	0,74	60,10	0,74	63,70	0,77	64,20	0,80	65,30	0,85	67,70	0,87	68,20	0,95	68,20	0,99	69,70	1,01	70,30
	0,62	51,20	0,69	57,70	0,73	60,00	0,73	63,60	0,76	64,10	0,79	65,20	0,84	67,60	0,86	68,10	0,94	68,10	0,98	69,60	1,00	70,20
	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,02	0,10
105	0,62	51,30	0,70	57,70	0,69	59,70	0,71	63,40	0,74	64,40	0,77	65,20	0,82	67,60	0,84	68,20	0,92	68,70	0,96	69,20	1,00	70,00
	0,63	51,40	0,71	57,80	0,70	59,80	0,72	63,50	0,75	64,50	0,78	65,30	0,83	67,70	0,85	68,30	0,93	68,80	0,97	69,30	1,01	70,10
	0,64	51,50	0,72	57,90	0,71	59,90	0,73	63,60	0,76	64,60	0,79	65,40	0,84	67,80	0,86	68,40	0,94	68,90	0,98	69,40	1,02	70,20
	0,63	51,40	0,71	57,80	0,70	59,80	0,72	63,50	0,75	64,50	0,78	65,30	0,83	67,70	0,85	68,30	0,93	68,80	0,97	69,30	1,01	70,10
	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10
120	0,62	51,10	0,69	57,70	0,68	59,60	0,73	63,50	0,75	64,10	0,79	65,10	0,82	67,50	0,85	68,10	0,91	69,10	0,94	69,50	0,99	70,10
	0,63	51,20	0,70	57,80	0,69	59,70	0,74	63,60	0,76	64,20	0,80	65,20	0,83	67,60	0,86	68,20	0,92	69,20	0,95	69,60	1,00	70,20
	0,64	51,30	0,71	57,90	0,70	59,80	0,75	63,70	0,77	64,30	0,81	65,30	0,84	67,70	0,87	68,30	0,93	69,30	0,96	69,70	1,10	70,30
	0,63	51,20	0,70	57,80	0,69	59,70	0,74	63,60	0,76	64,20	0,80	65,20	0,83	67,60	0,86	68,20	0,92	69,20	0,95	69,60	1,03	70,20
	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,06	0,10
135	0,64	51,30	0,69	57,40	0,67	59,70	0,70	63,50	0,73	64,30	0,76	65,30	0,84	67,40	0,82	68,00	0,90	68,30	0,97	69,40	1,01	69,90
	0,65	51,40	0,70	57,50	0,68	59,80	0,71	63,60	0,74	64,40	0,77	65,40	0,85	67,50	0,83	68,10	0,91	68,40	0,98	69,50	1,02	70,00
	0,66	51,50	0,71	57,60	0,69	59,90	0,72	63,70	0,75	64,50	0,78	65,50	0,86	67,60	0,84	68,20	0,92	68,50	0,99	69,60	1,03	70,01
	0,65	51,40	0,70	57,50	0,68	59,80	0,71	63,60	0,74	64,40	0,77	65,40	0,85	67,50	0,83	68,10	0,91	68,40	0,98	69,50	1,02	69,97
	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,06
150	0,64	51,20	0,69	57,50	0,68	59,50	0,71	63,60	0,75	64,20	0,76	65,40	0,83	67,60	0,86	68,10	0,91	68,40	0,98	69,10	0,99	69,90
	0,65	51,30	0,70	57,60	0,69	59,60	0,72	63,70	0,76	64,30	0,78	65,50	0,84	67,70	0,87	68,20	0,92	68,50	0,99	69,20	1,00	70,00
	0,67	51,40	0,72	57,70	0,70	59,70	0,73	63,80	0,77	64,40	0,79	65,60	0,85	67,80	0,88	68,30	0,93	68,60	1,00	69,40	1,01	70,02
	0,65	51,30	0,70	57,60	0,69	59,60	0,72	63,70	0,76	64,30	0,78	65,50	0,84	67,70	0,87	68,20	0,92	68,50	0,99	69,23	1,00	69,97
	0,02	0,10	0,02	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,02	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,15	0,01	0,06
165	0,62	51,20	0,69	57,60	0,67	59,40	0,70	63,50	0,74	64,30	0,77	65,10	0,82	67,70								

180	0,65	51,20	0,68	57,70	0,66	59,90	0,72	63,40	0,72	64,40	0,75	65,20	0,81	67,50	0,88	68,20	0,91	69,00	0,95	69,40	1,00	70,00
	0,66	51,30	0,69	57,80	0,67	60,00	0,73	63,50	0,73	64,50	0,76	65,30	0,82	67,60	0,89	68,30	0,92	69,10	0,96	69,50	1,01	70,02
	0,69	51,40	0,70	57,90	0,68	60,10	0,74	63,60	0,74	64,60	0,77	65,40	0,83	67,70	0,90	68,40	0,93	69,20	0,97	69,60	1,02	70,03
	0,67	51,30	0,69	57,80	0,67	60,00	0,73	63,50	0,73	64,50	0,76	65,30	0,82	67,60	0,89	68,30	0,92	69,10	0,96	69,50	1,01	70,02
	0,02	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,02
195	0,63	51,10	0,69	56,50	0,68	60,00	0,69	63,50	0,74	64,30	0,79	65,40	0,83	67,30	0,85	68,30	0,93	68,60	0,97	69,70	0,99	69,80
	0,64	51,20	0,71	56,60	0,69	60,10	0,71	63,60	0,75	64,40	0,80	65,50	0,84	67,40	0,86	68,40	0,94	68,70	0,98	69,80	1,00	69,90
	0,65	51,30	0,72	56,70	0,70	60,20	0,72	63,70	0,76	64,50	0,81	65,60	0,85	67,50	0,87	68,50	0,95	68,80	0,99	69,90	1,01	70,00
	0,64	51,20	0,71	56,60	0,69	60,10	0,71	63,60	0,75	64,40	0,80	65,50	0,84	67,40	0,86	68,40	0,94	68,70	0,98	69,80	1,00	69,90
	0,01	0,10	0,02	0,10	0,01	0,10	0,02	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10
210	0,61	51,30	0,70	56,60	0,66	59,90	0,68	63,60	0,75	64,10	0,78	65,50	0,82	67,70	0,84	68,00	0,93	69,20	0,94	69,50	1,02	69,90
	0,63	51,40	0,71	56,70	0,67	60,00	0,70	63,70	0,76	64,20	0,79	65,60	0,83	67,80	0,85	68,10	0,94	69,30	0,95	69,60	1,03	70,00
	0,64	51,50	0,72	56,80	0,68	60,10	0,71	63,80	0,77	64,30	0,80	65,70	0,84	67,90	0,86	68,20	0,95	69,40	0,96	69,70	1,04	70,01
	0,63	51,40	0,71	56,70	0,67	60,00	0,70	63,70	0,76	64,20	0,79	65,60	0,83	67,80	0,85	68,10	0,94	69,30	0,95	69,60	1,03	69,97
	0,02	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,02	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,06
225	0,62	51,00	0,68	56,70	0,67	59,70	0,71	63,80	0,77	64,20	0,75	65,10	0,80	67,50	0,85	68,30	0,91	68,90	0,97	69,30	1,01	70,00
	0,63	51,10	0,69	56,80	0,68	59,80	0,72	63,90	0,78	64,30	0,76	65,20	0,81	67,60	0,86	68,40	0,92	69,00	0,98	69,40	1,02	70,01
	0,64	51,30	0,70	56,90	0,69	59,90	0,73	64,00	0,79	64,40	0,77	65,30	0,82	67,70	0,87	68,50	0,93	69,10	0,99	69,50	1,03	70,02
	0,63	51,13	0,69	56,80	0,68	59,80	0,72	63,90	0,78	64,30	0,76	65,20	0,81	67,60	0,86	68,40	0,92	69,00	0,98	69,40	1,02	70,01
	0,01	0,15	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,01
240	0,63	51,20	0,68	56,70	0,69	59,60	0,67	63,70	0,75	64,30	0,76	65,20	0,80	67,50	0,87	68,00	0,90	69,20	0,96	69,20	0,97	69,90
	0,65	51,30	0,69	56,80	0,71	59,70	0,68	63,80	0,76	64,40	0,77	65,30	0,81	67,60	0,88	68,10	0,91	69,30	0,97	69,30	0,99	70,00
	0,66	51,40	0,70	56,90	0,72	59,90	0,70	63,90	0,77	64,50	0,78	65,40	0,82	67,70	0,89	68,20	0,92	69,40	0,98	69,40	1,00	70,10
	0,65	51,30	0,69	56,80	0,71	59,73	0,68	63,80	0,76	64,40	0,77	65,30	0,81	67,60	0,88	68,10	0,91	69,30	0,97	69,30	0,99	70,00
	0,02	0,10	0,01	0,10	0,02	0,15	0,02	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,02	0,10
255	0,65	51,00	0,69	56,50	0,70	59,90	0,69	63,60	0,74	64,20	0,74	65,50	0,84	67,70	0,86	68,20	0,93	69,10	0,94	69,60	0,99	70,01
	0,66	51,10	0,70	56,60	0,71	60,00	0,71	63,70	0,76	64,30	0,75	65,60	0,85	67,80	0,87	68,30	0,94	69,20	0,95	69,70	1,00	70,02
	0,67	51,20	0,71	56,70	0,72	60,10	0,72	63,80	0,77	64,40	0,76	65,60	0,86	67,90	0,88	68,40	0,95	69,30	0,96	69,80	1,01	70,03
	0,66	51,10	0,70	56,60	0,71	60,00	0,71	63,70	0,76	64,30	0,75	65,57	0,85	67,80	0,87	68,30	0,94	69,20	0,95	69,70	1,00	70,02
	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,02	0,10	0,02	0,10	0,01	0,06	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,01
270	0,65	51,20	0,70	56,40	0,71	59,90	0,70	63,40	0,75	64,10	0,77	65,30	0,82	67,50	0,85	67,90	0,94	69,40	0,98	69,70	1,01	70,00
	0,66	51,30	0,71	56,50	0,72	60,00	0,71	63,50	0,76	64,20	0,78	65,40	0,83	67,70	0,86	68,00	0,95	69,50	0,99	69,80	1,02	70,01
	0,67	51,40	0,72	56,60	0,73	60,10	0,72	63,60	0,77	64,30	0,79	65,50	0,84	67,80	0,87	68,10	0,96	69,60	1,00	69,90	1,03	70,02
	0,66	51,30	0,71	56,50	0,72	60,00	0,71	63,50	0,76	64,20	0,78	65,40	0,83	67,70	0,86	68,00	0,95	69,50	0,99	69,80	1,02	70,01
	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,15	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,01
285	0,66	51,20	0,66	57,70	0,66	59,70	0,69	63,50	0,76	64,40	0,79	65,20	0,80	67,60	0,84	68,10	0,93	68,90	0,94	69,50	1,02	69,80
	0,67	51,30	0,67	57,80	0,67	59,80	0,70	63,60	0,77	64,50	0,80	65,30	0,81	67,70	0,85	68,20	0,94	69,00	0,95	69,60	1,03	69,90
	0,68	51,40	0,70	57,90	0,68	59,90	0,71	63,70	0,78	64,60	0,81	65,40	0,82	67,80	0,86	68,30	0,95	69,10	0,96	69,70	1,04	70,00
	0,67	51,30	0,68	57,80	0,67	59,80	0,70	63,60	0,77	64,50	0,80	65,30	0,81	67,70	0,85	68,20	0,94	69,00	0,95	69,60	1,03	69,90
	0,01	0,10	0,02	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10
300	0,61	51,30	0,68	57,50	0,68	59,60	0,71	63,70	0,74	64,30	0,78	65,10	0,83	67,80	0,86	68,00	0,92	69,20	0,96	69,60	1,02	70,00
	0,62	51,40	0,69	57,60	0,69	59,70	0,72	63,80	0,75	64,40	0,79	65,20	0,84	67,90	0,87	68,10	0,93	69,30	0,97	69,70	1,03	70,10
	0,63	51,50	0,71	57,70	0,70	59,80	0,73	63,90	0,76	64,50	0,80	65,30	0,85	70,00	0,88	68,20	0,94	69,40	0,98	69,80	1,05	70,20
	0,62	51,40	0,69	57,60	0,69	59,70	0,72	63,80	0,75	64,40	0,79	65,20	0,84	68,57	0,87	68,10	0,93	69,30	0,97	69,70	1,03	70,10
	0,01	0,10	0,02	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	1,24	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,02	0,10
315	0,61	51,20	0,69	57,40	0,67	59,80	0,68	63,70	0,74	64,10	0,79	65,00	0,81	67,40	0,84	68,10	0,90	68,60	0,97	69,10	0,98	69,90
	0,63	51,30	0,70	57,50	0,68	59,90	0,69	63,80	0,75	64,20	0,80	65,10	0,82	67,50	0,85	68,20	0,91	68,70	0,98	69,20	0,99	70,00
	0,64	51,40	0,71	57,60	0,69	60,00	0,70	63,90	0,76	64,30	0,81	65,20	0,83	67,60	0,86	68,30	0,92	68,80	0,99	69,30	1,01	70,01
	0,63	51,30	0,70	57,50	0,68	59,90	0,69	63,80	0,75	64,20	0,80	65,10	0,82	67,50	0,85	68,20	0,91	68,70	0,98	69,20	0,99	69,97
	0,02	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,02	0,06
330	0,62	51,30	0,67	57,60	0,66	59,70	0,71	63,50	0,76	64,40	0,76	65,30	0,82	67,60	0,88	68,00	0,92	69,00	0,91	69,40	0,99	69,70
	0,63	51,40	0,68	57,70	0,67	59,80	0,72	63,60	0,77	64,50	0,77	65,40	0,83	67,70	0,89	68,10	0,93	69,10	0,92	69,50	1,00	69,90
	0,64	51,50	0,70	57,80	0,68	59,90	0,73	63,70	0,78	64,60	0,78	65,50	0,84	67,80	0,90	68,20	0,94	69,20	0,92	69,60	1,01	70,00
	0,63	51,40	0,68	57,70	0,67	59,80	0,72	63,60	0,77	64,50	0,77	65,40	0,83	67,70	0,89	68,10	0,93	69,10	0,92	69,50	1,00	69,87
	0,01	0,10	0,02	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,10	0,01	0,15
345	0,61	51,20	0,69	57,50	0,68	59,90	0,69	63,70	0,74	64,00	0,74	65,20	0,81	67,70	0,87	67,90	0,94	68,90	0,95	69,50	1,00	69,90
	0,62	51,30	0,70	57,60	0,69	60,00	0,70	63,80	0,75	64,10	0,75	65,30	0,82	67,80	0,88	68,00	0,95	69,00	0,96	69,60	1,01	70,00
	0,63	51,40	0,71	57,70	0,70	60,10	0,72	63,90	0,76	64,20												