



UNIVERSIDADE DE UBERABA  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E EXTENSÃO  
MESTRADO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA  
MESTRADO PROFISSIONAL

REGINALDO JOSÉ CAVALLARO

TORRA DE FOLHAS DE CAFÉ PARA ELABORAÇÃO DE BEBIDAS

UBERABA, MG

2019





REGINALDO JOSÉ CAVALLARO

TORRA DE FOLHAS DE CAFÉ PARA ELABORAÇÃO DE BEBIDAS

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - Mestrado Profissional da Universidade de Uberaba (PPGEQ-MP/UNIUBE).

Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos Agroindustriais.

Orientadora Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Elizabeth Uber Bucek

Coorientador Prof. Dr. José Roberto Delalibera Finzer

UBERABA, MG

2019

Catálogo elaborado pelo Setor de Referência da Biblioteca Central UNIUBE

C314t Cavallaro, Reginaldo José.  
Torras de folhas de café para elaboração de bebidas / Reginaldo José Cavallaro. – Uberaba, 2019.  
65 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade de Uberaba. Programa de Mestrado em Engenharia Química, concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos Agroindustriais.  
Orientadora: Profa. Dra. Elizabeth Uber Bucek.  
Coorientador: Prof. Dr. José Roberto Delalibera Finzer.

1. Café. 2. Bebidas não alcoólicas. 3. Folhas – Secagem. I. Bucek, Elizabeth Uber. II. Finzer, José Roberto Delalibera. III. Universidade de Uberaba. Programa de Mestrado em Engenharia Química. IV. Título.

CDD 633.73



REGINALDO JOSÉ CAVALLARO

TORRA DE FOLHAS DE CAFÉ PARA ELABORAÇÃO DE BEBIDAS

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - Mestrado Profissional da Universidade de Uberaba (PPGEQ-MP/UNIUBE).

Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos Agroindustriais.

Aprovada em: 07 / 03 / 2019

BANCA EXAMINADORA

---

Profª Drª Elizabeth Uber Bucek – Orientadora  
Universidade de Uberaba – UNIUBE

---

Prof. Dr. Ricardo José de Mendonça  
Universidade do triângulo Mineiro – UFTM

---

Prof. Dr. Mauro Luiz Begnini  
Universidade de Uberaba – UNIUBE



## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus pais Aristides Cavallaro e Nair Zilli Cavallaro, que me ensinaram desde cedo a valorizar o trabalho e o estudo.

Dedico este trabalho a todas as pessoas que acreditam em que a melhor forma de se rebelar contra o sistema é estudando, que o saber transforma.





## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Aristides Cavallaro e Nair Zilli Cavallaro, que desde cedo me ensinaram a importância do estudo e do trabalho, e me lembro das vezes que eles se sentavam à mesa comigo, para me ajudar nas tarefas da escola.

A minha querida Dr<sup>a</sup> Sandra Afonso de Castro, pelo companheirismo e revisão do texto.

Aos professores, desde os anos iniciais até os atuais, que contribuíram para minha formação acadêmica e como pessoa, ampliando os meus saberes e competências.

Aos meus orientadores Prof<sup>ra</sup> Elizabeth Uber Bucek e Prof. José Roberto Delalibera Finzer pelo tempo e dedicação neste trabalho.

Ao Instituto Federal Sudeste de Minas – Santos Dumont, pelo apoio.

À Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais – FAPEMIG, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES e à Universidade de Uberaba – UNIUBE, pelo suporte ao desenvolvimento dessa dissertação.



“Ele revela as coisas mais profundas e os mistérios mais secretos. Tem conhecimento do que esconde a obscuridade e é a origem da luz que irradia a luminosidade.”

Daniel 2:22



## RESUMO

Buscando uma alimentação saudável e natural, brasileiros têm mudado seus hábitos de consumo de bebidas, gerando crescimento das vendas de chá. A falta de critério e estudos da operação produtiva de bebidas à base de folha do cafeeiro justifica este estudo para obtenção do produto padronizado. O cuidado dado ao cultivo sustentável do cafeeiro reflete-se no grão, nas folhas e, conseqüentemente, nos produtos gerados a partir destas matérias primas. No processamento das folhas vegetais, para elaboração de bebidas, faz-se necessária a inativação enzimática. através de torrador rotativo, seguida do processo de secagem pelo fornecimento de calor e conseqüente eliminação da umidade das folhas, em forma de vapor, ação necessária para eliminar o gosto característico de folhas verdes quando destinadas a bebidas. A curva de equilíbrio obtida na secagem das folhas, em diferentes temperaturas, demonstra estabilização do processo e caracteriza o teor de umidade crítico ou de acordo com níveis aceitáveis. O trabalho teve por objetivo fazer o estudo da torra das folhas de café visando à obtenção de uma bebida na categoria de chá. Para isto planejou-se o estudo de processamento das folhas, a inativação enzimática (torra), e o desenvolvimento do produto. As folhas de cafeeiro foram coletadas aleatoriamente em ramos, em fazenda produtora, no município de Araxá-MG, na área contendo cerca de 500 pés de café. O estudo de inativação enzimática foi realizado em torrador rotativo, em diferentes temperaturas (60-100 °C), e em diferentes tempos (30-180s). A curva de equilíbrio de secagem foi realizada em 30 folhas, em diferentes temperaturas (40-105 °C), em estufa de circulação de ar forçado. Os resultados obtidos foram a determinação do coeficiente convectivo de transferência de calor e a determinação da umidade ideal para o aproveitamento das folhas de café torradas para uso em bebidas. É necessária a inativação enzimática para eliminar o gosto característico de folhas verdes quando destinadas a bebidas. Folhas torradas a 60 °C, até o tempo de 120s ainda apresentaram sinais da enzima Peroxidase e folhas torradas acima de 80 °C com tempos acima de 30s não apresentaram sinais da enzima. A análise da torra na determinação da difusividade efetiva, de acordo com a Lei de Fick, foi de  $2,0979 \times 10^{-11} m^2/s$ . As folhas torradas em temperaturas 90 °C, nos tempos acima de 120s e a 100 °C acima de 105s apresentaram odor aceitável característico de torra.

**Palavras-chave:** Torra de folhas; Secagem de folhas; Difusividade efetiva; Taxa de secagem; Coeficiente convectivo; Folha de café.



## ABSTRACT

In search of a healthy and natural diet, Brazilians have changed their drinking habits, generating growth in tea sales. The lack of criteria and studies of the productive operation of coffee leaf-based beverages justifies this study to obtain the standardized product. The care given to sustainable coffee growing is reflected in the grain, the leaves and, consequently, the products generated from these raw materials. In the processing of vegetable leaves, for the elaboration of beverages, it is necessary the enzymatic inactivation. through a rotary roaster, followed by the drying process by the supply of heat and consequent elimination of the humidity of the leaves, in the form of steam, necessary action to eliminate the characteristic taste of green leaves when destined to beverages. The balance curve obtained in the drying of the leaves, at different temperatures, demonstrates stabilization of the process and characterizes the critical moisture content or according to acceptable levels. The objective of the work was to study the roasting of the coffee leaves in order to obtain a drink in the tea category. For this purpose the study of leaf processing, enzymatic inactivation (roasting), and product development was planned. The coffee leaves were randomly collected from branches in a producing farm in the municipality of Araxá-MG in the area containing about 500 coffee trees. The enzymatic inactivation study was performed in a rotary roaster, at different temperatures (60-100 °C), and at different times (30-180s). The drying equilibrium curve was performed on 30 leaves, at different temperatures (40-105 °C), in a forced air circulation oven. The results obtained were the determination of the convective coefficient of heat transfer and the determination of the ideal humidity for the use of roasted coffee leaves for use in beverages. Enzymatic inactivation is necessary to eliminate the characteristic taste of green leaves when intended for beverages. Roasted leaves at 60 °C up to 120s still showed signs of the enzyme Peroxidase and roasted leaves above 80 °C with times above 30s showed no signs of the enzyme. The analysis of roasting in the determination of effective diffusivity according to Fick's Law was  $2.0979 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ . Roasted leaves at temperatures of 90 °C, at times above 120s and at 100 °C above 105s showed an acceptable odor characteristic of roasting.

**Keywords:** Leaf roasting; Leaf drying; Effective diffusivity; Drying rate; Convective coefficient; Coffee leaf.





## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 – Curva de secagem típica de um material. ....	11
Figura 2-2 – Curva de taxa de secagem em condições constantes. ....	12
Figura 2-3 – Esquema de funcionamento de um secador de bandejas. ....	19
Figura 2-4 – Secador de Bandejas Industrial. ....	20
Figura 2-5 – Secador de Túnel. ....	20
Figura 2-6 – Secador de Esteira. ....	21
Figura 2-7 – Secador de leito fluidizado. ....	22
Figura 2-8 – Esquema de Secador rotativo. ....	22
Figura 2-9 – Fluxo de massa para produção de folhas de café. ....	23
Figura 2-10 – Principais ácidos clorogênicos da folha de café. ....	27
Figura 2-11 – Divisão das Regiões no estado de Minas Gerais. ....	27
Figura 2-12 – Região do Triângulo Mineiro, Alto Paranaíba e Noroeste. ....	28
Figura 3-1 – Ramo de café com folhas e frutos usados no experimento. ....	29
Figura 3-2 – Cafeeiro adulto. ....	30
Figura 3-3 – Identificação do terceiro Par e Folha com Pecíolo. ....	30
Figura 3-4 – Torrador CARMOMAQ instalado no laboratório. ....	32
Figura 3-5 – Estufa de secagem MARCONI. ....	33
Figura 3-6 – Tacômetro Digital. ....	35
Figura 3-7 – Preparo do macerado vegetal em meio aquoso. ....	36
Figura 3-8 – Macerado aquoso, a) sem reagente, b) com reagente coloração castanho claro, c) marrom escuro e d) castanho escuro. ....	37
Figura 3-9 - Reação do Guaicol com a $H_2O_2$ catalisada pela enzima peroxidase. ....	37
Figura 3-10 – Etapas do estudo da torra de folhas de café. ....	38
Figura 3-11 – Ciclo de operação do torrador rotativo. ....	39
Figura 3-12 Pontos de comando do torrador. ....	40
Figura 4-1 – Grupo de folhas para ajustes do torrador – Antes da Torra. ....	41
Figura 4-2 – Grupo de folhas usadas no ajuste do torrador – Após torra. ....	42
Figura 4-3 – Sequência de secagem da folha 9: a) folha conforme colhida in natura 24 °C; b) em secagem a 40 °C; c) em secagem a 60 °C; d) em secagem a 80 °C, e e) em secagem a 105 °C. ....	43
Figura 4-4 – Dados de equilíbrio de secagem das folhas de café. ....	44
Figura 4-5 – Curva de inativação enzimática (torra) – Inserção individual das folhas a 60 °C. ....	46
Figura 4-6 – Folhas in natura, antes dos 30s de torra, com inserção individual a 60 °C. ....	46
Figura 4-7 – Folhas. Após os 30s de torra, com inserção individual a 60 °C. ....	47



Figura 4-8 – Folhas in natura, antes dos 180s de torra, com inserção individual a 60 °C.....	47
Figura 4-9 – Folha, após os 180s de torra, com inserção individual a 60 °C.....	48
Figura 4-10 – Curva de torra – Folhas Inseridas em Grupos a 60 °C. ....	49
Figura 4-11 – Folhas, antes dos 30s de torra, inseridas em Grupos a 60 °C. ....	50
Figura 4-12 – Folhas. Após 30s de torra, inseridas em Grupos a 60 °C. ....	50
Figura 4-13 – Folhas in natura, antes dos 180s de torra, inseridas em Grupos a 60 °C.....	51
Figura 4-14 – Folhas, após 180s de torra, inseridas em Grupo a 60 °C.....	51
Figura 4-15 – Comparação da perda de umidade entre os dois métodos: inserção das folhas individualmente e em grupos, na cavidade do torrador.....	52
Figura 4-16 – Filtrado de coloração escura com formação de bolhas e halo. ....	54
Figura 4-17 – Filtrado de coloração clara e reação para castanho avermelhado.....	55
Figura 4-18 – Filtrado de coloração clara e reação para castanho avermelhado com halo. ....	55
Figura 4-19 – Folha torrada a 60 °C, tempo 60s. ....	56
Figura 4-20 – Folha torrada a 60 °C, tempo 180s. ....	56
Figura 4-21 – Folha torrada a 80 °C, tempo 180s. ....	57



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 – Diferença entre secagem e evaporação. ....	5
Tabela 2-2 – Composição do Ar Limpo e Seco. ....	6
Tabela 2-3 – Secadores segundo o meio de transporte. ....	17
Tabela 2-4 – Tipos de secadores e suas aplicações no processamento de alimentos. ....	17
Tabela 2-5 – Arranjo dos fluxos do ar de secagem. ....	19
Tabela 2-6 – Comparação entre as formas convencional e orgânica de produção agrícola. ....	24
Tabela 2-7 – Compostos fenólicos da folha de café, secas a 30 °C, 40 °C e 50 °C. ....	26
Tabela 3-1 – Pontos de comando do torrador e suas funções.....	40
Tabela 4-1 – Massas úmida e seca das folhas, obtidas no ajuste de parâmetros do torrador. ....	42
Tabela 4-2 – Massa de matéria seca da folha de café. ....	44
Tabela 4-3 – Dados obtidos durante a torra – Folhas Inseridas Individualmente. ....	45
Tabela 4-4 – Dados obtidos durante a torra – Folhas Inseridas em Grupo. ....	49
Tabela 4-5 – Comparação da umidade perdida entre os dois métodos de inserção. ....	52
Tabela 4-6 – Característica das Folhas Inseridas Individualmente, após a torra.....	53
Tabela 4-7 – Característica das Folhas Inseridas em Grupos, após a torra. ....	54



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	área [ $m^2$ ];
ABIC	Associação Brasileira da Indústria do Café;
ALM	Assembleia Legislativa de Minas Gerais;
APEX	Agência Brasileira de Promoção de Exportações e Investimentos;
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento;
IAC	Instituto Agrônomo de Campinas;
C	calor específico do ar úmido [ $kJ \times kg^{-1}$ de ar seco];
$\mathcal{D}_{AB}$	coeficiente de difusão efetivo da água no sólido [ $m^2/s$ ];
$dX/d\theta$	taxa de torra [ $kg$ de $H_2O$ $kg/s$ de matéria seca];
$\theta$	período de taxa constante
$Fo_m$	Número de Fourier para transferência de massa [ $D_v t/s^2$ ];
h	horas [ $h$ ];
$h_c$	coeficiente convectivo de transferência de calor;
$L_0$	metade da espessura inicial da amostra [ $m$ ];
L	metade da espessura da amostra [ $m$ ];
M	massa molar [ $kg \times mol^{-1}$ ];
$M_{Mar}$	massa molar do ar seco [ $kg \times mol^{-1}$ ];
$\bar{M}_{Mar}$	massa molar média do ar seco [ $kg \times mol^{-1}$ ];
$M_{Mv}$	massa molar da água [ $kg \times mol^{-1}$ ];
m	coeficiente angular da reta;
$\bar{m}$	média das massas úmida e seca [ $g$ ];
$m_{ar}$	massa do ar seco [ $kg$ ];
$m_a$	massa de água na folha [ $kg$ ];
$m_{FF}$	massa de água na folha fresca [ $kg$ ];
$m_{FT}$	massa de água na folha torrada [ $kg$ ];
$m_{105}$	massa de água da folha seca a 105 °C [ $kg$ ];
$m_v$	massa de vapor de água [ $kg$ ];
$n_{ar}$	quantidade de ar seco [ $mol$ ];
$n_v$	quantidade de água [ $mol$ ];
P	pressão total [ $kPa$ ];





$p_a$	pressão parcial da água [ $kPa$ ];
$p_i$	pressão parcial [ $kPa$ ];
$p_v$	pressão parcial do vapor de água [ $kPa$ ];
$q$	taxa de calor;
$R$	constante universal dos gases [ $kJ/kmol \times K$ ] ou [ $kPa \times m^3/kmol \times K$ ];
$s$	metade da espessura da amostra [ $m$ ];
$S_s$	é a massa de vegetal seco [ $kg$ ];
$t$	tempo de secagem [ $s$ ];
$T$	temperatura absoluta [ $K$ ];
$T_G$	temperatura de Bulbo seco [ $K$ ];
$T_W$	temperatura de bulbo úmido;
UR	umidade relativa [%];
$\phi$	umidade relativa [%];
$v$	volume específico [ $m \times kg^{-1}$ ];
$y_{ar}$	fração molar de ar seco [ $mol \times mol^{-1} total$ ];
$y_v$	fração molar de água [ $mol \times mol^{-1} total$ ];
$Y_v$	umidade absoluta [ $kg \text{ água} \times kg^{-1} \text{ de ar seco}$ ];
$X$	teor de umidade da amostra [ $kg \text{ de } H_2O \text{ } kg^{-1} \text{ de matéria seca}$ ];
$X_0$	teor de umidade inicial [ $kg \text{ de } H_2O \text{ } kg^{-1} \text{ de matéria seca}$ ];
$X_W$	teor de umidade [ $kg \text{ de } H_2O \text{ } kg^{-1} \text{ de matéria úmida}$ ];
$X'_E$	teor de umidade de equilíbrio [ $kg \text{ de } H_2O \text{ } kg^{-1} \text{ de matéria seca}$ ];
$Z$	direção na qual ocorre a transferência de massa [ $m$ ];
$\lambda$	calor latente [ $kg \times kg^{-1} \text{ de água}$ ];



## SUMÁRIO

<b>1.0</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2.0</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>3</b>
2.1	SECAGEM .....	3
2.2	PSICROMETRIA .....	5
2.3	EQUAÇÃO DE ESTADO DO GÁS IDEAL .....	10
2.4	COMPORTAMENTO GERAL DA SECAGEM DE VEGETAIS .....	10
2.5	ANÁLISE MATEMÁTICA DA DIFUSIVIDADE .....	14
2.6	TIPOS DE SECADORES .....	16
2.7	PROCESSAMENTO DAS FOLHAS DE CAFÉ .....	23
2.8	Importância do Cultivo Sustentável de Café para Bebidas .....	23
2.9	COMPOSTOS FENÓLICOS DA FOLHA DO CAFÉ .....	26
2.10	PRODUÇÃO DE CAFÉ NA REGIÃO DO TRIÂNGULO MINEIRO E DO ALTO PARANAÍBA .....	27
<b>3.0</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>29</b>
3.1	COLETA DAS FOLHAS DO CAFEEIRO .....	29
3.2	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS .....	31
3.2.1	Torrador rotativo .....	31
3.2.2	Balança de Precisão .....	32
3.2.3	Estufa de secagem com circulação de ar .....	32
3.3	DETERMINAÇÃO DA CURVA DE EQUILÍBRIO DA SECAGEM E DA MASSA DE ÁGUA PERDIDA .....	33
3.4	DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE IDEAL DE FOLHAS, NA CÂMARA DO TORRADOR .....	34
3.5	DADOS DA CÂMARA DE TORRA .....	34
3.6	IDENTIFICAÇÃO E PESAGEM DAS FOLHAS ANTES E APÓS A TORRA .....	35
3.7	ANÁLISE COLORIMÉTRICA COM GUAIACOL .....	35
3.8	PROCEDIMENTO/PROCESSAMENTO DA TORRA .....	37
3.9	PROCEDIMENTO PARA FUNCIONAMENTO DO TORRADOR .....	38
<b>4.0</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>41</b>
4.1	TORRA DAS FOLHAS – AJUSTE DE PARÂMETROS DO TORRADOR .....	41
4.2	CURVA DE EQUILÍBRIO DA SECAGEM .....	43
4.3	EQUALIZAÇÃO DOS MÉTODOS DE INATIVAÇÃO ENZIMÁTICA .....	52
4.4	CARACTERÍSTICAS DAS FOLHAS APÓS A TORRA .....	53
4.5	ANALISE DE INATIVAÇÃO ENZIMÁTICA: TESTE GUAIACOL .....	54
<b>5.0</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>58</b>
<b>6.0</b>	<b>SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>60</b>
<b>7.0</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>61</b>



## 1.0 INTRODUÇÃO

É notória a busca incessante por modelos sustentáveis, custos menores dos produtos, aproveitamento de materiais, entre outras medidas, para melhoria dos processos e mesmo da qualidade dos produtos e serviços. Valduga (2002) chama a atenção para o avanço da Agricultura Natural, que começa a tomar corpo, no Brasil, e faz menção a que o sistema agrícola deva ser economicamente viável e socialmente justo, ainda à inserção de bebidas funcionais e medicinais, na dieta humana, e à inovação no processamento das matérias primas que se torna um desafio, conforme Valduga e colaboradores (2019).

As filosofias de vida que pessoas têm adotado, voltadas ao consumo sustentável e às boas práticas, têm impulsionado a indústria a buscar novas possibilidades de produção, com produtos que atendam a essa demanda. A produção de café, no Brasil, segundo a Associação Brasileira da Indústria do Café – ABIC (2018), no ano de 2015, foi de 49.640 milhões de sacas e respondeu por 33% das exportações mundiais.

Segundo Hewitt (1872), uma infusão das folhas de café torradas é usada para fazer um chá com um cheiro e sabor deliciosos (NOVITA; KASIM; ANGGRAINI; PUTRA, 2018). Por exemplo, em países como Indonésia, Jamaica, Índia, Java, Sumatra, Etiópia e Sudão do Sul, as folhas de café secas ao sol têm sido usadas como um substituto do chá (CAMPA e PETIVALLET, 2017).

Com a crescente busca por uma alimentação saudável e natural, brasileiros têm mudado seus hábitos de consumo de bebidas. Segundo a Agência Brasileira de Promoção de Exportações e Investimentos – APEX (2017), as vendas de chá, no Brasil, estão acontecendo de forma crescente: entre os anos de 2010 e 2012, houve um crescimento de 30% desse mercado, e o consumo mundial, em 2016, foi da ordem de 331 bilhões de litros. Já existem, no Brasil, alguns produtores que utilizam a folha do cafeeiro para bebidas, no entanto não se tem informações de critério, ou estudo, do processo produtivo e em que condições estão sendo secas essas folhas, para atingir a padronização do produto. Estudos são necessários com relação à produção de folhas secas e o uso de tecnologias para o seu processamento.

No processamento de folhas vegetais para elaboração de bebidas, como a erva mate, utiliza-se o sapeco (VALDUGA *et al.*, 2002), usando um secador rotativo (tambor rotativo),

promovendo inativação enzimática no sapeco, seguido da etapa de secagem, pelo calor e consequente eliminação da umidade das folhas.

Esta dissertação está organizada conforme os capítulos a seguir: no Capítulo 2, é apresentada a fundamentação teórica sobre o comportamento geral da secagem, alguns tipos de secadores e importância do café orgânico; no Capítulo 3, é apresentada a metodologia, os equipamentos utilizados no experimento, a curva de equilíbrio da secagem e a etapa de torra das folhas; no Capítulo 4, é apresentada a análise matemática da secagem; no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões e, no Capítulo 6, as sugestões para trabalhos futuros.

O presente trabalho tem por objetivo fazer um estudo da torra das folhas de café, para uso em bebidas, e constitui-se do estudo de processamento das folhas após colheita dos ramos, sendo incluída a inativação enzimática através da torra, e da secagem das folhas em secador de bandejas.

## 2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, serão apresentados os conceitos básicos para realização deste trabalho, a contextualização quanto ao emprego das etapas de secagem de sólidos, passando pela teoria básica da transferência de calor e massa, e os equipamentos utilizados na secagem de sólidos e de folhas e vegetais.

### 2.1 SECAGEM

Secagem é a operação unitária que possibilita transformar um material úmido sólido, semissólido ou líquido, em um produto sólido de umidade consideravelmente baixa. Implica a transferência da água do material para uma fase gasosa não saturada, conforme Telis e Mauro. (2016), e é dividida em dois modos: secagem condutiva e secagem convectiva. Na secagem condutiva, há um contato do sólido com uma superfície aquecida e, na secagem convectiva, esse contato acontece por um fluido aquecido em movimento. A secagem trata da remoção de líquidos voláteis de um sólido transformando-os em vapor (TREYBAL *et al.*, 1981) e, segundo Foust e colaboradores (1982), termo secagem aplica-se à transferência de um líquido que está num sólido molhado para uma fase gasosa não saturada.

A secagem convectiva é a mais utilizada no ambiente industrial (LIMA, 2013). Durante a secagem convectiva, uma corrente de gás aquecido escoia sobre o material fornecendo calor e aquecendo a sua superfície. A umidade que está presente na superfície e no interior do sólido, é então evaporada, e o vapor d'água formado é removido pelo gás, que se torna mais úmido à medida em que está escoando em contato com a superfície do sólido (MUJUMDAR, 2006). Na maioria dos casos da secagem convectiva, a remoção da umidade acontece por evaporação e implica no uso de energia térmica, a qual promove a mudança de fase da água líquida para o estado de vapor, podendo ocorrer a pressão atmosférica, ou a pressão reduzida, como em secadores a vácuo (CELESTINO, 2010).

É necessário conhecer as propriedades básicas termodinâmicas do ar e as suas alterações, ao longo da secagem, itens fundamentais para entender, descrever e interpretar a operação de secagem. O modo como a água está disponibilizada, no sólido, limita a quantidade de umidade que pode ser removida desse material. Desta forma, a compreensão do equilíbrio umidade – sólido é necessária para a determinação das condições favoráveis da secagem (KEEY, 1972).

A menor quantidade de umidade que um produto pode conter, em determinadas condições de secagem a que está submetido, é denominada umidade de equilíbrio (LUZ *et al.*, 2010). Corresponde à situação quando a pressão de vapor de água, sobre o sólido, é igual à pressão parcial do vapor de água do gás de secagem. Já a umidade total é aquela que o material possui no instante em que é colocado no secador. A diferença entre elas é conhecida como umidade livre (BABU *et al.*, 2018).

Os materiais vegetais, após a coleta, podem seguir três caminhos: uso direto do material fresco, extração de substâncias ativas do material fresco ou secagem do material para armazenamento e posterior utilização. Conforme Batalha e Ming (2004), os vegetais medicinais comercializados na forma fresca, é vinculado à proximidade dos centros urbanos. Em geral, os materiais apresentam conteúdo maior de umidade, em alguns casos aproximando de 80%. As plantas se deterioram, após curto período de tempo da colheita, o que obriga seu consumo ou processamento rápido, a fim de evitar a decomposição dos componentes de interesse ou mesmo perdas na produção. Para as plantas que são comercializadas, na forma seca, que são a maioria das disponíveis no mercado, é desnecessário que o produtor esteja situado próximo aos centros urbanos ou indústrias processadoras. A secagem possibilita a preservação desses materiais, minimizando as perdas no teor e na composição dos princípios ativos, tornando possível seu uso posterior sem prejuízos, dentro dos prazos normais de conservação (KAYA; AYDIN, 2009).

Costa (2007) citou ainda que a secagem industrial é a operação pela qual é retirada a umidade contida nos diversos materiais e Blackadder e Nedderman (2004) descrevem que, tipicamente, a secagem é a remoção de um líquido volátil, normalmente água, de um sólido poroso como madeira, tecido ou uma massa de pó.

O principal objetivo na redução de água dos alimentos é a diminuição nas taxas de alterações microbiológicas (MUJUMDAR, 2006; LAND, 1991). Existem vários outros motivos para empregar a secagem, na redução de umidade dos materiais, como facilitar o manuseio do produto, o empacotamento, o transporte ou a dosagem, atender a limites de umidade pré-estabelecidos, a requisitos técnicos de processamento e à preservação ou conservação durante a estocagem, uma vez que um excesso de umidade pode comprometer a vida útil do produto ou mesmo seu valor nutricional (LAND, 1991; PORTELLA e EICHELBERG, 2001; FELLOWS, 2006).



De acordo com Celestino (2010), o conceito de secagem também se aplica à operação de evaporação, que é a concentração de soluções líquidas. A Tabela 2-1 descreve as diferenças entre a secagem e a evaporação (CELESTINO, 2010). A maioria das operações de secagem baseia-se no contato da superfície de um material a ser seco com uma corrente de ar aquecido e de baixa umidade, de modo a propiciar um potencial para a transferência de umidade desse material para o ar. A quantificação desse potencial depende do conhecimento das propriedades de equilíbrio da mistura de ar seco e vapor de água com a umidade dos sólidos, temperatura e pressão, bem como de suas propriedades térmicas. O estudo de tais propriedades, aplicado às mudanças causadas por processos de transferência de massa/energia, é incluído na psicrometria.

Tabela 2-1 – Diferença entre secagem e evaporação.

<b>Secagem</b>	<b>Evaporação</b>
Remoção de líquido de um material sólido.	Remoção de líquido de uma solução líquida.
Remoção de líquido por centrifugação ou vaporização.	Remoção de líquido somente por evaporação.
A vaporização ocorre a uma temperatura inferior à temperatura de ebulição do líquido que se quer retirar do material sólido.	A evaporação ocorre na temperatura de ebulição do líquido que se quer retirar da solução líquida.

Fonte: (CELESTINO, 2010).

## 2.2 PSICROMETRIA

A psicrometria está relacionada à determinação das propriedades termodinâmicas de um gás, e com a utilização em processos envolvendo gases úmidos, isto é, estuda as relações existentes entre o ar e o vapor de água (VAN WYLEN, *et al.*, 1995; ÇENGEL e BOLES, 2013). O ar atmosférico é bastante utilizado para promover a secagem de materiais. É selecionado para exercer a função de fornecedor do calor requerido para evaporação de água de um material e para promover a retirada de água evaporada de materiais processados em secadores. Esse ar é uma mistura de muitos gases, contendo vapor de água e diversos poluentes. O ar é denominado seco quando todo vapor de água e contaminantes são removidos (ÇENGEL e BOLES, 2013).

A composição do ar seco é quase constante, no entanto pequenas variações, nas quantidades dos componentes individuais, ocorrem com o tempo, localização geográfica e altitude. A composição percentual em volume do ar seco é mostrada na Tabela 2-2, na qual é

apresentada a composição aproximada do ar limpo e seco, sendo massa molar média, para o ar seco  $\bar{M}_{Mar}$  igual a  $28,97 \text{ kg} \times \text{kmol}^{-1}$ .

Tabela 2-2 – Composição do Ar Limpo e Seco.

Componente	Composição Molar [mol. 100 mol <sup>-1</sup> total]
Nitrogênio – N <sub>2</sub>	78,08
Oxigênio – O <sub>2</sub>	20,95
Argônio – Ar	0,93
Dióxido de Carbono – CO <sub>2</sub>	0,03
Outros	0,01

Fonte: (TELIS e MAURO, 2016)

Ar úmido consiste em uma mistura binária de ar seco com uma quantidade de vapor de água. A quantidade de água, no ar úmido, pode variar de zero, que é o ar totalmente seco, até um máximo que depende da temperatura e da pressão. A última condição é denominada saturação e corresponde a um estado de equilíbrio entre o ar úmido e a água em estado condensado, em que a massa molecular da água é de  $18,02 \text{ kg} \times \text{kmol}^{-1}$ .

**Umidade Absoluta ( $Y_v$ ):** é a massa de vapor de água ( $m_v$ ) presente em uma unidade de massa de ar seco ( $m_{ar}$ ). Considerando que o ar úmido se comporta como um gás ideal e, usando a Lei de Dalton, segundo a qual a pressão parcial ( $p_i$ ) de um componente é igual à sua fração molar, na fase vapor multiplicada pela pressão total do sistema ( $P$ ), pode-se relacionar a umidade absoluta com a pressão parcial do vapor de água ( $p_v$ ) no ar por meio da Equação (2.1).

$$Y_v = \frac{m_v}{m_{ar}} = \frac{n_v M_{Mv}}{n_{ar} \bar{M}_{Mar}} = \frac{y_v M_{Mv}}{y_{ar} \bar{M}_{Mar}} = \frac{p_v M_{Mv}}{(P - p_v) \bar{M}_{Mar}} \quad (2.1)$$

Substituindo os valores dos pesos moleculares do ar e do vapor de água, obtém-se a Equação (2.2) (Wang, 1985; ASHRAE, 2001).

$$Y_v = 0,62198 \frac{p_v}{(P - p_v)} = \frac{X_v}{(1 - X_v)} \quad (2.2)$$

Quando determinada massa de ar é colocada em contato com uma massa de água líquida, ocorrerá transferência de água, na forma de vapor, da fase líquida para a corrente gasosa. Então, quando o sistema atingir o equilíbrio, a pressão parcial de água, no ar úmido, será igual à pressão

de vapor de água pura na temperatura do sistema. Nessa condição, diz-se que o ar está saturado e sua umidade absoluta corresponde à umidade de saturação.

**Umidade Relativa (UR ou  $\phi$ ):** é a razão percentual entre a fração molar de vapor de água, no ar úmido, e a fração molar de água, no ar saturado, nas mesmas condições de ( $T$ ) e ( $P$ ). Na Equação (2.3), as variáveis ( $y_{vs}^*$ ) e ( $p_{vs}^*$ ) indicam, respectivamente, a fração molar de água e a pressão parcial da água, na fase gasosa, na condição de equilíbrio, isto é, na saturação.

$$UR \text{ ou } \phi = \frac{y_v}{y_{vs}^*} 100 = \frac{y_v P}{y_{vs}^* P} 100 = \frac{P_v}{P_{vs}^*} 100 \quad (2.3)$$

Em função de sua umidade, temperatura e pressão, o ar úmido pode também ser caracterizado em termos de seu **Volume Específico**, ou **Volume Úmido ( $v$ )**, que é definido como sendo o volume ocupado pelo ar úmido por unidade de massa de ar seco nele contido. Assumindo comportamento de gás ideal e aplicando a lei dos gases perfeitos, o *volume específico* é dado pela Equação (2.4) (TREYBAL, 1981).

$$v = \frac{RT}{P} \left( \frac{1}{M_{Mar}} + \frac{Y_v}{M_{Mv}} \right) \quad (2.4)$$

Em pressão atmosférica, aplicando os valores de  $R$ ,  $P$ ,  $M_{Mar}$  e  $M_{Mv}$ , a Equação (2.4) pode ser reescrita em função da temperatura e da umidade absoluta, resultando na Equação (2.5), para o *volume específico*.

$$v = (2,83 \times 10^{-3} + 4,56 \times 10^{-3} Y_v) T \quad (2.5)$$

**Calor Específico ( $C$ ):** o calor específico do ar úmido é o calor necessário para elevar, em um grau, a temperatura de uma unidade de massa de ar seco incluindo também a massa de vapor de água nela contida. Assumindo que o calor específico do ar seco e do vapor de água sejam aproximadamente constantes na faixa usual de temperaturas, e iguais a  $1,005 \text{ kJ} \times \text{kg}^{-1} \text{ de ar seco} \times \text{K}^{-1}$  e  $1,88 \text{ kJ} \times \text{kg}^{-1} \text{ de vapor de água} \times \text{K}^{-1}$ , respectivamente, o calor específico é calculado pela Equação (2.6), que é a soma do calor específico do ar seco mais a parcela correspondente ao vapor de água que está misturado no ar.

$$C = 1,005 + (1,88 Y_v) \quad (2.6)$$

**Temperatura de Bulbo Seco ( $T_G$ ):** é a temperatura de uma mistura de ar, mais vapor de água, determinada pela imersão de um termômetro na mistura. É a temperatura real, ou termodinâmica (BLACKADDER e NEDDERMAN, 2004).

**Temperatura de Bulbo Úmido ( $T_W$ ):** é a temperatura, em estado estacionário, atingida por uma pequena porção de líquido que evapora em uma grande quantidade de ar úmido não saturado. Para quantificar experimentalmente essa temperatura, o bulbo de um termômetro, ou a extremidade de um termopar, é recoberta por uma mecha de gaze, ou algodão, embebida com água (NELLIS e KLEIN, 2012).

A pressão do vapor de água, na superfície da água líquida, será maior do que a pressão parcial do vapor, no interior do ar, se o mesmo não estiver saturado, e a água evapora e esco para o interior do ar. O ar, ao escoar sobre a água, tende à saturação junto à interface (ar-mecha umedecida). Como consequência, a camada de ar que está em contato com o termômetro esfria-se até uma temperatura mais baixa, quanto mais acentuada for a evaporação, o que depende de quanto o ar esteja longe do ponto de saturação (PARCKERT, 2009).

A água, que torna a mecha úmida, tem a tendência de adquirir a mesma temperatura. Se a velocidade do ar for elevada e a área de contato entre o ar e a água da mecha for pequena, não haverá mudança significativa na temperatura ou na umidade da corrente gasosa. A temperatura atingida pela água retida na mecha é a Temperatura de Bulbo Úmido do ar (McCABE et al., 2005).

**Taxa de Calor ( $q$ ):** pode ser transferido para a mecha, ser quantificado e representado pela Equação (2.7), que é conhecida como a Lei de resfriamento de Newton (TREYBAL, 1981),

$$q = h_c(T_G - T_W) \quad (2.7)$$

sendo  $h_c [W/m^2 \times K]$  o coeficiente de transferência de calor por convecção. A taxa de calor para a mecha também pode ser expressa pela Equação (2.8) utilizando o calor latente.

$$q = n_A \lambda_W \quad (2.8)$$

**Fluxo de Água ( $n_A$ ):** retirado da mecha, devido à evaporação, pode ser expresso pela Equação (2.9);  $k_Y$  é o coeficiente individual de transferência de massa na fase gasosa com base na diferença de fração molar [ $mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot (mol \cdot mol^{-1} total)^{-1}$ ].

$$n_A = k_Y(Y_W - Y_V) \quad (2.9)$$

Combinando as Equações (2.7), (2.8) e (2.9), tem-se a Equação (2.10), com todas as componentes.

$$(T_G - T_W) = \frac{\lambda_W}{(h_C/k_Y)} (Y_W - Y_V) \quad (2.10)$$

Uma equação equivalente, a Equação (2.10), porém mais simples, é mostrada na Equação (2.11), que isola a variável da umidade do ar, facilitando os cálculos (ASHRAE, 2001).

$$Y = \frac{(2501 - 2,381T_W)Y_W - (T - T_W)}{2501 - (1,805 - T) - (4,186T_W)} \quad (2.11)$$

Segundo Treybal (1981), para o sistema contendo um vapor de água, que o umidifica, os dados acumulados permitem elaborar a seguinte correlação, representada pela Equação (2.12) e a Equação (2.13), para determinar o número de Schmidt (INCROPERA *et al.*, 2008) -

$$\left(\frac{h_C}{k_Y}\right) = 1223 \times S_C^{0,567} \quad (2.12)$$

onde

$$S_C = \frac{v}{D_{AB}} = \frac{\mu}{(\rho D_{AB})} \quad (2.13)$$

O *Coefficiente de difusão da água no ar* ( $D_{AB}$ ) pode ser determinado, em diversas temperaturas, pela Equação (2.14) e Equação (2.15), que é a equação de Fuller, para o sistema ar-água. Na Equação (2.14), a pressão  $P$  é dada em  $N/m^2$ , enquanto que, na Equação (2.15), é expressa em *atm*, e a temperatura em Kelvin, em ambas as equações.

$$D_{AB} = \frac{1,9 \times T^{1,75}}{P} \quad (2.14)$$

Usando valores experimentais da difusividade da água, na pressão atmosférica, modificou-se o expoente da temperatura, na equação de Fuller, para ajustar os dados experimentais da difusividade da água (TREYBAL, 1981; REID *et al.*, 2001):

$$D_{AB} = \left[ \frac{0,26 (T/298)^{1,48}}{P} \right] \quad (2.15)$$

### 2.3 EQUAÇÃO DE ESTADO DO GÁS IDEAL

Qualquer equação que relacione as componentes da pressão, da temperatura e do volume específico de uma substância, é chamada de *equação de estado*. A equação de estado de uma substância, na fase gasosa mais simples e mais conhecida, é a equação de estado do gás ideal. Essa equação prevê o comportamento das componentes  $P$ - $v$ - $T$  de um gás dentro de uma determinada região. A fase gasosa de um líquido é chamada de *gás* quando está acima da temperatura crítica. Em 1802, os franceses J. Charles e L. Gay-Lussac determinaram experimentalmente que, em baixas pressões, o volume de um gás é proporcional à sua temperatura (VAN WYLEN *et al.*, 1995, ÇENGEL e BOLES, 2013), expressado na Equação (2.16), conhecida como equação de estado do gás ideal. E,  $R$  é a constante universal dos gases:

$$Pv = nRT \quad (2.16)$$

A massa de vapor de água pode ser expressa pelo produto do número de mol, pelo peso molecular da água e, semelhante à massa de ar seco, pode ser expressa pelo produto do número de mol, pelo peso molecular do ar. Além disso, utilizando a lei dos gases perfeitos, os números de moles dos constituintes podem ser expressos pelas Equações (2.17) e (2.18):

$$n_v = \frac{p_v V}{RT} \quad (2.17)$$

$$n_{ar} = \frac{p_{ar} V}{RT} \quad (2.18)$$

### 2.4 COMPORTAMENTO GERAL DA SECAGEM DE VEGETAIS

Em secagem de vegetais, como nos sólidos, com atuação de um gás, quando a temperatura e umidade são fixas, é manifestado sempre um tipo de comportamento. Depois do contato do meio secante com a amostra, a temperatura do material se ajusta até atingir uma temperatura constante. A temperatura do material e a velocidade de secagem podem aumentar ou diminuir para chegarem às condições da taxa de secagem constante, para a primeira etapa de secagem. Nessa condição, a temperatura da superfície do material molhado é a temperatura de bulbo úmido do meio secante (FOUST *et al.*, 1982).

Uma vez que as temperaturas do material tenham atingido a temperatura de bulbo úmido do gás, elas permanecem estáveis, e a taxa de secagem também permanece constante. Esse

período é denominado *período de secagem à taxa constante*, e termina quando o material a ser seco atinge o teor de umidade crítica de acordo com a Figura 2-1. O teor de umidade crítica pode ser expresso pela Equação (2.19). E  $W_C$  é o conteúdo de umidade crítica em base úmida.

$$X'_E = \frac{W_C}{1 - W_C} \quad (2.19)$$

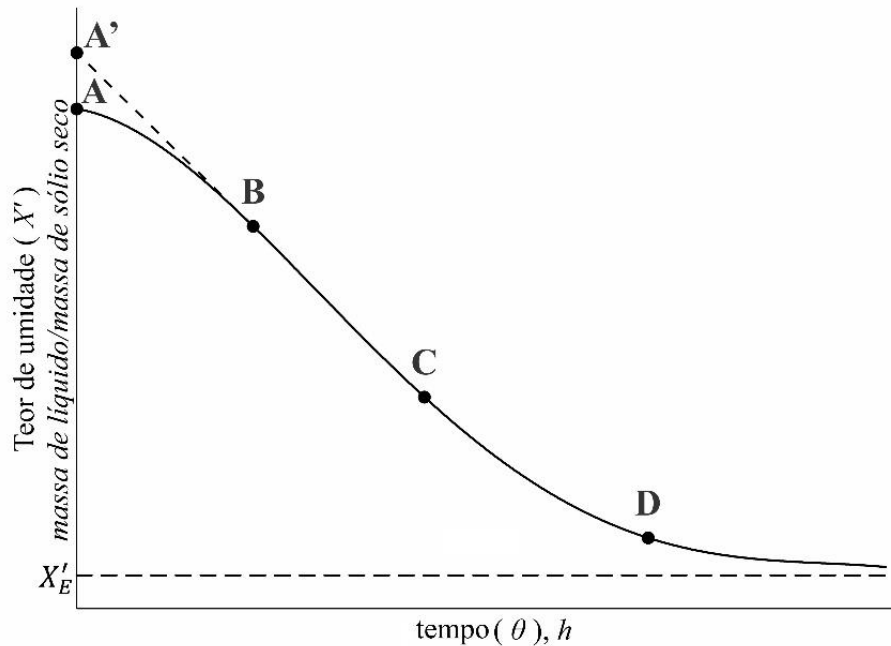


Figura 2-1 – Curva de secagem típica de um material.

Trecho A-B período em regime não permanente; B-C toda a superfície exposta do sólido está saturada de água; C-D o início da curva decrescente, a superfície do material fica com menor quantidade de líquido e após D não tem mais área que seja significativamente saturada de líquido.

Fonte: (FOUST *et al.*, 1982; LUZ, 2010) modificada.

Dois fenômenos ocorrem e podem ser observados, simultaneamente, quando um sólido úmido é submetido à secagem (FOUST *et al.*, 1982; PARK *et. al.*, 2007):

- i. **transferência de calor** para evaporar a umidade superficial, dependente das condições externas de temperatura, da umidade do ar, do fluxo e da direção do ar, da área de exposição do sólido e da pressão;
- ii. **transferência de massa** do interior do material a ser seco, para a sua superfície, e conseqüente evaporação devido ao primeiro mecanismo. A movimentação interna da umidade, no material sólido, é em função da natureza física, da temperatura e do conteúdo de umidade.

É possível observar esse comportamento nas curvas de secagem dos materiais. Cada material tem uma curva de secagem característica (PARK *et. al*, 2007). Em geral, os sólidos possuem uma curva de secagem bastante definida e a umidade decresce ao longo do período. Na Figura 2-2, é possível observar a taxa de secagem em função do teor de umidade:

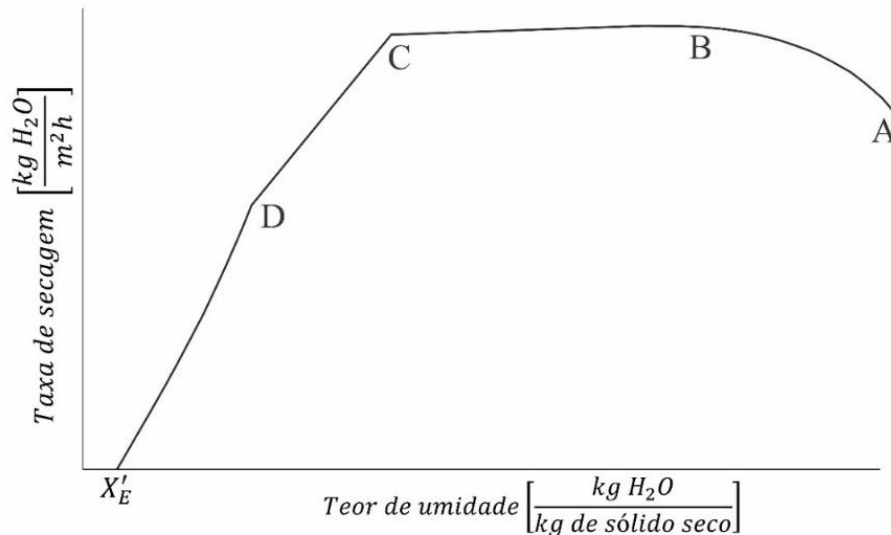


Figura 2-2 – Curva de taxa de secagem em condições constantes.

Trecho A-B período em regime não permanente; B-C toda a superfície exposta do sólido está saturada de água; C-D o início da curva decrescente, a superfície do material fica com menor quantidade de líquido e após D não tem mais área que seja significativamente saturada de líquido.

Fonte: (FOUST *et al.*, 1982, LUZ, 2010).

As curvas apresentadas estão relacionadas aos mecanismos de realização da secagem, em que, na Figura 2-1, o trecho da curva entre os pontos A-A' representa um período de indução, isto é, momento em que o sólido entrou em contato com o ar quente, mas ainda não está aquecido de forma uniforme. O segmento A-B, das Figuras 2-1 e 2-2, é o período em regime não permanente, durante o qual a temperatura do sólido atinge o seu patamar de regime permanente. No segmento B-C, toda a superfície exposta do sólido está saturada de água; a secagem acontece por evaporação, sem a influência direta do sólido, na taxa de secagem. O regime de secagem, a taxa constante, continua com a massa da superfície sendo substituída pelo líquido vindo do interior do sólido. No ponto C, o teor de umidade do sólido é o mínimo para suprir a totalidade da superfície. No período da secagem, entre os pontos C e D da Figura 2-1, onde C é o início da curva decrescente, a superfície do material fica com menor quantidade de líquido, diminui a velocidade de transferência do líquido para a superfície e diminui a taxa em que a massa é transferida da superfície. No ponto D, não tem mais área que seja significativamente saturada de líquido (FOUST *et al.*, 1982; McCABE *et al.*, 2005). Ainda,



abaixo do ponto **D**, a evaporação ocorre, a partir do interior do sólido, e, à medida em que a umidade continua diminuindo, atinge  $X'_E$ , cessando a secagem, pois atingiu o equilíbrio com o ar de secagem.

**Tempo de secagem ( $N$ )** – Quando se deseja determinar o tempo de secagem de um material sólido, obedecendo às mesmas condições, como a mostrada na Figura 2-1, apenas basta identificar a diferença correspondente aos pontos umidade inicial e final da curva. Também é possível ter uma estimativa da aparência de uma curva, a mostrada na Figura 2-2, para condições diferentes das aplicadas nos experimentos. E para determinar o tempo de secagem para essa curva, podemos utilizar taxa de secagem (TREYBAL, 1981), que, por definição, está expressa na Equação (2.20).

$$N = \frac{-S_S dX}{A d\theta} \quad (2.20)$$

sendo  $dX/d\theta$  a taxa de torra,  $S_S$  a massa de vegetal seco.

Reordenando a Equação (2.20) e integrando-a, ao longo do tempo, tem-se a Equação (2.21), enquanto o teor de umidade muda de seu valor inicial  $X_1$  para o valor final  $X_2$ :

$$\theta = - \int_0^\theta d\theta = \frac{S_S}{A} \int_{X_2}^{X_1} \frac{dX}{N} \quad (2.21)$$

Caso a secagem aconteça completamente, em um *período de taxa constante*, de modo que  $X_1$  e  $X_2 > X_C$  e  $N = N_C$ , a Equação (2.21) ficará na forma da Equação (2.22):

$$\theta = \frac{S_S(X_1 - X_2)}{AN_C} \quad (2.22)$$

Para o período de taxa decrescente, se  $X_1$  e  $X_2$  forem menores que  $X_C$ , de modo que a secagem aconteça sob condições de alteração  $N$ , precede-se da seguinte forma:

- i. caso geral** - para qualquer forma de curva, com queda na taxa de secagem, a Equação (2.21) pode ser integrada sob uma curva de  $\frac{1}{N}$ , como ordenada, e  $X$ , como abcissa, cujos valores podem ser obtidos a partir da curva de secagem;
- ii. caso especial** - quando  $N$  tem comportamento linear em  $X$ , como mostrado na região **C-D**, da Figura 2-2. Nesse caso, tem-se a Equação (2.23),

$$N = mX + b \quad (2.23)$$

onde a variável  $m$  é o coeficiente angular da reta, e  $b$  é uma constante; substituindo a Equação (2.23), na Equação (2.21), tem-se a Equação (2.24):

$$\theta = \frac{S_S(X_1 - X_2)}{A(N_1 - N_2)} \ln \frac{N_1}{N_2} = \frac{S_S(X_1 - X_2)}{AN_m} \quad (2.24)$$

Como  $N_1 = mX_1 + b$ ,  $N_2 = mX_2 + b$  e  $m = (N_1 - N_2)/(X_1 - X_2)$ , a Equação (2.22) pode ser reescrita, na Equação (2.25), em que  $N_m$  é a média logarítmica da taxa  $N_1$ , no conteúdo de umidade  $X_1$  e  $N_2$  em  $X_2$ . Com frequência, no declínio, a secagem, como mostrado na Figura 2-2, pode ser uma reta entre os pontos  $C$  e  $E$ , o que não é muito comum (TREYBAL, 1981).

$$N = m(X - X^*) = \frac{N_C(X - X^*)}{X_C - X^*} \quad (2.25)$$

Então a Equação (2.24) pode ser deduzida e modificada para a Equação (2.26).

$$\theta = \frac{S_S(X_C - X^*)}{N_C A} \ln \frac{X_1 - X^*}{X_2 - X^*} \quad (2.26)$$

## 2.5 ANÁLISE MATEMÁTICA DA DIFUSIVIDADE

Sólidos que secam de forma lenta têm, como característica do mecanismo de perda de umidade, a difusão. A resistência pela perda de umidade, em forma de vapor, da superfície do sólido para o ar, é usualmente desprezível, e a difusão do interior do sólido controla a velocidade de secagem. Há uma tendência de a difusividade aumentar com a temperatura, portanto a elevação da temperatura dos sólidos acelera a velocidade de secagem (McCABE *et al.*, 2005). A taxa de difusão pode ser representada pela segunda lei de Fick, mostrada na Equação (2.27),

$$\frac{\partial X_A}{\partial t} = D_{AB} \frac{\partial^2 X_A}{\partial Z^2} \quad (2.27)$$

onde  $X_A$  é o conteúdo de umidade do sólido (kg água/kg de sólido seco),  $Z$  é a direção do fluxo difusivo interno de água ( $m$ ),  $t$  é o tempo de secagem ( $s$ ) e  $D_{AB}$  é a difusividade efetiva da umidade ( $m^2.s^{-1}$ ).

Considerando uma placa semi-infinita, as condições de contorno iniciais são:

$$\begin{aligned} t = 0; X(Z, 0) &= X_0 \\ Z = L_0; X(L, t) &= X_e \text{ na superfície} \\ z = 0, \frac{\partial X}{\partial t} &= 0 \text{ umidade máxima no centro} \end{aligned} \quad (2.28)$$

Aplicando as condições de contorno, Equação (2.28), na Equação (2.27) e supondo que a umidade se distribui de forma uniforme, a solução analítica da lei de Fick é dada pela Equação (2.29), onde o valor para  $a_1 = (\pi/2)^2$ , sendo  $Fo_m$  o número de Fourier para transferência de massa.

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \left[ e^{-a_1 Fo_m} + \frac{1}{9} e^{-9a_1 Fo_m} + \frac{1}{25} e^{-25a_1 Fo_m} + \dots \right] \quad (2.29)$$

Para placas planas, como no caso das folhas do cafeeiro, apresenta-se na forma de uma série infinita e, na maioria dos casos que envolvam secagem, pode ser truncada após o primeiro termo. Conforme Borges (2016), há inúmeras pesquisas que utilizam o primeiro termo da série. Truncando a série ao primeiro termo e substituindo  $a_1$  e  $Fo_m$ , tem-se a Equação (2.30):

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} [e^{-a_1 Fo_m}] = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_v t}{4S^2}\right) \quad (2.30)$$

Assim, para o período de taxa decrescente, conforme o trabalho de Schultz (1999), obtém-se uma relação linear, em coordenadas semi-logarítmicas, entre a razão de umidade  $(X - X_e)/(X_0 - X_e)$  e o tempo de secagem. Dessa forma é possível determinar o coeficiente de difusão efetivo, que está expresso no número de Fourier ( $Fo_m$ ) da Equação (2.30) e, simplificado, chega-se à Equação (2.31):

$$\ln\left(\frac{X - X_e}{X_0 - X_e}\right) = -\frac{\pi^2 D_v t}{4S^2} + \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) \quad (2.31)$$

A difusividade efetiva normalmente é determinada plotando a umidade experimental em termos de  $\ln\left(\frac{X - X_e}{X_0 - X_e}\right)$  pelo tempo de secagem.

Ainda, a partir da Equação (2.31), podemos plotar um gráfico, através da Equação (2.32), que é o coeficiente angular da reta  $K$  (ALTAY, 2019),

$$K = \frac{\pi^2 D_v t}{4s^2} \quad (2.31)$$

onde  $D_v$  é a difusividade efetiva ( $m^2 \cdot s^{-1}$ );  $t$  é o tempo de secagem e  $s$  é a metade da espessura das folhas ( $m$ ).

Aplicando o valor da inclinação da reta  $K$ , podemos determinar a difusividade efetiva da umidade, conforme Doymaz (2013). Conforme Falade e Solademi (2010), a difusividade efetiva pode ser relacionada à temperatura pela Equação (2.32),

$$D_v = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R(T + 273,15)}\right) \quad (2.32)$$

onde  $D_0$  é o fator pré-exponencial da Equação de Arrhenius ( $m^2 \cdot s^{-1}$ );  $E_a$  é a energia de ativação para a difusão ( $kJ \cdot mol^{-1}$ );  $R$  é a constante de gás ideal ( $kJ \cdot mol^{-1} \cdot K$ ) e  $T$  é a temperatura em ( $^{\circ}C$ ). Equação (2.32) pode ser rearranjada para a Equação (2.33):

$$\ln(D_v) = \ln(D_0) - \left(\frac{E_a}{R(T + 273,15)}\right) \quad (2.33)$$

A difusividade da folha de café, na torração, foi de  $2,0979 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$  (CAVALLARO et al. 2018).

## 2.6 TIPOS DE SECADORES

Existem diferentes critérios de classificação dos equipamentos de secagem, incluindo o método de aquecimento utilizado (direto e indireto), se operam a vácuo ou à pressão atmosférica, e quanto às características do fluxo de carga ou descarga (contínuos ou bateladas).

Key (1972) divide os secadores, segundo o meio de transporte do material, como apresentados na Tabela 2-3. Toro e Kil Jin (2005) escreveram que a seleção do equipamento de secagem deve levar em consideração o levantamento dos parâmetros do processo em que a etapa de secagem está inserida, o produto final desejado e a matéria-prima que será utilizada no processo de secagem.

Tabela 2-3 – Secadores segundo o meio de transporte.

<b>Método</b>	<b>Secador Típico</b>	<b>Material Típico</b>
<b>Material Estático</b>	Secador de bandejas	Grande variedade de materiais
<b>Material carregado por gravidade</b>	Secador rotatório	Grânulos
<b>Material carregado em lâminas</b>	Secador de rosca	Materiais úmidos, pastas
<b>Material transportado em carrinhos</b>	Secador de túnel	Grande variedade de materiais
<b>Material carregado sobre rolos</b>	Secador de rolos aquecidos	Teias finas, folhas e placas
<b>Material carregado em esteiras</b>	Secador de esteiras	Grande variedade de materiais
<b>Material vibrado</b>	Secador de esteira vibratória	Grânulos em queda livre
<b>Material suspenso no ar</b>	Secador de leite fluidizado	Grânulos
<b>Material suspenso no ar</b>	<i>Spray dryer</i>	Soluções, materiais viscosos e pastas finas

Fonte: (KEEY, 1972).

Ainda, Guney e Tepe (2016) apresentam uma tabela, com os principais tipos de secadores, relacionando aplicações representativas no processamento de alimentos:

Tabela 2-4 – Tipos de secadores e suas aplicações no processamento de alimentos.

<b>Secador Típico</b>	
<b>Secador de bandejas</b>	Legumes, carnes e confeitos
<b>Secador rotatório</b>	Sementes, grãos, amido, cristais de açúcar
<b>Secador de túnel</b>	Frutas e vegetais
<b>Secadores de rolos aquecidos</b>	Leite, sopas, flocos, cereais para bebês, sucos, purés
<b>Secador de esteiras</b>	Grãos, legumes, frutas, cereais, nozes
<b>Secador de leite fluidizado</b>	Legumes, grânulos, grãos, ervilhas
<b><i>Spray dryer</i></b>	Leite, creme, café, chá, sucos, ovos, extratos, xaropes

Fonte: (GUNEY e TEPE, 2016).

Nos *secadores diretos*, como os secadores de bandejas, túnel ou esteira, entre outros, o material a ser seco é exposto diretamente ao ar quente, e, como vantagem, os equipamentos são mais simples e baratos e existe menor possibilidade de danos causados ao produto em razão de

seu superaquecimento. Por outro lado, a eficiência térmica dos secadores diretos é menor (TELIS e MAURO, 2016).

Nos *secadores indiretos*, o calor para secagem é transferido ao sólido úmido por uma superfície metálica aquecida, como no secador de tambor. Nesse caso, apesar da maior eficiência térmica do processo, existe risco de superaquecimento do produto em contato direto com a superfície aquecida. Secadores nos quais o aquecimento é feito pelas micro-ondas ou por radiação não ionizante, também são considerados indiretos.

Não é objeto deste estudo detalhar ou apresentar cálculos de dimensionamento dos equipamentos de secagem, isso já foi feito por outros autores. No entanto, como forma didática, serão apresentados alguns tipos de secadores e suas principais características.

### **Secadores contínuos e em batelada**

Os secadores em batelada operam de modo descontínuo, isto é, a secagem é feita separando o material em lotes que serão processados individualmente. Nos secadores que operam de modo contínuo, o material úmido entra continuamente no equipamento, enquanto o material já seco é continuamente produzido. O secador tem mecanismos para o transporte do material em direção à saída, a uma velocidade tal que o tempo de permanência, em seu interior, seja suficiente para secagem até a umidade final desejada. Nesses secadores, o escoamento do ar de secagem e do material a ser seco podem ocorrer de forma paralela, ou em concorrente ou em contracorrente, ou ainda de forma cruzada (McCABE *et al.*, 2005; TELIS e MAURO, 2016).

### **Secadores de Bandejas**

Secador de bandejas é o tipo mais simples e consiste em uma câmara ou gabinete com várias bandejas sobrepostas, perfuradas ou não, nas quais se deposita uma camada de sólido a ser seco. Por ser de construção simples, o secador de bandejas tem baixo custo, além de oferecer grande flexibilidade de operação.

O mesmo equipamento pode ser utilizado para a secagem de vários produtos, com apenas alguns ajustes nas condições de operação. Por outro lado, é difícil conseguir condições uniformes de secagem em todos os pontos do secador, uma vez que, na medida em que o ar

escoa sobre as bandejas, tem sua umidade e temperaturas alteradas. Assim, o produto que está mais próximo da alimentação do ar de secagem será seco mais rapidamente do que aquele situado próximo da saída.

Nessa condição, é necessário proceder à mudança das bandejas de posição durante a operação de secagem, ou retirar o produto do secador em lotes, após tempos de secagem diferentes. Essas limitações demandam aumento de mão de obra no processo, tornando o secador um equipamento para operações de baixa escala. Cada um desses arranjos apresenta vantagens e desvantagens, como mostrado na Tabela 2-5.

Tabela 2-5 – Arranjo dos fluxos do ar de secagem.

ESCOAMENTO	VANTAGENS	DESVANTAGENS
<b>Concorrente</b>	Secagem inicial rápida. Menor risco de danos a produtos sensíveis ao calor.	Dificuldade de remoção da umidade final do produto.
<b>Contracorrente</b>	Maior eficiência energética. Facilidade de remoção da umidade final.	Risco de danos a produtos sensíveis ao calor, de deterioração do produto durante a secagem, pois o ar morno e úmido entra em contato com o sólido com maior umidade.
<b>Cruzado</b>	Flexibilidade de controle da secagem em razão da separação de zonas de aquecimento, levando à secagem rápida e uniforme.	Maior complexidade e maiores custos fixos e operacionais.

Fonte: (TELIS e MAURO., 2016).

Na Figura 2.3, esquema de funcionamento do secador de bandejas (FOUST *et al.*, 1982).

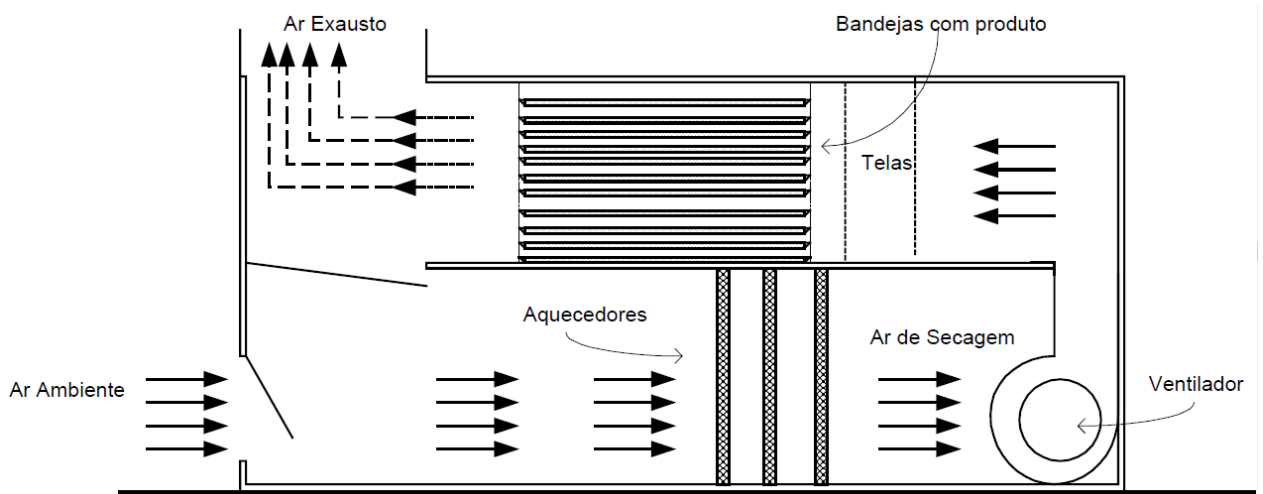


Figura 2-3 – Esquema de funcionamento de um secador de bandejas.  
Fonte: (FOUST *et al.*, 1982).

E, na Figura 2-3, imagem de um secador de bandejas industrial.



Figura 2-4 – Secador de Bandejas Industrial.  
Fonte: (GUNEY e TEPE, 2016).

### Secadores de Túnel

Foram criados a partir da modificação dos secadores de bandejas para operação em modo contínuo. Nesse tipo de equipamento, as bandejas são instaladas sobre estantes adaptadas a um sistema de movimentação que permite seu deslocamento ao longo de um túnel por onde escoo o ar de secagem. A Figura 2-5 mostra um esquema desse tipo de secador. O escoamento de ar pode ser em paralelo ou em contracorrente com o material a ser seco (FOUST *et al.*, 1982; TELIS e MAURO., 2016).

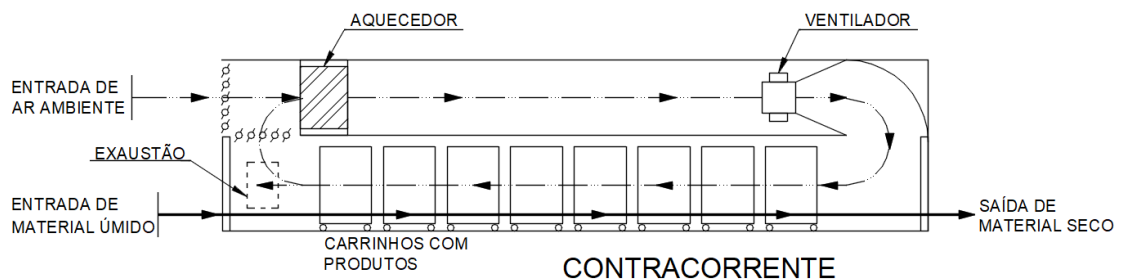


Figura 2-5 – Secador de Túnel.  
Fonte: (KUDRA e MUJUMBAR, 2009) imagem adaptada.

### Secadores de Esteira

Esses secadores são como variantes do secador de túnel. Sobre uma esteira transportadora – em geral fabricada de tela, com malha de abertura adequada à granulometria do produto a ser seco – é depositado o produto a ser seco. O ar de escoamento pode ocorrer em paralelo, em contracorrente, ou transversalmente ao leito. Esses secadores podem ser projetados



para operação em temperatura constante ou com zonas de temperaturas diferentes, permitindo o controle preciso das condições de secagem.

A Figura 2-6 mostra um esquema do secador de esteira.



Figura 2-6 – Secador de Esteira.  
Fonte: (GUNEY e TEPE, 2016).

Na indústria de alimentos, em geral, é utilizado para secagem de massas, gelatinas, ervamate, arroz parboilizado, frutas, vegetais entre outros. São adequados para secagem de grandes quantidades de material em períodos relativamente curtos.

### **Secadores de Leito Fluidizado**

A denominação “leito fluidizado” está associada ao processo de fluidização, no qual um leito de material particulado, submetido a determinadas condições de operação, passa a exibir um comportamento de fluido como resultado do escoamento de um líquido ou gás através das partículas. Nesse tipo de secador, é utilizado o próprio ar de secagem para fluidizar as partículas do material a ser seco (GUNEY e TEPE, 2016).

Secadores de leito fluidizado podem operar de modo contínuo ou em batelada e são adequados para secagem de grãos ou vegetais cortados, em pequenos pedaços, como coco ralado, queijo parmesão ralado e outros materiais particulados. Na Figura 2.7, é apresentado um esquema do secador de leito fluidizado. A ocorrência da fluidização exige que o ar seja admitido a uma velocidade mínima, suficiente para manter as partículas do leito suspensas na fase gasosa, com máxima porosidade e mínima perda de pressão.



Figura 2-7 – Secador de leito fluidizado.  
Fonte: (GUNEY e TEPE, 2016).

Existem algumas variantes do secador de leito fluidizado e incluem o leito de jorro e o leito vibrofluidizado, que não serão discutidos, ou apresentados nesse trabalho.

### Secadores Rotativos

São secadores de operação contínua, aplicados para materiais particulados difíceis de serem retidos em uma esteira ou cujas partículas tendem a aglomerar, como folhas de vegetais (MUJUMBAR; KROKIDA; MARINOS-KOURIS, 2006, p. 151). Sua geometria é cilíndrica, montada ligeiramente inclinada e acoplada a motores que impulsionam, em movimentos giratórios lentos, sobre seu eixo. A Figura 2.8 mostra um esquema de funcionamento deste tipo de secador. Seu interior oco possui defletores (aletas), responsáveis pela movimentação das partículas.

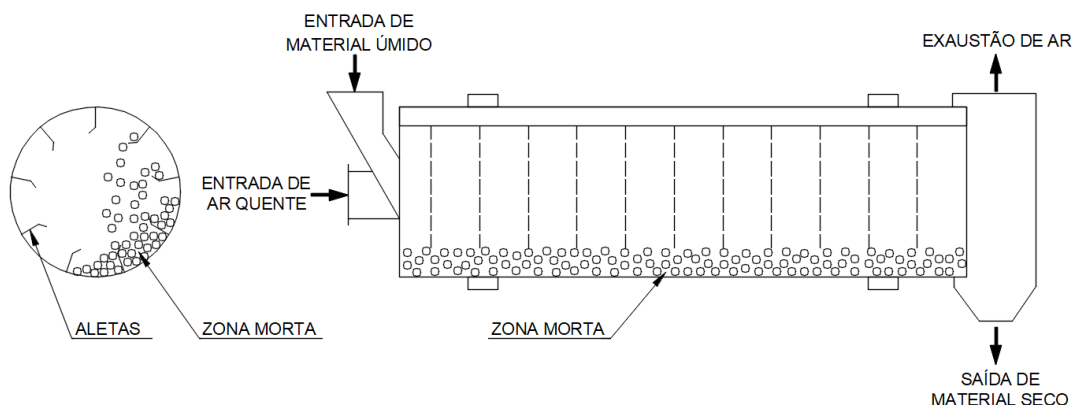


Figura 2-8 – Esquema de Secador rotativo.  
Fonte: (KUDRA *et al.*, 2009).

Nesse tipo de secador, o aquecimento ocorre de forma direta, pelo escoamento de ar aquecido, ou gases a contracorrente, ou de forma indireta, por tubos internos instalados longitudinalmente, por onde escoava vapor de água, ou através de uma camisa de vapor na

superfície cilíndrica. O movimento constante das partículas faz com que todas as suas faces sejam expostas ao ar de secagem e é responsável pelos altos coeficientes de transferência de calor e massa.

## 2.7 PROCESSAMENTO DAS FOLHAS DE CAFÉ

O processamento das folhas de café pode ser realizado de forma análoga ao processo da erva-mate e do chá verde, segundo Finzer e colaboradores (2013). O processo de inativação das enzimas, como o sapeco, é o contato direto da folha com uma chama, ou com ar aquecido, ou com o contato direto com a superfície quente da câmara de torra. Valduga e colaboradores (2019) sugerem um fluxo de massa para produção de folhas de café para uso em bebidas, Figura 2-9:

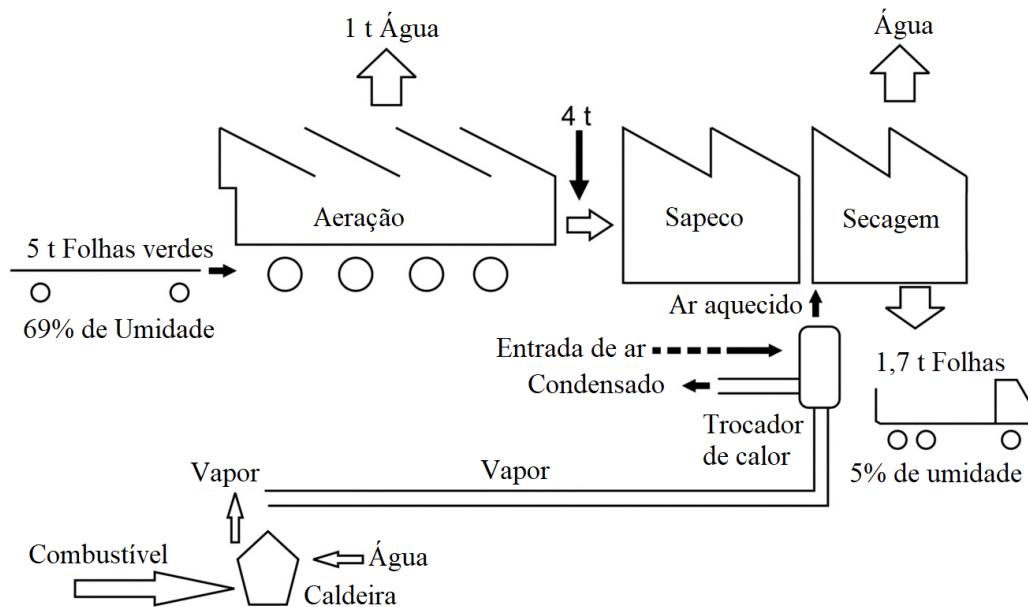


Figura 2-9 – Fluxo de massa para produção de folhas de café.

Fonte: (VALDUGA e colaboradores, 2019) adaptada.

Essa tecnologia pode oferecer potencial de exploração em relação ao processamento de folhas e flores de outras plantas.

## 2.8 Importância do Cultivo Sustentável de Café para Bebidas

Em seu trabalho, Caixeta e Pedini (2002) afirmam que uma produção é denominada orgânica não só porque utiliza intensamente matéria orgânica, animal e vegetal, como comumente é apresentado, ou conhecido, mas principalmente porque deve ser conduzida de modo semelhante à vida de um organismo vivo, que tem ritmos e limites naturais.

E, mais importante que controlar uma praga, em um cafezal, é saber se o manejo nutricional adotado pelo agricultor foi o responsável por seu aparecimento; conhecer as condições de trabalho dos funcionários da empresa; defender as relações comerciais transparentes como base da negociação dos produtos etc. Na Tabela 2-6, é apresentada uma sistematização dessas diferenças.

Tabela 2-6 – Comparação entre as formas convencional e orgânica de produção agrícola.

Característica	Agricultura	
	Convencional	Orgânica
<b>Objetivos Gerais</b>	Atender, de maneira geral, a interesses econômicos de curto prazo.	Atender a interesses econômicos, sobretudo, a interesses ecológicos e sociais autossustentados.
<b>Estrutura do Sistema</b>	Monocultura	Sistema diversificado
<b>Maneira de encarar o solo</b>	Como um substrato físico, basicamente como suporte para a planta.	Como um ser vivo (um meio eminentemente biológico).
<b>Recursos genéticos</b>	Redução da variabilidade; maior suscetibilidade ao meio; utilização de organismos geneticamente modificados (transgênicos), etc.	Adaptação ambiental; maior resistência ao meio.
<b>Adubação</b>	Fertilizantes altamente solúveis; adubação às vezes desequilibrante.	Reciclagem de nutrientes; uso de rochas moídas e materiais orgânicos.
<b>Como lidar com praga e doenças</b>	Uso intensivo de defensivos agrícolas.	Nutrição equilibrada e adequada; diversificação e consorciação; controles alternativos não contaminantes.
<b>Entradas do sistema</b>	Alto capital e consumo de energia; pouco trabalho.	Pouco capital e baixo consumo de energia; mais trabalho.
<b>Saídas do sistema e consequências</b>	Alimentos desbalanceados e contaminados; baixa valorização do produto; agressão ambiental.	Alimento de alto valor biológico; equilíbrio ecológico; alta valorização do produto; sustentabilidade do sistema.

Fonte: (CAIXETA e PEDINI, 2002).

Conforme Ehlers (1996), existem várias denominações para um sistema de produção ecologicamente equilibrado, ou, como conceituado, orgânico. Destacam-se ainda os diferentes conceitos, ou escolas, pontos a favor e os desafios existentes no processo de comercialização do café.

- i. **Agricultura Biodinâmica:** tem como significado o pensamento do filósofo austríaco Rudolf Steiner (1861-1925); salientou que, para uma boa sanidade das culturas vegetais, é necessária uma boa qualidade dos solos, visando a reestimar as forças naturais dos solos.

- ii. **Agricultura Orgânica:** entre os anos 1925 a 1930, o inglês Sir Albert Howard dirigiu uma pesquisa na Índia, sobre a compostagem e a adubação. Ressaltou a importância da utilização da matéria orgânica, nos processos produtivos, e mostrou que o solo não deve ser entendido apenas como um conjunto de substâncias, tendência proveniente da química analítica, pois nele ocorre uma série de processos vivos e dinâmicos, essenciais à saúde das plantas.
- iii. **Agricultura Biológica:** baseada nos conceitos de Hans Peter Müller e do médico Hans Peter Rush, que ampliaram os conceitos de Howard, preocupando-se com a economia dos produtores e com o sistema de comercialização direta dos produtos. Sugeriu que a agricultura deveria fazer uso de várias fontes de matéria orgânica, sejam do campo ou das cidades, integrando-se as propriedades agrícolas com as demais propriedades e com o conjunto de atividades socioeconômicas regionais.
- iv. **Agricultura Natural:** o princípio fundamental dessa é que as atividades agrícolas devem respeitar as leis da natureza. Com essa proposta, em 1938, o mestre Masanobu Fukuoka defendeu a ideia de que se deve aproveitar ao máximo os processos que já ocorrem espontaneamente na natureza, sem esforços desnecessários e desperdícios de energia. Os adeptos da agricultura natural limitam o uso de estercos, por serem impuros e adotam práticas, como a compostagem e a utilização de microrganismos, que auxiliam os processos de decomposição e melhoram a qualidade dos compostos.
- v. **Sistemas Organominerais:** sistema de produção que tem crescimento em volume, principalmente de café, denominado organomineral, ou SAT (sem agrotóxicos). Trata-se de um manejo onde o produtor elimina da propriedade toda e qualquer forma de aplicação de agrotóxicos, mas continua utilizando, por algum tempo, fertilizantes sintetizados quimicamente, proibidos pelas normas orgânicas.
- vi. **Agricultura Sustentável:** respeita o meio ambiente, do ponto de vista social, é justa e economicamente viável. E para ser considerada sustentável, a agricultura deve garantir, às gerações, a capacidade de suprimento das necessidades de produção e qualidade de vida das pessoas e no planeta (MAIA *et al.*, 2012).

Com base nesses tipos de produção agrícola, a procedência das folhas do café pode influenciar na qualidade do produto final, que é uma bebida do tipo chá.

## 2.9 COMPOSTOS FENÓLICOS DA FOLHA DO CAFÉ

Não é objetivo desse trabalho a determinação dos compostos fitoquímicos que compõem a folha do café e nem as perdas, ou mudanças que acontecem, durante a secagem, com esses compostos, mas, sim, estabelecer uma dinâmica de como processar as folhas do café, para produção de bebida do tipo chá.

O chá das folhas de café tem maior potencial antioxidante, menor cafeína e menor caule do que o chá tradicional (CAMPA; PETIVALLET, 2017). Segundo esses autores, essas folhas contêm compostos fenólicos que se assemelham aos das folhas da *Camellia sinensis*, portanto, os métodos para processar folhas de café podem alterar a composição fitoquímica e a bioatividade do produto final. Em seu trabalho, Samuchaya, Tzou-Chi e Jue-Liang (2019) apresentam uma tabela dos compostos fenólicos da folha de café e os efeitos da secagem à 30 °C, 40 °C e 50 °C, com esses compostos, Tabela 2-7.

Tabela 2-7 – Compostos fenólicos da folha de café, secas a 30 °C, 40 °C e 50 °C.

Composto	Folha fresca (mg/g)	Seca a 30 °C (mg/g)	Seca a 40 °C (mg/g)	Seca a 50 °C (mg/g)
<b>Catequina ou Epicatequina</b>	11,24	11,21	11,23	11,25
<b>Mangiferina ou Isomangiferina</b>	20,34	39,26	86,09	108,78
<b>Procianidina B</b>	17,40	29,86	41,16	57,70
<b>Ácidos cafeoilquímicos (CQA)</b>	14,00	15,31	18,17	20,23
<b>Cafeína</b>	79,79	160,83	301,66	361,93
<b>Quercetina-3-O-glucósido</b>	16,34	16,56	20,13	25,94
<b>Procianidina C</b>	88,18	115,26	178,16	351,07
<b>Rutina (isômero1 ou isômero2)</b>	23,76	25,15	28,69	39,75
<b>Ácido 3,4-dicafeoilquinóico (3,4-diCQA)</b>	11,37	16,01	16,35	18,82

Fonte: (SAMUCHAYA, TZOU-CHI e JUE-LIANG, 2019) adaptada.

Conforme Domingues e colaboradores (2012), as folhas de café contêm vários fitoquímicos específicos e incluem alcalóides, flavonóides, terpenóides, taninos, xantonóides, ácidos fenólicos e catequinas.

Um composto fenólico com função ácida, que confere cor verde ao meio aquoso quando em meio levemente alcalino e exposto ao ar, é conhecido como Ácido Clorogênico (ACG). Bastos de Maria e Moreira (2004), em suas pesquisas, apresentam os principais métodos de

determinação para análise do ACG; e Rodríguez-Gómez *et al.* (2018) determinam os três principais Ácidos Clorogênicos em extratos de folha de café, Figura 2-10:

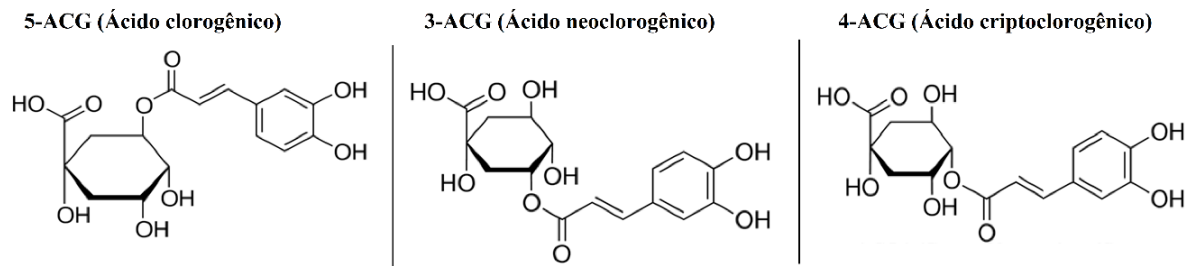


Figura 2-10 – Principais ácidos clorogênicos da folha de café.  
Fonte: (RODRÍGUEZ-GÓMEZ *et al.*, 2018) adaptada.

Segundo Garambone e Rosa (2008), os estudos sugerem que o ACG tem ação benéfica, na redução da hipertensão, no estresse oxidativo e se apresenta como um potente antioxidante.

## 2.10 PRODUÇÃO DE CAFÉ NA REGIÃO DO TRIÂNGULO MINEIRO E DO ALTO PARANAÍBA

As regiões do Triângulo Mineiro, do Alto Paranaíba e do Noroeste mineiro, Figuras 2-11 e 2-12, são responsáveis, juntas, por uma área de 169.867 ha de plantio e uma produção de 21,54 sc/ha, no ano de 2017, segundo o boletim da Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB (2014) e ABIC (2018).

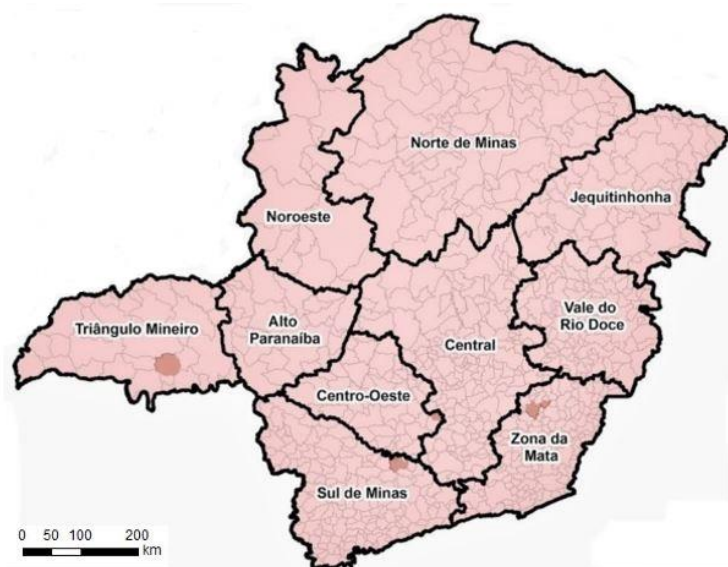


Figura 2-11 – Divisão das Regiões no estado de Minas Gerais.  
Fonte: (ALMG, 2018).

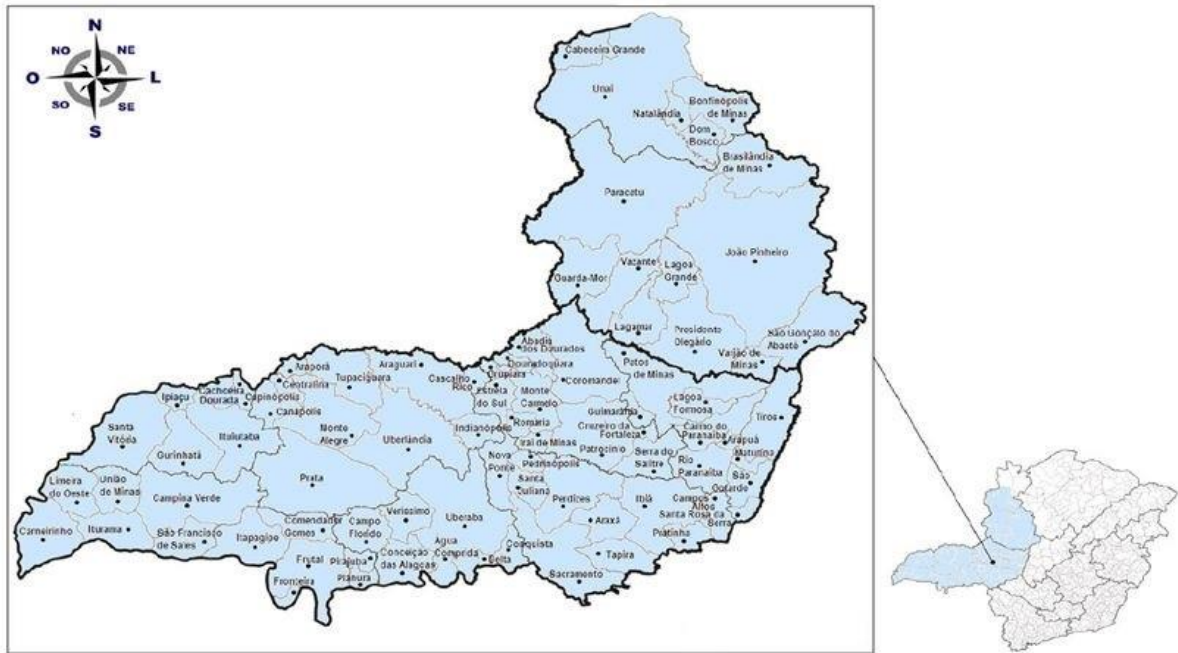


Figura 2-12 – Região do Triângulo Mineiro, Alto Paranaíba e Noroeste.  
Fonte: (ALMG, 2018).

Por serem regiões de grande produção de café, apresentam maior potencial na produção de folhas. Oliveira *et al.* (2007), citando Silva *et al.* (2003) com duas passadas da colhedora, ocorre um maior brotamento ortotrópico, não se verificando influência na produtividade da lavoura. Ou seja, o aproveitamento das folhas, da desfolha, ou da sua poda, para a produção do chá, não prejudica a produtividade da lavoura.



### 3.0 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, estão descritas as metodologias da coleta do vegetal, o ajuste do torrador para determinação dos parâmetros da torra das folhas, as diferentes condições de torra, a análise da inativação das enzimas e as condições de estudo da curva de equilíbrio.

#### 3.1 COLETA DAS FOLHAS DO CAFEIEIRO

As folhas de café foram obtidas de fazendas produtoras entre os municípios de Araxá e Perdizes-MG (região do Alto Paranaíba), preferencialmente provenientes de cultivo sustentável. Foram utilizadas folhas de café “Cultivar Arábica Tipo Catuaí 144 Vermelho”. É apresentado, na Figura 3-1, um ramo com seu fruto e folhas. As folhas são provenientes de indivíduos com idade média de 25 anos.



Figura 3-1 – Ramo de café com folhas e frutos usados no experimento.  
Fonte: do autor CAVALLARO (2019).

Figura 3-2 – planta de porte baixo, internódios curtos, ramificação com secundária abundante, frutos vermelhos de maturação média a tardia, sementes de tamanho médio de acordo com o Instituto Agrônômico de Campinas – IAC (2018):



Figura 3-2 – Cafeeiro adulto.  
Fonte: do autor CAVALLARO (2019).

As folhas foram colhidas seguindo a metodologia de amostragem foliar conforme Trani *et al* (1983), Scivittaro e Oliveira (2014), obtendo-se folhas com pecíolo, posicionadas no terceiro par, a partir do ápice dos ramos, na altura média do cafeeiro, como mostrado na Figura 3-3, no período da frutificação, nos meses de julho a setembro. Foram coletados os ramos para preservar a umidade das folhas no transporte.

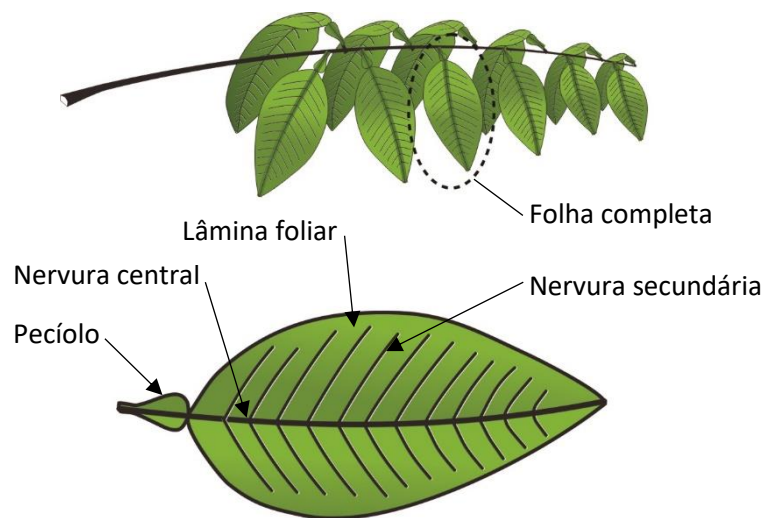


Figura 3-3 – Identificação do terceiro Par e Folha com Pecíolo.  
Fonte: (SCIVITTARO e OLIVEIRA, 2014) modificada.

Para a coleta das folhas, no cafeeiro, foi utilizada tesoura de poda. Os ramos posteriormente acondicionados em saco de papel envolto por saco plástico (PEBD – polietileno de baixa densidade, transparente, boa durabilidade, resistência química elevada, impermeável, facilmente processável, atóxico, inodoro e inerte) para manter a umidade no momento da coleta, identificando as amostras com o nome do produtor, data e horário da coleta. Procuraram-se, para coleta das amostras, as plantas que apresentavam aspectos mais saudáveis e distantes de estradas e rodovias, para evitar folhas com acúmulo de poeira. A colheita aconteceu, no período da manhã, nas primeiras horas de trabalho do pessoal da fazenda. O corte seguiu a recomendação conforme Trani *et al.* (1983), Scivittaro e Oliveira (2014).

Após a coleta, os ramos com as folhas foram acondicionados em caixa térmica, com gelo artificial, na temperatura de 5 °C, e transportados até o laboratório de processos químicos da UNIUBE – Universidade de Uberaba, na cidade de Uberaba-MG, onde os experimentos foram conduzidos. As folhas completas, com pecíolo, foram retiradas dos caules, no momento do processamento.

### **3.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS**

Para a realização dos experimentos de processamento das folhas de café, foram utilizados um torrador rotativo e um secador de bandejas com circulação forçada de ar.

#### **3.2.1 Torrador rotativo**

Para a etapa de inativação enzimática (torra), foi utilizado um torrador rotativo de um cilindro, contendo um moinho acoplado. Torrador CARMOMAQ, modelo TP1, potência 1/3 CV, motor IV polos monofásico 220V-60Hz, consumo de GLP 0,11 kg/h, com capacidade de até 300 gramas de café cru, temperatura até 300 °C, contendo sistema de resfriamento do material inativado, termômetro analógico acoplado na proteção superior do cilindro rotativo, fabricado em aço inoxidável, com tampa frontal em ferro fundido, abertura para o fluxo de ar e resfriamento rápido através de exaustor, na parte inferior do equipamento.

Na Figura 3-4, tem-se uma visão geral do torrador rotativo que foi utilizado para os experimentos.

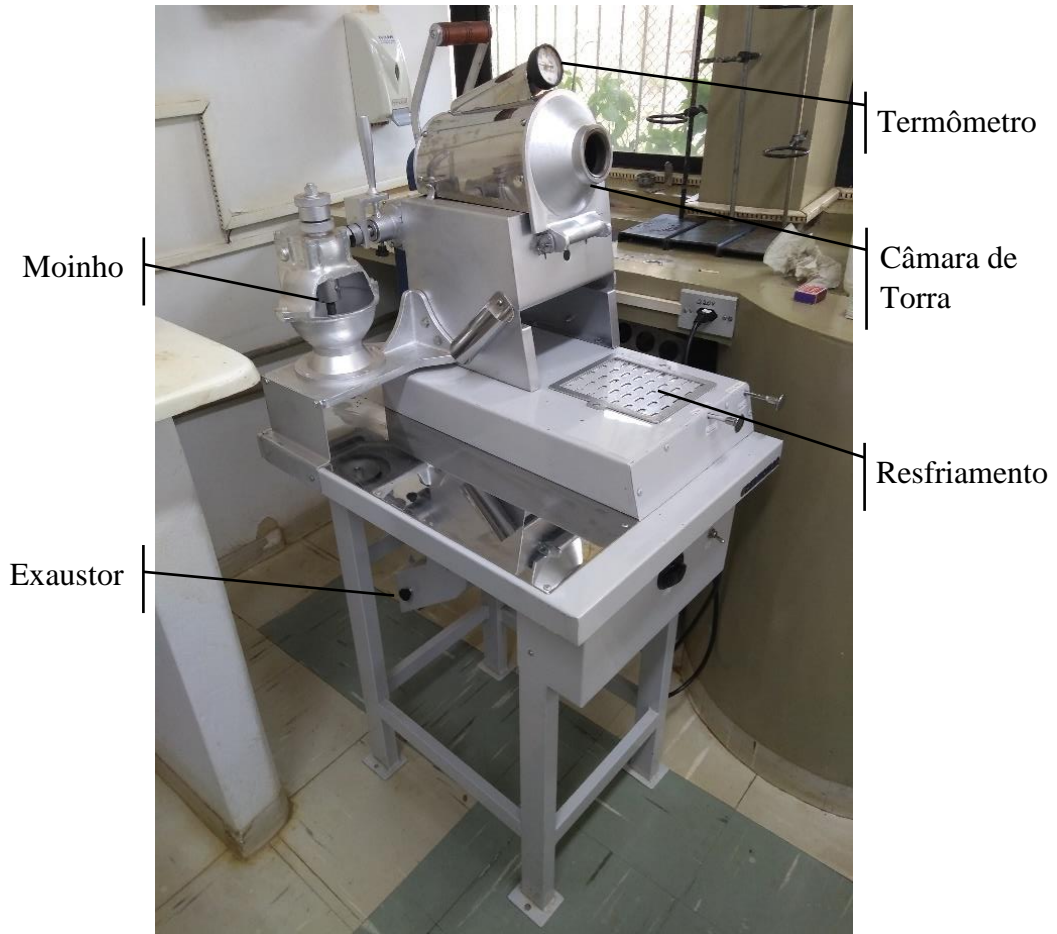


Figura 3-4 – Torrador CARMOMAQ instalado no laboratório.  
Fonte: do autor CAVALLARO (2018).

### 3.2.2 Balança de Precisão

Balança semianalítica modelo BG 400, fabricante GEHAKA, carga máxima 404 g, resolução de 0,001 g, dimensão do prato diâmetro 110 mm.

### 3.2.3 Estufa de secagem com circulação de ar

Estufa de secagem com circulação/renovação de ar para produtos vegetais que necessitam de ação moderada de temperatura, reduzindo os riscos de modificar princípios ativos, durante secagem, melhorando a eficiência através de processo com circulação e renovação de ar; com controlador de temperatura de até 200 °C, termostato de segurança (MARCONI, 2018).

Na Figura 3-5 tem-se uma visão geral da estufa de secagem.



Figura 3-5 – Estufa de secagem MARCONI.

Fonte: Laboratório de Farmacognosia e Engenharias – UNIUBE (2019).

### 3.3 DETERMINAÇÃO DA CURVA DE EQUILÍBRIO DA SECAGEM E DA MASSA DE ÁGUA PERDIDA

Para determinar a massa de água perdida, inicialmente foi determinada a massa de cada uma das folhas frescas, antes e após a torra, em balança analítica. A massa de água é a diferença da massa da folha fresca subtraída a massa da folha após a torra, Equação (3.9):

$$m_a = m_{FF} - m_{FT} \quad (3.9)$$

#### Determinação da curva de equilíbrio da secagem

Inicialmente foram determinados os teores de umidade das folhas de café.

Em estufa, com circulação de ar forçado, foram separadas 30 (trinta) folhas frescas, pesadas e identificadas. Após pesagem e registro fotográfico das folhas frescas, foram dispostas as folhas, em bandejas de aço inoxidável, e mantidas à temperatura de 40 °C, por período de 60 horas, e em seguida pesadas. Este procedimento foi repetido até obtenção de peso constante de cada folha (BRASIL, 2010). Em seguida, as folhas foram secas a 60 °C, 80 °C e 105 °C

(conforme o procedimento anteriormente descrito), em estufa de circulação de ar forçado. Para cada temperatura de secagem foram feitos os registros das massas e de imagem a cada 24 horas.

A perda de água das folhas  $X_W$  foi determinada através da Equação (3.10),

$$X_W = \frac{m_{105} - m_a}{m_{105}} \quad (3.10)$$

sendo,  $m_{105}$  a massa de água das folhas secas a 105 °C e  $m_a$  a massa de água das folhas em determinada temperatura.

Pode também ser obtida pela Equação (3.11),

$$X_W = \frac{1 - (m_a - m_{FT})}{m_a} \quad (3.11)$$

onde  $m_{FT}$  é a massa da folha torrada a uma determinada temperatura.

### 3.4 DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE IDEAL DE FOLHAS, NA CÂMARA DO TORRADOR

Para identificar a maior quantidade de folhas que movimentam livremente dentro da câmara do torrador em rotação, foram realizados testes com quantidades de 10, de 15 e de 20 folhas, com o torrador operando em temperatura ambiente. As quantidades que apresentaram melhor comportamento, dentro da câmara, foram as quantidades de 10 e de 15 folhas, com movimentos livres; a quantidade de 20 folhas, durante o movimento de giro, teve o comportamento de movimentos em blocos, que pode dificultar a torra das folhas de forma homogênea. A capacidade do torrador, em massa de folhas de café é inferior à de grãos, devido ao maior volume ocupado pelas folhas, dentro da câmara de torra.

### 3.5 DADOS DA CÂMARA DE TORRA

Para determinar a rotação da câmara de torra, foi utilizado um tacômetro digital a laser, modelo DT-2234C, do fabricante Digital Meter, Figura 3-6:



Figura 3-6 – Tacômetro Digital.

O procedimento de medição da rotação foi realizado com o marcador, na entrada de alimentação da câmara, conforme recomendações do fabricante, e foi registrado 36,7 RPM. A determinação do volume da câmara de torra, segundo Cavallaro *et al.* (2018), é de 3.290,40 cm<sup>3</sup>.

### 3.6 IDENTIFICAÇÃO E PESAGEM DAS FOLHAS ANTES E APÓS A TORRA

Para cada sequência do experimento de torra, as folhas foram separadas aleatoriamente do caule, em quantidades necessárias para o experimento, identificadas com números e pesadas isoladamente, à temperatura ambiente, no laboratório, depois fotografadas em contraste de fundo escuro e claro, na face superior e na face inferior das folhas. As massas das folhas, antes e após a torra, foram registradas, conforme o experimento realizado.

### 3.7 ANÁLISE COLORIMÉTRICA COM GUAIACOL

A reação colorimétrica com guaiacol foi realizada em folhas frescas de café a fim de verificar a inativação enzimática, que tem por finalidade evitar o escurecimento e a liberação de sabor não desejável (FINZER *et al.*, 2018). Foi utilizada a metodologia descrita por Clerici e colaboradores (2014), modificada, adequada às condições exigidas pela folha de café. A enzima peroxidase é considerada mais resistente ao calor, de modo que, quando inativada, certamente outras enzimas também são inativadas (FINZER *et al.*, 2013).

### Teste Qualitativo com Guaiacol

**Preparo do Reagente:** A solução de guaiacol a 1% (v/v) foi preparada com 0,5 mL do reagente guaiacol (NEON<sup>®</sup>) diluído em água Milli-Q (água obtida por osmose reversa e filtrada em filtro 0,22  $\mu\text{m}$ ), em balão volumétrico de 50 mL, seguido de homogeneização por 10 min. O peróxido de hidrogênio utilizado foi H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 10 vol FARMAX<sup>®</sup>.

**Preparo do Macerado Vegetal:** uma folha de café inteira completa e desenvolvida, fresca ou processada no torrador, cerca de 0,4 – 0,6 g de massa, foi macerada na presença de 5 mL de água Milli-Q (medida com pipeta volumétrica), em gral de vidro, por 1 min e 45s, seguido de filtração, Figura 3-7. O teste com o Guaiacol é realizado no filtrado (MACIEL; GOUVÊA; PASTORE, 2007).



Figura 3-7 – Preparo do macerado vegetal em meio aquoso.  
Fonte: do autor CAVALLARO (2019).

**Teste com Reagente:** 2 gotas de solução Guaiacol 1% em presença de 2 mL de água Milli-Q e 2 gotas de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, seguido de homogeneização por 10s, não desenvolve coloração, permanecendo límpida e transparente a mistura.

A substituição da água Milli-Q por 2 mL de: **a)** macerado vegetal aquoso contendo enzimas e sem reagente, **b)** com reagente desenvolve coloração castanho claro, **c)** marrom escuro e **d)** castanho escuro, Figura 3-8:



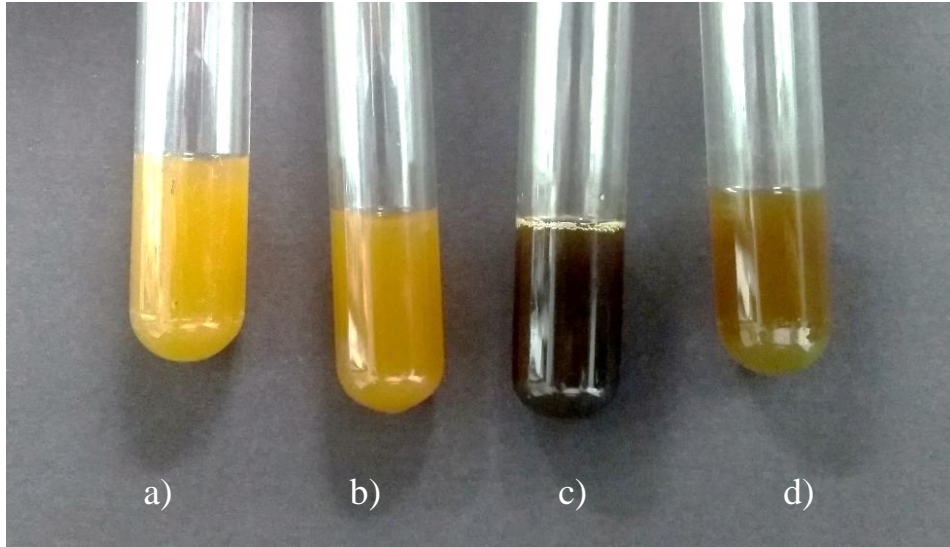


Figura 3-8 – Macerado aquoso, a) sem reagente, b) com reagente coloração castanho claro, c) marrom escuro e d) castanho escuro.

Fonte: do autor CAVALLARO (2019).

A reação é observada após 5, 10 e 15min da mistura homogeneizada com o reagente. O desenvolvimento da coloração é considerado reação positiva. A ausência de enzimas não altera a coloração do macerado, após adição da solução Guaiacol 1% e  $H_2O_2$ . A Figura 3-9 representa a reação do Guaiacol sobre a enzima peroxidase (POD) em presença do  $H_2O_2$ .

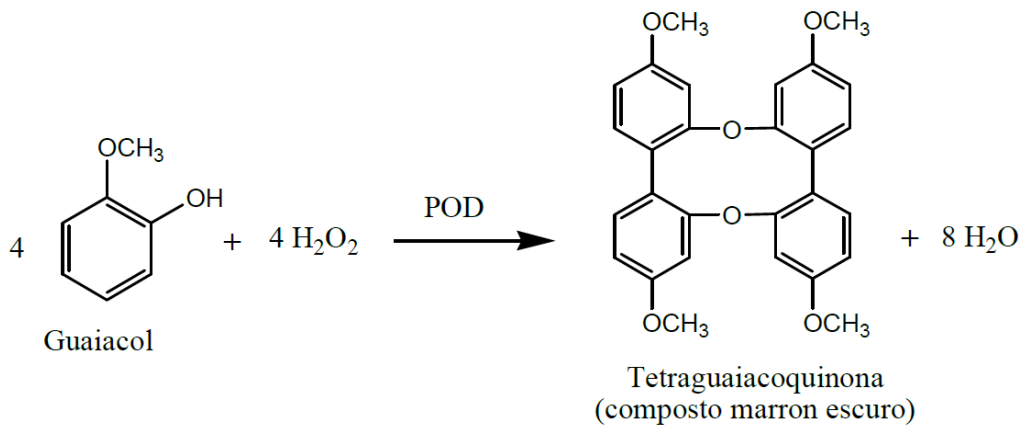


Figura 3-9 - Reação do Guaiacol com a  $H_2O_2$  catalisada pela enzima peroxidase.

Fonte: (CLERICI *et al.*, 2014).

### 3.8 PROCEDIMENTO/PROCESSAMENTO DA TORRA

Durante a etapa de torra das folhas, pode-se observar um encolhimento. À medida que ocorre a perda de umidade, ocasionada pela transferência de massa, também se observa que as folhas ficam mais crocantes e quebradiças, exigindo maior cuidado no manuseio.

Os testes realizados, inserindo as folhas individualmente no torrador, tiveram um acréscimo, em média, de 25,6 segundos, explicado mais adiante, no processamento, em relação aos testes com as folhas inseridas em grupos para obter a mesma resposta de torra, ou seja, curva de inativação enzimática pelo processo de torra, como descrito a seguir. Para manter uma uniformidade do experimento e adotar uma metodologia de trabalho, respeitando todas as etapas do processo da torra, desde a colheita das folhas, foi adotado o fluxograma mostrado na Figura 3-10.

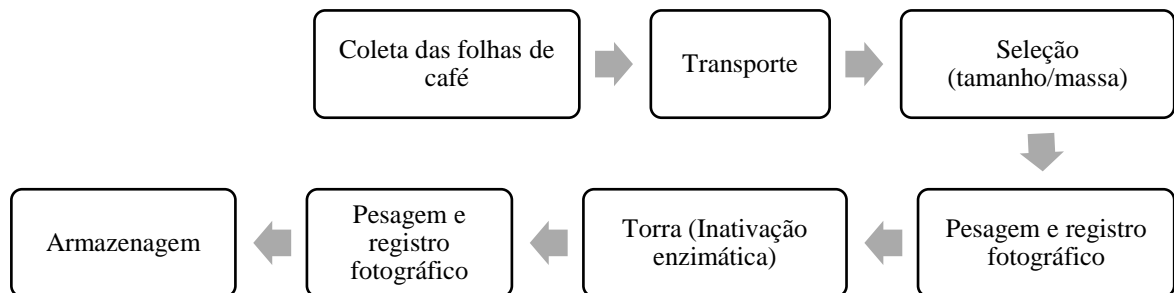


Figura 3-10 – Etapas do estudo da torra de folhas de café.  
Fonte: do autor CAVALLARO (2019).

Para a etapa de torra, no torrador rotativo, foram adotadas duas metodologias de inserção das folhas, sendo o primeiro método com a inserção em sequência de 10 (dez) folhas uma após a outra. O outro método foi a inserção de quantidade de 10 (dez) folhas simultaneamente, que mais se aproxima de processos em batelada, ou industriais.

### 3.9 PROCEDIMENTO PARA FUNCIONAMENTO DO TORRADOR

O inativador (torrador rotativo) é um equipamento bastante simples de operar, no entanto, para evitar resultados distorcidos, durante a inativação enzimática, alguns procedimentos devem ser observados e praticados. Esta prática foi adotada, para garantir uma melhor padronização do experimento, Figura 3-11, e para executar o trabalho com segurança.

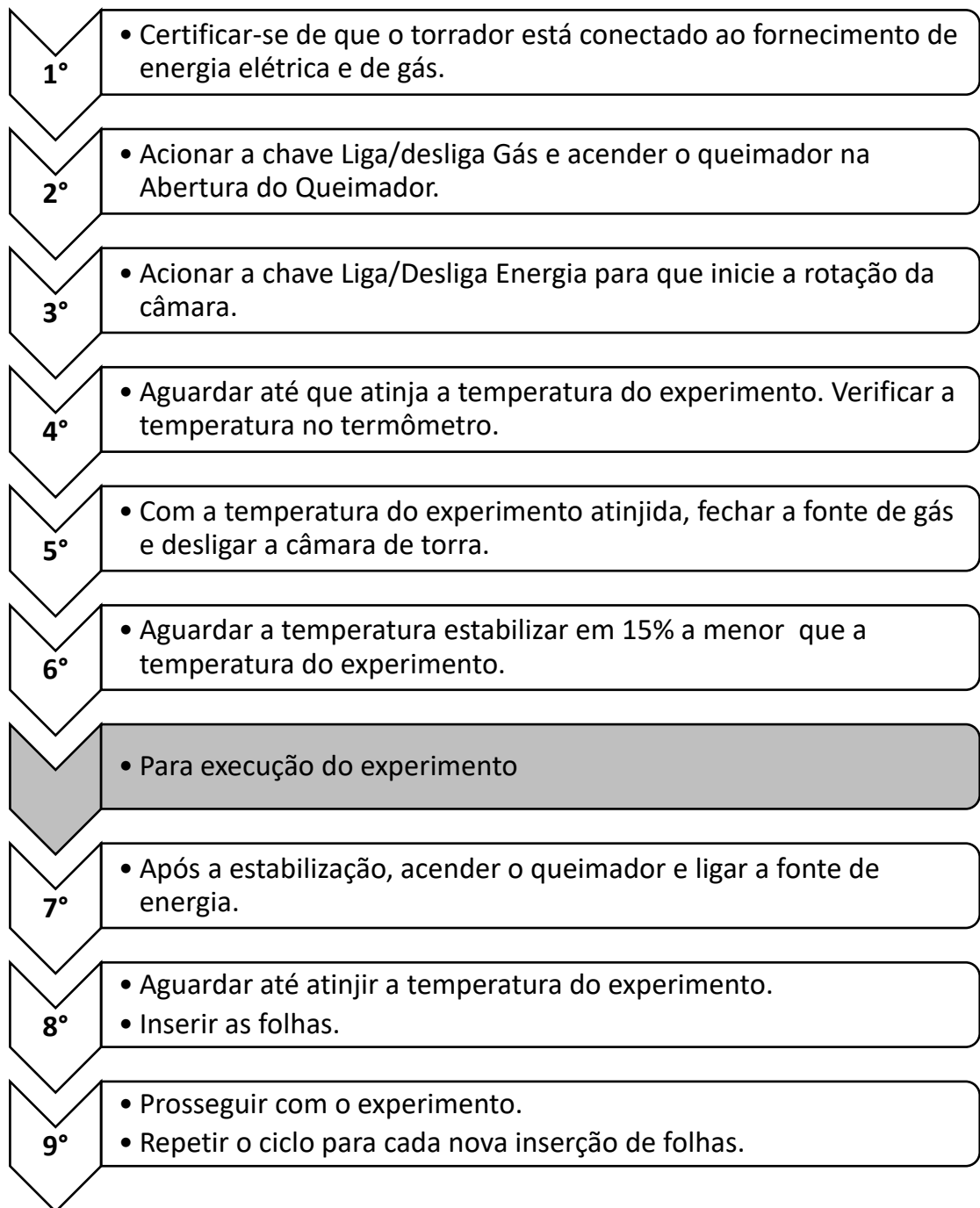


Figura 3-11 – Ciclo de operação do torrador rotativo.  
 Fonte: do autor CAVALLARO (2019).

### **Pontos de Comando do Torrador Rotativo**

Para facilitar a operação do torrador, foi identificado os pontos de comando e suas respectivas funções, Figura 3-12 e Tabela 3-1.

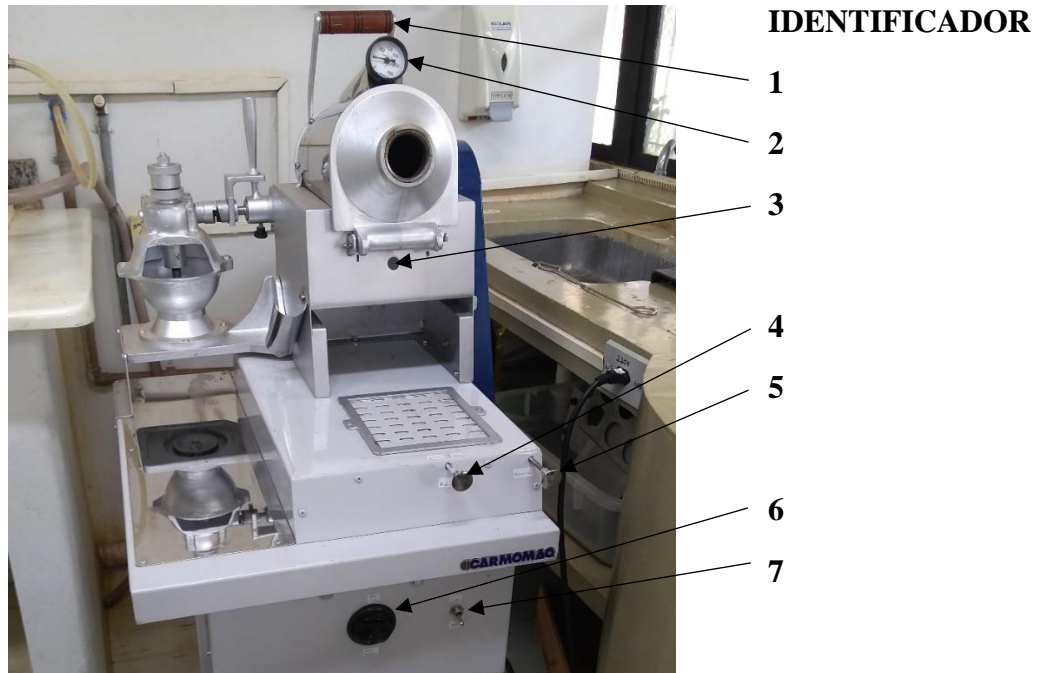


Figura 3-12 Pontos de comando do torrador.  
Fonte: do autor CAVALLARO (2019).

Tabela 3-1 – Pontos de comando do torrador e suas funções.

IDENTIFICADOR	COMANDO	FUNÇÃO
1	Chave Liga/Desliga Energia	Chave liga/desliga a câmara de torra e o exaustor.
2	Chave Liga/Desliga Gás	Chave liga/desliga liberando o gás para o queimador. Deve permanecer desligada quando não tem experimento.
3	Abertura do queimador	Local para inserção da chama (fósforo) para acender o queimador.
4	Abre/Fecha Exaustão	Alavanca que libera a janela de exaustão, aumentando ou diminuindo o fluxo do exaustor, para o resfriamento.
5	Abre/Fecha Resfriamento	Alavanca que libera a janela de resfriamento.
7	Alavanca de descarregamento	Alavanca que auxilia na inclinação do tambor para frente, e na retirada das amostras, após a torra. Deve permanecer travada durante o funcionamento da câmara.
8	Termômetro	Termômetro analógico para monitoramento da temperatura da câmara.

Fonte: do autor CAVALLARO (2019).

#### 4.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, estão os resultados e as discussões obtidos neste trabalho, relativo à condição ideal da torra de um grupo de folhas e sua influência na inativação enzimática, bem como a determinação da taxa de equilíbrio de secagem, visando a obter um produto final com qualidade para inserção no mercado de bebidas do tipo chá.

#### 4.1 TORRA DAS FOLHAS – AJUSTE DE PARÂMETROS DO TORRADOR

Para o ajuste do equipamento torrador e definição dos parâmetros a serem observados, um grupo de 10 (dez) folhas foram separadas procedendo à identificação e pesagem, conforme Figura 4-1, e aquecido o torrador, com a câmara de torra em funcionamento, até a temperatura de 75 °C, medida pelo termômetro instalado no equipamento. Após, foram inseridas as 10 (dez) folhas, uma a uma, e acionado o cronômetro, até o tempo de 2 (dois) minutos, depois de inserida a décima folha.



Figura 4-1 – Grupo de folhas para ajustes do torrador – Antes da Torra.  
Fonte: do autor CAVALLARO (2019).

Após esse tempo, foram retiradas do torrador e esfriadas, no próprio equipamento, em bandeja de aço inoxidável perfurada, Figura 4-2. Na Tabela 4-1, estão anotadas as massas, antes e após a torra das folhas que foram submetidas por tempo de 2 (dois) minutos à temperatura 75 °C, frisa-se.



Figura 4-2 – Grupo de folhas usadas no ajuste do torrador – Após torra.  
Fonte: do autor CAVALLARO (2019).

Tabela 4-1 – Massas úmida e seca das folhas, obtidas no ajuste de parâmetros do torrador.

Folha	Massa Úmida (g)	Massa Seca (g)
1	0,853	0,260
2	0,668	0,172
3	0,929	0,354
4	0,930	0,307
5	0,839	0,313
6	1,178	0,403
7	0,802	0,288
8	0,877	0,282
9	1,102	0,398
10	0,969	0,437
$\bar{m}$	$0,9147 \pm 0,139$	$0,3214 \pm 0,075$

Fonte: do autor CAVALLARO (2019).

## 4.2 CURVA DE EQUILÍBRIO DA SECAGEM

No estudo da curva de secagem das folhas de café, as temperaturas utilizadas no processo de secagem (40 °C, 60 °C, 80 °C e 105 °C) eliminam tanto a água do vegetal, como as substâncias voláteis nele presentes, como descrito na Farmacopeia Brasileira (BRASIL, 2010). Dentre as substâncias voláteis presentes nas folhas de café, Magalhães e colaboradores (2008) destacam: decanal, *trans*- $\beta$ -ocymene, (*E,E*)- $\alpha$ -farnesene, *p*-cymene, dodecane e 2-methylnonane.

Na Figura 4-3, estão os registros da sequência de secagem da folha de número 9, da cinética de secagem. No trabalho de Valduga (2002), sobre secagem de folhas de *Ilex paraguariensis* (erva-mate), com a torra em diferentes tempos, é observado que o aspecto visual das folhas muda de coloração e não apresentam enrugamento, ou torção.



Figura 4-3 – Sequência de secagem da folha 9: a) folha conforme colhida *in natura* 24 °C; b) em secagem a 40 °C; c) em secagem a 60 °C; d) em secagem a 80 °C, e e) em secagem a 105 °C.

Fonte: do autor CAVALLARO (2019).

Na Tabela 4-2, estão indicadas as massas das folhas após secagem, conforme cada temperatura. A soma das 30 (trinta) folhas frescas foi um total de 24,868 g base úmida. Parckert (2009), em seu trabalho com folhas de Nim, no processo de secagem, após realização da torra, encontrou o coeficiente de correlação  $R^2=0,9$ . No experimento com as folhas de café, os dados obtidos, estão na Tabela 4-2, e o coeficiente de correlação encontrado foi  $R^2=0,9993$  (Figura 4-4), que pode ser expresso por um polinômio de segundo grau. A Figura 4-4 representa a linha obtida através da secagem das folhas até massa constante.

Tabela 4-2 – Massa de matéria seca da folha de café.

Temperatura (°C)	Massa (g)	Xw (kg H <sub>2</sub> O/kg de folha seca)	Perda de Água (%)
40	8,686	0,0534	65,07
60	8,544	0,0361	65,64
80	8,421	0,0212	66,14
105	8,246	0,0000	66,84

Os resultados da coluna Xw (kg H<sub>2</sub>O/kg de folha seca) são calculados pela Equação (3.11). Para exemplificar o uso da equação, foram tomados os dados referentes a temperatura 40 °C:

$$X_w = \frac{8,246 \text{ g} - 8,686 \text{ g}}{8,246 \text{ g}}$$

$$X_w = 0,0534$$

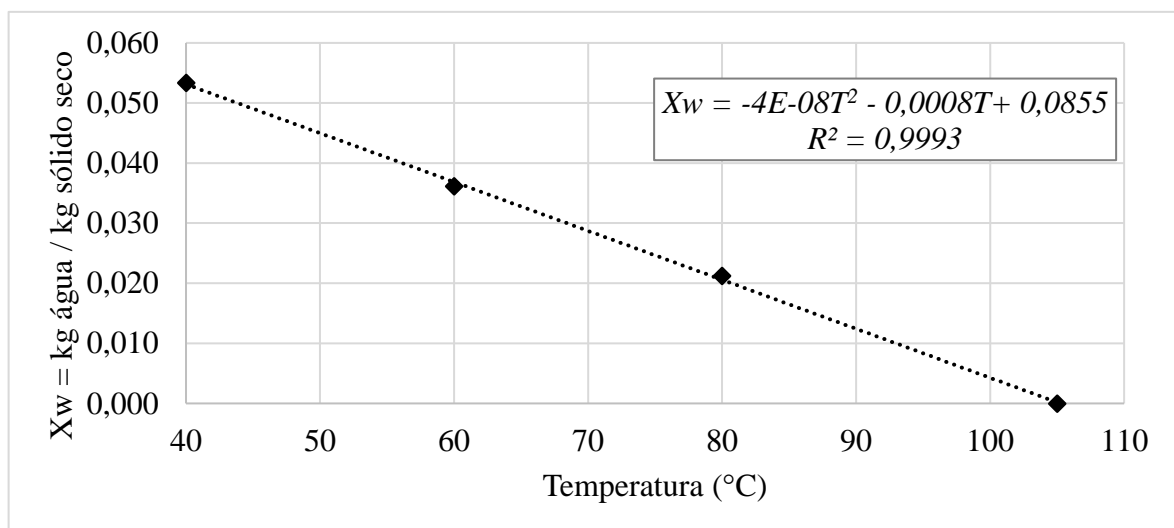


Figura 4-4 – Dados de equilíbrio de secagem das folhas de café.  
Fonte: do autor CAVALLARO (2018).

Conforme Brasil (2010), a secagem, para atingir o peso constante, deve prosseguir até que duas pesagens consecutivas não sejam diferentes em mais de 0,5 mg por grama da substância, e que a segunda pesagem seja realizada, após uma hora de secagem adicional, nas condições especificadas.

### **Inativação Enzimática – Folhas inseridas individualmente a 60 °C**

O experimento de torra foi iniciado com a separação dos grupos de 10 (dez) folhas, com equalização das massas, identificação, pesagem e o procedimento de aquecimento da câmara



de inativação. A sequência de inserção das folhas, na câmara, foi da maior para a menor. Essa prática foi adotada para evitar que as folhas menores, que têm menor volume, permanecessem mais tempo no torrador e perdessem, proporcionalmente, maior quantidade de água.

O tempo médio de inserção das folhas, individualmente, foi de 25,6 segundos, para os 8 (oito) grupos de folhas. Na Tabela 4-3, consta os tempos de inserção para cada grupo de folhas na cavidade do torrador. Ao atingir temperatura de 60 °C, foram inseridas as folhas uma a uma, sempre da maior para a menor e, ao final da inserção da décima folha, começou-se a quantificar o tempo de torra. Após o tempo determinado pelo experimento, desligou-se o torrador e retiraram-se as folhas, com auxílio de um tenaz e foram colocadas em bandeja perfurada, de aço inoxidável, onde foram resfriadas à temperatura ambiente, e feitos registros de imagens e pesagens.

Na tabela, são anotados os dados obtidos durante o experimento, representados graficamente pela Figura 4-7, que é a curva de torra das folhas que foram inseridas uma a uma no torrador. Da Figura 4-6 à Figura 4-9, são apresentadas algumas folhas, antes e após a torra, nos tempos 30 (trinta) e 180 (cento e oitenta) segundos.

Tabela 4-3 – Dados obtidos durante a torra – Folhas Inseridas Individualmente.

<b>Tempo (s)</b>	<b>Tempo de inserção (s)</b>	<b>Massa Úmida (g)</b>	<b>Massa Seca (g)</b>	<b>Xw (kg H<sub>2</sub>O/kg matéria seca)</b>
<b>30</b>	28	9,704	6,833	0,704
<b>60</b>	35	9,690	6,659	0,687
<b>90</b>	24	9,439	6,218	0,659
<b>105</b>	24	9,236	4,899	0,530
<b>120</b>	22	9,071	4,160	0,459
<b>135</b>	25	9,583	4,163	0,434
<b>150</b>	24	9,458	3,617	0,382
<b>180</b>	23	9,475	3,745	0,395

Os resultados da coluna Xw (kg H<sub>2</sub>O/kg de folha seca) são calculados pela Equação (3.11). Para exemplificar o uso da equação, foram tomados os dados referentes ao tempo de 30s.

$$X_W = 1 - \frac{(9,704 \text{ g} - 6,833 \text{ g})}{9,704 \text{ g}}$$

$$X_W = 0,704$$

Com os dados da Tabela 4-3, formatados na curva da Figura 4-5, obtém-se um coeficiente de correlação  $R^2 = 0,9722$  e é expresso por um polinômio.

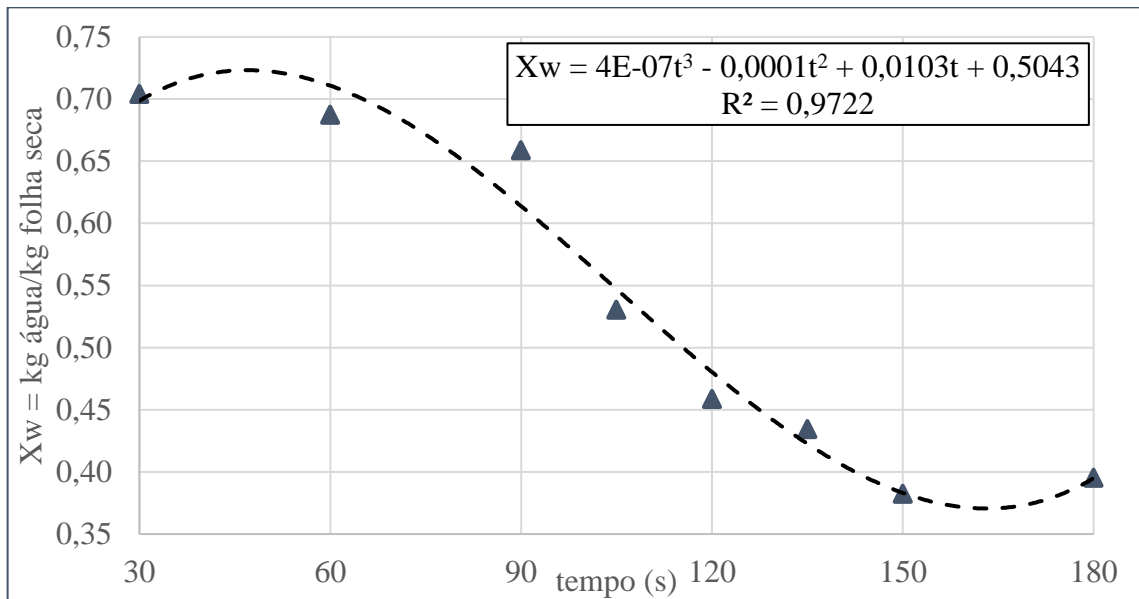


Figura 4-5 – Curva de inativação enzimática (torra) – Inserção individual das folhas a 60 °C.  
Fonte: do autor CAVALLARO (2018).



Figura 4-6 – Folhas *in natura*, antes dos 30s de torra, com inserção individual a 60 °C.  
Fonte: do autor CAVALLARO (2018).



Figura 4-7 – Folhas. Após os 30s de torra, com inserção individual a 60 °C.  
Fonte: do autor CAVALLARO (2018).



Figura 4-8 – Folhas in natura, antes dos 180s de torra, com inserção individual a 60 °C.  
Fonte: do autor CAVALLARO (2018).



Figura 4-9 – Folha, após os 180s de torra, com inserção individual a 60 °C.  
 Fonte: do autor CAVALLARO (2018).

### **Inativação Enzimática – Folhas Inseridas em Grupo**

Para esse experimento também foram separados os grupos de 10 (dez) folhas, com equalização das massas, mantendo a proximidade do primeiro método, identificação das folhas com números e, em sequência, o procedimento de aquecimento da câmara de inativação. Nessa metodologia, as 10 (dez) folhas foram inseridas, juntas, dentro do torrador e foi iniciada a contagem do tempo de torra. Nesse método não foi considerado o tempo de inserção das folhas, que é desprezível.

Após o tempo determinado pelo experimento, desligou-se o torrador e foram retiradas as folhas e resfriadas em uma bandeja de aço inoxidável, no próprio equipamento, depois levadas até a bancada para pesagem e registro fotográfico.

Na Tabela 4-4, foram anotados os dados obtidos durante o experimento e representados graficamente na Figura 4-10, que é a curva de torra das folhas que foram inseridas em grupo no

torrador. Da Figura 4-11 à Figura 4-14, são mostradas algumas folhas, antes e após a torra, nos tempos 30 (trinta) e 180 (cento e oitenta) segundos.

Tabela 4-4 – Dados obtidos durante a torra – Folhas Inseridas em Grupo.

Tempo (s)	Massa Úmida (g)	Massa Seca (g)	Xw (kg H <sub>2</sub> O / kg folha seca)
30	9,495	8,392	0,884
60	9,348	7,695	0,823
90	9,295	6,586	0,709
120	9,116	4,739	0,520
135	9,110	4,082	0,448
150	9,504	3,818	0,402
180	9,358	4,167	0,445
210	9,383	3,435	0,366

Os resultados da coluna Xw (kg H<sub>2</sub>O/kg de folha seca) são calculados pela Equação (3.11). Para exemplificar o uso da equação, foram tomados os dados referentes ao tempo de 30s.

$$X_w = 1 - \frac{(9,495 \text{ g} - 8,392 \text{ g})}{9,495 \text{ g}}$$

$$X_w = 0,884$$

Com os dados da Tabela 4-4, formatados na curva da Figura 4-10, o coeficiente de correlação  $R^2 = 0,9641$  e é expresso por um polinômio.

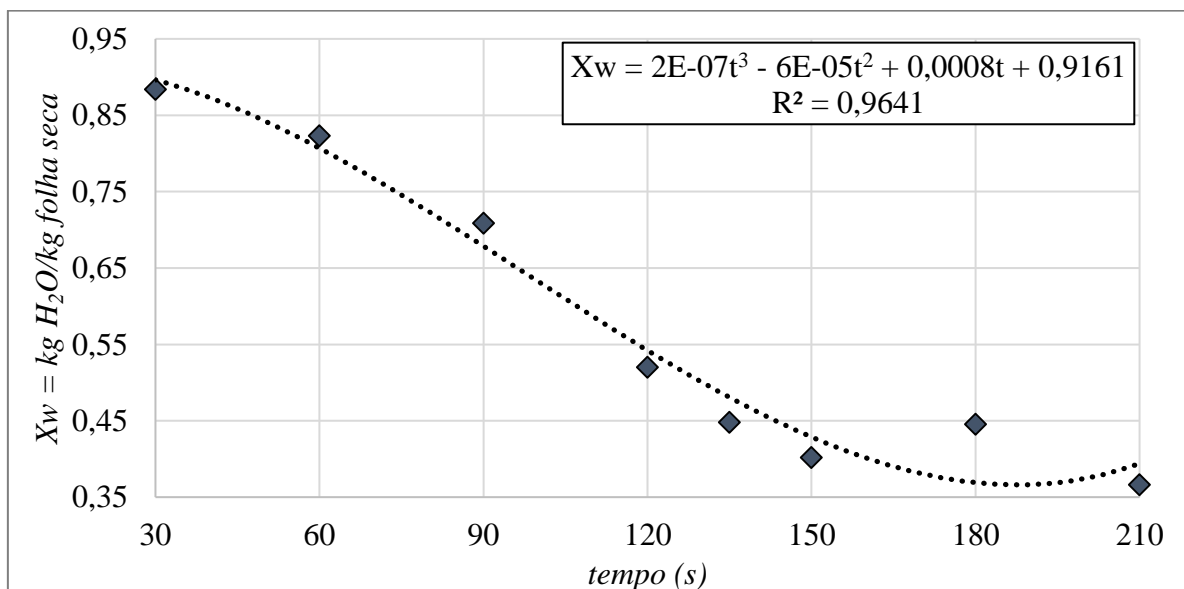


Figura 4-10 – Curva de torra – Folhas Inseridas em Grupos a 60 °C.  
Fonte: do autor CAVALLARO (2018).



Figura 4-11 – Folhas, antes dos 30s de torra, inseridas em Grupos a 60 °C.  
Fonte: do autor CAVALLARO (2018).



Figura 4-12 – Folhas. Após 30s de torra, inseridas em Grupos a 60 °C.  
Fonte: do autor CAVALLARO (2018).



Figura 4-13 – Folhas *in natura*, antes dos 180s de torra, inseridas em Grupos a 60 °C.  
Fonte: do autor CAVALLARO (2018).



Figura 4-14 – Folhas, após 180s de torra, inseridas em Grupo a 60 °C.  
Fonte: do autor CAVALLARO (2018).

### 4.3 EQUALIZAÇÃO DOS MÉTODOS DE INATIVAÇÃO ENZIMÁTICA

Comparando os valores de  $X_w$  e da umidade final dos dois métodos de torra, que são inserção das folhas individualmente e inserção das folhas em grupos, separando apenas os valores para os tempos comuns entre os métodos (Tabela 4-5), pode-se elaborar um gráfico comparativo, Figura 4-15, da umidade perdida em função do tempo.

Tabela 4-5 – Comparação da umidade perdida entre os dois métodos de inserção.

Tempo (s)	$X_w$ individuais (kg H <sub>2</sub> O/kg folhas secas)	Umidade perdida (%)	$X_w$ grupos (kg H <sub>2</sub> O/kg folhas secas)	Umidade perdida (%)
30	0,704	29,59	0,884	11,62
60	0,687	31,28	0,823	17,68
90	0,659	34,12	0,709	31,86
120	0,459	54,14	0,520	48,01
135	0,434	56,56	0,448	55,19
150	0,382	61,76	0,402	59,83
180	0,395	60,47	0,445	55,47

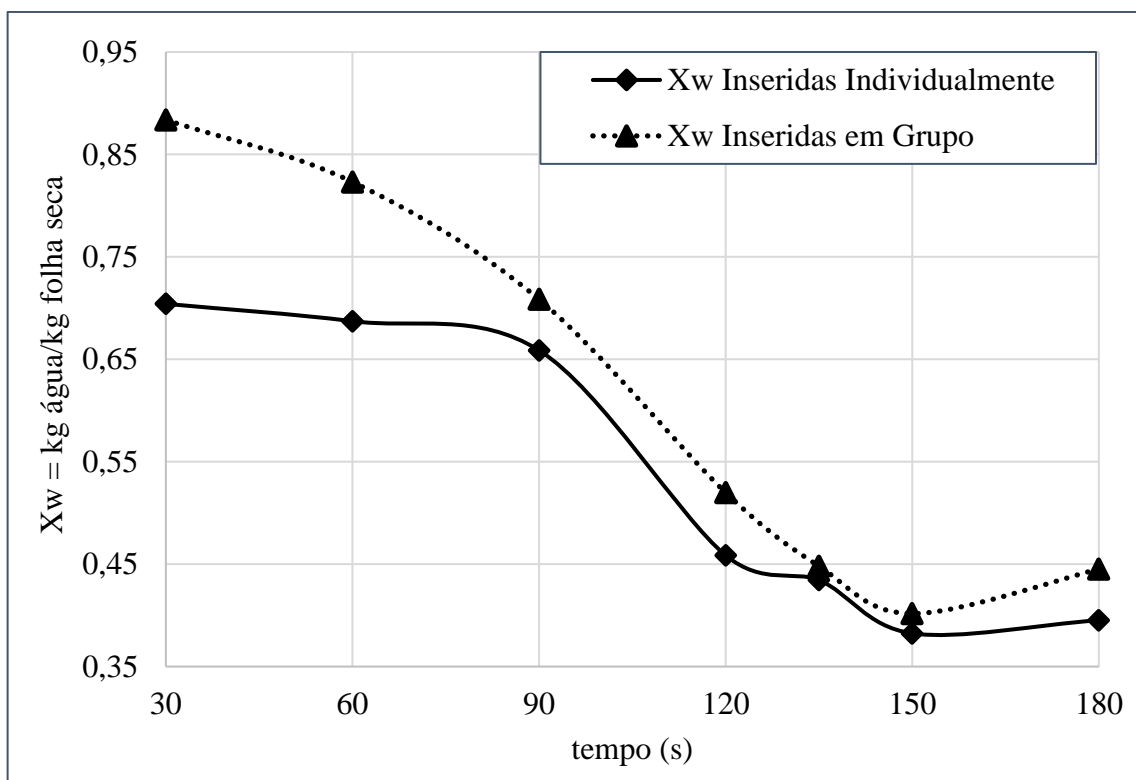


Figura 4-15 – Comparação da perda de umidade entre os dois métodos: inserção das folhas individualmente e em grupos, na cavidade do torrador.

Fonte: do autor CAVALLARO (2018).



É possível observar que, para o método de inserção das folhas em grupos, na câmara do torrador, como ocorre nos processos em escala industrial, desde o início a taxa de secagem é crescente, ocorrendo até o tempo de 180s. Após esse tempo, a taxa de secagem (o coeficiente angular) vai diminuindo gradativamente. Esse mesmo comportamento é observado no trabalho de Valduga (2002), no sapeco de folhas de mate, que promove a inativação enzimática semelhante ao processo de torra.

Nas folhas que passaram pelo processo de torra, com inserção individual, o comportamento da curva é diferente; até o tempo de 90s o coeficiente angular é pequeno e vai se acentuando após esse tempo, voltando a diminuir após o tempo de 180s.

#### 4.4 CARACTERÍSTICAS DAS FOLHAS APÓS A TORRA

Após passar pelo processo de torra, as folhas tiveram suas características avaliadas, quais sejam, a cor, a textura, o tamanho e outras, alteradas. Na Tabela 4-6, estão apresentadas as observações das folhas de café inseridas individualmente na cavidade do torrador.

Tabela 4-6 – Característica das Folhas Inseridas Individualmente, após a torra.

<b>Tempo (s)</b>	<b>Massa Inicial (g)</b>	<b>Massa após torra (g)</b>	<b>Xw (kg H<sub>2</sub>O/kg folhas secas)</b>	<b>Umidade perdida (%)</b>	<b>Características observadas nas folhas</b>
<b>30</b>	9,704	6,833	0,704	29,59	amolecidas
<b>60</b>	9,690	6,659	0,687	31,28	amolecidas, alguns pontos chamuscados
<b>90</b>	9,439	6,218	0,659	34,12	ainda amolecidas, com pontos chamuscados mais acentuados
<b>105</b>	9,236	4,899	0,530	46,96	ainda amolecidas e enrugadas
<b>120</b>	9,071	4,160	0,459	54,14	apresentam alguma rigidez e enrugadas
<b>135</b>	9,583	4,163	0,434	56,56	apresentam alguma rigidez, enrugadas e retorcidas
<b>150</b>	9,458	3,617	0,382	61,76	rigidez, enrugadas e retorcidas
<b>180</b>	9,475	3,745	0,395	60,47	rigidez acentuada, enrugadas e retorcidas

Fonte: do autor CAVALLARO (2019).

Na Tabela 4-7, estão apresentadas as observações das folhas de café, inseridas em grupos de 10 (dez), no torrador.

Tabela 4-7 – Característica das Folhas Inseridas em Grupos, após a torra.

Tempo (s)	Massa Inicial (g)	Massa após torra (g)	Xw (kg H <sub>2</sub> O/kg folhas secas)	Umidade perdida (%)	Características observadas nas folhas
30	9,495	8,392	0,884	11,62	amolecidas
60	9,348	7,695	0,823	17,68	amolecidas, alguns pontos chamuscados
90	9,295	6,586	0,709	31,86	amolecidas, alguns pontos chamuscados
120	9,116	4,739	0,520	48,01	Amolecidas, alguns pontos chamuscados e começam enrugar
135	9,110	4,082	0,448	55,19	apresentam alguma rigidez e enrugamento
150	9,504	3,818	0,402	59,83	apresentam alguma rigidez, enrugadas e retorcidas
180	9,358	4,167	0,445	55,47	rigidez, enrugadas, retorcidas e quebradiças

Fonte: do autor CAVALLARO (2019).

#### 4.5 ANALISE DE INATIVAÇÃO ENZIMÁTICA: TESTE GUAIACOL

No teste inicial do reagente, observou-se que, após 5, 10 e 15 min, não ocorreu mudança de coloração da água. No primeiro experimento, com a folha *in natura* fragmentada, em presença do ar, observou-se um filtrado de coloração escura, formação de bolhas, na parede do tubo de ensaio, e formação de halo, de altura 2 mm; no tubo, com reagente, mudança de cor para castanho escuro, Figura 4-16:

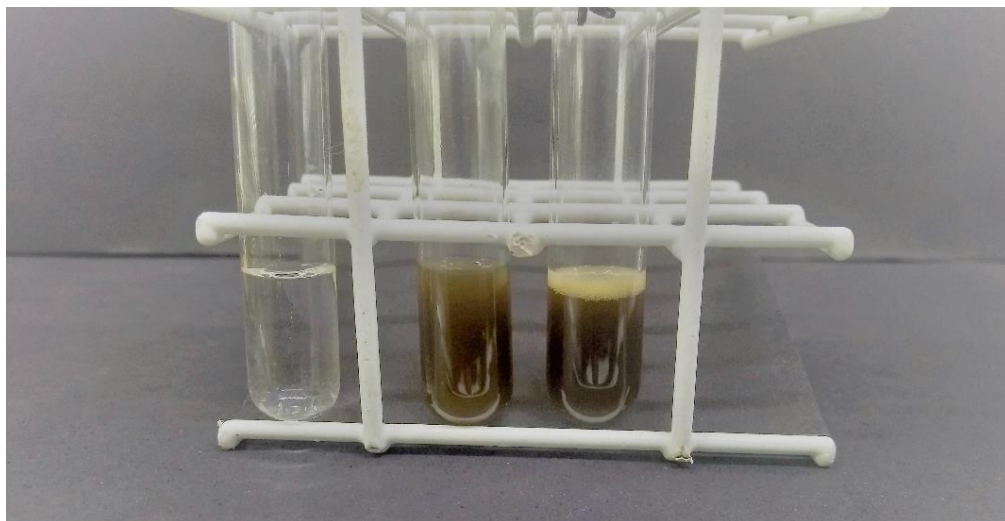


Figura 4-16 – Filtrado de coloração escura com formação de bolhas e halo.

Fonte: do autor CAVALLARO (2019).

No segundo experimento Figura 4-17, com a folha macerada durante 180s, imersa na água, observou-se um filtrado de coloração mais clara (folha 60 °C, 60s). No tubo, com reagente, ocorreu formação de halo, e mudança de cor para castanho escuro.

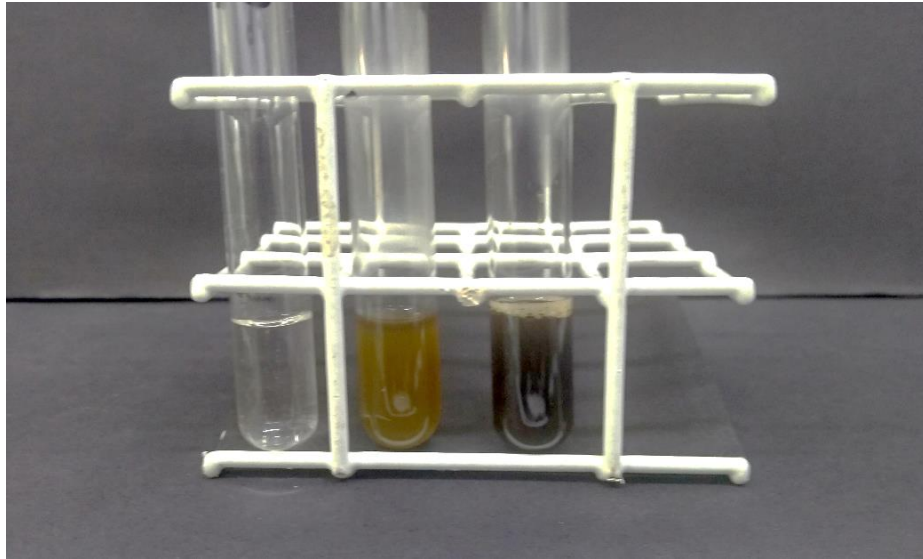


Figura 4-17 – Filtrado de coloração clara e reação para castanho avermelhado.  
Fonte: do autor CAVALLARO (2019).

No terceiro experimento, Figura 4-18, com a folha macerada, durante 1 min e 45s, imersa em água, observou-se um filtrado de coloração clara; no tubo, com reagente, ocorreu formação de halo acentuado, mudança de cor para castanho avermelhado.



Figura 4-18 – Filtrado de coloração clara e reação para castanho avermelhado com halo.  
Fonte: do autor CAVALLARO (2019).

No primeiro experimento, com folha torrada a 60 °C, no tempo 60s, observou-se um filtrado de coloração escuro, não ocorreu formação de bolhas, ou halo; após 5 min, foi possível identificar fraca mudança de coloração, no tubo com reagente, Figura 4-19:

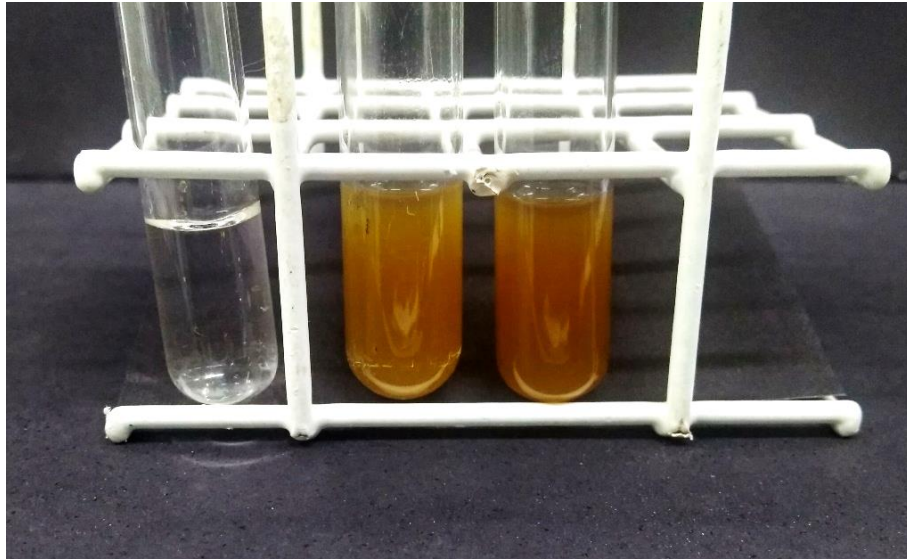


Figura 4-19 – Folha torrada a 60 °C, tempo 60s.  
Fonte: do autor CAVALLARO (2019).

No segundo experimento, com folha torrada a 60 °C, no tempo 180s, observou-se um filtrado de coloração mais claro que no primeiro experimento, Figura 4-20, formação de bolhas na parede do tubo, sem formação de halo; após 5 min, não foi identificado mudança de coloração do filtrado.

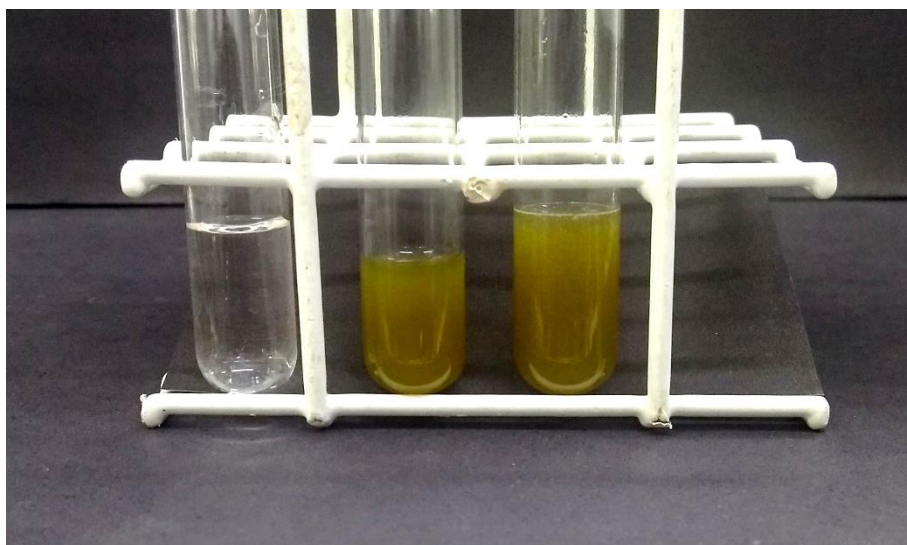


Figura 4-20 – Folha torrada a 60 °C, tempo 180s.  
Fonte: do autor CAVALLARO (2019).

No terceiro experimento, com folha torrada a 80 °C, no tempo 180s, observou-se um filtrado de coloração semelhante ao filtrado da folha torrada a 60 °C, Figura 4-21; não ocorreu formação de bolhas, na parede do tubo, e nem formação de halo. Após 5 min, não foi identificado mudança de coloração do filtrado, o que comprova que as enzimas foram inativadas.

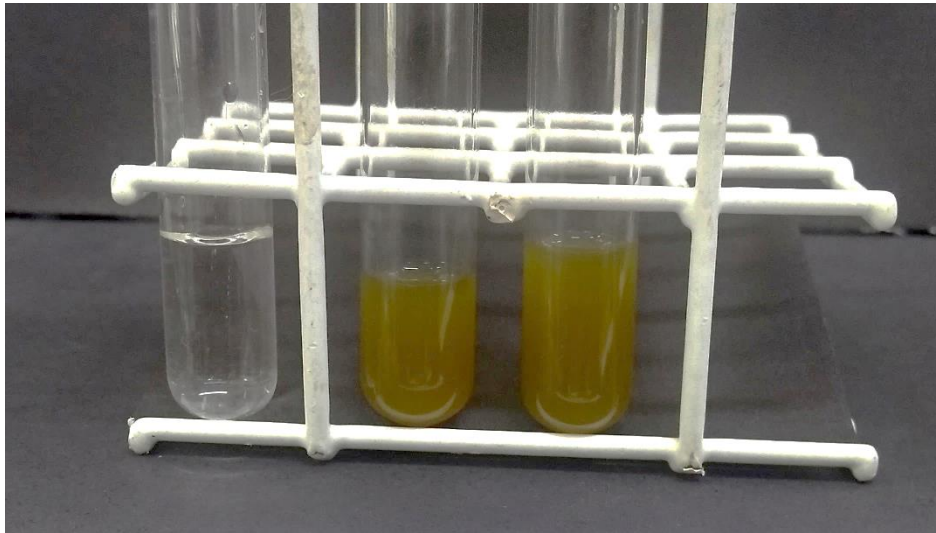


Figura 4-21 – Folha torrada a 80 °C, tempo 180s.  
Fonte: do autor CAVALLARO (2019).

## 5.0 CONCLUSÕES

Acredita-se que, com o presente estudo, após os trabalhos de processamento das folhas de café, aplicadas as tecnologias indicadas, possa-se contribuir, de forma abrangente, com as pesquisas referente aos processos de secagem, mais especificamente com a secagem de folhas para bebidas em forma de chás.

### i) Quanto à torra das folhas:

- as folhas, quando inseridas em grupos, no torrador, apresentam melhor aspecto de cor, sem apresentar sinais de chamuscado;
- as folhas torradas, no tempo 180s, apresentam alguma opacidade e início de coloração acastanhada (chamuscado);
- nas temperaturas de 90 °C, nos tempos acima de 120s, e de 100 °C, nos tempos acima de 105s, as folhas ficam mais crocantes e quebradiças;
- observa-se que o método de inserção de folhas em grupos é o que mais se assemelha aos processos industriais;
- observando o comportamento da curva de inativação enzimática (torra), o método de torra, com as folhas em grupos, pode ser otimizado prolongando o tempo da torra, antes do processo de secagem em estufa;
- o coeficiente de difusividade das folhas de café aumenta, com a elevação da temperatura, na câmara de torra;
- o aumento da temperatura, na câmara de torra, proporciona diminuição no tempo necessário para remover a água das folhas de café durante a torra.

### ii) Quanto à curva de equilíbrio:

- observa-se que a taxa de secagem é crescente, ocorrendo até o tempo de 150 (cento e cinquenta) segundos; após esse tempo, a taxa de secagem (coeficiente angular) se estabilizou com pequena diminuição em relação ao ponto mais alto da curva;

- a curva de equilíbrio da secagem apresentou coeficiente de correlação satisfatória, o que demonstra que os dados se ajustaram a uma reta.

### iii) Quanto ao teste com Guaiacol:

- no primeiro experimento, com folha fragmentada, a formação de bolhas e halo sugere liberação de oxigênio que não foi consumido pela reação do guaiacol utilizada;
- a fragmentação da folha, em presença do  $O_2$  (ar), reage quimicamente com os componentes da folha de café (rica em fenóis) e não possibilitou a reação com o guaiacol. A prática de fragmentação das folhas, em presença de  $O_2$  (ar), não é recomendada para detectar a presença da enzima Peroxidase;
- as folhas torradas a  $60\text{ }^\circ\text{C}$ , no tempo 60s – 120s, deu início à inativação enzimática, o que causa gosto de folha verde no produto;
- a inativação enzimática é eficiente em temperaturas acima de  $80\text{ }^\circ\text{C}$ .

## **6.0 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS**

- i)** Sugere-se a realização deste estudo com outras diferentes espécies de café cultivadas, a fim de verificar a aceitabilidade de aroma e sabor no mercado, a partir da metodologia aqui apresentada.
- ii)** Realizar ensaios de secagem com secador de esteira e com micro-ondas.
- iii)** Testar o processo de torra em diferentes velocidades da câmara de inativação (torrador).
- iv)** Aplicar outros modelos de secagem, como a Lei de Fick.
- v)** Avaliação da composição química das folhas de café, após a torra e secagem.
- vi)** Verificar se as folhas processadas, nesse trabalho, são capazes de gerar uma bebida de qualidade aceitável no mercado.



## 7.0 REFERÊNCIAS

- ABIC. Associação Brasileira da Indústria do Café, [SI]. Disponível em <http://abic.com.br/estatisticas/producao-agricola/>. Acessado em 21/08/2018.
- ALMG (Assembleia Legislativa de Minas Gerais). <[https://politicaspUBLICAS.almg.gov.br/temas/assistencia\\_social/dados\\_indicadores/dado\\_indicador2a.html?tagNivel1=199&tagAtual=199](https://politicaspUBLICAS.almg.gov.br/temas/assistencia_social/dados_indicadores/dado_indicador2a.html?tagNivel1=199&tagAtual=199)>. Acessado em 25/08/2018.
- ALTAY, K. Determination of the drying kinetics and energy efficiency of purple basil (*Ocimum basilicum* L.) leaves using different drying methods. **Heat & Mass Transfer**, v. 55, n. 8, p. 2173-2185, 2019.
- APEX. Agência Brasileira de Promoção de Exportações e Investimento. <<http://www.apexbrasil.com.br/Noticia/cha-e-a-bebida-mais-consumida-no-mundo>>, 2017. Acessado em 21/08/2018.
- ASHRAE. **ASHRAE Handbook 2001, Fundamentals**, cap. 6: Psychrometricis, p. 6.1-6.17, Atlanta: GA, 2001.
- BABU, A. K.; KUMARESAN, G.; RAJ, V. A. A.; VELRAJ, R. Review of leaf drying: Mechanism and influencing parameters, drying methods, nutrient preservation, and mathematical models. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 90, p. 536-556, 2018.
- BASTOS DE MARIA, C. A.; MOREIRA, R. F. A. Métodos para análise de ácido clorogênico. **Quim. Nova**, vol. 27, p. 586-592, 2004.
- BATALHA, M. O.; MING, L. C. **Plantas medicinais e aromáticas: um estudo de competitividade no estado de São Paulo**. São Paulo: SEBRAE, 2004. 240 p.
- BLACKADDER, D. A.; NEDDERMAN, R. M. **Manual de Operações Unitárias**. São Paulo: HEMUS, 2004. 276 p.
- BORGES, F. B. **Descrição da secagem convectiva de grãos de milho através de modelos difusivos**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campinas Grande, 2016. 147 p.
- BRASIL. **Farmacopeia Brasileira**. 5ª ed., v. 1, ANVISA, Brasília, 2010, 546 p.
- CAIXETA, I. F.; PEDINI, S. Cafeicultura orgânica: Conceitos e Princípios. **Informe Agropecuário**, v. 23, n. 214/215, p. 15-20, 2002.
- CAMPA, C.; PETIVALLET, A. **Achieving Sustainable Cultivation of Coffee. In Beneficial Compounds from Coffee Leaves**; Lashermes, P., Ed.; Burleigh Science Publishing: Sawston, UK, 2017. 15p.
- CAVALLARO, R. J.; BUCEK, E. U.; FINZER, J. R. D. **Análise da torra de folhas de café para uso em bebidas quentes**. In: Anais II Encontro de Desenvolvimento de Processos Agroindustriais, Uberaba, p. 1-8p, 2018.

- CELESTINO, S. M. C. **Princípios de Secagem de Alimentos**, Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2010. 51 p.
- ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**, 7ª ed., Porto Alegre: AMGH, 2013. 1048p.
- CHAVES, P. B. P.; SPROESSER, R. L. **Práticas de laboratório de análise sensorial de alimentos e bebidas**. Viçosa, UFV, 1999, 81 p.
- CLERICI, M. T. P. S.; SEBASTIÃO, R. H.; OLIVEIRA, L. C.; SANTOS, M. S.; MORAES, A. L. L.; CLARETO, S. S. Escurecimento enzimático: uma aula prática, **Revista de Ensino de Bioquímica**, v. 12, n. 2, p. 71-90, 2014.
- CONAB Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: café** – v. 1, n. 1, Brasília, 2014. 82 p.
- COSTA, E. C. **Secagem Industrial**. São Paulo, Blucher, 2007, 196 p.
- DOMINGUES, A. P.; SHIMIZU, M. M.; MOURA, J. C. M. S.; CATHARINO, R. R.; RAMOS, R. A.; MAZZAFERA, P. Looking for the Physiological Role of Anthocyanins in the Leaves of *Coffea arabica*. **Photochemistry and Photobiology**, v. 88, n. 4, p. 928-937, 2012.
- DOYMAZ, İ. Experimental study on drying of pear slices in a convective dryer. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 48, n. 9, p. 1909-1915, 2013.
- EHLERS, E. **Agricultura sustentável: origens e perspectivas de um novo paradigma**. São Paulo: Livros da Terra, 1996. 178 p.
- FALADE, K. O.; SOLADEMI, O. J. Modelling of air drying of fresh and blanched sweet potato slices. **International Journal of Food Science & Technology**, 45, n. 2, p. 278-288, 2010.
- FELLOWS, P. J. **Tecnologia do Processamento de Alimentos – Princípios e práticas**. 2ª ed., Porto Alegre: Artemed, 2006. 602 p.
- FINZER, J. R. D., VALDUGA, A. T., PARCKERT, E. D. T., FERREIRA, M. M. P. Processing Leaves for the Preparation of Beverages. **Food and Public Health**, v.7, p. 383–384, 2013.
- FINZER, J. R. D.; VALDUGA, A. T.; FERREIRA, M. M. P.; GONÇALVES, I. L. Beverages of coffee tree leaves. **J Anal Pharm Res**, v.7, p. 383–384, 2018.
- FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W., MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. **Princípios das Operações Unitárias**. Rio de Janeiro: LTC, 1982. 670 p.
- GARAMBONE, E.; ROSA, G. Possíveis benefícios do ácido clorogênico à saúde. **Alimentos e Nutrição**, v. 18, n. 2, p. 229-235, 2008.
- GUNEY, M. S.; TEPE, Y. Improving the Roasting Process and Efficiency of Hazelnut. **Advances in Food Sciences**, v. 38, n. 3, p. 109-116, 2016.
- HEWITT, R. J. **Coffee its history, cultivation and uses**. New York: D. Appleton and Company; 1872. 116 p.

- IAC (Instituto Agrônomo de Campinas). Disponível em <<http://www.iac.sp.gov.br/publicacoes/agronomico/cafe.php>>. Acessado em 08/07/2018.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Mass.** 7ª ed., Rio de Janeiro: LTC. 2008. 664 p.
- KAYA, A.; AYDIN, O. An experimental study on drying kinetics of some herbal leaves. **Energy Conversion and Management**, v. 50, n. 1, p. 118-124, 2009.
- KEEY, R. B. **Drying: Principles and Practice.** Pergamon Press Inc., 1972. 358 p.
- KUDRA, T.; MUJUMBAR, A. S. **Advanced Drying Technologie.** 2ª ed., New York, CRC Press, 2009. 455 p.
- LAND, C. M. **Industrial Drying Equipment – Selection and Application. Chemical industries.** v.45. Marcel Dekker, Inc. New York, 1991. 362 p.
- LIMA, R. A. B. **Análise da secagem convectiva de folhas de manjeriço (Ocimum basilicum L.).** Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. São Carlos: UFSCar, 2013. 169 p.
- LUZ, G. R. **Avaliação de estratégias de operação e de controle da secagem industrial do farelo de soja.** Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2016. 184 p.
- MACIEL, H. P. F.; GOUVÊA, C. M. C. P.; PASTORE, G. M. Extração e caracterização parcial de peroxidase de folhas de Copaifera langsdorffii Desf. **Food Science and Technology**, 27, n. 2, p. 221-225, 2007.
- MAGALHÃES, S. T. V.; GUEDES, R. N. C.; LIMA, E. R.; DEMUNER, A. J. Coffee leaf volatiles and egg laying by the coffee leaf miner *Leucoptera coffeella*. **Crop Protection**, 27, n. 6, p. 1038-1041, 2008.
- MAIA, G. B. da S.; PINTO, A. R.; DE CONTI, B. M. **Agricultura Sustentável, BNDES Setorial**, v. 36, p. 219-248, 2012.
- MARCONI. Disponível em <<http://www.marconi.com.br/>>. Acessado em 08/07/2018,
- McCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. **Unit Operations of Chemical Engineering.** 7ª ed. New York: McGraw-Hill, 2005. 1152 p.
- MUJUMDAR, A. S. **Principles, classification, and selection of dryers.** In: MUJUMDAR, A. S. (ed.). **Handbook of Industrial Drying.** 3ª ed. New York: Taylor & Francis, p. 4-32, 2006.
- MUJUMDAR, A. S., KROKIDA, M., MARINOS-KOURIS, D. **Handbook of Industrial Drying.** 3ª ed., CRC Press, 2006. 1312 p.
- NELLIS, G.; KLEIN, S. **Thermodynamics.** 1ª ed. Nova York: Cambridge University Press, 2012. 1072 p.

- NOVITA, R.; KASIM, A.; ANGGRAINI, T.; PUTRA, D. P. Kahwa daun: traditional knowledge of a coffee leaf herbal tea from West Sumatera, Indonesia. **Journal of Ethnic Foods**, v. 5, n. 4, p. 286-291, 2018.
- OLIVEIRA, E. D.; SILVA, F. M. D.; SOUZA, Z. M. D.; FIGUEIREDO, C. A. P. D. Influência da colheita mecanizada na produção cafeeira. **Ciência Rural**, v. 37, n. 5, p. 1466-1470, 10 2007.
- PARCKERT, E. D. T. **Processamento de Folhas de NIM: Inativação enzimática e secagem**. Dissertação de mestrado (Engenharia Química), UFU, Uberlândia, 2009. 79 p.
- PORTELLA, J. A.; EICHELBERG, L. **Secagem de Grãos**. 1ª ed. Passo Fundo. EMBRAPA Trigo, 2001. 194 p.
- REID, R. C.; PRAUSNITZ, J. M.; SHERWOOD, T. K. **The Properties of Gases and Liquids**. 5ª ed. New York, McGraw-Hill. 2001. 688 p.
- RODRÍGUEZ-GÓMEZ, R.; VANHEUVERZWJIN, J.; SOUARD, F.; DELPORTE, C.; STEVIGNY, C.; STOFFELEN, P.; BRAEKELEER, K. de; KAUFFMANN, J. M. Determination of Three Main Chlorogenic Acids in Water Extracts of Coffee Leaves by Liquid Chromatography Coupled to an Electrochemical Detector. **Antioxidants**, v. 7, n. 10, p. 143, 2018.
- SAMUCHAYA, N.; TZOU-CHI, H.; JUE-LIANG, H. Determination of Phenolic Compounds, Procyanidins, and Antioxidant Activity in Processed *Coffea arabica* L. Leaves. **Foods**, v. 8, n. 9, p. 389 (1-13), 2019.
- SCHULTZ, E. L. **Influência das condições de secagem sobre o encolhimento e propriedades de transporte em fatias de maçã**. Dissertação de Mestrado (Engenharia Química), UFSC, Florianópolis. 1999. 113 p.
- SCIVITTARO, W. B.; OLIVEIRA, R. P. **Procedimentos para Coleta de Amostras de Tecido Foliar e de Frutos**. EMBRAPA Clima Temperado, 2014. 3 p.
- SILVA, F. M.; SALVADOR, N.; RODRIGUES, R. F.; TOURINO, E. S. Avaliação da colheita do café totalmente mecanizada. **Engenharia Agrícola**, v. 23, n. 2, p. 309–315, 2003.
- TELIS, V. R. N; MAURO, M. A. **Operações Unitárias na Indústria de Alimentos**, Cap. 16 (Desidratação), 1ª ed., vol. 2, p. 78-148, Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- TORO, A. L. F.; KIL JIN, P. Métodos de seleção de secadores. **Food Science and Technology**, v. 25, n. 2, p. 208-216, 2005.
- TRANI, P. E.; HIROCE, R.; BATAGLIA, O. C. **Análise foliar: amostragem e interpretação**. Campinas, Fundação Cargil. 1983. 18 p.
- TREYBAL, R. E. **Mass Transfer Operations**. 3ª ed. Nova York: McGraw-Hill, 1981. 784 p.
- VALDUGA, A. T. **Uso Sustentado e Processamento de *Ilex paraguariensis* St. Hil (Erva Mate)**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais, UFSCAR, São Carlos, 2002. 216 p.

VALDUGA, A. T.; GONÇALVES, I. L.; MAGRI, E.; DELALIBERA FINZER, J. R. Chemistry, pharmacology and new trends in traditional functional and medicinal beverages. **Food Research International**, v. 120, p. 478-503, 2019.

VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E.; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica**. 4ª ed., São Paulo, Blücher, 1995. 608 p.

WANG, S. K. **Handbook of Air Conditioning and Refrigeration**, 2ª ed. Nova York: McGraw-Hill, 2000. 1400 p.