



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



**Estudo da secagem convectiva do bagaço de mirtilo visando
minimizar a perda de compostos antociânicos**

Aluno: Fan Guan Zen

Cartão: 130825

Prof^ª. Dr^ª. Ligia Damasceno Ferreira Marczak
Professora Orientadora

Doutoranda Carolina Pereira Kechinski
Co-orientadora

Porto Alegre, dezembro 2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Prof. Carlos Alexandre Netto

Vice-reitor: Prof. Rui Vicente Oppermann

Pró-Reitoria de Graduação: Prof^a. Valquíria Linck Bassani

Diretor da Escola de Engenharia: Prof^a. Denise Carpena Coitinho Dal Molin

Coordenador do Curso de Engenharia Química: Prof. Oscar William Perez Lopez

AGRADECIMENTOS

À Prof^ª. Dr^ª. Ligia Damasceno Ferreira Marczak, à Doutoranda Carolina Kechinski e à Prof^ª. Dr^ª. Aline Schilling Cassini pela orientação, atenção e colaboração fundamental no trabalho.

À minha família, especialmente aos meus pais, que são a minha base.

Aos grandes amigos Bernardo, Emiliana, Sarah, Maninho, Thiago e Gilmara, pelo companheirismo.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pela excelente qualidade de ensino.

A todos que contribuíram para a realização do trabalho.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	2
2.1.	Mirtilo.....	2
2.1.1.	Características Nutricionais do Mirtilo.....	3
2.2.	Antocianinas.....	5
2.2.1.	Estrutura Química.....	6
2.2.2.	Estabilidade das Antocianinas.....	7
2.2.3.	Cinética de Degradação de Nutrientes.....	8
2.3.	Secagem de Alimentos.....	9
2.3.1.	Influência da Desidratação Sobre os Microrganismos.....	10
2.3.2.	Secagem de Alimentos por Convecção.....	11
2.3.3.	Fatores que Influenciam a Secagem.....	12
2.3.4.	Curvas de Secagem.....	13
3.	MATERIAL E MÉTODOS.....	15
3.1.	Material.....	15
3.2.	Determinação da Umidade Relativa.....	15
3.3.	Secagem.....	15
3.3.1.	Aparato Experimental.....	16
3.3.2.	Determinação das Curvas de Secagem.....	17
3.4.	Cálculo do Tempo Recomendado de Secagem.....	18
3.5.	Cálculo da Perda de Antocianinas.....	19
3.6.	Desenho Experimental e Análise Estatística.....	19
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	21
4.1.	Curvas de Secagem.....	21
4.2.	Efeito da Velocidade do Ar na Secagem do Bagaço.....	22
4.3.	Efeito da Temperatura do Ar na Secagem do Bagaço.....	23
4.4.	Ajuste dos dados experimentais ao modelo exponencial.....	23
4.5.	Influência dos fatores de interesse sobre o tempo de secagem do bagaço de mirtilo os dados experimentais ao modelo exponencial.....	24
4.6.	Influência da secagem do bagaço sobre a perda de compostos antociânicos.....	27
5.	CONCLUSÕES.....	31
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	32
	APÊNDICE A – Default dos parâmetros do Siemens MICROMASTER 420.....	36
	APÊNDICE B – Tabelas dos Resultados Experimentais.....	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Aspecto geral do mirtilo na planta.....	2
Figura 2. Estrutura química da molécula de antocianidina ou aglicona.....	6
Figura 3. Formas estruturais de antocianinas em diferentes níveis de pH.....	7
Figura 4. Aparato experimental de secagem convectiva utilizado nos experimentos. (1) Ventilador; (2) Resistência; (3) Cabine; (4) Cesto; (5) Balança.....	16
Figura 5. Curva de secagem para o bagaço de mirtilo a 40 °C e velocidade de 0,45 m/s.....	22
Figura 6. Curvas de secagem dos experimentos 5,9 e 10.....	22
Figura 7. Curvas de secagem dos experimentos 5,7 e 8.....	23
Figura 8. Gráfico de Pareto para o tempo de secagem em função da temperatura e da velocidade de secagem do bagaço de mirtilo.....	26
Figura 9. Curva de contorno do tempo de secagem em função da velocidade do ar e da temperatura para o bagaço de mirtilo.....	27
Figura 10. Gráfico de Pareto para a perda de antocianinas em função da temperatura e da velocidade de secagem do bagaço de mirtilo.....	29
Figura 11. Curva de contorno da perda de antocianina em função da velocidade do ar e da temperatura para o bagaço de mirtilo.....	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição nutricional do mirtilo em 100 g de fruto.....	4
Tabela 2. Valores de k para a faixa de temperaturas (34 a 76 °C)	19
Tabela 3. Desenho experimental utilizado para avaliar os efeitos da temperatura e velocidade do ar (valores originais e codificados) na secagem do bagaço de mirtilo.....	20
Tabela 4. Planejamento fatorial completo de 2 fatores (T, v)	21
Tabela 5. Resultado do ajuste dos dados experimentais obtidos para o bagaço de mirtilo ao modelo exponencial	24
Tabela 6. Resultado de tempo de secagem para que o bagaço de mirtilo atingisse 15% de umidade	24
Tabela 7. Análise de Variância (ANOVA) do planejamento fatorial do tempo para diferentes combinações de temperatura e velocidade do ar de secagem em bagaço de mirtilo ($R^2 = 0,0,9783$).....	25
Tabela 8. Resultado da perda de antocianina para que o bagaço de mirtilo atinja 15% de umidade	28
Tabela 9. Análise de Variância (ANOVA) do planejamento fatorial da perda de ACY para diferentes combinações de temperatura e velocidade do ar de secagem em bagaço de mirtilo ($R^2 = 0,8748$).....	28
Tabela 10. Lista de parâmetros para P0003=3 e P0004=0.....	37
Tabela 11. Lista de parâmetros P0003=2 e P0004=0.....	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a_s	Constantes da Equação 6 e 8.
ACY	Antocianina.
B.u.	Base úmida.
B.s.	Base seca.
C_1	Parâmetro de ajuste do modelo exponencial da Equação 3.
C_2	Parâmetro de ajuste do modelo exponencial da Equação 3.
C_0	Concentração inicial ($t=0$), em g.L^{-1} .
C_t	Concentração após certo tempo (t), em g.L^{-1} .
m_{ss}	Massa de sólido seco, em kg.
m_t	Massa total da amostra no tempo t , em kg.
R^2	Coefficiente de determinação.
t	Tempo, em min.
T	Temperatura, em $^{\circ}\text{C}$ ou K.
x_1	Temperatura de secagem codificada.
x_2	Velocidade do ar de secagem codificada.
X	Teor de umidade em base seca no tempo t , em $\text{kg água.kg ss}^{-1}$.
X_0	Teor de umidade em base seca inicial, em $\text{kg água.kg ss}^{-1}$.
X_{adm}	Teor de umidade adimensional.
UR	Umidade relativa, em %.
v	Velocidade do ar de secagem, em m.s^{-1} .

RESUMO

O mirtilo, devido ao seu alto teor de compostos antociânicos, ficou conhecido como “fruto da longevidade” e é utilizado nas indústrias alimentícias para a fabricação de sucos e derivados. Este processamento gera cerca de 20% de resíduo sólido (bagaço) que, mesmo sendo um subproduto, chega a conter cerca de 70% do teor de antocianinas do fruto. Visando o aproveitamento desse subproduto, o objetivo desse trabalho foi estudar a perda de compostos antociânicos do bagaço de mirtilo durante a secagem convectiva, procurando diminuir ao máximo o teor de umidade do produto prolongando a sua vida útil e ao mesmo tempo reduzindo a perda desses compostos nutricionais e funcionais. O bagaço (resíduo obtido da extração enzimática do suco de mirtilo) foi congelado e armazenado ao abrigo da luz apresentando um teor de umidade inicial em torno de 70%. Através de um planejamento fatorial 2^2 composto central rotacional as variáveis estudadas foram: a temperatura e a velocidade do ar de secagem. Em cada ensaio, aproximadamente 300 g de bagaço foram submetidos a um processo de secagem convectiva forçada em um secador de bandeja e secos até que a variação de massa fosse igual ou inferior a 1% da massa inicial. Com os dados coletados ao longo do tempo, determinaram-se as curvas de secagem. Os resultados mostraram que apenas a temperatura do ar influencia significativamente na secagem. Para o estudo da perda de compostos antociânicos, verificou-se que tanto a temperatura quanto a velocidade do ar influenciaram significativamente na perda destes compostos durante a secagem.

1. INTRODUÇÃO

O público consumidor, cada vez mais exigente, busca por alimentos funcionais (com corantes naturais) que substituam os corantes sintéticos. O mirtilo, por exemplo, é conhecido como “fruto da longevidade”, por possuir alto teor de compostos antociânicos (substâncias com poder antioxidante). Do processamento de sucos de mirtilo é gerado cerca de 20% de resíduo sólido (bagaço), que contém a maior parte das antocianinas presentes no fruto (na ordem de 70%) (Kechinschi *et al*, 2010).

As antocianinas são responsáveis pelas cores que vão do vermelho ao azul em várias frutas e flores. Elas pertencem a uma das maiores subclasses dos flavonóides (compostos polifenólicos) e, devido ao seu potencial antioxidante, apresentam vários benefícios à saúde como a prevenção de doenças cardiovasculares, a inibição de certos tipos de câncer e a atividade antiinflamatória no cérebro (Wang e Stoner, 2008; Prior e Wu, 2006).

Uma das operações unitárias mais importantes é a secagem, exemplo disso é o processamento de alimentos nas indústrias, que geralmente envolve o uso da desidratação para prolongar a vida de prateleira dos alimentos por meio da redução da atividade de água, inibindo, desta forma, o crescimento microbiano e a atividade enzimática.

Neste contexto, o objetivo desse trabalho foi estudar a perda de compostos antociânicos do bagaço de mirtilo durante a secagem convectiva, procurando diminuir ao máximo a perda desses compostos funcionais e, ao mesmo tempo, prolongar a vida útil do bagaço a fim de viabilizar o seu uso para a fabricação de corantes naturais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Este capítulo trata dos principais aspectos relacionados ao mirtilo, antocianinas e secagem.

2.1. Mirtilo

O mirtilo, apresentado na Figura 1, é uma espécie frutífera originária do Hemisfério Norte, que pode ser comercializado tanto *in natura* como processado na forma de sucos, polpas e geléias. Devido à sua riqueza em compostos antociânicos (substâncias de alto poder antioxidante, preventivas de doenças degenerativas) e ao seu sabor exótico, tem envolvido consumidores de diversos níveis econômicos.



Figura 1. Aspecto geral do mirtilo na planta. **Fonte:** Sousa *et al*, 2007.

O mirtilo pode ser classificado em três grupos principais: *rabbiteye*, *lowbush* e *highbush*. As cultivares do primeiro grupo adaptam-se em regiões de pouco frio (cerca de 300 horas de frio), enquanto as do grupo *highbush* se adaptam melhor em regiões mais frias, que geralmente coincidem com as de maior altitude. Já a *lowbush* é a que mais necessita de frio (acima de 1000 horas de frio por ano). No Brasil, o fruto foi introduzido em 1983, pela Embrapa Clima Temperado, em Pelotas (RS), a partir de plantas provenientes da Universidade da Flórida, com o objetivo de avaliar a adaptação da espécie ao clima e solo brasileiros. A espécie trazida ao Brasil foi a *Vaccinium ashei*, pertencente ao grupo *rabbiteye*. Esta coleção de cultivares foi a principal base para a difusão da cultura no Brasil, pois permitiu obter informações

essenciais para a definição do manejo da espécie em nossas condições climáticas e de solo (Raseira e Antunes, 2004).

Os Estados Unidos detêm 50% da produção mundial da fruta, seguidos pelo Canadá (33%) e pelo continente europeu (16%), cabendo ao restante do mundo apenas 1% de participação no volume produzido em 2002. Os norte-americanos importam 82% da produção do restante do mundo, mas apesar de ser o maior produtor e consumidor da fruta, o país não é autossuficiente e depende diretamente do abastecimento canadense, chileno, neozelandês e argentino nos períodos de entressafra. O crescente interesse dos consumidores norte americanos, europeus e asiáticos pela fruta tem pressionado os tradicionais produtores mundiais e os novos empreendedores a aumentar a oferta do fruto. Entre eles, o Chile, a Argentina e, mais recentemente, Uruguai e Brasil (Raseira e Antunes, 2004).

A cultura do mirtilo no Brasil ainda encontra-se em fase de desenvolvimento, ocasião em que se busca um sistema de produção eficiente e competitivo para inserir o país entre os grandes produtores mundiais. O quadro produtivo atual, no país, está estimado em cerca de 60 toneladas, concentradas nas cidades de Vacaria (RS), Lavras (RS) e Campos do Jordão (SP). Trata-se de um número pouco significativo, face ao potencial natural que o país oferece para a produção comercial. Porém, em vista das previsões otimistas, novos investidores surgirão, preenchendo a fatia do mercado interno, ainda não explorado com produto nacional e, principalmente, o mercado internacional (Raseira e Antunes, 2004).

2.1.1. Características Nutricionais do Mirtilo

O mirtilo apresenta, em média, cerca de 80% de água. O conteúdo de água nos tecidos depende, entre outros fatores, da disponibilidade hídrica do solo. A perda de água nos frutos conduz à redução de volume e perda de massa, porém, o elevado teor de umidade torna-os, geralmente, suscetíveis à deterioração, aumentando a possibilidade de contaminação por crescimento microbiano. Os açúcares são os principais componentes solúveis e representam cerca de 80% da matéria seca. A glicose e a frutose são os principais açúcares existentes no mirtilo, conforme mostrado na Tabela 1, e os seus teores influenciam no sabor do fruto (Sousa *et al.*, 2007).

Os frutos contêm ácidos orgânicos em teores elevados, sendo os mais comuns o cítrico e o málico. O ácido quínico representa 40% dos ácidos orgânicos presente, no mirtilo (Sousa *et al.*, 2007), o ácido málico apresenta valores entre 0,06 e 0,14 g/100 g de fruto e o ácido cítrico entre 0,4 e 0,5 g/100 g de fruto (Raseira e Antunes, 2004).

Tabela 1. Composição nutricional do mirtilo em 100 g de fruto.

Nutrientes em 100 g de fruto	
Umidade	83-87 g
Proteínas	0,4-0,7 g
Lipídeos	0,5 g
Glicose	5-7 g
Frutose	5-7 g
Fibra	1-1,5 g
Cinzas	0,19-0,25 g
Sais minerais (mg)	
Cálcio	11,4-12,2
Ferro	0,6
Magnésio	5,8-8,4
Fósforo	14-47
Potássio	48-112
Sódio	3,4-4,3
Zinco	0,1
Cobre	0,1
Manganês	0,4-1,2
Vitaminas e outros componentes (mg)	
Vitamina C	22-62
Taninos	270-550
Pectinas	300-600
Atocianinas	300-725
Valor energético	51-62 kcal

Fonte: Sousa *et al.*, 2007.

Os teores de pH, acidez e sólidos solúveis contribuem para a apreciação do sabor dos frutos. O pH, geralmente inferior a 4,5, aumenta no decorrer do amadurecimento, influenciando nas características organolépticas e na capacidade de conservação dos frutos. É um parâmetro importante na determinação do potencial de crescimento dos microrganismos (também os patogênicos), capazes de provocar deterioração.

Propriedades Nutraceuticas

O mirtilo, além de apresentar um sabor exótico, possui potencialidades econômicas, elevada rentabilidade e propriedades funcionais que trazem benefícios para a saúde, sendo conhecido como “fruto da longevidade”. O seu elevado poder antioxidante, segundo Raseira e Antunes (2004), pode ser associado ao seu alto teor de antocianinas.

A indústria alimentícia está procurando manter a integridade dos compostos nutricionais e funcionais do mirtilo, tendo em vista os benefícios à saúde. O mirtilo impede a fixação e o desenvolvimento da *Escherichia coli*, bactéria causadora de infecções no trato urinário. Além disso, dietas suplementadas com antocianinas são capazes de prevenir problemas relacionados a doenças neurodegenerativas, como o Mal de Alzheimer, Mal de Parkinson e esclerose lateral (Ramirez *et al*, 2005).

O mirtilo contém alto teor de antocianinas, que pertencem a uma das subclasses dos Flavonóides (compostos polifenólicos) com alto poder antioxidante, atuando na neutralização dos radicais livres (moléculas instáveis ligadas ao aparecimento de um grande número de doenças crônicas). Vários estudos têm sido conduzidos em diversos países evidenciando que o consumo de mirtilo pode prevenir: problemas de inflamações, artrite reumatóide (Hänninen *et al*, 2000); câncer (Wang e Stoner, 2008); doenças degenerativas (Alves *et al*, 2008).

2.2. Antocianinas

As antocianinas são os constituintes mais abundantes dos flavonóides de frutas e vegetais. Uma concentração relativamente alta delas na dieta humana torna a vida mais saudável, uma vez que estudos sugerem que o consumo de antocianinas diminui o risco de doenças cardiovasculares, diabetes, artrites e câncer devido, pelo menos em parte, pelas suas atividades antioxidante e antiinflamatória (Prior e Wu, 2006). Dentre as frutas vermelhas, o mirtilo apresenta maior capacidade antioxidante, a qual é diretamente ligada ao seu alto teor de antocianinas (Kalt *et al*, 1999).

Antocianinas (do grego *anthos* = flor e *kianos* = azul) fornecem cores atrativas como laranja, vermelho e azul, são solúveis em meio aquoso, largamente encontradas na natureza e inócuas. Essas características as tornam atrativas como corante natural (Pazmiño-Durán *et al*, 2001). Em especial, os frutos de mirtilo apresentam propriedades antioxidantes que estão atribuídas aos seus compostos bioativos (antocianinas, flavonóides, polifenóis e ácido ascórbico) (Sinelli *et al*, 2008). Vale destacar que, no suco pasteurizado de mirtilo, recupera-se apenas de 13% a 23% das antocianinas, enquanto que uma quantidade substancial delas (acima de 42%) está presente no bagaço (Lee e Wrolstad, 2002).

A estabilidade das antocianinas é afetada por vários fatores como pH, temperatura de armazenagem, estrutura química, concentração, luz, oxigênio, solventes, a presença de enzimas, flavonóides, proteínas e íons metálicos. O tratamento térmico é um dos métodos mais utilizados para preservar e prolongar a

vida útil dos alimentos e é também um dos fatores mais importantes que afetam a estabilidade das antocianinas (Skrede *et al*, 2000).

A degradação térmica das antocianinas vem sendo estudada por outros autores em diversas frutas como em framboesas (Ochoa *et al*, 1999), uvas (Morais *et al*, 2002), amoras (Wang e Xu, 2007) e mirtilo (Kechinski *et al*, 2010). O conhecimento dos parâmetros cinéticos é fundamental para prever as perdas de compostos nutricionais e funcionais que ocorrem nas frutas durante a secagem.

2.2.1 Estrutura química

As antocianinas pertencem a uma das subclasses dos Flavonóides (compostos polifenólicos) constituídos por 2 anéis de benzeno e um anel heterocíclico central contendo oxigênio. As antocianidinas (agliconas) são estruturas básicas das antocianinas e, quando são encontradas nas formas glicosiladas, são conhecidas como antocianinas, conforme a Figura 2 (Konczak, 2004).

Existe uma enorme variedade de antocianinas espalhadas na natureza. Atualmente, são conhecidas mais de 500 antocianinas diferentes e 23 antocianidinas, porém apenas 6 (pelargonidina, cianidina, delphinidina, peonidina, petunidina e malvidina) são mais comuns em plantas vasculares (Castañeda-Ovando, 2009). Antocianidinas livres são raramente encontradas em plantas, ocorrendo comumente glicosiladas com açúcares que estabilizam a molécula (Francis, 2000). A glicosilação pode ocorrer em várias posições, sendo observada com maior frequência na posição 3. É importante salientar que antocianina natural nunca apresenta as hidroxilas das posições 5, 7 e 4' substituídas ao mesmo tempo. Um dos grupos hidroxila deve permanecer livre numa dessas posições para a formação da estrutura quinoidal, responsável pela cor (Bridle e Timberlake, 1997).

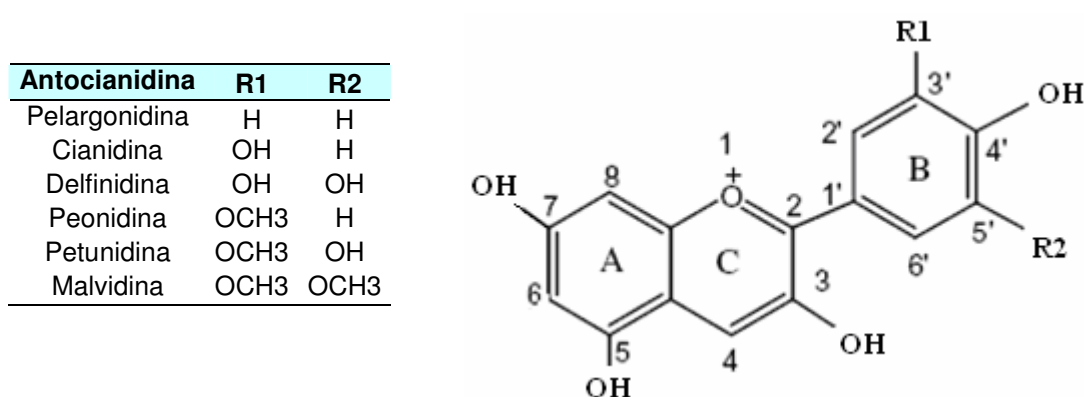


Figura 2. Estrutura química da molécula de antocianidina ou aglicona.

As antocianinas podem ser encontradas em diferentes formas químicas, dependendo do pH da solução, conforme a Figura 3. Através desta figura, observa-se que a forma oxônio (que vai do laranja ao roxo) predomina em pH 1,0, e a forma hemiacetal (incolor) em pH 4,5.

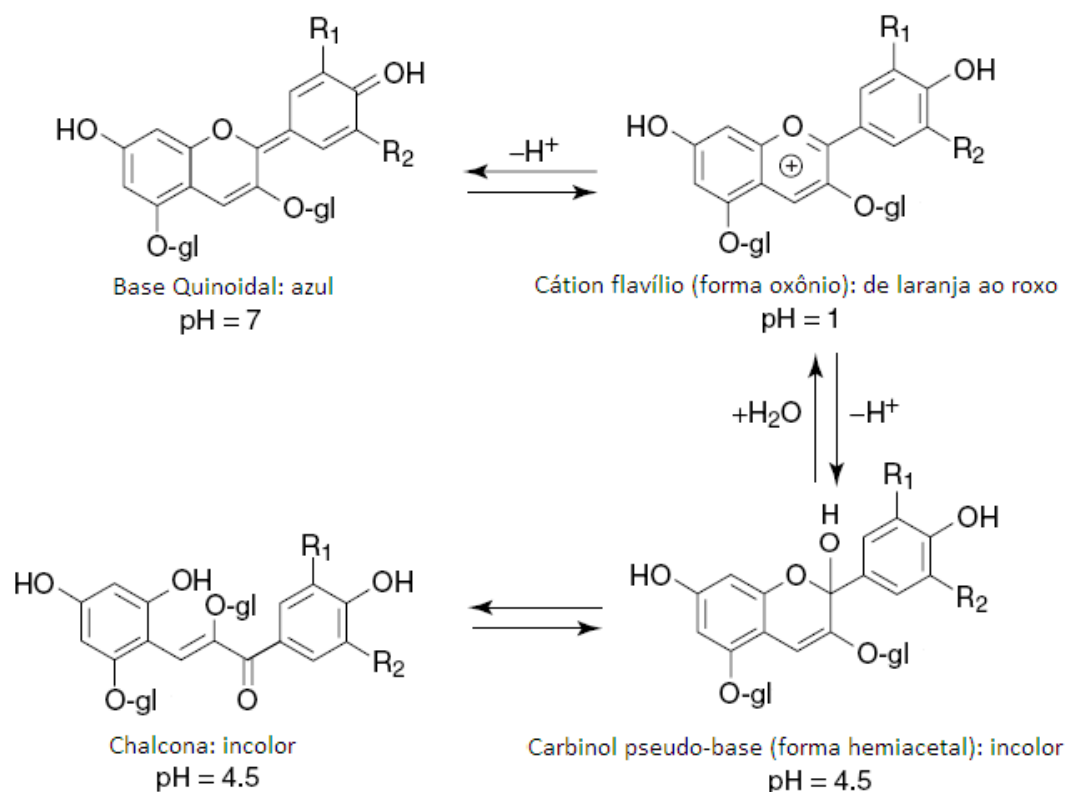


Figura 3. Formas estruturais de antocianinas em diferentes níveis de pH. **Fonte:** adaptado de Francis e Markakis, (1989), Giusti e Wrolstad (2001) e Malacrida e Motta (2005).

Investigações na estabilidade das antocianinas e na variação de cor com o pH concluíram que as mudanças de cores desses compostos são muito mais significantes em regiões alcalinas devido à instabilidade dos mesmos (Cabrita *et al*, 2000). Em especial, no mirtilo, a cor está estreitamente correlacionada com o teor de antocianinas do fruto e este, por sua vez, está relacionado com o pH e o ratio (relação sólidos solúveis e acidez total) (Sellappan *et al*, 2002).

2.2.2 Estabilidade das antocianinas

As antocianinas isoladas são altamente instáveis e muito suscetíveis à degradação (Giusti e Wrolstad, 2003). Sua estabilidade é afetada por vários fatores:

estrutura química, pH, temperatura, luz, presença de oxigênio, degradação enzimática e interações entre os componentes dos alimentos, tais como ácido ascórbico, íons metálicos, açúcares e copigmentos (Castaneda-Ovando *et al*, 2009).

O aquecimento, durante o processamento dos alimentos, consegue destruir rapidamente as antocianinas. Muitos estudos demonstraram uma relação logarítmica entre a destruição das antocianinas e o aumento aritmético da temperatura. Processos utilizando baixo tempo em alta temperatura têm sido recomendados para melhor retenção dos pigmentos (Kechinski *et al*, 2010).

Wang e Xu (2007) concluíram que as antocianinas presentes na amora, durante o aquecimento e o armazenamento, degradaram mais rapidamente com o aumento da temperatura. Sendo assim, a maior estabilidade de antocianinas foi alcançada utilizando menores temperaturas com intervalos de tempo curtos durante o processamento e a armazenagem.

2.2.3 Cinética de Degradação de Nutrientes

Um conhecimento preciso dos parâmetros cinéticos é essencial para prever as mudanças na qualidade nutricional dos alimentos que ocorrem durante o processamento industrial como a pasteurização, a concentração e o branqueamento. Esse tratamento térmico é necessário uma vez que ele reduz a atividade de água, afetando o crescimento microbiano e as reações enzimáticas, possibilitando, assim, reduzir a contaminação microbiana e evitar o escurecimento. Porém, ao mesmo tempo, deve-se procurar manter o máximo possível as características físicas e nutritivas dos alimentos durante esses tratamentos, para obtenção de propriedades sensoriais desejáveis.

Visto a importância funcional das antocianinas, a sua degradação térmica tem sido estudada por vários autores. Ochoa *et al* (1999) estudaram a influência das temperaturas na armazenagem em polpas de framboesa sobre o teor de antocianinas e ácido ascórbico. Morais *et al* (2002) estudaram os efeitos da luz, armazenamento e temperatura na taxa de decomposição dos pigmentos das antocianinas monoméricas extraídas de peles de uva. Kirca *et al* (2006 e 2007) estudaram a estabilidade de cenouras pretas e determinaram os parâmetros cinéticos (energia de ativação, E_a , e a constante da velocidade de reação, k) obtidos a partir de uma reação cinética de primeira ordem e modelaram a dependência com a temperatura de acordo com a equação de Arrhenius.

2.3 Secagem de alimentos

Inicialmente, serão descritos os conceitos de desidratação, umidade, base úmida versus base seca, e atividade de água. Logo após, é discutido o efeito da desidratação sobre os microorganismos e os métodos de secagem incluindo os tipos de secadores. Por fim, são abordados os fatores que afetam a secagem e o seu mecanismo.

Conforme descrito detalhadamente na referência que trata da secagem de alimentos - Fellows (2006) – a secagem está entre as Operações Unitárias mais usuais na indústria química e de alimentos. Em uma boa parte das situações, esta etapa é a última no processamento do produto antes de sua classificação e embalagem. A qualidade do produto seco, a quantidade de energia gasta e o tempo utilizado neste processo são parâmetros primordiais para a rentabilidade do produto submetido a esta operação.

A desidratação (ou secagem) é definida como “a aplicação de calor sob condições controladas para remover, por evaporação, a maior parte da água normalmente presente em um alimento”. O objetivo principal da secagem é prolongar a vida de prateleira dos alimentos por meio da redução da atividade de água. Isso inibe o crescimento microbiano e a atividade enzimática. Porém, a secagem causa uma deterioração tanto na qualidade sensorial quanto no valor nutricional do alimento. Estas alterações devem ser minimizadas por meio da seleção de condições apropriadas de desidratação para cada alimento em particular.

A umidade dos alimentos e a atividade da água

A umidade é a quantidade de moléculas de água que se encontra ligada ou não às diversas partes do produto. Considera-se como teor de água livre o teor de umidade passível de remoção em determinada temperatura e este pode englobar tanto a água ligada como a não ligada. A porção de água não ligada é definida como a água presente no produto cujo comportamento assemelha-se ao da água pura. Esta corresponde à umidade de saturação, ou seja, à umidade em excesso ao teor de umidade de equilíbrio. A porção de água ligada, por sua vez, é aquela que apresenta uma baixa pressão de vapor, baixa mobilidade e um ponto de congelamento bem menor do que a água pura.

A disponibilidade da água para a atividade microbiológica, enzimática ou química é que determina a vida de prateleira de um alimento, e isso é medido pela atividade de água do alimento, também conhecida como pressão de vapor relativa

(PVR). A atividade de água é definida como “a razão da pressão de vapor da água no alimento e a pressão de vapor saturada da água na mesma temperatura”.

Umidade em base úmida (b.u.) X Umidade em base seca (b.s.)

Uma vez que o volume do sólido úmido pode variar durante o processo de secagem, não é indicado expressar o teor de umidade em função deste. Assim, o teor de umidade de um sólido é geralmente expresso em função de sua massa de matéria seca (X , em kg água.kg sólido seco⁻¹ (kg ss)), pois esta permanece constante durante todo o processo de secagem. O teor de umidade é definido, desta forma, como a razão entre o teor de água presente no alimento e o teor de sólidos secos:

$$X = \frac{m_t - m_{ss}}{m_{ss}} \quad (1)$$

onde m_t é a massa total da amostra (kg), m_{ss} é a massa de sólido seco da amostra (kg) e X é o teor de umidade em base seca (kg água.kg ss⁻¹).

2.3.1. Influência da desidratação sobre os microrganismos

A retirada da água é um método de controle do crescimento microbiano, já que os microrganismos necessitam de água disponível para desenvolver suas atividades metabólicas. A habilidade dos microrganismos de crescer e produzir toxinas está diretamente relacionada com a atividade de água do meio. Certos mofo podem crescer em substratos alimentícios com umidade baixa, como 12%. As leveduras e bactérias requerem níveis mais altos de umidade, ao redor de 30%.

As enzimas geralmente são sensíveis às condições de calor úmido, especialmente em temperaturas superiores às da atividade enzimática, porém não são sensíveis ao calor seco. O controle da atividade enzimática é sempre necessário e deve ser feito, inativando quimicamente as enzimas ou submetendo o alimento ao calor úmido.

Bang *et al* (2011) determinaram a eficácia dos tratamentos da combinação de ClO₂, da secagem com ar (25°C e umidade relativa de 40% por 2 horas), e secagem com ar (55°C e umidade relativa de 23% por 48 horas) na morte total das bactérias aeróbias, Escherichia Coli e de fungos em rabanetes. Resultados mostram que houve uma diminuição das bactérias nas condições mencionadas.

Laroche *et al* (2005) estudaram a termoresistência do fungo *Saccharomyces cerevisiae* e a bactéria *Lactobacillus plantarum*. Esse estudo mostrou que a atividade de água inicial é muito importante na destruição ou sobrevivência de microorganismos. Além disso, o rápido resfriamento após o aquecimento permite redução significativa dos mesmos.

2.3.2. Secagem de alimentos por convecção

O calor necessário para conseguir a evaporação da água dos alimentos pode ser transmitido por condução, por convecção e por radiação, que geralmente se combinam, embora predomine uma delas. Esse calor pode aportar em pressão atmosférica ou sob certo grau de vácuo, quando se utilizam temperaturas mais baixas.

Os vários métodos de desidratação podem ser principalmente classificados conforme apresentado a seguir.

- a) Desidratação com ar quente (adiabáticos): quando o alimento entra em contato com uma corrente de ar quente e o calor é transmitido fundamentalmente por convecção;
- b) Desidratação por contato direto com uma superfície sólida: quando o calor é transmitido ao alimento, principalmente, por condução;
- c) Desidratação mediante o aporte de energia radiante, com predominância da radiação como transmissão de calor.

Existem diversos tipos de desidratadores, a escolha de um determinado tipo é ditada pela natureza do produto que vai ser desidratado, pela forma que se deseja dar ao produto processado, pelo fator econômico e pelas condições de operação. De modo geral, podem-se dividir os secadores mais usados em duas classes:

- 1) Secadores adiabáticos: quando o calor é conduzido por meio de ar quente. Neste grupo, estão incluídos secadores de caixa, de túnel, atomizador (*spray-dryer*), leito fluidizado, fornos secadores, secadores de câmara (secadores de bandeja), secadores transportadores (esteira), secadores pneumáticos, secadores rotatórios, entre outros;
- 2) Transferência de calor por superfície sólida: secador de tambor e outros desidratadores a vácuo. Os secadores nos quais o calor é fornecido ao alimento por condução têm duas vantagens principais em comparação à secagem por ar quente – não é necessário aquecer grandes volumes de ar

antes do início da secagem, produzindo alta eficiência térmica, e a secagem pode ser realizada na ausência de oxigênio para proteger componentes dos alimentos que sejam facilmente oxidados.

Segundo Aversa *et al* (2007), a secagem convectiva forçada com ar quente é a técnica mais utilizada pelas indústrias químicas para secar alimentos. Valores típicos de temperatura do ar variam entre 40 °C e 80 °C, enquanto que a velocidade do ar normalmente varia de 0,5 a 5 m/s, alcançando em alguns casos, o valor de 10 m/s. O tempo de secagem depende desses e outros parâmetros e pode chegar perto de vinte horas.

Como o presente trabalho foi desenvolvido usando-se experimentalmente um secador de bandeja, o mesmo será mais detalhado. Esse tipo de secador consiste em uma câmara com isolamento externo, provida de telas baixas ou bandejas perfuradas, cada uma das quais contém uma fina camada de alimento. O ar quente é soprado através de dutos e chicanas para promover uma distribuição de ar uniforme sobre e/ou através de cada bandeja. Os secadores de bandeja são utilizados para pequenas escalas de produção ou para trabalhos em escala-piloto. Possuem custos de capital inicial e de manutenção baixos e são flexíveis para operar com diferentes alimentos.

2.3.3. Fatores que influenciam a secagem

Existe um grande número de fatores que controlam a taxa de secagem. Eles podem ser agrupados entre: condições do processo de secagem (tipo de secador e condições de operação) ou à natureza do alimento submetido ao processo.

Condições do processo

Dentre as condições externas mais importantes, encontram-se a temperatura, a velocidade e a umidade relativa do ar de secagem.

a) Temperatura: o alimento absorve calor do ar quente, o que provê o calor latente necessário para evaporar a água da superfície. Um aumento na temperatura do ar faz com que a água evapore mais rapidamente de uma superfície molhada e, portanto, provoca uma queda maior na temperatura.

b) Umidade relativa: o teor de umidade relativa presente no ar de secagem afeta diretamente a força motriz do processo. Uma redução na umidade relativa faz

com que a água evapore mais rapidamente de uma superfície molhada e, portanto, provoca uma queda maior na temperatura;

c) Velocidade do ar: quando o ar quente é soprado sobre um alimento úmido, o vapor d'água se difunde através da camada limite de ar ao redor do alimento e é levado pelo ar em movimento. Um gradiente de pressão de vapor de vapor d'água é estabelecido entre o interior do alimento úmido e o ar seco. Esse gradiente provê a “força motriz” para a remoção de água do alimento. Portanto, quanto maior a velocidade do ar, menor a espessura da camada limite e maior a taxa de secagem.

Natureza do produto alimentício

a) Difusão de líquidos que são absorvidos em camadas na superfície dos componentes sólidos do alimento. Realizar a secagem de um produto seccionado em unidades menores será sempre mais rápido do que secá-lo por inteiro;

b) A composição e a estrutura do alimento influenciam no mecanismo de remoção de umidade. A umidade é removida com mais facilidade dos espaços intercelulares do que de dentro das células. Além disso, altas concentrações de solutos aumentam a viscosidade e diminui a atividade de água, reduzindo, assim, a taxa de movimento de umidade.

Segundo Nagaya *et al* (2006), a secagem de alimentos em temperaturas baixas com controle da vazão de ar permite secar alimentos como vegetais sem perda de cor e nem da textura original.

Obón *et al* (2009) estudaram as condições ótimas de secagem no secador do tipo spray-dryer para o suco de cacto (*Opuntia stricta*), que é usado como corante natural. A melhor condição foi: taxa de vazão do ar de secagem ($36 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) e temperatura a $160 \text{ }^\circ\text{C}$. A cor da fruta ficou estável quando foi armazenada por um mês.

2.3.4. Curvas de secagem

O processo de secagem divide-se em duas partes: uma, à taxa constante, e a outra quando ocorre uma queda na taxa de secagem. Na primeira, a taxa é governada pela rapidez com que o ar oferece calor à água na partícula alimentícia e assim elimina o vapor de água produzido. Durante esse período, a água se difunde para a superfície da partícula tão rapidamente quanto possa ser evaporada. Geralmente a temperatura da partícula é a do bulbo úmido do ar em contato com a matéria-prima. Entretanto, a partir de um dado momento, a água não pode mais difundir-se para a

superfície na mesma velocidade em que é evaporada; a taxa de secagem passa a ser controlada pela difusão da água líquida no interior do sólido. À medida que o conteúdo de umidade diminui, a taxa de difusão diminui, diminuindo a taxa de secagem.

O material sólido da partícula começa a absorver calor do ar e a temperatura da matéria-prima começa a aproximar-se da temperatura do bulbo seco de ar. A taxa de secagem durante o período de taxa constante é governada, principalmente, pelas propriedades do ar de secagem. O ar tende a resfriar-se porque fornece calor não só para a água como também para o sólido. Já que a água e o sólido se encontram na temperatura do bulbo úmido, o calor disponível é determinado pela diferença entre as temperaturas do bulbo úmido e do bulbo seco do ar, mais do que pela temperatura absoluta do ar. A pressão de vapor da água no sólido é a da água na temperatura do bulbo úmido do ar, enquanto que a pressão de vapor da água no ar é menor. A diferença entre as duas pressões de vapor determina a velocidade com que o vapor d'água pode ser absorvido pelo ar. Portanto, o ar não pode ser resfriado até o ponto em que não possa absorver o vapor d'água produzido. A velocidade do ar é importante, porque numa mesma unidade de tempo, teremos mais ar disponível conforme o aumento da velocidade e, portanto, maior calor disponível para o arraste da água.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Material

O bagaço utilizado foi o resíduo obtido da extração do suco de mirtilo pelo método enzimático. O resíduo passou por um processo de prensagem para a redução da umidade para valores em torno de 67% (b.u.). Logo em seguida, o bagaço foi armazenado congelado em recipiente protegido da luz até o momento das análises. Vinte e quatro horas antes de cada experimento, o bagaço foi descongelado e homogeneizado. Nos experimentos realizados com o bagaço, foram utilizadas amostras cuja umidade inicial apresentou $66,92\% \pm 2,47$ (b.u.).

3.2. Determinação da umidade relativa

Amostras recolhidas no início e no final de cada experimento de secagem foram submetidas à determinação de umidade relativa. Para tanto, pesava-se em uma balança analítica (modelo SAE 200, Bosch, Alemanha) cerca de 5 g de amostra em um recipiente de alumínio (previamente seco e de massa conhecida) e este era colocado em uma estufa (tipo A3 DG Temp, modelo DeLeo, Brasil), permanecendo por 3 horas a $105\text{ }^{\circ}\text{C}$. As umidades relativas das amostras antes e após todos os experimentos se encontram no Apêndice B.

3.3. Secagem

Para que a variação de umidade inicial observada entre amostras de mesmo tipo de bagaço não influenciasse na análise dos resultados obtidos, optou-se pela expressão dos dados de umidade em função de um adimensional (X_{adm}):

$$X_{adm} = \frac{X}{X_0} \quad (2)$$

onde X , X_0 , são respectivamente, o teor de umidade (b.s.) no tempo t e o teor de umidade (b.s.) inicial.

3.3.1 Aparato experimental

Para a realização dos experimentos, cujo objetivo era a obtenção das curvas de secagem do bagaço de mirtilo, utilizou-se um equipamento em escala piloto, mostrado na Figura 4.

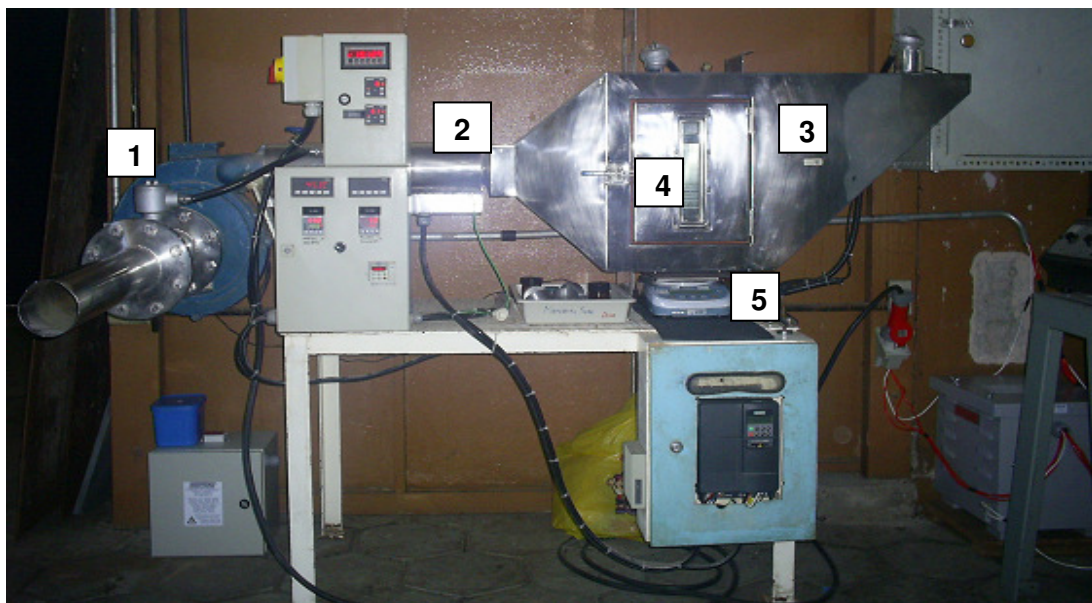


Figura 4. Aparato experimental de secagem convectiva utilizado nos experimentos. (1) Ventilador; (2) Resistência; (3) Cabine; (4) Cesto; (5) Balança.

Nesta figura, (1) representa o ventilador centrífugo de insuflamento (vazão máxima de 15 m^3 de $\text{ar} \cdot \text{min}^{-1}$, em condições ambientes) cuja vazão é controlada por um inversor de frequência; (2) representa três resistências elétricas em paralelo (com temperatura máxima de 180°C a $330 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$), ligadas à um inversor de frequência e controladas pelo controlador descrito a seguir; (3) representa a cabine de secagem, com paredes laterais móveis e providas de aberturas, a fim de tornar possível a inversão da direção do escoamento de ar entre ascendente e descendente; (4) representa o cesto para a disposição do produto ($\text{área}=0,04 \text{ m}^2$), com telas de abertura de 3,5 mm de diâmetro; (5) representa a balança semi-analítica (marca Bel, mark 10000, Itália) acoplada ao cesto de produto.

O equipamento possuía ainda os seguintes sensores e controladores:

- Dois medidores (termopares) de temperatura na entrada do secador (um para escoamento ascendente e outro para escoamento descendente) do tipo Pt100, conectados a dois controladores-indicadores PID da marca West, modelo 6100;

- Um medidor de temperatura e de umidade de saída do ar de secagem (marca Testo – Hygrotest 650) cuja faixa de operação é de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $180\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, para a temperatura e 0 a $100\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\%$ para a umidade relativa, na saída do secador;
- Um medidor de vazão de ar, marca Nykon Dwyler, modelo MTG100F1S14RFN, cuja faixa de medição varia entre 73,5 e $735\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1} \pm 0,25\%$.

Antes de iniciar os experimentos, foi necessário testar e configurar o secador. Ao fazer esses testes, surgiram dificuldades como: não havia tomada de 380 V (tensão exigida do secador) no local onde o equipamento seria ligado; o secador não fazia aquecimento devido ao inversor de frequência desconfigurado. Sendo assim, foi necessário aproximadamente um mês e meio para resolver os problemas mencionados antes de iniciar os experimentos, o que atrasou consideravelmente o cronograma previsto. Os parâmetros configurados do inversor de frequência das resistências do secador (Siemens 420) se encontram no Apêndice A.

3.3.2. Determinação das curvas de secagem

Para a determinação das curvas de secagem, foram controladas a vazão e a temperatura do ar de entrada do secador e registradas a perda de massa ao longo do tempo, variando-se a temperatura e a velocidade de secagem.

O equipamento utilizado na determinação experimental das curvas de secagem situa-se no pátio interno do DEQUI. O procedimento padrão empregado para a realização dos experimentos de secagem encontra-se descrito a seguir:

1. Ligava-se o equipamento e fixava-se a temperatura e a vazão de ar a serem empregadas no experimento;
2. Após o secador atingir as condições desejadas e estabilizar, retirava-se o cesto de dentro da cabine. Pesava-se aproximadamente 200 g de amostra para os experimentos 4, 8 e 300 g para os experimentos 1, 2, 3, 5, 6, 7, 9, 10. Logo, colocava-se a amostra pesada no cesto;
3. Inseria-se o cesto com a amostra no interior da cabine de secagem e iniciava -se o experimento, cronometrando o tempo e anotando a massa.

A massa de produto era anotada a cada 2 minutos (experimentos 3, 4 e 8) e, a cada 5 minutos, para o restante. O escoamento do ar de secagem era, inicialmente,

ascendente, a fim de proporcionar um maior desprendimento inicial dos sólidos finos presentes na amostra (minimizar o erro). Além disso, a direção de escoamento era invertida a cada 2 pontos para os experimentos 1, 2, 5 e 6 e, a cada ponto, para o restante, visando a secagem mais uniforme do produto.

O experimento terminava quando se detectava que praticamente já não ocorriam mudanças na massa da amostra (variação de menos de 1% da massa inicial). Com os dados coletados (perda de massa ao longo do tempo) para cada um dos experimentos de secagem, obteve-se a umidade adimensional versus o tempo (apresentados no Apêndice B) através das Equações 1, 2, e 4.

Para o ajuste dos dados experimentais obtidos durante os testes de secagem, optou-se pela utilização do modelo exponencial:

$$X_{adm} = C_1 \exp(-C_2 t) \quad (3)$$

onde C_1 e C_2 são as constantes do modelo escolhido, X_{adm} é o teor de umidade adimensional e t é o tempo (min).

3.4. Cálculo do tempo recomendado de secagem

Com o objetivo de calcular o tempo necessário para que o bagaço de mirtilo atingisse uma umidade de 15 % (b. u.) (Tabela 6), foi necessário transformar este valor para umidade em base seca, uma vez que o volume do sólido úmido pode variar durante o processo de secagem. Portanto, primeiramente, se obtém a massa de sólido seco através da equação (4), já que a umidade inicial relativa (66,92 % ± 2,47) e a massa total da amostra inicial são conhecidas.

$$m_{ss} = m_t (1 - UR) \quad (4)$$

onde m_t é a massa total da amostra no tempo t (kg), m_{ss} é a massa de sólido seco da amostra (kg) e UR é a umidade relativa (%). Calculado a m_{ss} e inserindo na mesma Equação 4 para a UR de 15%, tem-se a m_t nesse ponto. Com esta m_t e a m_{ss} , obtém-se o X , conforme a Equação 1. Como a m_t inicial e m_{ss} já são conhecidas, obtém-se o X_0 conforme a Equação 1. Com o X e X_0 , obtém-se o X_{adm} pela Equação 2. Logo, através do modelo ajustado (Equação 3), calculou-se o tempo necessário para que o bagaço de mirtilo atingisse uma UR de 15 %. Este valor de umidade foi escolhido porque o objetivo do trabalho era atingir uma umidade na qual o produto estivesse

estável microbiologicamente, que, de acordo com Gava (2008), ocorre para umidades variando de 15 a 40%, sendo escolhido o limite inferior desta faixa.

3.5. Cálculo da perda de antocianinas

Inicialmente, foi feita a quantificação das antocianinas baseado no método do pH diferencial proposto por Giusti e Wrolstad (2001), porém os resultados não foram conclusivos, por provável erro no preparo das amostras. Diante disto, optou-se pela realização do cálculo da perda de antocianinas baseado nos estudos de degradação das antocianinas do suco de mirtilo, que, de acordo com Kechinski et al. (2010), se dá por uma reação de primeira ordem com a cinética de degradação expressa pela Equação 5:

$$C_t = C_0 \exp(-kt) \quad (5)$$

onde: C_t é o teor de antocianina após um certo tempo de aquecimento t (min) à dada temperatura T (°C); C_0 é o teor de antocianinas inicial e k é a constante cinética de reação de primeira ordem.

Os valores de k , encontrados por Kechinski *et al* (2010), estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores de k para a faixa de temperaturas (34 a 76 °C)

T (°C)	$k \times 10^3$ (min ⁻¹)
34	0,0057
40	0,064
55	0,35
70	1,35
76	3,17

Fonte: Kechinski *et al* (2010)

Sabe-se que a perda de antocianinas calculada para o bagaço de mirtilo é uma estimativa, já que os valores de k utilizados foram calculados para o suco de mirtilo.

3.6. Desenho Experimental e Análise Estatística

O desenho experimental seguiu um fatorial 2² com delineamento composto central rotacional (DCCR) e modelo quadrático. As variáveis independentes para a secagem foram: temperatura do ar (T), X_1 (34 °C a 76 °C) e velocidade do ar (v), X_2 (0,4 a 0,7 m.s⁻¹). Na Tabela X está apresentado o DCCR real para a secagem do

bagaço de mirtilo. Nela, observa-se que cada variável independente possui 5 níveis codificados (x_i , $i=1,2$) com os seguintes valores: -1,4, -1, 0, +1 e +1,4.

Tabela 3. Desenho experimental utilizado para avaliar os efeitos da temperatura e velocidade do ar na secagem do bagaço de mirtilo.

Níveis (x_i)	T (°C)	v (m.s ⁻¹)
-1,41	34	0,40
-1	40	0,45
0	55	0,55
1	70	0,65
1,41	76	0,70

A superfície de resposta foi obtida utilizando o *software* Statistica do Windows, versão 8.0 da Statsoft ®.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A fim de avaliar a influência dos parâmetros de processo estudados (velocidade e temperatura do ar de secagem), o planejamento fatorial completo de 2 fatores (T, v) foi empregado, sendo mostrado na Tabela 4.. Assim, um total de 10 experimentos, incluindo 2 repetições do ponto central (codificado por 0) mais os axiais, foram realizados. A variável dependente foi o tempo de secagem para atingir uma umidade final de 15% e a perda de antocianinas.

Tabela 4. Planejamento fatorial completo de 2 fatores (T, v).

Exp.	T(°C)	v (m/s)
1	40 (-1)	0,45 (-1)
2	40 (-1)	0,65 (+1)
3	70 (+1)	0,45 (-1)
4	70 (+1)	0,65 (+1)
5	55 (0)	0,55 (0)
6	55 (0)	0,55 (0)
7	34 (-1,4)	0,55 (0)
8	76 (+1,4)	0,55 (0)
9	55 (0)	0,40 (-1,4)
10	55 (0)	0,70 (+1,4)

4.1. Curvas de secagem

Todos os gráficos que serão mostrados nesse capítulo foram gerados considerando apenas os pontos da curva ascendente, uma vez que o experimento começou utilizando o fluxo de escoamento ascendente, objetivando remover os finos da amostra. Além disso, não tem sentido considerar o fluxo descendente, já que ele apresenta o mesmo comportamento do fluxo ascendente, conforme mostrado na Figura 5 que apresenta a umidade adimensional em função do tempo para a temperatura de 40 °C e velocidade de 0,45 m/s.

Todas as curvas de secagem obtidas para o bagaço de mirtilo apresentaram apenas período de taxa decrescente. Doymaz (2007) estudou a secagem de tomates e pedaços de moranga a 55, 60, 65 e 70 °C e velocidades de ar entre 1,0 e 1,5 m/s. Ele concluiu que as curvas de secagem dos experimentos empregados não apresentaram um período de taxa constante, mas apenas indicaram um período de taxa decrescente.

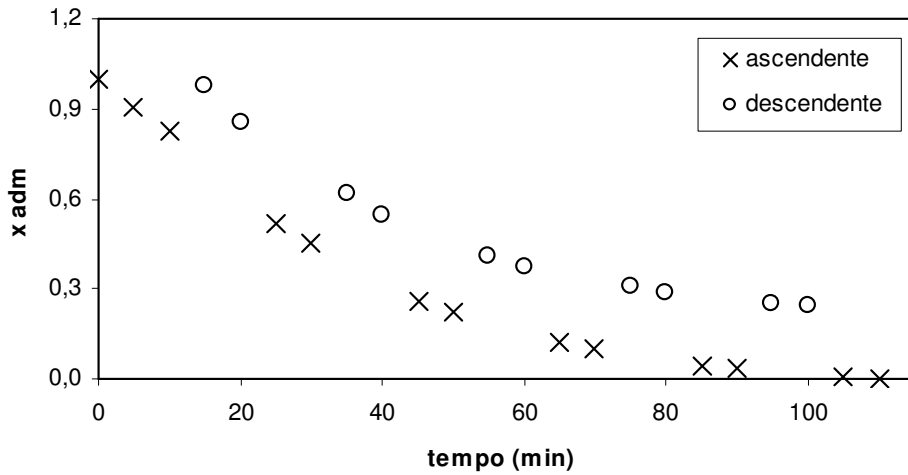


Figura 5. Curva de secagem para o bagaço de mirtilo a 40 °C e velocidade de 0,45 m/s.

4.2. Efeito da velocidade do ar na secagem do bagaço

A Figura 6 mostra a umidade em base seca plotada versus o tempo, mantendo -se a temperatura de 55 °C, para as três velocidades (experimentos 5,9 e 10). Através da análise da figura é possível observar que a velocidade do ar na secagem do bagaço não afetou consideravelmente a taxa de secagem, para a faixa de velocidades estudadas, uma vez que todas as curvas ficaram muito próximas umas das outras e apresentaram comportamentos muito semelhantes.

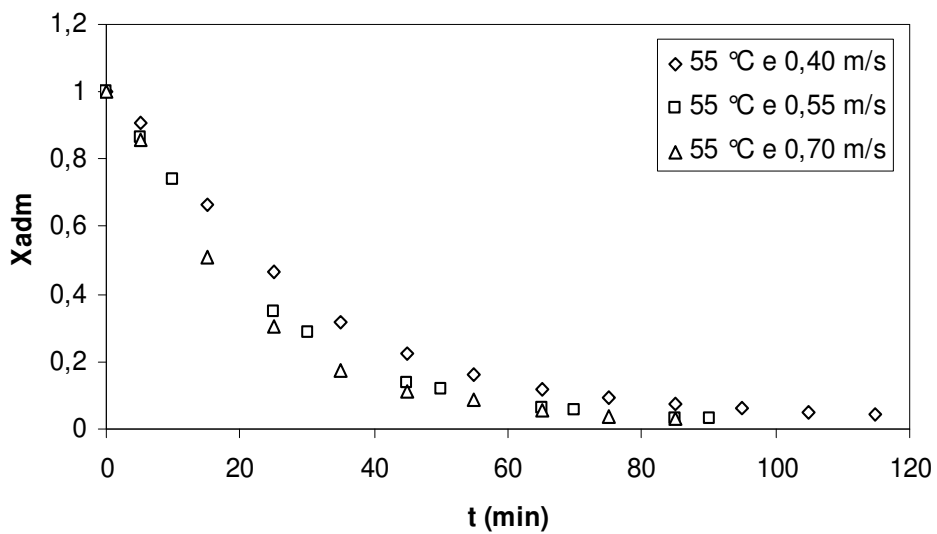


Figura 6. Curvas de secagem dos experimentos 5,9 e 10.

4.3. Efeito da temperatura do ar na secagem do bagaço

Na Figura 7 são apresentados os dados do comportamento das 3 curvas de secagem (experimentos 5, 8 e 9) para a mesma velocidade do ar de secagem (0,55 m/s) e diferentes temperaturas. Observa-se que a taxa de secagem aumenta com o aumento de temperatura, ou seja, quanto maior a temperatura, menor tempo de secagem.

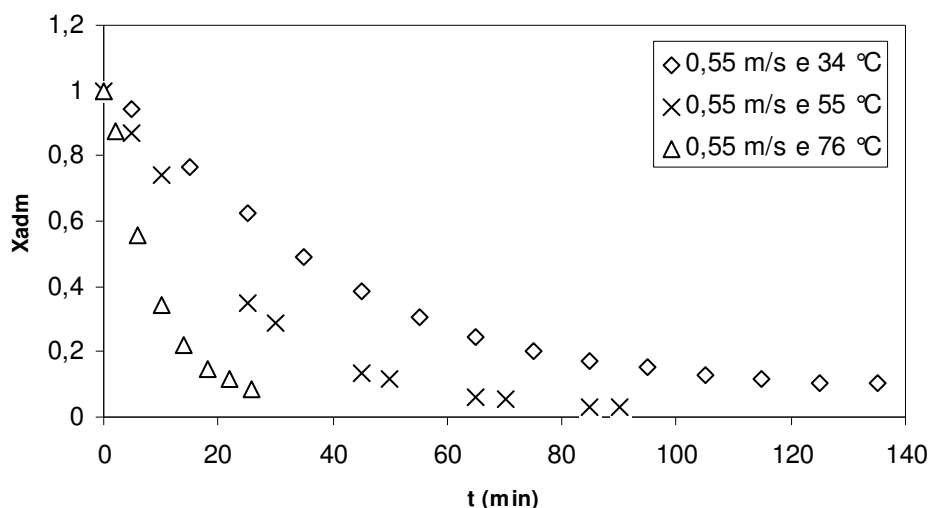


Figura 7. Curvas de secagem dos experimentos 5,7 e 8.

4.4. Ajuste dos dados experimentais ao modelo exponencial

A partir das curvas de secagem do bagaço de mirtilo, testou-se o ajuste dos dados de umidade em base seca *versus* o tempo ao modelo exponencial exposto na Equação 2. A Tabela 5 apresenta os resultados dos ajustes destas curvas de secagem ao modelo exponencial. Nesta tabela, podem ser observados os valores obtidos para as constantes C_1 e C_2 e o coeficiente de determinação para cada conjunto de parâmetros, onde T (°C) e v ($m \cdot s^{-1}$) são, respectivamente, a temperatura e a velocidade do ar de secagem.

Tabela 5. Resultado do ajuste dos dados experimentais obtidos para o bagaço de mirtilo ao modelo exponencial.

Exp.	T (°C)	v (m.s ⁻¹)	C1	C2	R ²
1	40 (-1)	0,45 (-1)	0,9868	0,0234	0,9941
2	40 (-1)	0,65 (+1)	1,0007	0,0241	0,9956
3	70 (+1)	0,45 (-1)	1,5891	0,0941	0,9636
4	70 (+1)	0,65 (+1)	0,7328	0,0590	0,9468
5	55 (0)	0,55 (0)	0,9816	0,0404	0,9933
6	55 (0)	0,55 (0)	0,9733	0,0418	0,9930
7	34 (-1,4)	0,55 (0)	0,9265	0,0183	0,9798
8	76 (+1,4)	0,55 (0)	0,9394	0,0974	0,9904
9	55 (0)	0,40 (-1,4)	0,9149	0,0285	0,9844
10	55 (0)	0,70 (+1,4)	0,9125	0,0420	0,9868

Como pode ser visto nesta tabela, a média de todos os coeficientes de determinação (R²) deram quase 1 (0,9828 ± 0,016), portanto o modelo exponencial se ajusta adequadamente às curvas de secagem.

4.5. Influência dos fatores de interesse sobre o tempo de secagem recomendado para o bagaço de mirtilo

Na Tabela 6 são apresentados os resultados do tempo de secagem obtidos para que o bagaço de mirtilo atingisse um teor de 15% de umidade. Nessa tabela, pode-se observar que o menor tempo de secagem foi para o experimento 4, que envolveu a temperatura de 70°C e a velocidade de 0,65 m.s⁻¹, e que o maior tempo de secagem foi para o experimento 7, que envolveu a temperatura de 34°C e a velocidade de 0,55 m/s.

Tabela 6. Resultado de tempo de secagem para que o bagaço de mirtilo atingisse 15% de umidade.

Experimento	T (°C)	v (m.s ⁻¹)	Tempo de Secagem (min)
1	40 (-1)	0,45 (-1)	98,89
2	40 (-1)	0,65 (+1)	99,28
3	70 (+1)	0,45 (-1)	32,43
4	70 (+1)	0,65 (+1)	22,17
5	55 (0)	0,55 (0)	58,73
6	55 (0)	0,55 (0)	56,51
7	34 (-1,4)	0,55 (0)	126,83
8	76 (+1,4)	0,55 (0)	26,2
9	55 (0)	0,40 (-1,4)	80,86
10	55 (0)	0,70 (+1,4)	54,81

Um modelo polinomial foi ajustado aos dados experimentais, conforme a Equação 6.

$$\text{Tempo de secagem} = a_0 + a_1x_1 + a_{11}x_{12} + a_2x_2 + a_{22}x_{22} + a_{12}x_1x_2 \quad (6)$$

onde a_s são constantes, x_1 é a temperatura de secagem codificada e x_2 é a velocidade do ar de secagem codificada. Com base nos resultados da Tabela 6 fez-se uma Análise de Variância (ANOVA) e os resultados estão apresentados na Tabela 7. A ANOVA indicou que a temperatura (cujo valor encontra-se em negrito) exerce influência significativa sobre a secagem.

Tabela 7. Análise de Variância (ANOVA) do planejamento fatorial do tempo para diferentes combinações de temperatura e velocidade do ar de secagem em bagaço de mirtilo ($R^2 = 0,9783$).

Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Temperatura (°C)(L)	10216,28	1	10216,28	4145,881	0,009886
Temperatura (°C)(Q)	231,81	1	231,81	94,07	0,065407
(2)Velocidade do Ar (m.s⁻¹)(L)	272,71	1	272,71	110,668	0,060335
Velocidade do Ar (m.s ⁻¹)(Q)	35,73	1	35,73	14,502	0,163484
1L by 2L	28,36	1	28,36	11,507	0,182502
Lack of Fit	257,62	3	85,87	34,848	0,123738
Pure Error	2,46	1	2,46		
Total SS	11009,52	9			

Analisando o Gráfico de Pareto apresentado na Figura 8, observa-se que apenas o efeito da temperatura exerce influência significativa sobre a secagem do bagaço de mirtilo.

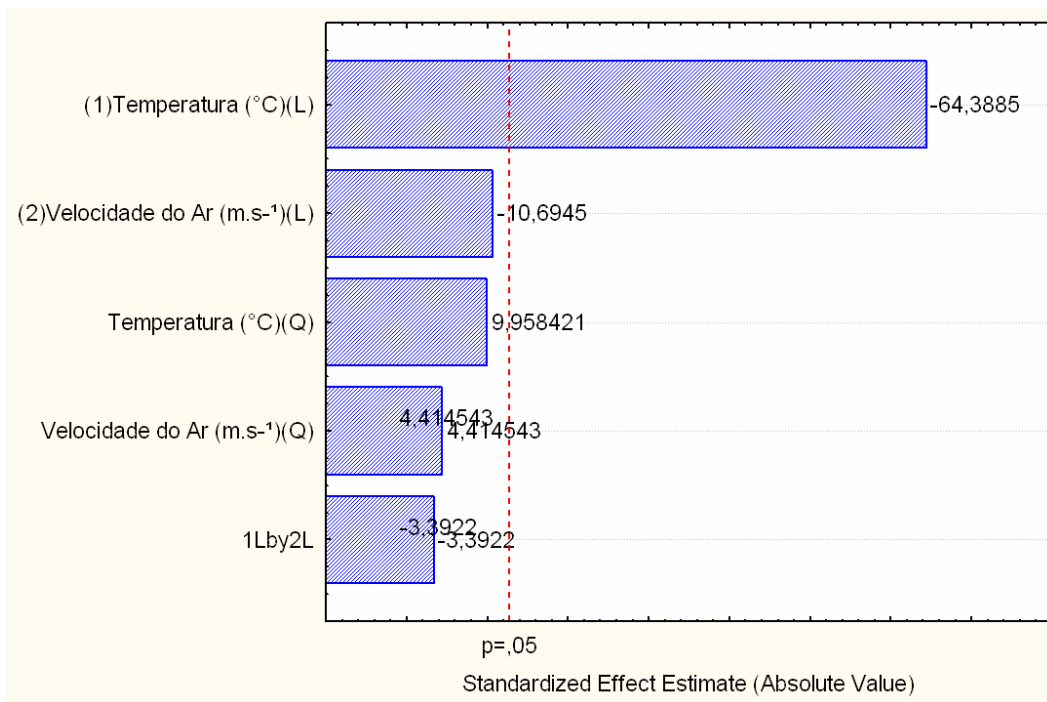


Figura 8. Gráfico de Pareto para o tempo de secagem em função da temperatura e da velocidade de secagem do bagaço de mirtilo.

Assim, considerando apenas os efeitos significativos fez-se a estimação dos parâmetros que são apresentados na Equação 7 cujo coeficiente de determinação ficou em 0,9280.

$$\text{Tempo de secagem (min)} = 65,67 - 35,92x_1 \quad (7)$$

onde x_1 é a temperatura de secagem codificada. Uma vez que o $F_{\text{calculado}}$ (103,03) desse modelo foi maior que o F_{tabelado} (5,32) conclui-se que o modelo proposto é válido.

A partir desse modelo foi possível construir as curvas de contorno do tempo de secagem do bagaço de mirtilo em função da temperatura e da velocidade do ar de secagem apresentadas na Figura 9. A análise dessa figura mostra que a secagem é mais rápida em temperaturas maiores.

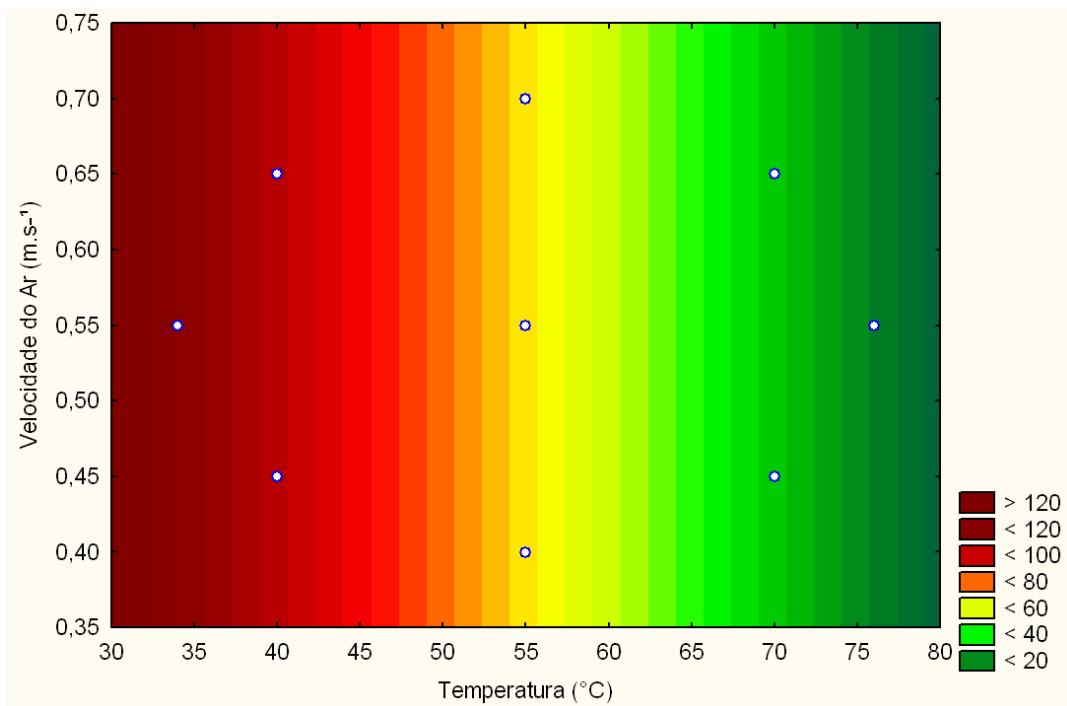


Figura 9. Curva de contorno do tempo de secagem em função da velocidade do ar e da temperatura para o bagaço de mirtilo.

Doymaz (2005) estudou sobre o comportamento da secagem de vagem (usando temperaturas de 50 a 70 °C para o ar de secagem) e concluiu que o aumento do mesmo resulta em tempos de secagem menores.

4.6. Influência da secagem do bagaço sobre a perda de compostos antociânicos

Na Tabela 8 são apresentados os resultados da perda de antocianinas obtidas para que o bagaço de mirtilo atinja um teor de 15% de umidade. Nessa tabela pode-se observar que a menor perda foi para o experimento 7 que envolveu a temperatura de 34 °C e a velocidade de 0,55 m.s⁻¹ e que a maior perda de antocianinas foi para o experimento 8 que envolveu a temperatura de 76 °C e a velocidade de 0,55 m/s.

Tabela 8. Resultado da perda de antocianina para que o bagaço de mirtilo atinja 15% de umidade.

Exp.	T (°C)	v (m/s)	Perda ACY (%)
1	40 (-1)	0,45 (-1)	0,63
2	40 (-1)	0,65 (+1)	0,63
3	70 (+1)	0,45 (-1)	4,28
4	70 (+1)	0,65 (+1)	2,95
5	55 (0)	0,55 (0)	2,05
6	55 (0)	0,55 (0)	1,97
7	34 (-1,4)	0,55 (0)	0,07
8	76 (+1,4)	0,55 (0)	7,98
9	55 (0)	0,40 (-1,4)	2,81
10	55 (0)	0,70 (+1,4)	1,91

Um modelo polinomial foi ajustado aos dados experimentais, conforme a Equação 8.

$$\text{Perda de antocianina} = a_0 + a_1x_1 + a_{11}x_{12} + a_2x_2 + a_{22}x_{22} + a_{12}x_1x_2 \quad (8)$$

onde a_s são constantes, x_1 é a temperatura de secagem codificada e x_2 é a velocidade do ar de secagem codificada. Com base nos resultados da Tabela 8, fez-se uma Análise de Variância (ANOVA) e os resultados estão apresentados na Tabela 9. A ANOVA indicou que a temperatura, tanto linear quanto quadrática, e a velocidade (cujos valores encontram-se em negrito), exercem influência significativa sobre a secagem.

Tabela 9. Análise de Variância (ANOVA) do planejamento fatorial da perda de ACY para diferentes combinações de temperatura e velocidade do ar de secagem em bagaço de mirtilo ($R^2 = 0,8748$).

Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Temperatura (°C)(L)	36,67903	1	36,67903	11462,20	0,005946
Temperatura (°C)(Q)	2,52284	1	2,52284	788,39	0,022664
(2)Velocidade do Ar (m.s⁻¹)(L)	0,84499	1	0,84499	264,06	0,039128
Velocidade do Ar (m.s ⁻¹)(Q)	0,00991	1	0,00991	3,10	0,328956
1L by 2L	0,44222	1	0,44222	138,20	0,054024
Lack of Fit	5,90793	3	1,96931	615,41	0,029622
Pure Error	0,00320	1	0,00320		
Total SS	47,21976	9			

Analisando o Gráfico de Pareto apresentado na Figura 10, observa-se que o efeito da temperatura linear é bem mais intenso que o da quadrática e que a

velocidade do ar tem efeito pouco significativo sobre a perda de antocianina durante a secagem.

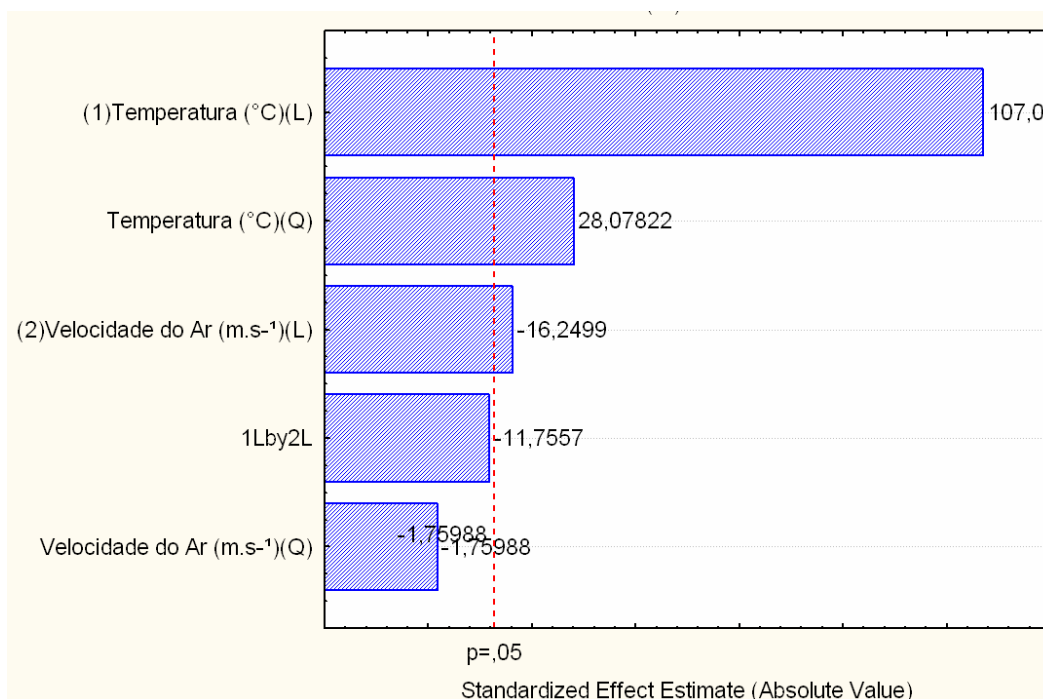


Figura 10. Gráfico de Pareto para a perda de antocianinas em função da temperatura e da velocidade de secagem do bagaço de mirtilo.

Assim, considerando apenas os efeitos significativos fez-se a estimação dos parâmetros que são apresentados na Equação 9 cujo coeficiente de determinação ficou em 0,8562.

$$\text{Perda de Antocianina (\%)} = 1,91 + 2,15x_1 + 0,78x_1^2 - 0,32x_2 \quad (9)$$

onde x_1 é a temperatura de secagem codificada x_2 é a velocidade de secagem codificada. Novamente, como $F_{\text{calculado}}$ (12,84) desse modelo foi maior que o F_{tabelado} (4,76), o modelo proposto é válido. A partir desse modelo foi possível construir as curvas de contorno da perda de antocianinas do bagaço de mirtilo em função da temperatura e da velocidade do ar de secagem apresentadas na Figura 11. A análise dessa figura mostra que houve uma perda maior de antocianina em temperaturas e velocidades maiores.

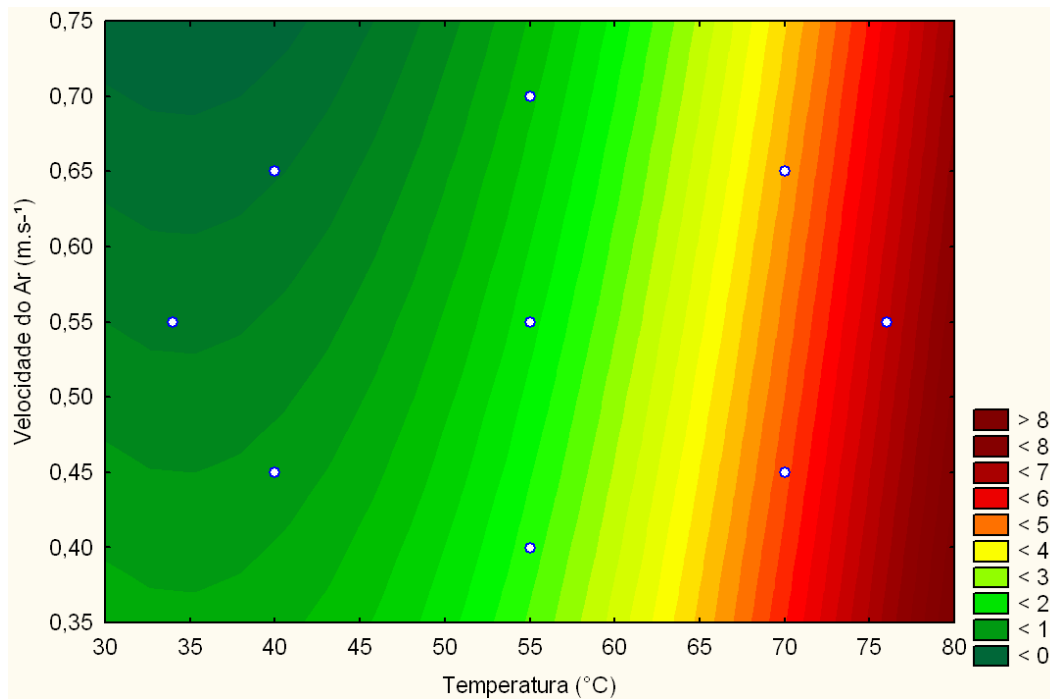


Figura 11. Curva de contorno da perda de antocianina em função da velocidade do ar e da temperatura para o bagaço de mirtilo.

De acordo com Kechinski et al. (2010a), em seus estudos de degradação das antocianinas do suco de mirtilo, a degradação térmica das antocianinas são maiores em temperaturas mais altas e o grau de estabilidade é maior em temperaturas menores.

5. CONCLUSÕES

O presente estudo analisou o efeito da temperatura e velocidade do ar de secagem na perda de compostos antociânicos do bagaço de mirtilo. Os resultados mostraram que as curvas de secagem apresentaram comportamentos exponenciais e que a velocidade do ar não influencia significativamente na secagem para a faixa de valores estudados, porém a temperatura do ar influencia significativamente, já que a taxa de secagem aumenta com o aumento da temperatura. Para o estudo das perdas de antocianinas, a temperatura e a velocidade do ar influenciaram significativamente na perda destes compostos durante a secagem, sendo observado que a taxa da perda de antocianina aumenta à medida que a temperatura aumenta.

Os resultados da quantificação das antocianinas não foram conclusivos e, por isso, os dados não foram colocados neste trabalho. Entre as possíveis causas deste erro podem ser citados o preparo de forma errada da amostra e o acondicionamento incorreto destas após a secagem, pegando umidade. Contudo, este trabalho servirá como base para futuros trabalhos que envolvem a secagem do bagaço, servindo como sugestão, por exemplo, a quantificação das antocianinas logo após a secagem e fazer um estudo cinético de degradação das antocianinas.

REFERÊNCIAS

ALVES, R. E.; BRITO, E. A.; RUFINO, M. S. M.; SAMPAIO, C. G. *Antioxidant activity measurement in tropical fruits: A case study with acerola*. Acta Horticulturae, v. 773, p. 299–305, 2008.

AL-ZUBAIDY, M.M.I.; KHALIL, R.A. *Kinetic and prediction studies of ascorbic acid degradation in normal and concentrate local lemon juice during storage*. Food Chemistry, v. 101, n. 1, p. 254-259, 2007.

AVERSA, M.; CURCIO, S.; CALABRÒ, V.; IORIO, G. *An analysis of the transport phenomena occurring during food drying process*. Journal of Food Engineering, v. 78, p. 922-932, 2007.

BANG, J.; KIM, H.; KIM, H.; BEAUCHAT, L., R.; RYU, J., H. *Combined effects of chlorine dioxide, drying, and dry heat treatments in inactivating microorganisms on radish seeds*. Food Microbiology, v. 28, p. 114-118, 2011.

BRIDLE, P.; TIMBERLAKE C. F. *Anthocyanins as natural food coloursselected aspects*. Food Chemistry, v. 58, p. 103-109, 1997.

CABRITA, L.; FOSSEN, T.; ANDERSEN, O. M. *Colour and stability of the six common anthocyanidin 3-glucosides in aqueous solutions*. Food Chemistry, v. 68(1), p. 101-107, 2000.

CASTAÑEDA - OVANDO, A.; PACHECO□HERNANDEZ, M.D.L.; PAEZ-HERNANDEZ, M.E.; RODRIGUEZ, J.A.; GALAN□VIDAL, C.A. *Chemical studies of anthocyanins: A review*. Food Chemistry, v. 113, n. 4, p. 859-871, 2009.

DOYMAZ, I. *Drying behaviour of green beans*. Journal of Food Engineering, v. 69, p. 161-165, 2005.

DOYMAZ, I. *Air-drying characteristics of tomatoes*. Journal of Food Engineering, v. 78, p. 1291-1297, 2007.

DOYMAZ, I. *The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices*. Journal of Food Engineering, v. 79, p. 243-248, 2007.

FELLOWS, P.J. *Tecnologia do Processamento de Alimentos: princípios e prática*; tradução OLIVERA, F. C. et al. 2 ed. Porto Alegre. Ed. Artmed, 2006. p.602.

FRANCIS, F.J. *Anthocyanins and betalains: composition and applications*. Cereal Foods World, v. 45, p. 208-213, 2000.

FRANCIS, F.J.; MARKAKIS, P.C. *Food colorants: Anthocyanins*. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, v. 28, n. 4, p. 273-314, 1989.

GAVA, A.J.; SILVA, C.A.B.D.; FRIAS, J.R.G. *Tecnologia de Alimentos: princípios e aplicações*. São Paulo. Ed. Nobel, 2008. p.511.

GIUSTI, M. M., WROLSTAD, R. E. *Acylated anthocyanins from edible sources and their applications in food systems*. Biochemical Engineering Journal, v.14, n.3, p. 217-225, 2003.

GIUSTI, M.M.; WROLSTAD, R.E. *Anthocyanins: characterization and measurement with UV-visible spectroscopy*. In: Current protocols in food analytical chemistry, New York. Wiley, p.1-13, 2001.

HÄNNINEN, O.; KAARTINEN, K.; RAUMA, A.-L.; NENONEN, M.; TÖRRONEN R.; S. HÄKKINEN S.; ADLERCREUTZ H.; LAAKSO, J. *Antioxidants in vegan diet and rheumatic disorders*. Toxicology, v.155, p. 45-53, 2000.

KALT, W.; FORNEY, C.F.; MARTIN, A.; PRIOR, R.L. *Antioxidant Capacity, Vitamin C, Phenolics, and Anthocyanins after Fresh Storage of Small Fruits*. Journal of Agricultural and Food Chemistry, v. 47, n. 11, p. 4638-4644, 1999.

KECHINSKI, C.P.; GUIMARÃES, P.V.R.; NOREÑA, C.P.Z.; TESSARO, I.C.; MARCZAK, L. D. F. *Degradation Kinetics of Anthocyanin in Blueberry Juice during Thermal Treatment*. Journal of Food Science, v. 75, p. C173-C176, 2010.

KECHINSKI, C.P.; SOUZA, A. C. P.; MARCZAK, L. D. F.; TESSARO, I.C. *Extração de antocianinas do bagaço de mirtilo*. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Química, XVIII, 2010, Paraná.

KIRCA, A.; OZKAN, M.; CEMEROĞLU, B. *Stability of black carrot anthocyanins in various fruit juices and nectars*. Food Chemistry, v. 97, n. 4, p. 598-605, 2006.

KIRCA, A.; OZKAN, M.; CEMEROĞLU, B. *Effects of temperature, solid content and pH on the stability of black carrot anthocyanins*. Food Chemistry v. 101, p. 212–218, 2007.

KONGZAK, I.; ZHANG, W. *Anthocyanins: more than nature's colours*. Hindawi Publishing Corporation, 2004.

NAGAYA, K.; LI, Y.; JIN, Z.; FUKUMURO, M.; Ando, Y.; AKAISHI, A. *Low-temperature desiccant-based food drying system with airflow and temperature control*. Journal of Food Engineering, v. 75 p. 71-77, 2006.

LAROCHE, C.; FINE, F.; GERVAIS, P. *Water activity affects heat resistance of microorganisms in food powders*. International Journal of Food Microbiology, v. 97, p. 307- 315, 2005.

LEE, J.; DURST R.W.; WROLSTAD R.E. *Impact of Juice Processing on Blueberry Anthocyanins and Polyphenolics: Comparison of Two Pretreatments*. Journal of food science, vol. 67, n. 5, p. 1660-1667, 2002.

MALACRIDA, C.R.; MOTTA, S.D. *Compostos fenólicos totais e antocianinas em suco de uva*. Ciência e Tecnologia de Alimentos, v. 25, p. 659-664, 2005.

MORAIS, H.; RAMOS, C.; FORGÁCS, E.; CSERHÁTI, T.; OLIVIERA, J. *Influence of storage conditions on the stability of monomeric anthocyanins studied by reversed-phase highperformance liquid chromatography*. Journal of Chromatography B: Analytical Technologies in the Biomedical and Life Sciences, v. 770, n. 1-2, p. 297-301, 2002.

OBÓN, J. M.; CASTELLAR, M.R.; ALACID, M.; FERNÁNDEZ-LÓPEZ, J. A.; *Production of a red–purple food colorant from Opuntia stricta fruits by spray drying and its application in food model systems*. Journal of Food Engineering, v. 90, p. 471-479, 2009.

OCHOA, M.R.; KESSELER, A.G.; VULLIOUD, M.B.; LOZANO, J.E. *Physical and Chemical Characteristics of Raspberry Pulp: Storage Effect on Composition and Color*. Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie, v. 32, n. 3, p. 149-153, 1999.

PAZMIÑO-DURÁN, E.A.; GIUSTI, M.M.; WROLSTAD, R.E.; GLÓRIA, M.B.A. *Anthocyanins from Oxalis triangularis as potential food colorants*. Food Chemistry, v. 75, n. 2, p. 211-216, 2001.

PRIOR, R.L.; WU, X. *Anthocyanins: structural characteristics that result in unique metabolic patterns and biological activities*. Free Radical Research, v. 40, p.1014-1028, 2006.

RAMIREZ, M.R.; IZQUIERDO, I.; RASEIRA, M.D.C.B.; ZUANAZZI, J.A.; BARROS, D.; HENRIQUES, A.T. *Effect of lyophilised vaccinium Berries on memory, anxiety and locomotion in adult rats*. Pharmacological Research, v. 52, p. 457-462, 2005.

RASEIRA, M.D.C.B.; ANTUNES, L.E.C. *A cultura do mirtilo (Vaccinium myrtillus)*. Pelotas: Embrapa Clima Temperado. 69 p., 2004.

SELLAPPAN, S.; AKOH, C.C.; KREWER, G. *Phenolic Compounds and Antioxidant Capacity of Georgia - Grown Blueberries and Blackberries*. Journal of Agricultural and Food Chemistry, v.50, n. 8, p. 2432-2438, 2002.

SIEMENS. *Manual Siemens Micromaster 420*. Ed. 2001.

SILVA, L. *Caracterização dos subprodutos da vinificação*. Revista do Instituto Superior Politécnico de Viseu, v. 28, p. 123-133, 2003.

SINELLI N.; SPINARDI, A.; EGIDIO D. V.; MIGNANI, I.; CASIRAGHIA, E. *Evaluation of quality and nutraceutical content of blueberries (Vaccinium corymbosum L.) by near and mid-infrared spectroscopy*. Postharvest Biology and Technology, v. 50, p. 31-36, 2008.

SKREDE, G.; WROLSTAD, R.E.; DURST, R.W. *Changes in Anthocyanins and Polyphenolics During Juice Processing of Highbush Blueberries (Vaccinium corymbosum L.)*. Journal of Food Science, v. 65, n. 2, p. 357-364, 2000.

SOUSA, M.B.; CURADO, T.; VASCONCELLOS, F.N.; TRIGO, M.J. *Mirtilo: qualidade pós-colheita*. Agro divulgação v. 556, n. 8, 2007.

WANG, L.-S.; STONER, G. D. *Anthocyanins and their role in cancer prevention*. Cancer Letters, v.269, p. 281-290, 2008.

WANG, W.-D.; XU, S.-Y. *Degradation kinetics of anthocyanins in blackberry juice and concentrate*. Journal of Food Engineering, v. 82, n. 3, p. 271-275, 2007.

YUE, X.; XU, Z. *Changes of Anthocyanins, Anthocyanidins, and Antioxidant Activity in Bilberry Extract during Dry Heating*. Journal of Food Science, v. 73, n. 6, p. C494- C499, 2008.

APÊNDICE A – Default dos parâmetros do Siemens MICROMASTER 420 (inversor de freqüência ligada à resistência do secador)

Segue abaixo algumas dicas para quem está iniciando na operação do inversor:

- **P0003** → nível de acesso do usuário. Existem 4 níveis: padrão (1), estendido (2), avançado (3) e o de serviço (4). Estão apresentados nas Tabelas 10 e 11, os níveis 3 e 2, respectivamente.

- **P0004** → filtro de parâmetros. O inversor permite que se faça uma filtragem dos parâmetros, ou seja, dependendo do código escolhido abaixo, mostra apenas os parâmetros relacionados a uma área específica. Por exemplo:
 - Sem função de filtragem. Permite acesso direto aos parâmetros (P0004=0);
 - Unidade inversora (P0004=2);
 - Dados do Motor (P0004=3);
 - Comandos e Entradas/Saídas Digitais (P0004=7);
 - Entrada/Saída Analógica (P0004=8);
 - Canal de Referência e Gerador de Rampa (P0004=10);
 - Características Adicionais (P0004=12);
 - Controle do Motor (P0004=13);
 - Comunicação (P0004=20);
 - Alarmes, Advertências e Monitoração (P0004=21);
 - Controle PI (P0004=22).

- **P0010** → filtro de parâmetros de comissionamento. É dividido entre:
 - 0: pronto para partir;
 - 1: comissionamento rápido;
 - 30: ajustes de fábrica.

Nota: P0010 deve sempre ser levado a '0' antes de operar o motor. Contudo, se P3900 = 1 for selecionado ao final, isto se dará automaticamente.

Tabela 10. Lista de parâmetros para P0003=3 e P0004=0.

Código	Nome do parâmetro	Nível	Default
r0002	Estado do acionamento	2	1
P0005	Seleção do display	2	21
P0006	Modo do display	3	2
P0007	Retardo para desligar iluminação do display	3	0
P0010	Filtro de parâmetros de comissionamento	1	0
P0011	Trava para determinados parâm. de usuário	3	0
P0012	Chave para determinados parâm. de usuário	3	1
P0013	Definição dos parâmetros do usuário	3	in000→0
r0018	Versão do Firmware	1	1.05
r0019	CO/BO: palavra de controle BOP	3	b---r
r0020	CO: Referência de frequência atual	3	10 Hz
r0021	CO: Frequência atual	2	0 Hz
r0022	Velocidade atual do motor	x	0 min-1
r0024	CO: Frequência de saída atual	3	0 Hz
r0025	CO: Tensão de saída atual	2	0 V
r0026	CO: Tensão do link DC	2	552 V
r0027	CO: Corrente de saída atual	2	0.00 A
r0034	CO: Utilização do motor	2	0.0
r0037	CO: Temperatura do inversor	3	24
r0039	CO: Medidor do consumo de energia	2	0.0 kWh
P0040	Reseta o medidor do consumo de energia	2	0
r0052	CO/BO: Palavra de estado 1	2	buH L 7
r0053	CO/BO: Palavra de estado 2	2	brr J -
r0054	CO/BO: Palavra de controle 1	3	b7 nn r
r0055	CO/BO: Palavra de controle 2	3	b- L --
r0056	CO/BO: Status do controle do motor	2	b---n
r0067	CO: Limite atual de corrente do acionamento	3	15.45 A
r0071	CO: Tensão de saída máxima	3	380.0 V
r0086	CO: Corrente ativa atual	3	0.0A
P0100	Europa/América	1	2
r0200	Cód. numérico da faixa de potência atual	3	33
P0201	Código numérico da faixa de potência	3	33
r0203	Modelo do inversor	3	1
r0204	Característica da faixa de potência	3	b--.--
r0206	Potência nominal do inversor [kW] ou [hp]	2	7.5 kW
r0207	Corrente nominal do inversor	2	18.40 A
r0208	Tensão nominal de alimentação do inversor	2	400 V
P0210	Tensão de alimentação do inversor	3	400 V
r0231	Comprimento máximo de cabos	3	in000→100
P0290	Reação do inversor a uma sobrecarga	3	2
P0291	Configuração da proteção do inversor	3	b---7
P0292	Alarme de sobrecarga do inversor	3	15
P0300	Seleção do tipo do motor	2	1
P0304	Tensão nominal do motor	1	380 V
P0305	Corrente nominal do motor	1	10.00 A
P0307	Potência nominal do motor [kW] ou [hp]	1	5.00 kW
P0308	CosPhi nominal do motor	2	0.000
P0310	Frequência nominal do motor	1	60.00 Hz
P0311	Velocidade nominal do motor	1	3400 min-1
r0313	Par de polos do Motor	3	1
P0320	Corrente de magnetização do motor	3	0.0
r0330	Escorregamento nominal do motor	3	5.56

r0331	Corrente nominal de magnetização	3	3.742 A
r0332	Fator de potência nominal	3	0.860
P0335	Refrigeração do motor	2	0
P0340	Cálculo de parâmetros do motor	2	0
P0344	Peso do motor	3	38.0
P0346	Tempo de magnetização	3	0.164
P0347	Tempo de desmagnetização	3	0.164
P0350	Resistência do estator (fase/fase)	3	3 . 2052
r0384	Constante de tempo do rotor	3	164
r0395	Resistência total do estator [%]	3	7.3
P0610	Reação térmica I2t do motor	2	2
P0611	Constante de tempo - I2t do motor	2	1071
P0614	Alarme de sobrecarga - I2t do motor	2	100.0
P0640	Fator de sobrecarga do motor (%)	2	150.0
P0700	Seleção da origem do comando	1	1
P0701	Seleção da entrada digital	2	0
P0702	Seleção da entrada digital	2	0
P0703	Seleção da entrada digital	2	9
P0704	Seleção da entrada digital	2	0
P0719	Seleção de comando e ref. de frequência	3	0
r0720	Número de entradas digitais	3	4
r0722	CO/BO: valores das entradas digitais	2	b--r-
P0724	Tempo de retardo das entradas digitais	3	3
P0725	Seleção PNP / NPN das entradas digitais	3	1
r0730	Número de saídas digitais	3	1
P0731	BI: Função da saída digital	2	52.3
r0747	CO/BO: Estado da saída digital	3	b---γ
P0748	Defina ação da saída digital	3	b---.---
r0750	Número de entradas analógicas	3	1
r0752	Valor do sinal na entrada analógica [V] - oscila	2	10.00
P0753	Tempo de filtro da entrada analógica	3	3
r0754	Valor da entr. analóg. após escala [%] - oscila	2	100.00
r0755	CO: valor da ent. an. após escala [4000h]	2	16 384
P0756	Tipo de entrada analógica	2	1
P0757	Valor x1 de escala da entrada analógica	2	0.00 V
P0758	Valor y1 de escala da entrada analógica	2	0.00
P0759	Valor x2 de escala da entrada analógica	2	10.00 V
P0760	Valor y2 de escala da entrada analógica	2	100.0
P0761	Largura da banda morta da entrada analógica	2	0.00 V
P0762	Retardo para falha de perda de sinal	3	10
r0770	Número de saídas analógicas	3	1
P0771	CI: Saída analógica	2	21
P0773	Tempo de filtro da saída analógica	3	2
r0774	Valor real da saída analógica	2	0.00
P0776	Tipo de saída analógica	3	0
P0777	Valor x1 de escala da saída analógica	2	0.00
P0778	Valor y1 de escala da saída analógica	2	0.00
P0779	Valor x2 de escala da saída analógica	2	100.00
P0780	Valor y2 de escala da saída analógica	2	20.00
P0781	Largura da banda morta da saída analógica	2	0.00
P0800	BI: Download jogo de parâmetros 0	3	0
P0801	BI: Download jogo de parâmetros 1	3	0
P0840	BI: ON/OFF1	3	19.0
P0842	BI: ON/OFF1 reversão	3	0

P0844	Bl: 1. OFF2	3	19.1
P0845	Bl: 2. OFF2	3	19.1
P0848	Bl: 1. OFF3	3	1
P0849	Bl: 2. OFF3	3	1
P0852	Bl: Liberação de impulsos	3	1
P0918	CB Endereço no bus	2	3
P0927	Via permitida para alteração de parâmetros	2	b--nn
r0947	No. de falhas	2	in000→0
r0948	Momento da falha	3	in000→0
P0952	No. total de falhas	3	3
r0964	Dados da versão do Firmware	3	in000→42
r0967	Palavra de controle 1	3	b ₇ nn Γ
r0968	Palavre de estado 1	3	buH ^L γ
P0970	Reset aos valores da fábrica	1	0
P0971	Transf. de dados da RAM para EEPROM	3	0
P1000	Seleção da referência de frequência	1	2
P1001	Frequência fixa 1	2	0.00
P1002	Frequência fixa 2	2	5.00 Hz
P1003	Frequência fixa 3	2	10.00 Hz
P1004	Frequência fixa 4	2	15.00 Hz
P1005	Frequência fixa 5	2	20.00 Hz
P1006	Frequência fixa 6	2	25.00 Hz
P1007	Frequência fixa 7	2	30.00 Hz
P1016	Modo frequência fixa - Bit 0	3	1
P1017	Modo frequência fixa - Bit 1	3	1
P1018	Modo frequência fixa - Bit 2	3	1
P1020	Bl: Frequência fixa - seleção Bit 0	3	0
P1021	Bl: Frequência fixa - seleção Bit 1	3	0
P1022	Bl: Frequência fixa - seleção Bit 2	3	0
r1024	CO: Frequência fixa atual	3	0.00 Hz
P1031	Memória da referência de potenc. motoriz.	2	0
P1032	Inibe reversão pelo potenc. motoriz.	2	1
P1035	Bl: Habilita potenciômetro motoriz(aumentar)	3	19.d
P1036	Bl: Habilita potenciômetro motoriz (diminuir)	3	19.E
P1040	Referência do potenciômetro motorizado	2	5.00 Hz
r1050	CO: valor da ref. do potenciômetro motoriz.	3	5.00 Hz
P1055	Bl: Habilita JOG à direita	3	19.8
P1056	Bl: Habilita JOG à esquerda	3	0
P1058	Frequência de JOG à direita	2	5.00 Hz
P1059	Frequência de JOG à esquerda	2	5.00 Hz
P1060	JOG tempo de rampa de aceleração	2	10.00 Hz
P1061	JOG tempo de rampa de desaceleração	2	10.00 Hz
P1070	Cl: Referência principal	3	755
P1071	Cl: Escala da referência principal	3	1
P1074	Bl: Desabilita referência adicional	3	0
P1075	Cl: Referência adicional	3	0
P1076	Cl: Escala da referência adicional	3	1
r1078	CO: Referência de frequência total	3	60.00 Hz
r1079	CO: Referência de frequência selecionada	3	60.00 Hz
P1080	Frequência mínima	1	0.00 Hz
P1082	Frequência máxima	1	45.00 Hz
P1091	Frequência omitida 1	3	0.00 Hz
P1092	Frequência omitida 2	3	0.00 Hz
P1093	Frequência omitida 3	3	0.00 Hz

P1094	Frequência omitida 4	3	0.00 Hz
P1101	Largura de banda da frequência omitida	3	2.00 Hz
P1110	Bl: Inibe referência negativa de frequência	3	0
P1113	Bl: Reversão	3	19.b
r1114	CO: Ref. de freq. após controle de direção (oscila)	3	60.00 Hz
r1119	CO: Ref de freq. antes de limites	3	10.00 Hz
P1120	Tempo de rampa de aceleração	1	5.00
P1121	Tempo de rampa de desaceleração	1	5.00
P1124	Bl: Habilita os tempos de rampa de JOG	3	0
P1130	Rampa acel - tempo de arredond. Inicial	2	0.00
P1131	Rampa acel - tempo de arredond. Final	2	0.00
P1132	Rampa desacel - tempo de arredond. Inicial	2	0.00
P1133	Rampa desacel - tempo de arredond. Final	2	0.00
P1134	Tipo de arredondamento	2	0
P1135	OFF3 tempo de desaceleração	2	5.00
r1170	CO: Referência de frequência	3	0.00 Hz
P1200	Partida com motor girando - habilitação	2	0
P1202	Partida com motor girando- corrente do motor	3	100
P1203	Partida com motor girando - taxa de procura	3	100
P1210	Rearranque automatico	2	1
P1211	Número de tentativas de rearmar	3	3
P1215	MHB(*) habilitação da função	2	0
P1216	MHB(*) retardo na liberação	2	1.0
P1217	MHB(*) tempo de sustentação	2	1.0
P1230	Bl: Habilita frenagem DC	3	0
P1232	Corrente da frenagem DC	2	100
P1233	Duração da frenagem DC	2	0
P1236	Corrente da frenagem Compound	2	0
P1240	Configuração do controle Vdc-máx	3	1
r1242	CO:Nível de ativação do controle de Vdc-máx	3	626.0 V
P1243	Fator dinâmico do controle de Vdc-máx	3	100
P1253	Limitação da saída do controle Vdc	3	8.33 Hz
P1254	Auto-deteção de entrada do controle Vdc	3	1
P1300	Modo de controle	2	0
P1310	Continuous	2	50.0
P1311	Boost de Acceleration	2	0.0
P1312	Boost de partida	2	0.0
P1316	Frequência final do boost	3	17.0
P1320	V/f Programável - frequência do ponto 1	3	0.00 Hz
P1321	V/f Programável - tensão do ponto 1	3	0.0 V
P1322	V/f Programável - frequência do ponto 2	3	0.00 Hz
P1323	V/f Programável - tensão do ponto 2	3	0.0
P1324	V/f Programável - frequência do ponto 3	3	0.00 Hz
P1325	V/f Programável - tensão do ponto 3	3	0.0 V
P1333	Frequência de partida para FCC	3	10.0
P1335	Compensação de escorregamento	2	0.0
P1336	Limite de escorregamento	2	250
r1337	CO: Frequência de escorregamento	3	0.00
P1338	Resonance damping gain V/f	3	0.00
P1340	Ganho proporcional do controle de Imáx.	3	0.000
P1341	Cte. de tempo integral do controle de Imáx.	3	0.300
r1343	CO: Frequência de saída do contr. de Imáx.	3	20.00 Hz
r1344	CO: Tensão de saída do controle de Imáx.	3	0.0 V
P1350	Partida suave de tensão	3	0

P1800	Frequência de chaveamento	2	4
r1801	CO: Frequência de chaveamento atual	3	2
P1802	Modo de modulação	3	0
P1820	Reversão da sequência de fases na saída	2	0
P1910	Seleção de identificação do motor	2	0
r1912	Resistência medida do estator	2	0.0000
P2000	Frequência de referência	2	60.00 Hz
P2001	Tensão de referência	3	1000 V
P2002	Corrente de referência	3	20.00 A
P2009	Normalização USS	3	in000→0
P2010	USS taxa de transferência	2	in000→6
P2011	USS endereço	2	in000→0
P2012	USS Comprimento de PZD	3	in000→2
P2013	USS Comprimento de PKW	3	in000→127
P2014	USS Tempo de ausência de telegrama	3	in000→0
r2015	CO: PZD do BOP link (USS)	3	in000→1
P2016	CI: PZD para o BOP link (USS)	3	in000→52
r2018	CO: PZD do COM link (USS)	3	in000→1
P2019	CI: PZD para o COM link (USS)	3	in000→52
r2024	USS No. de telegramas sem erro	3	in000→0
P2025	USS No. de telegramas rejeitados	3	in000→0
r2026	USS No. de erros de caracteres	3	in000→0
r2027	USS No. de telegramas repletos de erros	3	in000→0
r2028	USS No. de telegramas com erro de paridade	3	in000→0
r2029	USS No. de telegr. c/ comando indefinido	3	in000→0
r2030	USS No. de telegramas com erro BCC	3	in000→0
r2031	USS No. de telegr. com erro de comprimento	3	in000→0
r2032	BO: Pal.Contr.1 do BOP link (USS)	3	1
r2033	BO: Pal.Contr.2 do BOP link (USS)	3	0
r2036	BO: Pal.Contr.1 do COM link (USS)	3	1
r2037	BO: Pal.Contr.2 do COM link (USS)	3	0
P2040	CB Tempo de ausência de telegrama	3	0
P2041	Parâmetro CB	3	in000→0
r2050	CO: PZD da CB	3	in000→1
P2051	CI: PZD para CB	3	in000→52
r2053	Identificação da CB	3	in000→0
r2054	Diagnose da CB	3	in000→0
r2090	BO: Palavra de controle 1 da CB	3	1
r2091	BO: Palavra de controle 2 da CB	3	0
P2100	No. de falhas com reação alterada	3	in000→0
P2101	Valor da reação alterada de falha	3	in000→0
P2103	BI: 1. Reconhecimento de falhas	3	722.2
P2104	BI: 2. Reconhecimento de falhas	3	0
P2106	BI: Falha externa	3	1
r2110	Número de alarmes	2	in000→0
P2111	Número total de alarmes	3	2
r2114	Contador de tempo de motor em operação	3	in000→0
P2115	Hora real do relógio do AOP	3	in000→0
P2150	Histerese de frequência f,hys	3	3.00
P2155	Threshold frequency f1	3	30.00 Hz
P2156	Tempo de retardo f1	3	10
P2164	Hysteresis frequency f,hysLeave	3	3.00 Hz
P2167	Switch-off frequency f_off	3	1.00 Hz
P2168	Delay time Toff (inverter switch-off)	3	10

P2170	Threshold current I,thresh	3	100.0
P2171	Tempo de retardo de corrente	3	10
P2172	Threshold voltage Vdc, thresh	3	800 V
P2173	Tempo de retardo Vdc	3	10
P2179	Corrente limite para identificar falta de carga	3	3.0
P2180	Retardo para identificar falta de carga	3	2000
r2197	CO/BO:Palavra de est. 1 de monitoramento	2	b- Γ Γh
P2200	BI: Habilita o controle PID	2	0
P2201	PID - referência fixa 1	2	0.00
P2202	PID - referência fixa 2	2	8.33
P2203	PID - referência fixa 3	2	16.67
P2204	PID - referência fixa 4	2	25.00
P2205	PID - referência fixa 5	2	33.33
P2206	PID - referência fixa 6	2	41.67
P2207	PID - referência fixa 7	2	50.00
P2216	PID - modo de referência fixa - Bit 0	3	1
P2217	PID - modo de referência fixa - Bit 1	3	1
P2218	PID - modo de referência fixa - Bit 2	3	1
P2220	BI: Ref. fixa de PID. seleção Bit 0	3	0
P2221	BI: Ref. fixa de PID. seleção Bit 1	3	0
P2222	BI: Ref. fixa de PID. seleção Bit 2	3	0
r2224	CO: PID - referência fixa atual	2	0.00
P2231	Memória de referência do PID-pot. Motoriz.	2	0
P2232	Inibe reversão ref. do PID-pot. motoriz.	2	1
P2235	BI: Habilita potenc. motoriz PID (aumentar)	3	19.d
P2236	BI: Habilita potenc. motoriz. PID (diminuir)	3	19.E
P2240	Referência do PID-potenciômetro motorizado	2	8.33
r2250	CO: Referência ext. PID-pot. Motorizado	2	8.33
P2253	CI: Referência de PID	2	0
P2254	CI: PID trim source	3	0
P2255	PID fator de ganho da referência	3	100.00
P2256	PID trim gain factor	3	100.00
P2257	Tempo de aceleração para referência do PID	2	1.00
P2258	Tempo de desacel. Para a referência do PID	2	1.00
r2260	CO: Referência de PID atual	2	0.00
P2261	PID Cte. de tempo do filtro da referência	3	0.00
r2262	CO: Referência filtrada de PID atual	3	0.00
P2264	CI: Realimentação do PID	2	755
P2265	PID Cte de tempo do filtro de realimentação	2	0.00
r2266	CO: Realimentação do PID	2	100.00
P2267	Máximo valor da realimentação do PID	3	100.00
P2268	Mínimo valor da realimentação do PID	3	0.00
P2269	Ganho aplicado à realimentação do PID	3	100.00
P2270	realimentação do PID - seletor de função	3	0
P2271	PID Tipo de transdutor	2	0
r2272	CO: realimentação do PID escalonada (oscila)	2	100.00
r2273	CO: erro de PID	2	-100
P2280	PID - ganho proporcional	2	3.00
P2285	PID - tempo integral	2	0.00
P2291	PID - limite superior da saída	2	100.00
P2292	PID - limite inferior da saída	2	0.00
P2293	PID - Tempos de rampas até os limites	3	1.00
r2294	CO: Saída atual do PID	2	0.00
P3900	Fim do comissionamento rápido	1	0

Fonte: Manual Siemens Micromaster 420, 2001

Para o comissionamento rápido:

Tabela 11. Lista de parâmetros P0003=2 e P0004=0.

Código	Nome do parâmetro	Default
r0018	Versão do Firmware	1.05
P0100	Operação para Europa/América	2
P0304	Tensão Nominal do Motor	380 V
P0305	Corrente Nominal do Motor	10.00 A
P0307	Potência Nominal do Motor	5.00 kW
P0310	Frequência Nominal do Motor	60 Hz
P0311	Velocidade Nominal do Motor	3400 min ⁻¹
P0700	Seleção da Fonte de Comando	1
P0970	Reset aos valores da fábrica	0
P1000	Seleção do Controle de Frequência	2
P1080	Frequência Mínima do Motor	0.00
P1082	Frequência Máxima do Motor	45.00 Hz
P1120	Tempo da Rampa de Aceleração	5.00
P1121	Ramp-Down Time	5.00
P3900	Fim do comissionamento rápido	0

Fonte: Manual Siemens Micromaster 420, 2001

APÊNDICE B – Tabelas dos Resultados Experimentais

onde X_{adm} é a umidade adimensional e UR é umidade relativa.

Exp. t (min)	1	2	5	6
	X_{adm}			
0	1,000	1,000	1,000	1,000
5	0,915	0,919	0,867	0,864
10	0,840	0,842	0,739	0,734
25	0,556	0,555	0,346	0,325
30	0,502	0,500	0,285	0,265
45	0,322	0,321	0,137	0,122
50	0,289	0,290	0,117	0,106
65	0,195	0,187	0,063	0,059
70	0,179	0,173	0,056	0,053
85	0,126	0,124	0,033	0,029
90	0,118	0,116	0,031	0,027
105	0,090	0,083		
110	0,086	0,079		

Exp. t (min)	3	4	8
	X_{adm}		
0	1,000	1,000	1,000
2	0,946	0,882	0,875
6	0,763	0,583	0,554
10	0,604	0,388	0,345
14	0,460	0,268	0,221
18	0,341	0,197	0,150
22	0,246	0,154	0,119
26	0,174	0,119	0,087
30	0,122	0,104	0,068
34	0,084	0,084	
38	0,056	0,076	
42	0,038	0,067	
46	0,026	0,060	
50	0,018	0,055	
54	0,011		
58	0,007		
62	0,001		

Exp. t (min)	7	9	10
	X_{adm}		
0	1,000	1,000	1,000
5	0,943	0,909	0,859
15	0,768	0,665	0,508
25	0,624	0,466	0,302
35	0,489	0,319	0,174
45	0,386	0,222	0,115
55	0,306	0,160	0,088
65	0,246	0,119	0,054
75	0,204	0,093	0,039
85	0,171	0,075	0,034
95	0,151	0,062	
105	0,126	0,052	
115	0,117	0,044	
125	0,104		
135	0,102		

Exp t (min)	UR (%)	
	Pré secagem	Pós secagem
1	64,44	11,02
2	65,86	11,84
3	70,13	2,63
4	69,95	3,60
5	65,86	5,13
6	65,86	8,37
7	65,90	14,66
8	69,95	7,26
9	65,90	6,29
10	65,90	8,78