



UNIVERSIDADE DE UBERABA

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

SIEGRID KOPP IKEDA

**ESTUDO DAS VARIÁVEIS DE SECAGEM NA PRODUÇÃO DE  
MALTODEXTRINA E OS IMPACTOS NO DESEMPENHO DO SECADOR E NO  
PRODUTO**

UBERABA-MG  
2021





SIEGRID KOPP IKEDA

**ESTUDO DAS VARIÁVEIS DE SECAGEM NA PRODUÇÃO DE  
MALTODEXTRINA E OS IMPACTOS NO DESEMPENHO DO SECADOR E NO  
PRODUTO**

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).

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Delalibera Finzer

UBERABA-MG  
2021

Catálogo elaborado pelo Setor de Referência da Biblioteca Central UNIUBE

- I3e Ikeda, Siegrid Kopp.  
Estudo das variáveis de secagem na produção de maltodextrina e os impactos no desempenho do secador e no produto / Siegrid Kopp Ikeda. – Uberaba, 2021.  
78 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade de Uberaba. Programa de Mestrado em Engenharia Química, concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos Agroindustriais.  
Orientador: Prof. Dr. José Roberto Delalibera Finzer.
1. Carboidratos. 2. Processos de secagem. 3. Engenharia Química.  
I. Finzer, José Roberto Delalibera. II. Universidade de Uberaba.  
Programa de Mestrado em Engenharia Química. III. Título.

CDD 660.28426

SIEGRID KOPP IKEDA

**ESTUDO DAS VARIÁVEIS DE SECAGEM NA PRODUÇÃO DE MALTODEXTRINA E  
OS IMPACTOS NO DESEMPENHO DO SECADOR E NO PRODUTO**

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

Aprovado em: 29/03/2021

BANCA EXAMINADORA:



Prof(a). Dr(a). José Roberto Delalibera Finzer - Orientador  
Universidade de Uberaba



Prof(a). Dr(a). Eloízio Júlio Ribeiro  
Universidade Federal de Uberlândia



Prof(a). Dr(a). Euclides Antônio Pereira de Lima  
Universidade de Uberaba



## DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Antônio Ikeda e Ani Ikeda, com muito amor.

Aos meus irmãos, Adi, Margit e Dieter; meus sobrinhos, Julia, Pedro, Marina, Sofia e Jasmin e meus cunhados, Tiago, André e Lídia.

A escolha da minha profissão na engenharia se deve a minha afinidade com a ciência, a matemática e uma influência positiva dos meus tios engenheiros, José Antônio Amaro, engenheiro químico, Jorge Udo Kopp, engenheiro metalúrgico, e Rayal Tusutiya, engenheiro mecânico.

Aos meus ancestrais.



## **AGRADECIMENTOS**

Aos docentes do Mestrado em Engenharia Química da Universidade de Uberaba, pelo conhecimento compartilhado e pela troca de experiências durante as atividades.

Agradeço aos meus colegas de trabalho do laboratório e da produção, pelo tempo e pela dedicação para explicar o processo de produção da maltodextrina, e aos meus gestores, que incentivam o meu desenvolvimento na Cargill Agrícola S.A.

À Cargill Agrícola S.A, que disponibilizou as informações de processos e dados, possibilitando a realização deste trabalho.

Ao meu orientador, Professor Dr. José Roberto Delalibera Finzer, pela sabedoria, orientação e dedicação para a elaboração desta dissertação, minha gratidão.

Por fim, agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais – FAPEMIG, pelo importante apoio dado ao desenvolvimento desta dissertação.



## **EPÍGRAFE**

Acredite sempre no tempo e no potencial. Tenha um propósito genuíno. Dedique-se e sinta seu coração. Divirta-se, empolgue-se com as pequenas conquistas. Seja grata.



## RESUMO

As maltodextrinas são produtos da hidrólise parcial do amido e têm sido largamente usadas em muitos tipos de alimentos processados. São classificadas de acordo com o grau de hidrólise do amido e possuem várias propriedades funcionais, como doçura, solubilidade e viscosidade. Também consiste em um produto de aplicabilidade ampla, como suplementos energéticos. A variação da densidade final do produto pode não atender à especificação de empresas consumidoras. Isto ocasiona problemas no armazenamento do produto acabado e um possível risco de segurança no armazenamento. O produto não ficará adequadamente posicionado nos paletes ou ocorrerá avaria nas embalagens, devido ao armazenamento inadequado, gerando perdas financeiras ou devoluções de produtos. A decisão de avaliar o controle de qualidade de malto dextrina amadureceu após a constatação de que a densidade final tem um impacto no armazenamento e no atendimento dos clientes. Este trabalho tem por objetivo verificar a influência dos parâmetros de secagem em *spray dryer*, na densidade aparente da maltodextrina em seis lotes industriais, utilizando os dados de processos disponíveis. Adicionalmente, calculou-se o balanço de massa e energia envolvidos na secagem destes lotes de maltodextrina e a temperatura de transição vítrea nas condições de operação do *spray dryer*. As perdas do processo e a eficiência térmica do *spray dryer* foram calculadas neste estudo para conhecimento e ações futuras. O estudo mostrou que entre os parâmetros quantificados, o vácuo aplicado no secador por atomização (*spray dryer*) que influenciou na densidade aparente da malto dextrina e o secador deve operar com um vácuo médio de 44 mmCa, uma vez que os outros parâmetros de secagem apresentaram valores similares e, portanto, sem influência na densidade aparente. A porosidade média da maltodextrina foi de  $0,7018 \pm 0,017$ . Pelas informações do fabricante (NIRO-GEA), a capacidade de evaporação é de  $1200,00 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$  e a taxa da massa de água evaporada, calculada em média no sistema, é de  $825,19 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ , o que leva à conclusão que o *spray dryer* estava operando com 69% da capacidade de projeto durante a produção. A densidade do *liquor* calculado, utilizando-se a Equação de CHOI e OKUS (1986), é de  $1310,62 \pm 2,81 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  e calculado utilizando-se o valor do sólido total para conversão, é de  $1340,15 \pm 3,16 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . A taxa mássica média de maltodextrina não recuperada no processo, calculada através do balanço de massa, é de  $269,53 \pm 122,90 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ . O sistema de secagem apresentou uma taxa de perda de energia de  $-1.670.069,04 \pm 53.499,07 \text{ kJ} \cdot \text{h}^{-1}$ , que consiste na perda de 19%. A eficiência térmica do sistema foi de  $0,26 \pm 0,01$ , o que significa que 26% da energia é utilizada para a secagem do produto. O valor da temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) calculada para este sistema de secagem está entre 150,0 a 151,8°C, a temperatura de saída da



câmara do secador entre 106,12°C a 107,05°C e a temperatura de entrada do ar no secador entre 192,08°C a 196,43°C. A temperatura de operação interna do secador está abaixo da temperatura de transição vítrea do produto final. Isso possibilita classificar o produto como vítreo.

Palavras-chaves: Maltodextrina. Balanço de massa. Balanço de energia. Temperatura de transição vítrea.



## ABSTRACT

Maltodextrins are products of partial hydrolysis of starch and have been widely used in many types of processed foods. They are classified according to the degree of hydrolysis of the starch and have several properties attributed as sweetness, solubility and viscosity. It also consists of a product with wide applicability, such as energy supplements. The variation in the final density of the product may not meet the specification of consumer companies. This causes problems in the storage of the finished product, causing a possible safety risk in storage. The product will not be positioned on the pallets or there will be damage to the packaging due to due storage, generating financial losses or product returns. The decision to conduct current research on maltodextrin quality control has matured after realizing that the final density has an impact on storage and not serving customers. This work aims to verify the influence of spray drying parameters on the apparent density of maltodextrin in six batches. After the evaluation, it was identified that the vacuum variation in the spray dryer caused deviations in the final product density. Additional, the mass and executive energy balance is calculated when drying the maltodextrin batches. The process losses and the thermal efficiency of the spray dryer were calculated in this study for future knowledge and actions. The glass transition temperature was evaluated in the spray dryer operating conditions and considerations were made for studies. The study showed that among the quantified parameters, the vacuum applied in the spray dryer that influenced the apparent density of maltodextrin and the operation of the dryer should operate with an average vacuum of 44 mmCa, since the other drying parameters presented similar values and, therefore, without influence on apparent density. The mean porosity of maltodextrin was  $0.7018 \pm 0.017$ . According to manufacturer information (NIRO-GEA), the evaporation capacity is  $1200.00 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$  and the rate of evaporated water mass calculated on average in the system is  $825.19 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ , which leads to the conclusion of what the spray dryer was operating at 69% of the design capacity during production. The density of the liquor calculated using the EQUATION CHOI and OKUS (1986) is  $1310.62 \pm 2.81 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  and calculated using the value of the total solid for conversion is  $1340.15 \pm 3.16 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . The mean mass rate of maltodextrin not recovered in the process calculated by mass balance is  $269.53 \pm 122.90 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ . The drying system showed an energy loss rate of  $-1,670,069.04 \pm 53,499.07 \text{ kJ} \cdot \text{h}^{-1}$ , which consists of a loss of 19%. The thermal efficiency of the system was  $0.26 \pm 0.01$ , which means that 26% of the energy is used for drying the product. The value of the glass transition temperature ( $T_g$ ) calculated for this drying system is between  $150.0$  a  $151.8^\circ\text{C}$ , the output temperature of the dryer chamber between  $106.12^\circ\text{C}$  to  $107.05^\circ\text{C}$  and the air inlet temperature in the dryer between



192.08°C to 196.43°C. The internal operating temperature of the dryer is below the glass transition temperature of the final product. This makes it possible to classify the product as vitreous.

Keywords: Maltodextrin. Mass balance. Energy balance. Glass transition temperature.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Representação esquemática de amilopectina (SILVA, 1995)	27
Figura 2.2	Representação esquemática de amilose (SILVA, 1995).	27
Figura 2.3	Composição de carboidratos de maltodextrina com DE 20 produzidas por diferentes processos (SILVA <i>et al.</i> , 2014).	30
Figura 2.4	Variação do tempo de hidrólise do amido de diferentes fontes em função da DE requerida (adaptado SOTO <i>et al.</i> , 2012).	30
Figura 2.5	Representação esquemática do processo de conversão do amido a maltodextrina (CHANGZHOU, 2016).	32
Figura 2.6	Formação da microcápsula na secagem por spray dryer (SILVA <i>et al.</i> , 2014).	34
Figura 2.7	Esquema do funcionamento do <i>spray dryer</i> (SILVA, 2014).	34
Figura 2.8	Densidade aparente do molho de soja em pó em diferentes condições de secagem (WANG <i>et al.</i> , 2015).	35
Figura 2.9	Distribuição do tamanho de partícula das partículas de molho de soja em pó em diferentes condições de secagem (WANG <i>et al.</i> , 2015).	37
Figura 2.10	Estado físico de materiais. Mudança entre estados de equilíbrio e estado vítreo que sempre ocorre através do estado gomoso (COLLARES, 2001).	38



Figura 2.11	Evolução da temperatura de transição vítrea do produto alimentício no decorrer do processo de desidratação (COLLARES,2001).	40
Figura 3.1	Esquema das etapas do estudo	41
Figura 3.2	Esquema das correntes em um secador por atomização operando a vácuo (RAMOS <i>et.al</i> ,2019).	45



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Coloração gerada em função de grau de polimerização de unidades de glicose (SILVA, 1995).	28
Tabela 2.2	Influência das variáveis na operação do <i>spray dryer</i> (Masters, 1985).	33
Tabela 2.3	Valores de temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) para diferentes compostos (Adaptado COLLARES,2001).	39
Tabela 3.1	Equações para determinação dos calores específicos para componentes de alimentos.	44
Tabela 3.2	Equações para determinação de densidade para componentes dos alimentos.	44
Tabela 3.3	Dados de conversão de valor de sólidos totais (DS) em densidade do <i>liquor</i> .	49
Tabela 4.1	Dados de análise da umidade, pH, sólidos totais (%DS), dextrose equivalente (%DE) e densidade aparente dos seis lotes de maltodextrina.	50
Tabela 4.2	Dados a cada hora de operação do <i>spray dryer</i> na secagem do lote 1 de maltodextrina.	51
Tabela 4.3	Dados a cada hora de operação do <i>spray dryer</i> na secagem do lote 2 de maltodextrina.	51



Tabela 4.4	Dados a cada hora de operação do <i>spray dryer</i> na secagem do lote 3 de maltodextrina.	52
Tabela 4.5	Dados a cada hora de operação do <i>spray dryer</i> na secagem do lote 4 de maltodextrina.	53
Tabela 4.6	Dados a cada hora de operação do <i>spray dryer</i> na secagem do lote 5 de maltodextrina.	53
Tabela 4.7	Dados a cada hora de operação do <i>spray dryer</i> na secagem do lote 6 de maltodextrina.	54
Tabela 4.8	Resultados de DS, pH, Iodo e DE dos tanques de <i>liquor</i> utilizados para a produção do lote 1 de maltodextrina.	55
Tabela 4.9	Resultados de DS, pH, Iodo e DE dos tanques de <i>liquor</i> utilizados para a produção do lote 2 de maltodextrina.	56
Tabela 4.10	Resultados de DS, pH, Iodo e DE dos tanques de <i>liquor</i> utilizados para a produção do lote 3 de maltodextrina.	56
Tabela 4.11	Resultados de DS, pH, Iodo e DE dos tanques de <i>liquor</i> utilizados para a produção do lote 4 de maltodextrina.	56
Tabela 4.12	Resultados de DS, pH, Iodo e DE dos tanques de <i>liquor</i> utilizados para a produção do lote 5 de maltodextrina.	56



Tabela 4.13	Resultados de DS, pH, Iodo e DE dos tanques de <i>liquor</i> utilizados para a produção do lote 6 de maltodextrina.	56
Tabela 4.14	Valores médios e desvio padrão dos parâmetros de controle do <i>spray dryer</i> para os seis lotes de maltodextrina.	57
Tabela 4.15	Dados do calor específico de carboidrato ( $c_{p_{kt\ lr}}$ ) e de água presentes ( $c_{p_{a\ lr}}$ ) no <i>liquor</i> para a produção de cada lote de maltodextrina.	58
Tabela 4.16	Dados do calor específico do carboidrato ( $c_{p_{kt\ lr}}$ ), calor específico da água ( $c_{p_{a\ lr}}$ ), a fração mássica do carboidrato ( $X_{kt\ lr}$ ) e água ( $X_{a\ lr}$ ) e o calor específico do <i>liquor</i> de cada lote ( $c_{p\ lr}$ ).	58
Tabela 4.17	Dados do calor específico do carboidrato ( $c_{p_{k\ mtx}}$ ) e água ( $c_{p_{a\ mtx}}$ ) presentes na maltodextrina para cada lote produzido.	59
Tabela 4.18	Dados do calor específico do carboidrato ( $c_{p_{kt\ mtx}}$ ), calor específico da água ( $c_{p_{a\ mtx}}$ ), a fração mássica do carboidrato ( $X_{kt\ mtx}$ ) e água ( $X_{a\ mtx}$ ) e o calor específico da maltodextrina de cada lote ( $c_{p_{mtx}}$ ).	59
Tabela 4.19	Dados da densidade do carboidrato ( $\rho_{k\ lr}$ ) e de água presentes ( $\rho_{a\ lr}$ ) no <i>liquor</i> para a produção dos lotes de maltodextrina.	60
Tabela 4.20	Dados da densidade do carboidrato ( $\rho_{kt\ lr}$ ), a densidade da água ( $\rho_{a\ lr}$ ), a fração mássica do carboidrato ( $X_{kt\ lr}$ ) e água ( $X_{a\ lr}$ ) e a densidade do <i>liquor</i> de cada lote ( $\rho_{lr}$ ).	60



Tabela 4.21	Dados da densidade do carboidrato ( $\rho_{kt\ mtx}$ ) e de água ( $\rho_{a\ mtx}$ ) dos lotes de maltodextrina.	61
Tabela 4.22	Dados da densidade do carboidrato ( $\rho_{kt\ mtx}$ ), a densidade da água ( $\rho_{a\ mtx}$ ), a fração mássica do carboidrato ( $X_{kt\ mtx}$ ) e água ( $X_{a\ mtx}$ ) e a densidade da maltodextrina de cada lote ( $\rho_{mtx}$ ).	61
Tabela 4.23	Taxa mássica do <i>liquor</i> ( $\dot{m}_{lr}$ ) e maltodextrina ( $\dot{m}_{mtx}$ ), frações mássicas de água no <i>liquor</i> ( $X_{a\ lr}$ ) e na maltodextrina ( $X_{a\ mtx}$ ) e a taxa de água evaporada ( $\dot{m}_{a\ ev}$ ) no sistema para cada lote produzido de maltodextrina.	62
Tabela 4.24	Taxas mássicas da maltodextrina ( $\dot{m}_{mtx}$ ) e do <i>liquor</i> ( $\dot{m}_{lr}$ ), as frações mássicas da maltodextrina no <i>liquor</i> ( $1 - X_{a\ lr}$ ) e na maltodextrina ( $1 - X_{a\ mtx}$ ) e a taxa de perda de maltodextrina ( $\dot{m}_{mtx\ p}$ ) no sistema de secagem e ensaque para cada lote produzido de maltodextrina.	63
Tabela 4.25	Dados de sólidos totais (DS) e a sua densidade dos lotes de <i>liquor</i> ( $\rho_{lr}$ ) utilizados na produção dos lotes de maltodextrina.	64
Tabela 4.26	Valores da taxa mássica de <i>liquor</i> ( $\dot{m}_{lr}$ ) e maltodextrina ( $\dot{m}_{mtx}$ ), fração mássica da maltodextrina no <i>liquor</i> ( $1 - X_{a\ lr}$ ) e na maltodextrina ( $1 - X_{a\ mtx}$ ) e taxa de perda de malto dextrina calculados para cada lote de maltodextrina ( $\dot{m}_{mtx\ p}$ ).	64
Tabela 4.27	Dados da taxa de água evaporada ( $\dot{m}_{ma\ ev}$ ) do sistema.	65



Tabela 4.28	Dados da entalpia do ar úmido na entrada ( $H_{ar\ e}$ ) do <i>spray dryer</i> considerando a temperatura de entrada na câmara ( $T_{e\ k}$ ) e a umidade absoluta do ar na entrada ( $Y_e$ ).	68
Tabela 4.29	Dados da entalpia do ar úmido na saída ( $H_{ar\ e}$ ) do <i>spray dryer</i> considerando a temperatura de saída na câmara ( $T_{s\ k}$ ) e a umidade absoluta do ar na saída ( $Y_s$ ).	68
Tabela 4.30	Cálculo do calor trocado do <i>liquor</i> ( $q_{lr}$ ) para cada lote produzido de maltodextrina, utilizando na Equação (3.18) a temperatura de entrada do <i>liquor</i> ( $T_{elr}$ ).	69
Tabela 4.31	Cálculo do calor trocado da maltodextrina ( $q_{mtx}$ ) para cada lote produzido de maltodextrina, utilizando na Equação (3.18) a temperatura de saída da câmara ( $T_{sk}$ ).	69
Tabela 4.32	Dados da taxa mássica ( $\dot{m}$ ), calor trocado ( $q$ ) do <i>liquor</i> e maltodextrina, entalpia ( $H$ ) do ar úmido da entrada e saída e o cálculo da perda de calor ( $Q$ ) no sistema de secagem para cada lote de maltodextrina produzida.	70
Tabela 4.33	Dados da entalpia ( $H_{are}$ ) do ar de entrada, do calor trocado ( $q$ ) de <i>liquor</i> e maltodextrina, calor latente da água ( $\lambda_a$ ) e taxas mássicas ( $\dot{m}$ ) de maltodextrina, do <i>liquor</i> , massa da água evaporada para o cálculo da eficiência térmica ( $\eta$ ).	71
Tabela 4.34	Cálculo do volume de vazios ( $v_{va}$ ) e volume total ( $v_{total}$ ), e porosidade do produto ( $\epsilon$ ).	72
Tabela 4.35	Dados de dextrose-equivalente (DE) e a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) para os lotes de maltodextrina.	72



## LISTA DE ABREVIACOES, SIGLAS E SÍMBOLOS

GP	Grau de polimerização de unidades de glicose	-
DS	Porcentagem de sólidos totais	%
DE	Dextrose-equivalente	%
pH	Potencial hidrogeniônico	-
T <sub>ek</sub>	Temperatura de entrada do ar na câmara de secagem do <i>spray dryer</i>	C
V <sub>er</sub>	Vazão de entrada do <i>liquor</i> no <i>spray dryer</i>	m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>
T <sub>er</sub>	Temperatura de entrada do <i>liquor</i> no <i>spray dryer</i>	C
m	Massa	G
R	Rotação do atomizador do <i>spray dryer</i>	Rpm
V <sub>k</sub>	Controle de vácuo na câmara de secagem do <i>spray dryer</i>	C
T <sub>sk</sub>	Temperatura do produto na saída da câmara de secagem do <i>spray dryer</i>	C
U	Umidade do produto seco	%
c <sub>p</sub>	Calor especifico	kJ·kg <sup>-1</sup> ·C <sup>-1</sup>



$X_i$	Fração mássica do componente i	-
$\rho$	Densidade	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
$\rho_i$	Densidade do componente i	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
$\dot{m}$	Taxa mássica	$\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$
$Y$	Umidade absoluta do ar	$\text{kg}_{\text{água}}\cdot\text{kg}^{-1}_{\text{ar seco}}$
$T_g$	Temperatura de transição vítrea	$^{\circ}\text{C}$
$\lambda$	Calor latente da água	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
$H$	Entalpia	$\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$
$Q$	Taxa de calor do ambiente para o sistema	$\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$
$\eta$	Eficiência térmica	-
$P_{\text{at}}$	Pressão atmosférica	kPa
RB	Marrom	-
A	Constante	-
B	Constante	-
h	Altitude	M



V	Volume específico	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
V	Vazão	$\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$
M	Massa molecular	$\text{kg}\cdot\text{kgmol}^{-1}$
R	Constante dos gases	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
$V_k$	Vácuo na câmara do <i>spray dryer</i>	mmCa
V	Volume	$\text{m}^3$
<b>M</b>	Média	-
$\Sigma$	Desvio padrão	-
$\varepsilon$	Porosidade	-
Q	Calor trocado	$\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$



## SUBSCRITOS

kt	Carboidrato
i	Componente i
p	Perda
mtx	Maltodextrina
lr	<i>Liquor</i>
e	Entrada
s	Sáida
va	Vazio
kv	Kelvin
r	Real



u	Úmido
ar	Ar
a	Água
v	Vapor de água
ev	Evaporada
ma	Massa
k	Câmara do <i>spray dryer</i>
st	Solto
ka	Compactada



## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	25
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	27
2.1	O amido.....	27
2.2	A maltodextrina .....	28
2.3	Processo de produção de maltodextrina .....	31
2.4	<i>Spray dryer</i> na produção de maltodextrina .....	33
2.4.1	Densidade aparente.....	35
2.4.2	Distribuição do tamanho de partícula.....	36
2.4.3	Morfologia do pó.....	37
2.5	Temperatura de transição vítrea.....	37
3	MATERIAL E MÉTODOS .....	41
3.1	Material de estudo .....	41
3.2	Método de análise de pH no <i>liquor</i> e maltodextrina.....	42
3.3	Método de análise de iodo no <i>liquor</i> .....	42
3.4	Método de dextrose-equivalente no <i>liquor</i> e na maltodextrina .....	42
3.5	Método para determinação da densidade aparente da maltodextrina.....	43
3.6	Método de determinação de Baumé no <i>liquor</i> .....	43
3.7	Método de medição da umidade da maltodextrina.....	43
3.8	Calor específico .....	43
3.9	Densidade.....	44
3.10	Balanço de massa .....	45
3.11	Balanço geral de energia e eficiência térmica .....	46
3.12	Equação do cálculo da pressão atmosférica de Uberlândia.....	47
3.13	Cálculo da umidade absoluta do ar e a taxa do ar seco.....	47
3.14	Equação do cálculo da energia .....	48
3.15	Equação do cálculo da entalpia .....	48
3.16	Equação para o cálculo da porosidade .....	48
3.17	Tabela de dados para a determinação da densidade do <i>liquor</i> através dos dados de sólidos totais.....	48
3.18	Equação para determinação da temperatura de transição vítrea.....	49
3.19	Tratamento estatístico de dados .....	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
4.1	Avaliação dos resultados dos seis lotes de produto final de maltodextrina.....	50
4.2	Avaliação dos dados de operação do <i>spray dryer</i> durante a secagem da maltodextrina .....	50
4.3	Avaliação dos impactos dos parâmetros após evaporação e antes do <i>spray dryer</i> .....	55
4.4	Avaliação dos impactos dos parâmetros do <i>spray dryer</i> na densidade do produto final.....	57
4.5	Cálculo do calor específico do <i>liquor</i> e da maltodextrina.....	57



<b>4.6</b>	<b>Cálculo da densidade no <i>liquor</i> e da maltodextrina.....</b>	<b>60</b>
<b>4.7</b>	<b>Balanço de massa da água no sistema de secagem do <i>spray dryer</i>.....</b>	<b>62</b>
<b>4.8</b>	<b>Balanço de massa da maltodextrina no sistema de secagem do <i>spray dryer</i>.....</b>	<b>63</b>
<b>4.9</b>	<b>Balanço de massa no secador utilizando dados medidos da densidade aparente da maltodextrina e a densidade do <i>liquor</i> .....</b>	<b>64</b>
<b>4.10</b>	<b>Balanço de energia no secador.....</b>	<b>65</b>
4.10.1	Cálculo da massa evaporada.....	65
4.10.2	Cálculo da umidade absoluta do ar na entrada e saída do secador e taxa de ar seco....	66
4.10.3	Cálculo da entalpia do ar úmido.....	67
4.10.4	Cálculo do calor trocado do <i>liquor</i> e da maltodextrina .....	69
4.10.5	Balanço geral do sistema de calor de secagem e eficiência térmica .....	70
<b>4.11</b>	<b>Porosidade .....</b>	<b>71</b>
<b>4.12</b>	<b>Temperatura de transição vítrea.....</b>	<b>72</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>73</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>75</b>



## 1 INTRODUÇÃO

As maltodextrinas são produtos da hidrólise parcial do amido e têm sido largamente usadas em muitos tipos de alimentos processados. São classificadas de acordo com o grau de hidrólise do amido e possuem várias propriedades funcionais, como doçura, solubilidade e viscosidade de pastas. Também consiste em um produto de aplicabilidade ampla como suplementos energéticos.

A decisão de direcionar a pesquisa atual para o controle de qualidade de maltodextrina amadureceu após a constatação de que a densidade final do produto é fundamental na comercialização e aplicações diversas do material.

A variação da densidade final do produto pode não atender à especificação de empresas consumidoras. Isto ocasiona problemas no armazenamento do produto acabado, ocasionando possível risco de segurança. O produto não ficará adequadamente posicionado nos paletes ou ocorrerá avaria de produtos e embalagens, devido ao armazenamento inadequado. Isto gera perdas para a empresa na expedição de produtos e pode ocasionar devoluções de clientes.

Neste trabalho foi dado ênfase às condições de processo no *spray dryer* e aos dados de controle de qualidade do *liquor* após a evaporação e do produto acabado seco.

O Capítulo 2, reporta um resumo bibliográfico sobre o amido, a maltodextrina, o processo de produção de maltodextrina, o *spray dryer* na produção de maltodextrina e a temperatura de transição vítrea.

O Capítulo 3 descreve os métodos analíticos utilizados para a realização das análises no *liquor* e na maltodextrina. Neste capítulo também são apresentadas as equações utilizadas para o cálculo do balanço de massa e energia na secagem em *spray dryer* do produto final, eficiência térmica, porosidade e temperatura de transição vítrea.

O objetivo desta pesquisa foi estudar as variáveis na secagem em *spray dryer* na produção e secagem de seis lotes industriais de maltodextrina, considerando a avaliação dos parâmetros de qualidade do produto intermediário, *liquor*, e do produto seco, a maltodextrina, identificando quais variáveis podem ter mais influência na densidade aparente do produto.

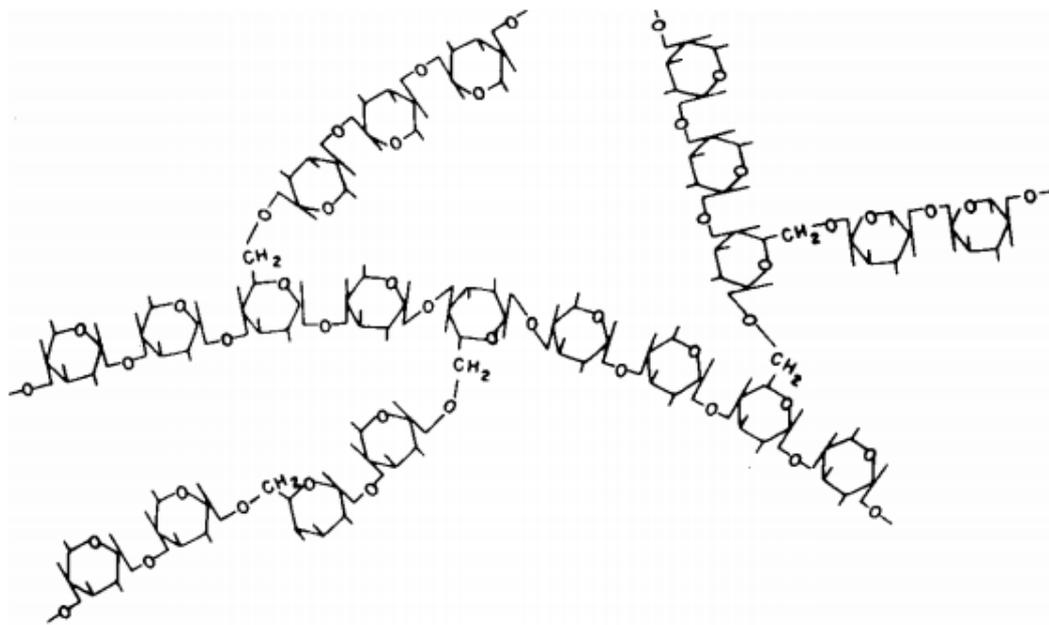
Adicionalmente, realizaram-se os cálculos para a determinação do balanço de massa e energia do sistema de secagem, o cálculo da porosidade do produto, o cálculo da temperatura de transição vítrea e o cálculo da eficiência energética do *spray dryer*.

O escopo deste estudo foi a secagem em *spray dryer* de seis lotes industriais de maltodextrina. O início do estudo foi a avaliação dos parâmetros de controle de qualidade do *liquor*, após evaporação, que é enviado para a secagem. Os parâmetros de processo de secagem monitorados a cada hora na secagem em *spray dryer*. A análise dos produtos finais obtidos após a secagem realizada para monitoramento dos parâmetros de qualidade.

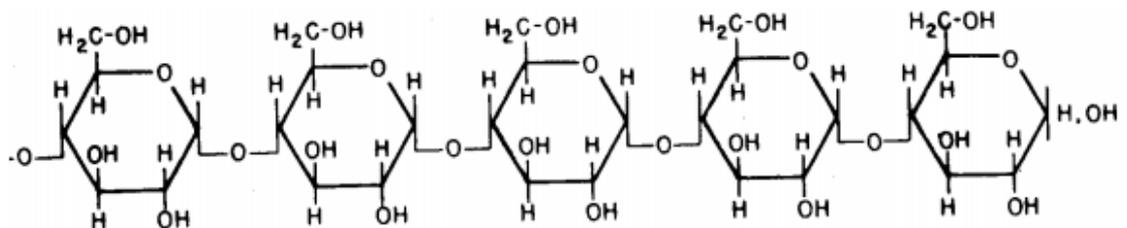
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 O amido

O amido quimicamente consiste em um carboidrato formado por átomos de carbono, hidrogênio e oxigênio, na razão 6:10:5 ( $C_6H_{10}O_5$ ), constituído de unidades de glicose ligadas entre si pelo oxigênio do carbono C1 de uma, ao carbono C4 da outra, denominadas ligações glicosídicas (SILVA, 1995). Dois tipos de moléculas ocorrem: a amilose, constituída por unidades de glicose unidas por ligações glicosídicas  $\alpha$  (1 $\rightarrow$ 4), cujo número que pode variar de 300 a 2.000; a amilopectina, de cadeias ramificadas (com ramificação a intervalos de 15 a 30 unidades de glicose, unidas com ligações do tipo da amilose  $\alpha$  (1 $\rightarrow$ 4) e ligações  $\alpha$  (1 $\rightarrow$ 6), MORETTO et al., (2002). As Figuras 2.1 e 2.2 representam moléculas de amilopectina e amilose.



**Figura 2.1:** Representação esquemática de amilopectina (SILVA, 1995).



**Figura 2.2:** Representação esquemática de amilose (SILVA, 1995).

Na amilopectina a proporção numérica de ligações  $\alpha$  (1 $\rightarrow$ 6) e  $\alpha$  (1 $\rightarrow$ 4) é de aproximadamente 1:20. Então, para 21 ligações glicosídicas ter-se-á uma ligação  $\alpha$  (1 $\rightarrow$ 6). O tamanho das cadeias laterais de amilopectina é variável. O grau de polimerização de unidades de glicose (GP) define o comprimento de uma cadeia (SILVA, 1995).

A molécula de amilose adquire uma conformação de hélice no interior da qual se insere a amilopectina.

A espiral é responsável pela coloração que o amido é capaz de dar com o iodo, com a qual forma o complexo. A intensidade da cor está relacionada com o comprimento da cadeia associada com GP, conforme mostra a Tabela 2.1.

**Tabela 2.1:** Coloração gerada em função do grau de polimerização de unidades de glicose (SILVA, 1995).

GP	Cor
45	Azul
35-40	Púrpura
20-30	Vermelho
12-15	Pardo
12	Incolor

## 2.2 A maltodextrina

A maltodextrina é, por definição, amido hidrolizado formado por unidades de  $\alpha$ -D-glicose unidas, principalmente, por ligações glicosídicas  $\alpha$  (1 $\rightarrow$ 4) com uma fórmula geral  $[(C_6H_{10}O_5)]_n$ . Como o produto hidrolizado do amido, é constituído por uma mistura de sacarídeos, principalmente D-glicose, maltose e uma série de oligossacarídeos e polissacarídeos, como maltotriose e misturas de maltotetraose, apresenta ampla distribuição de massa molecular. Comercialmente, é produzida a partir de amido nativo por meio de hidrólise parcial, purificação e secagem por pulverização. Esses tratamentos físicos e enzimáticos levam à perda da estrutura granular do amido. Ao contrário dos amidos naturais, a maltodextrina é solúvel em água, conveniência que auxiliou sua apreciação pela indústria alimentícia, onde é

utilizada como modificador de textura, gelificante, substituto de gordura, intensificadores de volume, crioprotetores e para prolongar a vida útil do produto, principalmente como matriz de encapsulamento (TAKEITI *et al.*, 2010).

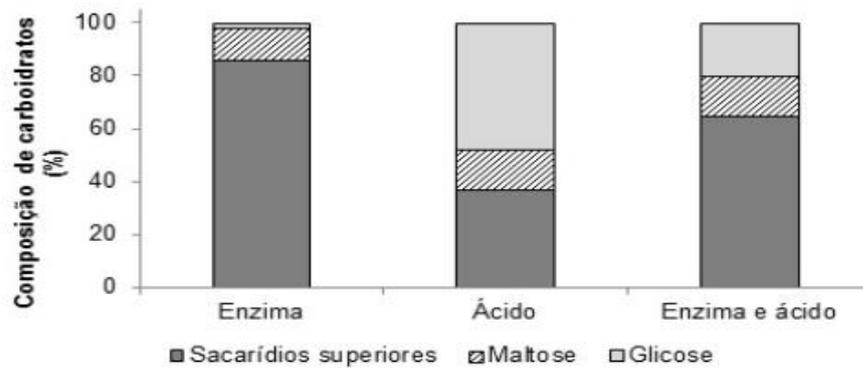
A dextrose-equivalente (DE) expressa o número de grupos aldeídos de extremidades reductoras em relação à glicose pura na mesma concentração, de modo que dextrose-equivalente (DE) alta indica alta conversão hidrolítica e baixa massa molecular. A origem do amido (milho, aveia, mandioca, arroz ou batata) também afeta a distribuição dos segmentos moleculares da malto dextrina. A proporção entre moléculas da cadeia linear de amilose e a cadeia ramificada da amilopectina varia de acordo com a natureza do amido. A maioria dos amidos contém entre 15 a 35% de amilose. Dependendo do grau de hidrólise da molécula de amido, o produto obtido é classificado como maltodextrina, se o valor de Dextrose for menor que 20 ou xarope DE igual ou maior que 20 (SILVA *et al.*, 2014).

Com condições de hidrólise diferentes, a produção de maltodextrina com valores de DE semelhantes, apresenta diferentes proporções de sacarídeos de alta e de baixa massa molecular, e, portanto, com diferentes características físico-químicas. As variações nos valores de DE resultam em maltodextrina com diferentes propriedades físico-químicas como higroscopicidade, osmolaridade, viscosidade e coesividade. No entanto, a malto dextrina comercial costuma ser referenciada pelo seu DE. Em particular, a estabilidade e a solubilidade são afetadas pelos componentes de alta massa molecular, enquanto a viscosidade, cristalinidade e doçura dependem da predominância de componentes de baixa massa molecular. Como consequência, estudos demonstraram que a dextrose equivalente (DE) não é apropriada para prever o desempenho do produto em diversas aplicações, como produtos de secagem por *spray*, revestimentos e encapsulamento extrudado. Os avanços tecnológicos permitem o controle da via de hidrólise, principalmente por meio de processos enzimáticos, para a produção de maltodextrina com composição sacarídica melhor definida como apresentado na Figura 2.3 (SILVA *et al.*, 2014).

Os sacarídeos superiores são predominantes na maltodextrina produzida por via enzimática, devido à especificidade das reações de hidrólise catalisadas pelas  $\alpha$  amilases sobre as ligações  $\alpha$  (1 $\rightarrow$ 4), o que não ocorre na hidrólise ácida, na qual as reações hidrolíticas ocorrem ao acaso, aumentando a possibilidade de formação de maltoses e glicose (WANG e WANG, 2000; SILVA *et al.*, 2014).

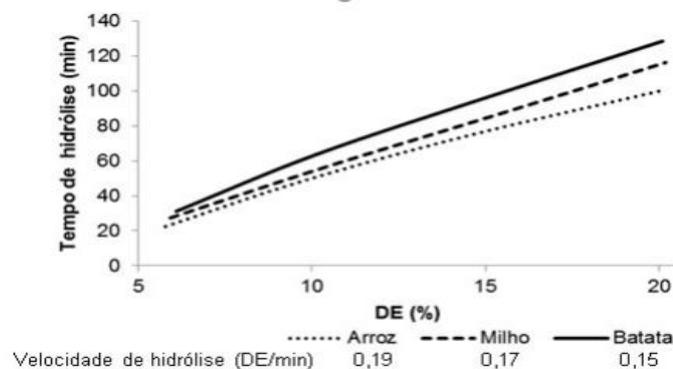
A taxa da hidrólise enzimática do amido é influenciada pela fonte botânica, pois cada uma possui características específicas de composição e organização da sua fração amilácea

(Figura 2.4.). O alto peso molecular na composição da maltodextrina faz com que suas soluções apresentem baixas pressões osmóticas, altas viscosidades e pouca ou nenhuma doçura. A baixa potência redutora significa que a maltodextrina participa ligeiramente das reações de *browning*. Assim como os carboidratos, a característica e propriedade da maltodextrina indica para a sua aplicação em alimentos processados (TIEFENBACHER, 2017).



**Figura 2.3:** Composição de carboidratos de maltodextrina com DE 20 produzidas por diferentes processos (SILVA, 2014).

A higroscopicidade da maltodextrina aumenta em função do valor de DE (dextrose-equivalente). A propriedade de absorver umidade do ambiente é relacionada às quantidades de ramificações com grupamentos hidrofílicos, que podem ligar-se facilmente à água durante o manuseio, após a secagem em *spray dryer*. O fenômeno da absorção de água por carboidratos é atribuído às ligações entre o hidrogênio presente nas moléculas de água e os grupos hidroxilas disponíveis tanto nas regiões amorfas como nas superfícies cristalinas dos grânulos de amidos e derivados (SAMUHASANEETOO *et al.*, 2004; PHISUT, 2012; SILVA *et al.*, 2014).



**Figura 2.4:** Variação do tempo de hidrólise do amido de diferentes fontes em função da DE requerida.

**Fonte:** adaptado SOTO *et al.*, 2012; SILVA *et al.*, 2014).

### 2.3 O processo de produção de maltodextrina

A obtenção industrial da maltodextrina ocorre pela hidrólise controlada do amido por via físico-química (com calor, pressão e ácidos) ou enzimática (com amilases), ou ambas. O grau de polimerização (GP) da maltodextrina, sua linearidade e grau de ramificação são influenciados pela fonte, concentração inicial da solução de amido, método e condições de hidrólise (tempo e temperatura), assim como pelo tipo e concentração da enzima ou ácido utilizados no processo (LUMDUBWONG e SEIB, 2001; SILVA *et al.* 2014).

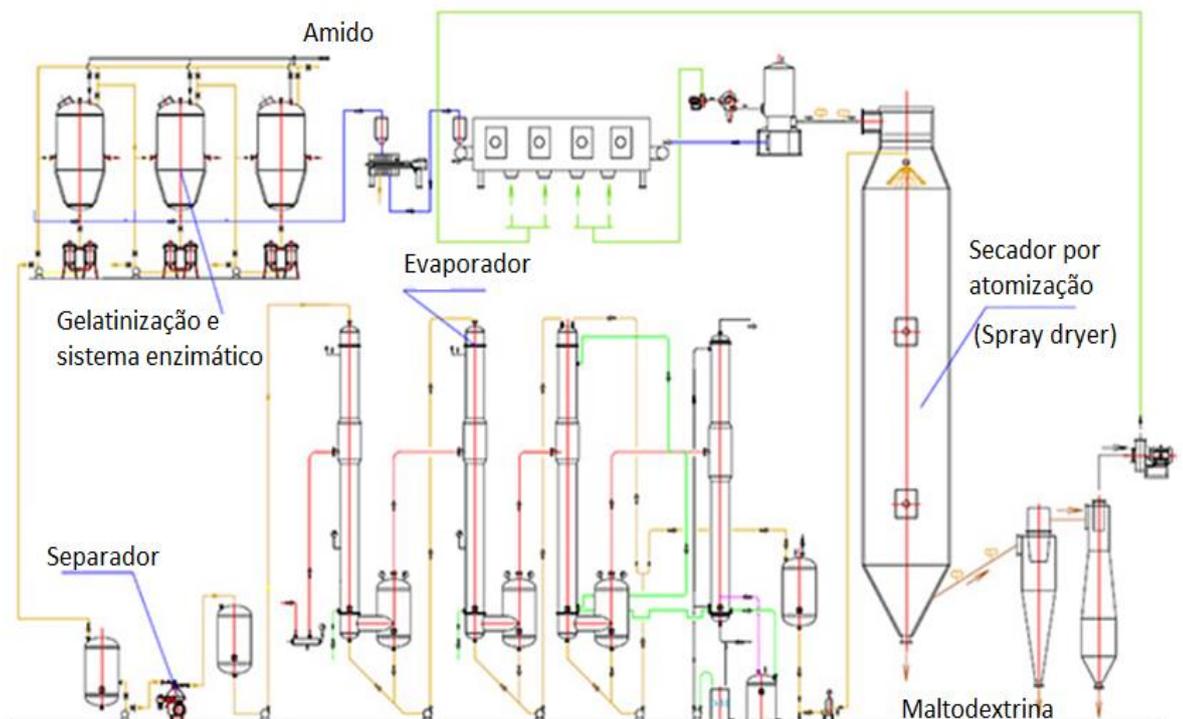
Quando o amido entra em contato com a água fria, os grânulos incham ligeiramente (10 a 20%), devido à difusão e absorção de água nas regiões amorfas, mas essa alteração é reversível pela secagem. No entanto, quando os grânulos são aquecidos em água, eles incham irreversivelmente num fenômeno denominado gelatinização, em que ocorre perda da organização estrutural com perda da estrutura cristalina. A gelatinização ocorre inicialmente nas regiões amorfas devido à fragilidade das ligações de hidrogênio nessas áreas, ao contrário do que ocorre nas regiões cristalinas. À medida que os grânulos continuam se expandindo, ocorre a lixiviação da amilose da fase intergranular para a fase aquosa, resultando em variação substancial das propriedades reológicas do sistema. O conjunto de mudanças que envolve a ruptura da estrutura granular, o inchamento, a hidratação e a solubilização das moléculas do amido é definido como o fim da gelatinização. Quando as moléculas de amido são aquecidas em excesso de água, a estrutura cristalina é rompida e as moléculas de água formam pontes de hidrogênio entre a amilose e a amilopectina expondo seus grupos hidroxil, o que causa um aumento no inchamento e solubilidade do grânulo. A extensão destas interações é influenciada pela proporção amilose: amilopectina e pelas características destas moléculas (distribuição, peso molecular, grau e rompimento de ramificações e conformação (DENARDIN e SILVA, (2009).

A hidrólise ácida do amido tem se mostrado um processo randômico e, a um dado tempo, um produto de amido hidrolisado ácido compreende uma mistura de várias espécies moleculares diferentes que podem variar desde o monômero de glicose até o polímero que se aproxima do tamanho do amido. Por causa da ampla gama de tamanhos moleculares obtidos na hidrólise ácida, é comum conduzir a conversão de uma forma que os polímeros longos não reajam mais com o iodo (COKER *et at.*, 1984).

A hidrólise enzimática do amido é o método mais adequado para produzir maltodextrina. Se uma suspensão aquosa de amido for aquecida a certa temperatura, as

partículas de amido começam a se expandir e perdem a cristalinidade, ocorrendo a gelatinização. A pasta é liquefeita e a enzima de sacarificação é adicionada. Teoricamente, quando o valor DE é inferior a 20%, ou seja, o teor de açúcar redutor é inferior a 20%, o produto é denominado malto dextrina. Após a sacarificação, é necessária uma filtração. Segue-se a clarificação usando carvão ativado ou trocadores de íons. Finalmente, o secador por atomização seca a maltodextrina transformando-a na forma de pó, como ilustrado na Figura 2.5 (CHANGZHOU, 2016).

O processo de produção de maltodextrina líquida com a dextrose - equivalente (DE) entre 5 e 20%, compreende em misturar um amido em água com DS entre 24 e 40%. Adiciona-se a enzima  $\alpha$  amilase em uma quantidade suficiente para hidrolisar ou converter o amido. Aquece-se esta pasta de amido e  $\alpha$  amilase em temperaturas entre 120 a 165°C por um período entre 30 segundos e 10 minutos. Ajusta-se a temperatura novamente entre 101 a 115°C, por até 15 minutos, em um vaso de pressão. Adiciona-se novamente a  $\alpha$  amilase para continuar a conversão. Resfria-se a temperatura entre 93 e 100°C por um tempo estabelecido para produção de um produto final com DE entre 5 e 20% (EUROPEAN PATENT APPLICATION, 2011).



**Figura 2.5:** Representação esquemática do processo de conversão do amido a maltodextrina (CHANGZHOU, 2016).

## 2.4 *Spray dryer* na produção de maltodextrina

A secagem por *spray dryer* é uma unidade de operação pela qual um produto líquido é atomizado em uma corrente de gás quente para obter instantaneamente um pó. O líquido inicial que alimenta o pulverizador pode ser uma solução, uma emulsão ou uma suspensão. O produto seco resultante está em conformidade com pós, grânulos ou aglomerações, a forma da qual depende das propriedades físicas e químicas do produto e operação do secador. As características do produto final dependem de condições de secagem por atomização, incluindo concentração de auxiliar de secagem utilizado, temperatura do ar de entrada, taxa de admissão e características de alimentação (MUZAFFAR *et al.*,2018).

Diversos são os parâmetros que influenciam as propriedades do pó seco produzido pela etapa de secagem como *spray dryer*. A Tabela 2.2 fornece resumidamente as principais variáveis e suas influências.

**Tabela2.2:** Influência das variáveis na operação do *spray dryer* (Engel *et al.*,2015).

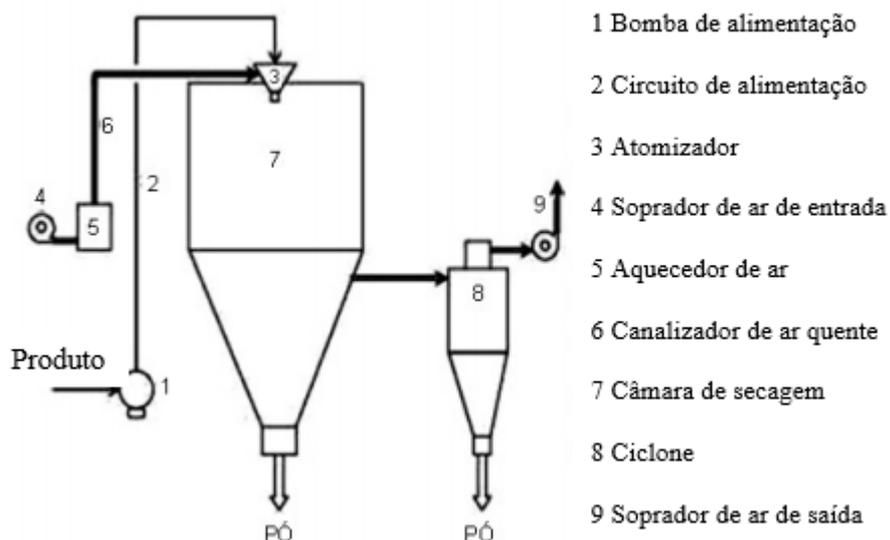
Variável	Influência
Concentração do fluido	Concentração de sólido maior reduz o calor requerido pelo <i>spray dryer</i> e forma partículas grandes
Vazão de alimentação	Vazão alta produz partículas grandes
Densidade	Seu efeito varia inversamente ao tamanho da partícula
Viscosidade	O tamanho da gota varia diretamente com a viscosidade da alimentação
Temperatura do fluido	Aumento da temperatura de entrada diminui o consumo de calor requerido pelo secador
Vazão do ar de secagem	Vazão alta, baixo tempo na câmara, consequentemente, alta umidade residual
Temperatura do ar de secagem	Aumento da temperatura provoca a diminuição da densidade do produto

O *spray dryer* é um equipamento utilizado para produzir pós secos na indústria de alimentos. A partir de uma suspensão ou solução de um soluto em fase líquida, ocorre a concentração do soluto em forma de partículas, sendo o solvente vaporizado. A mistura é fornecida até o bico atomizador, onde ocorre a geração de gotículas de até 350 µm de diâmetro (Figura 2.6.), dependendo das especificações do atomizador. O escoamento de ar quente, que pode ocorrer em sentido oposto às gotículas, fornece calor para vaporizar o solvente e, conforme a umidade é eliminada, são formadas partículas sólidas que são coletadas num ciclone ou pela

base do secador *spray dryer* (Figura 2.7.). O bico atomizador é utilizado para produzir gotas com o tamanho, especificado e, conseqüentemente, maximizar a transferência de calor e a taxa de vaporização do solvente. A alta relação área de superfície por volume das partículas promove rápida evaporação da água ou do solvente. Com isso, o tempo de exposição das partículas ao calor é curto e a temperatura do núcleo não ultrapassa 100°C, o que reduz a ocorrência de alterações indesejáveis em compostos termossensíveis (AZEREDO,2005; MURUGESAN e ORSAT, 2011).



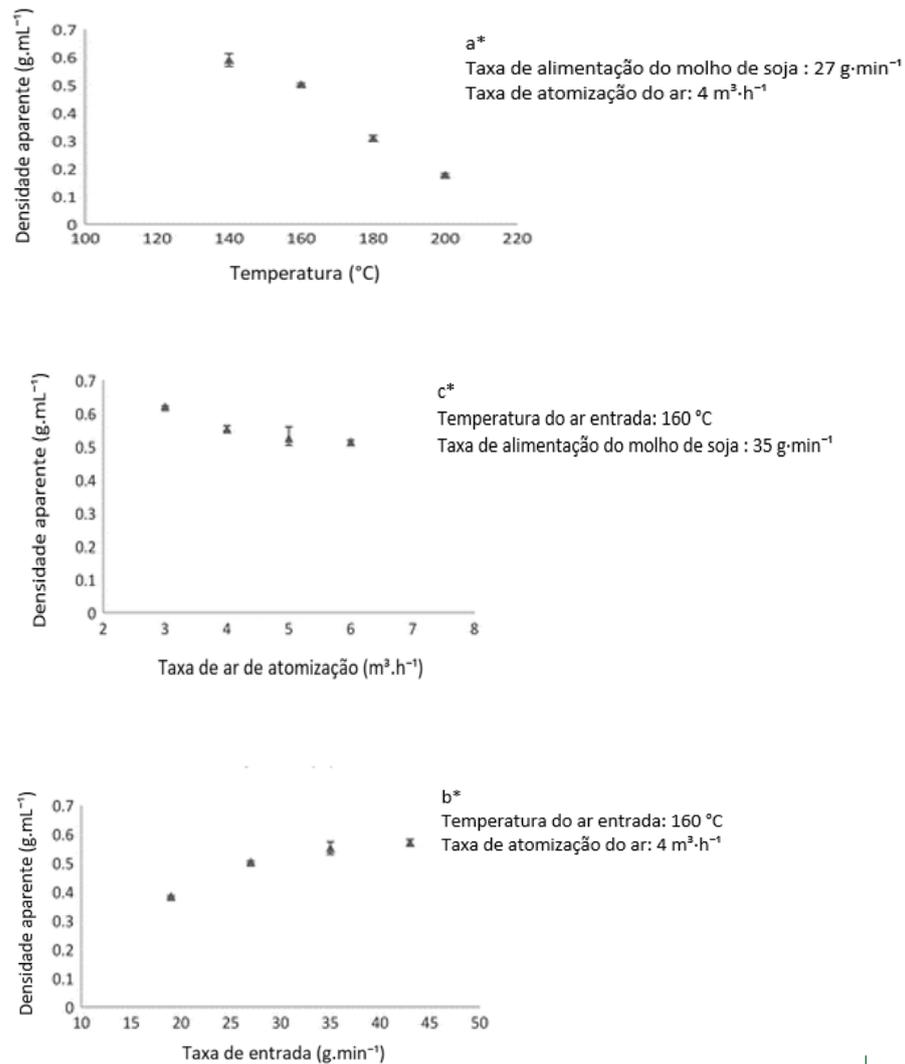
**Figura 2.6:** Formação da microcápsula na secagem por *spray dryer* (SILVA et al., 2014).



**Figura 2.7:** Esquema do funcionamento do *spray dryer* (SILVA et al., 2014).

### 2.4.1 Densidade aparente

A densidade aparente do produto tem correlação com as condições de operação de secagem do *spray dryer*. A densidade aparente diminui conforme a temperatura do ar de secagem aumenta e um efeito oposto é observado quando a taxa de alimentação do produto aumenta (WANG et al., 2015). A Figura 2.8. apresenta gráficos que mostram o resultado da densidade aparente do milho de soja em pó em diferentes condições de secagem. Sendo: no Gráfico a\*, a taxa de alimentação é  $27 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$  e taxa de ar de atomização,  $4 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ; no Gráfico b\*, a temperatura de secagem de entrada é  $160^\circ\text{C}$  e a taxa de ar de atomização,  $4 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ; no Gráfico c\*, a taxa de alimentação é  $35 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$  e a temperatura do ar de entrada,  $160^\circ\text{C}$ .



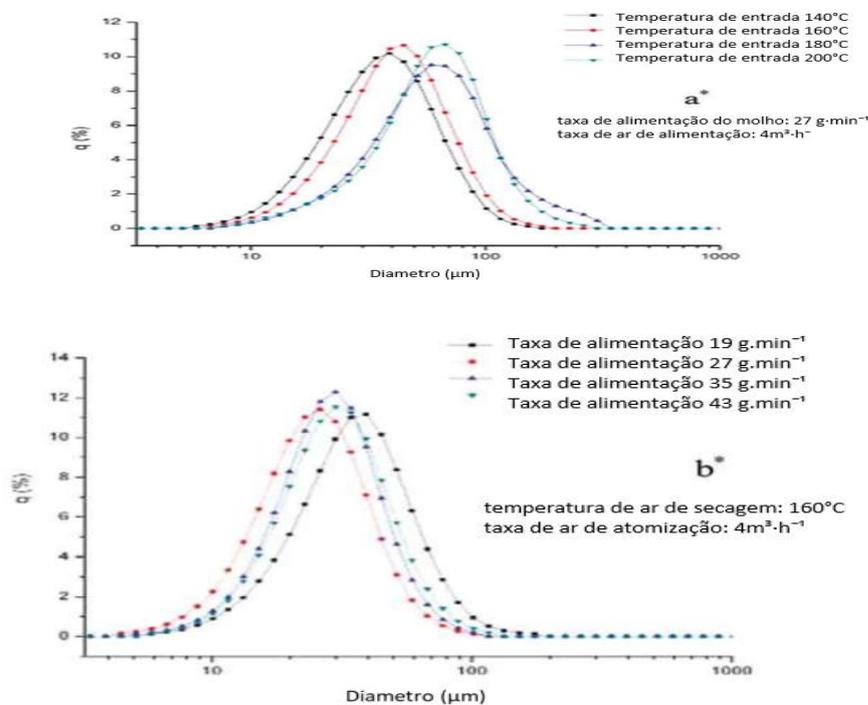
**Figura 2.8:** Densidade aparente do milho de soja em pó em diferentes condições de secagem (WANG et al.,2015).

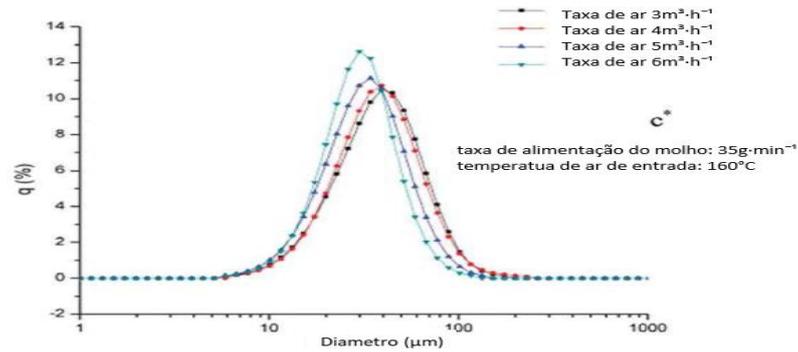
O aumento da temperatura do ar de secagem ou a diminuição da vazão de alimentação geralmente resulta em uma diminuição da densidade aparente e ocorre uma maior tendência para as partículas serem ocas. Isso pode ser resultado de uma taxa de evaporação mais alta ou de menor teor de umidade residual, que pode ser a razão pela qual a densidade aparente diminui drasticamente à medida que a temperatura de secagem de ar de entrada aumenta (WANG *et al.*, 2015).

#### 2.4.2 Distribuição do tamanho de partícula

O aumento da temperatura de secagem do ar estabelece a estrutura das partículas precocemente e evita o encolhimento durante a secagem, resultando em partículas maiores. O aumento da taxa de alimentação pode causar colisão e subsequente fusão de pequenas gotas e, portanto, tamanho de partículas aumentado (WANG *et al.*, 2015).

A Figura 2.9. mostra o efeito da taxa de ar de atomização na distribuição do tamanho das partículas. Uma taxa de atomização mais alta produziu gotas menores durante o processo de atomização e, portanto, o tamanho dos pós produzidos após a secagem tem uma correlação clara com a taxa de ar de atomização (WANG *et al.*, 2015).





**Figura 2.9:** Distribuição do tamanho das partículas de molho de soja em pó em diferentes condições de secagem (WANG *et al.*, 2015).

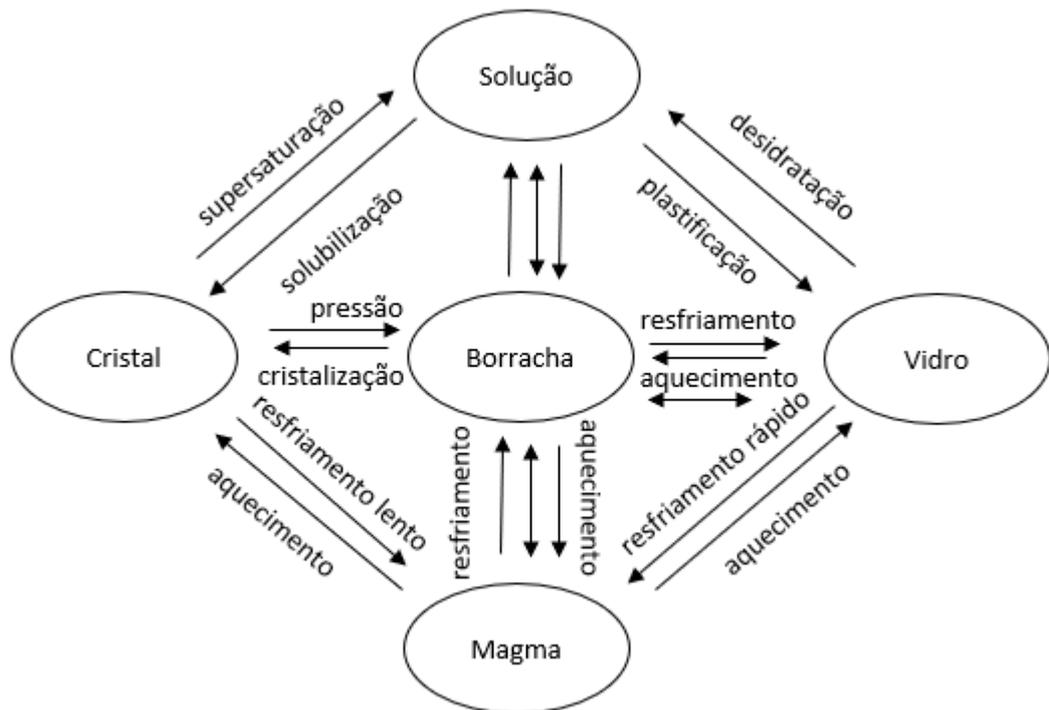
### 2.4.3 Morfologia do pó

A partícula de molho de soja em pó seco por pulverização é esférica, com significativa heterogeneidade de tamanho. O pó seco, sob temperatura de ar de entrada mais alta, possui uma superfície relativamente mais lisa do que aquele seco sob temperatura mais baixa. Durante a secagem por pulverização, uma temperatura de ar de secagem mais alta pode ajudar as gotículas a desenvolverem rapidamente uma superfície seca e dura, evitando a deflação e o encolhimento subsequentes. Mudanças morfológicas com relação à temperatura de secagem ao ar foram realizadas na literatura para produtos lácteos em pós atomizados (WANG *et al.*, 2015).

## 2.5 Temperatura de transição vítrea ( $T_g$ )

Existem estados de equilíbrio não estáveis, ou seja, podem ser permanentemente alterados como um resultado de alguma pequena perturbação. Esses estados são chamados de metaestáveis. Um sistema termodinâmico a uma temperatura específica está em uma condição metaestável se toda mudança isotérmica pequena de qualquer de suas variáveis termodinâmicas resulta em um aumento na sua energia livre, enquanto alterações isotérmicas grandes nestas variáveis podem levar a um estado com menor energia livre. A ideia de metaestabilidade, por definição, requer que, ao longo de todas as rotas possíveis entre os estados metaestável e estável de um sistema termodinâmico, haja estados de maior energia livre que o estado metaestável. Estes estados intermediários dão aumento às barreiras de energia livre, impedindo a transformação do estado metaestável para estável. O estado vítreo de um líquido é também um estado de metaestabilidade suportado por barreiras de energia que impedem as mudanças nas posições das moléculas. O estado vítreo é uma forma de matéria que mantém a estrutura de

energia e volume de um líquido, mas cujas mudanças na energia e no volume com a temperatura são similares, em magnitude, às de um sólido cristalino. A mais importante mudança característica do estado amorfo é a que envolve a transição de um sólido vítreo para um estado gomoso, ou, ao contrário, de um estado gomoso para vítreo, o que ocorre na chamada temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ), ver Figura 2.10 (COLLARES,2001).



**Figura 2.10:** Estado físico de materiais. Mudança entre estados de equilíbrio e estado vítreo que sempre ocorre através do estado gomoso (adaptado COLLARES,2001).

Em termos termodinâmicos, a transição vítrea é definida como uma transição de segunda ordem (em contraste com a fusão de um cristal, que é de primeira ordem), ou seja, as duas fases envolvidas diferem nas segundas derivadas da energia livre, em relação à temperatura e pressão, mas não nas suas energias livres por si mesmas ou nas suas derivadas primeiras. Portanto, a transição vítrea é caracterizada pela descontinuidade no coeficiente de expansão térmica e na capacidade calorífica.

A temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) é um centro de uma faixa em torno de  $20^\circ\text{C}$  ou superior, na qual a transformação ocorre. Abaixo de  $T_g$  um material está em um estado vítreo que é caracterizado por um sólido rígido, embora quebradiço, com uma viscosidade na ordem de  $10^{12}$  Pa.s. Nos estados vítreos, a mobilidade ou difusão das moléculas é praticamente

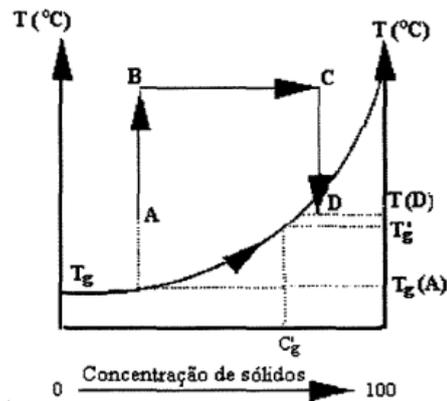
inexistente. Quando a temperatura do material está acima da temperatura de transição vítrea, o material vítreo torna-se gomoso e demonstra uma considerável diminuição da viscosidade e aumento da mobilidade (COLLARES,2001). A Tabela 2.3 demonstra valores de temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) para diferentes compostos.

**Tabela 2.3:** Valores de temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) para diferentes compostos( Adaptado COLLARES,2001).

Compostos	$T_g(^{\circ}\text{C})$
Frutose	5; 7; 10; 11; 13
Glicose	21; 29; 30; 31; 35
Lactose	101
Maltose	43; 70; 87; 91; 92; 95
Sacarose	52; 57; 67; 70
Glúten	39,3
Maltodextrina M040	188
Maltodextrina M100	160
Maltodextrina M250	121

A baixa mobilidade molecular devido à alta viscosidade na temperatura de transição vítrea, resultará na inabilidade de se atingir configurações de equilíbrio e, conseqüentemente ocorrerá a formação de um material vítreo. Termodinamicamente, a presença de um estado metaestável indica que há barreiras de energia livre que retardam a obtenção do estado estável.

A operação de secagem é demonstrada na Figura 2.11. Inicia-se com um aumento da temperatura do produto alimentício, sem modificação de sua composição (trajeto A→B na Figura 2.10). Posteriormente, a evaporação da água do produto se dá a uma temperatura quase constante (trajeto B→C). Após a secagem, o produto é resfriado a uma temperatura próxima à temperatura inicial para ser armazenado (trajeto C→D). Pode ser constatado, pela Figura 2.11, que a temperatura de transição vítrea do produto se eleva no decorrer da secagem, como consequência do aumento da concentração de sólidos do material. É aconselhável que a temperatura final do produto desidratado,  $T(D)$ , seja inferior à temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) na concentração de sólidos alcançada. Nesta condição, o material encontra-se no estado vítreo durante o seu armazenamento.



**Figura 2.11:** Evolução da temperatura de transição vítrea do produto alimentício no decorrer do processo de desidratação (COLLARES,2001).

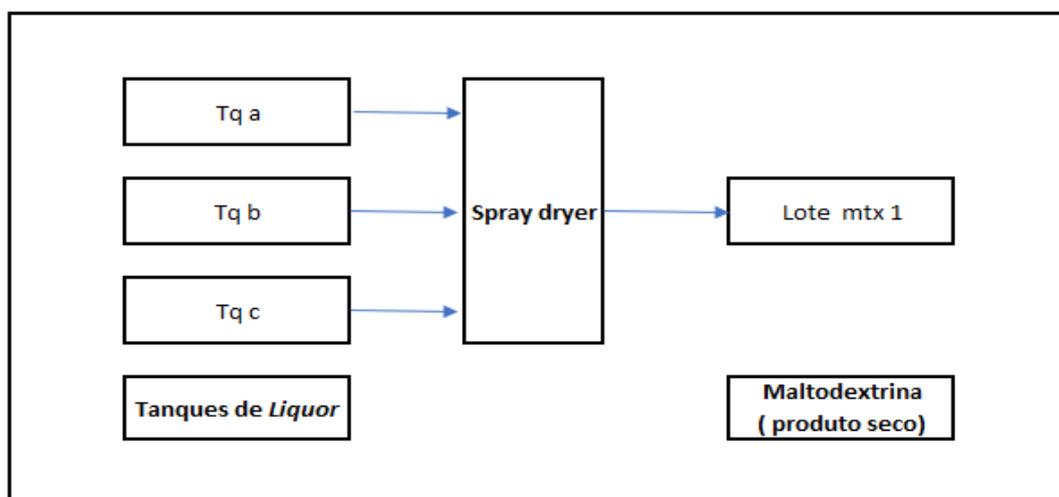
A alta higroscopicidade, termoplasticidade e baixa temperatura de transição de vítrea ( $T_g$ ) de substâncias de baixo peso molecular contribuem para o problema de *stickness*. Em uma temperatura de secagem de *spray dryer* maior do que  $T_g + 20^\circ\text{C}$ , estes componentes tendem a formar uma partícula macia com uma superfície pegajosa, levando a uma estrutura de gomosa em vez de um pó. A mobilidade molecular de tais moléculas é alta por causa de sua baixa temperatura de transição vítrea, levando à formação de um produto gomoso em temperaturas de operação de *spray dryer*. A temperatura de transição vítrea é a principal característica de temperatura de uma fase amorfa (MUZAFFAR *et al.*, 2015). O evento de transição vítrea ocorre quando um açúcar duro, sólido, amorfo se transforma para uma fase macia, emborrachada e líquida. Em termos de energia de superfície, um vidro sólido tem uma baixa energia superficial e tende a não se ater a nenhuma outra superfície sólida de baixa energia. Devido à transformação do estado vítreo a gomoso, a energia superficial do material aumenta e as moléculas começam a interagir com a superfície do sólido. Em uma operação de secagem de alimentos, devido à remoção do plastificador (água) do produto gomoso, é convertido para o estado vítreo. Se na secagem o produto não passar pela transição devido a uma temperatura de secagem mais alta do que a temperatura de transição vítrea, o produto permanecerá em alta energia no estado gomoso. Se este alimento entrar em contato com uma superfície sólida de alta energia, ele vai grudar ou agarrar-se a ela.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Material de estudo

Utilizou-se para este estudo seis lotes industriais de maltodextrina produzidos na fábrica da Cargill S.A. A partir da escolha dos lotes, foi realizada uma rastreabilidade desses lotes, identificando as condições de processo de secagem em *spray dryer* e as características do *liquor* após a evaporação armazenados em tanques que foram secos para a produção do produto final.

Para a determinação das características do produto acabado em pó, amostras do produto acabado foram coletadas durante o ensaio do produto. A amostra foi analisada no laboratório. Os dados de operação de secagem dos lotes de *liquor* foram coletados a cada hora, utilizando-se a leitura dos dados disponíveis nos instrumentos de controle de operação do *spray dryer*. Os tanques de *liquor* utilizados para a produção desses lotes foram analisados pelo laboratório e liberados para a realização da secagem do produto. A rastreabilidade dos dados foi realizada pesquisando-se os registros da produção e do laboratório. A Figura 3.1 apresenta um esquema da origem dos dados utilizados para este estudo.



**Figura 3.1:** Esquema das etapas do estudo (autor, 2021).

### 3.2 Método de análise de pH no *liquor* e maltodextrina

Pesa-se a 10g de amostra em um béquer, adiciona-se 90 mL de água destilada. Agita-se esta solução até que esteja totalmente dissolvida. Realiza-se a leitura de pH. Utilizou-se o equipamento Gehaka, Modelo PG200, Sensor da digimed DME-CV2.

### 3.3 Método de análise de iodo no *liquor*

A determinação de amido hidrolisado é baseada na reação de um complexo do iodo com amido que resulta na produção da cor azul. É usada uma solução de 0,02N de iodo para ser adicionada numa solução preparada com produto e água deionizada, resfriada entre 2,0°C a 4,0°C, aguarda-se 2 minutos para avaliar a cor da solução.

No processo, adiciona-se 50 mL de hidrolisado de amido não diluído e 25 mL de água desionizada. Mexe-se até dissolver completamente. Coloca-se amostra na geladeira e resfriada entre 2,0°C a 4,0°C. Adiciona-se 0,02 N de iodo gota a gota até que uma leve cor permaneça. Enquanto se agita a amostra, adicione-se exatamente 1,0 mL de 0,02 N de iodo. Observe-se qualquer cor inicial azul ou roxa. Faça-se a leitura final após 2 minutos de tempo de reação. As cores avaliadas neste método são: Azul (A), Marrom (RB).

### 3.4 Método de dextrose-equivalente no *liquor* e na maltodextrina

O osmômetro (marca: *Adjanced Instruments*, Inc. modelo: 3250) é um instrumento para medir a depressão do ponto de congelamento. Verificou-se que os açúcares presentes no hidrolisado de amido diminuem o ponto de congelamento em proporção direta ao equivalente de dextrose. Ao preparar uma amostra de concentração conhecida e medir e depressão do ponto de congelamento, a DE pode ser facilmente calculada.

O método consiste em pesar 12,00 a 13,00 g de amostra, diluir a amostra a 13% de sólidos na amostra. Pipetar 25 µl da amostra para o osmômetro e proceder à leitura. O valor da dextrose-equivalente é calculado pela Equação (3.1).

$$DE = 0,14 \cdot mOSm - 1,18 \quad (3.1)$$

sendo: DE = Dextrose-equivalente (%).

### 3.5 Método para determinação da densidade aparente da maltodextrina

A determinação da densidade aparente é realizada com adição da amostra em equipamento *magnetic feeder* em uma proveta calibrada de 100 ml e, em seguida, a proveta com o produto é pesada numa balança analítica. A Equação (3.2) apresenta o cálculo da densidade aparente.

$$\rho_{r \text{ mtx}} = (m_2 - m_1) \cdot \frac{1000}{100ml} \quad (3.2)$$

sendo:  $\rho_{r \text{ mtx}}$ =Densidade aparente do produto sólido ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $m_2$  =Massa da amostra e proveta (g);  $m_1$ = Massa da proveta (g)

### 3.6 Método de determinação de Baumé do liquor

Este método utiliza-se através da leitura do índice de refração, lida através de um refratômetro (marca: Antoon Paar; modelo: ABBEMAT), para a determinação da % de substância seca (% DS) ou Baumé, quando a composição química e a temperatura da amostra são conhecidas. Para esta determinação é utilizada uma tabela de conversão que relaciona índice de refração, % substância seca e Baumé para este produto.

### 3.7 Método de medição da umidade da maltodextrina

Para a determinação da umidade (U) na amostra de malto dextrina é realizada com uma amostra de 5 g, colocada em uma estufa de ar forçado a 130°C por 1 hora. A amostra precisa ser resfriada utilizando um dessecador por 30 minutos. A Equação (3.3), apresenta o cálculo da umidade do produto seco.

$$U (\%) = \frac{m_5 - m_3}{m_4 - m_3} \cdot 100 \quad (3.3)$$

sendo:  $m_3$ = Massa do cadinho (g);  $m_4$  = Massa do cadinho e amostra (g);  $m_5$ = Massa do cadinho e amostra seca (g)

### 3.8 Calor específico

A relação de VAN BEEK (1976) consiste em um modelo mais geral para o cálculo do calor específico de alimentos. O modelo indica que o calor específico pode ser estabelecido pelo conhecimento da composição e do calor específico de cada componente, Equação (3.4).

$$c_p = \sum (c_{pi} \cdot X_i) \quad (3.4)$$

sendo:  $c_p$  = Calor específico ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ );  $X_i$  = Fração mássica do componente  $i$ ;  $c_{pi}$  = Calor específico do componente  $i$  ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )

Para o cálculo do calor específico dos componentes dos alimentos, utilizou-se os dados publicados por CHOI e OKUS (1986). A Tabela 3.1 apresenta as equações que relacionam o cálculo do calor específico dos componentes dos alimentos e a temperatura.

**Tabela 3.1:** Equações para determinação dos calores específicos para componentes de alimentos.

Componente	$c_p$ = Calor específico ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ); T ( $^\circ\text{C}$ )	Desvio padrão
Proteína	$c_p = 1,9842 + 1,4733 \cdot 10^{-3}T - 4,8008 \cdot 10^{-6}T^2$	0,1147
Carboidrato	$c_p = 1,54884 + 1,9625 \cdot 10^{-3}T - 5,9399 \cdot 10^{-6}T^2$	0,0986
Gordura	$c_p = 1,9842 + 1,4733 \cdot 10^{-3}T - 4,8008 \cdot 10^{-6}T^2$	0,0236
Cinza	$c_p = 1,0926 + 1,8896 \cdot 10^{-3}T - 3,6817 \cdot 10^{-6}T^2$	0,0296
Água ( $<0^\circ\text{C}$ )	$c_p = 4,0817 - 5,3062 \cdot 10^{-3}T + 9,9516 \cdot 10^{-4}T^2$	0,0988
Água ( $>0^\circ\text{C}$ )	$c_p = 4,1762 - 9,0864 \cdot 10^{-3}T + 5,4731 \cdot 10^{-6}T^2$	0,0159
Gelo	$c_p = 2,0623 + 6,0769 \cdot 10^{-3}T$	0,0014

### 3.9 Densidade

O uso da equação para a determinação de densidade utiliza a fração mássica e densidade dos componentes dos alimentos. O alimento é composto por proteína, gordura, carboidrato, cinza e água. Neste estudo, como as frações mássicas de gordura, proteína e cinzas são muito pequenas, não foram utilizados no cálculo do calor específico do *liquor* ou da maltodextrina. A Equação (3.5) apresenta o cálculo da densidade.

$$\rho = 1 / \sum (X_i / \rho_i) \quad (3.5)$$

sendo:  $\rho$  = Densidade ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $X_i$  = Fração mássica do componente  $i$ ;  $\rho_i$  = Densidade do componente  $i$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ).

Os valores de densidade de cada componente do alimento são obtidos pelas equações de CHOI e OKUS (1986), apresentada na Tabela 3.2., que relaciona a densidade com a temperatura.

**Tabela 3.2:** Equações para determinação de densidade para componentes dos alimentos.

Componente	$\rho$ = Densidade ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ); T ( $^\circ\text{C}$ )	Desvio padrão
Proteína	$\rho = 1,3299 \cdot 10^3 - 5,184 \cdot 10^{-1}T$	39,9501
Carboidrato	$\rho = 1,59919 \cdot 10^3 - 3,1046 \cdot 10^{-1}T$	93,1249
Gordura	$\rho = 9,2559 \cdot 10^2 - 4,1757 \cdot 10^{-1}T$	1,2554

(continua)

**Tabela 3.2:** Equações para determinação de densidade para componentes dos alimentos. (conclusão)

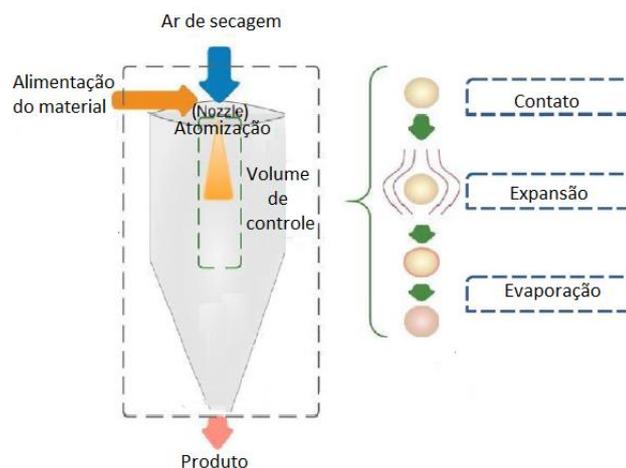
Componente	$\rho =$ Densidade ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ); $T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Desvio padrão
Cinza	$\rho = 2,4238 \cdot 10^3 - 2,8063 \cdot 10^{-1}T$	2,2315
Água	$\rho = 9,9718 \cdot 10^2 + 3,1439 \cdot 10^{-3}T - 3,7574 \cdot 10^{-3}T^2$	2,1044
Gelo	$\rho = 9,1689 \cdot 10^2 - 1,3071 \cdot 10^{-1}T$	0,5382

### 3.10 Balanço de massa

A entrada do sistema, considera-se a taxa de alimentação da solução ( $\dot{m}_{lr}$ ) e a taxa de ar atomizado ( $\dot{m}_{aru}$ ) e na saída, a taxa de ar transporta a água evaporada ( $\dot{m}_{ars}$ ) e a taxa do produto ( $\dot{m}_{mtx}$ ), no modelo para o balanço de massa para um sistema de *spray dryer* a vácuo (Figura 3.2). Neste modelo considera-se que não ocorre reação química do produto e a massa de produto acumulada para fora do volume de controle pode ser negligenciada ( $\frac{dm}{dt} = 0$ ). Portanto, o balanço de massa no *spray dryer* com vácuo pode ser escrito como (RAMOS *et al*, 2019), Equação (3.6):

$$(\dot{m}_{lr} + \dot{m}_{aru}) = (\dot{m}_{mtx} + \dot{m}_{ars}) \quad (3.6)$$

sendo:  $\dot{m}_{lr}$  = Taxa de alimentação de *liquor*( $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ );  $\dot{m}_{aru}$  = Taxa de ar úmido atomizado( $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ );  $\dot{m}_{mtx}$  = Taxa de malto dextrina ( $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ );  $\dot{m}_{ars}$  = Taxa de ar úmido de saída que transporta água evaporada( $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ ).



**Figura 3.2:** Esquema das correntes em um secador por atomização operando a vácuo (RAMOS *et.al*,2019).

Dentro da câmara do *spray dryer*, a fase sólida (s), líquida (l) e gasosa (g) estão presentes. A taxa de ar úmido,  $\dot{m}_{aru}$ , consiste em vapor de água e ar seco. A taxa de ar seco,  $\dot{m}_{ar}$

$e$ , na entrada ( $e$ ) e na saída ( $s$ ) do secador são iguais. Portanto, o balanço de massa do componente água, na base úmida é descrita como: (Equação 3.7)

$$(\dot{m}_{lr} \cdot X_{a\ lr} + \dot{m}_{ar\ e} \cdot Y_e) = (\dot{m}_{mtx} \cdot X_{a\ mtx} + \dot{m}_{ar\ s} \cdot Y_s) \quad (3.7)$$

sendo:  $X_{a\ lr}$  = Fração mássica de água no *liquor* ( $\text{kg}_{\text{ maltodextrina}} \cdot \text{kg}^{-1}_{\text{ produto seco}}$ );  $Y_e$  = Umidade absoluta do ar na entrada do secador ( $\text{kg}_{\text{ água}} \cdot \text{kg}^{-1}_{\text{ ar seco}}$ );  $X_{a\ mtx}$  = Fração mássica de água na malto dextrina ( $\text{kg}_{\text{ maltodextrina}} \cdot \text{kg}^{-1}_{\text{ produto seco}}$ );  $Y_s$  = Umidade absoluta do ar na saída do secador ( $\text{kg}_{\text{ água}} \cdot \text{kg}^{-1}_{\text{ ar seco}}$ );  $\dot{m}_{lr}$  = Taxa de alimentação de *liquor* ( $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ );  $\dot{m}_{mtx}$  = Taxa de malto dextrina ( $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ );  $\dot{m}_{ar\ e}$  = Taxa de ar na entrada ( $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ );  $\dot{m}_{ar\ s}$  = Taxa de ar de saída ( $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ ).

Para o componente sólido, tem-se: (Equação 3.8)

$$\dot{m}_{lr} \cdot (1 - X_{a\ lr}) = \dot{m}_{mtx} \cdot (1 - X_{a\ mtx}) \quad (3.8)$$

### 3.11 Balanço geral de energia e eficiência térmica

O balanço geral de energia do *spray dryer* a vácuo pode ser obtido através de um balanço de entalpia dos fluxos de entrada e saída do sistema. Desta forma, o balanço de energia pode ser descrito na equação abaixo (Equação 3.9):

$$\dot{m}_{lr} \cdot q_{lr} + \dot{m}_{ar\ e} \cdot H_{ar\ e} = \dot{m}_{mtx} \cdot q_{mtx} + \dot{m}_{ar\ s} \cdot H_{ars} \quad (3.9)$$

Entretanto, este sistema não é adiabático, assim é adicionado um termo de ganho ou perda de entalpia, como descrito na equação (RAMOS *et al*, 2019), Equação (3.10):

$$\dot{m}_{lr} \cdot q_{lr} + \dot{m}_{ar\ e} \cdot H_{ar\ e} + Q = \dot{m}_{mtx} \cdot q_{mtx} + \dot{m}_{ar\ s} \cdot H_{ars} \quad (3.10)$$

sendo :  $\dot{m}_{are}$  = Taxa de ar seco na entrada do secador ( $\text{kg}_{\text{ ar seco}} \cdot \text{h}^{-1}$ );  $\dot{m}_{ars}$  = Taxa de ar seco na saída do secador ( $\text{kg}_{\text{ ar seco}} \cdot \text{h}^{-1}$ );  $q_{lr}$  = Calor trocado da solução de *liquor* na entrada ( $\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}$ );  $H_{are}$  = Entalpia do ar na entrada do secador ( $\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}$ );  $q_{mtx}$  = Calor trocado do produto malto dextrina ( $\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}$ );  $\dot{m}_{mtx}$  = Taxa do produto maltodextrina ( $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ );  $\dot{m}_{lr}$  = Taxa da solução de *liquor* ( $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ );  $H_{ars}$  = Entalpia do ar na saída do secador ( $\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}$ );  $Q$  = Taxa de calor transferida para o sistema ( $\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}$ ).

A eficiência térmica ( $\eta$ ) do *spray dryer* pode ser determinada pela razão entre a soma da energia do material aquecido e da água evaporada, considerando a taxa da massa de água evaporada ( $\dot{m}_{ma\ ev}$ ), multiplicada pelo calor latente de vaporização da água na temperatura da câmara,  $\lambda_a$ , pelo calor de entrada no secador. A Equação (3.11) descreve esta razão (CHENG *et.al*, 2018).

$$\eta = (\dot{m}_{mtx} \cdot q_{mtx} + \dot{m}_{ma\ ev} \cdot \lambda_a) / (\dot{m}_{lr} \cdot q_{lr} + \dot{m}_{ar\ e} \cdot H_{ar\ e}) \quad (3.11)$$

sendo:  $\lambda_a$  = Calor latente de vaporização da água ( $\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}$ ).

### 3.12 Equação para cálculo da pressão atmosférica de Uberlândia

Para o cálculo da pressão atmosférica em Uberlândia, foi utilizada a Equação (3.12):

$$P_{at} = a + b \cdot h \quad (3.12)$$

sendo: para  $h < 1120\text{m}$  (McQUISTON e PARKER, 1994);  $P_{at}$  = Pressão atmosférica (kPa);  $a = 101,325$ ;  $b = -0,01153$ ;  $h$  = Altitude (m).

### 3.13 Cálculo da umidade absoluta do ar e a taxa de ar seco

O cálculo da umidade absoluta do ar ( $Y$ ) e taxa de ar seco ( $\dot{m}_{ar}$ ) é realizado com a utilização das equações descritas abaixo.

Utilizando-se a Equação (3.13) de um sistema adiabático considerando a água adicionada em um sistema com ar úmido, sabendo-se que a taxa ar de entrada mais a taxa da água evaporada é igual a taxa do ar de saída.

$$\dot{m}_{ar} \cdot Y_e + \dot{m}_{a\ ev} = \dot{m}_{ar} \cdot Y_s \quad (3.13)$$

sendo:  $\dot{m}_{ar}$  = Taxa mássica de ar seco na entrada e saída do secador ( $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ );  $\dot{m}_{a\ ev}$  = Taxa de água evaporada ( $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ );  $Y_e$  = Umidade absoluta do ar na entrada do secador ( $\text{kg} \text{ água} \cdot \text{kg}^{-1}$  de ar seco);  $Y_s$  = Umidade absoluta do ar na saída no secador ( $\text{kg}$  de água  $\cdot \text{kg}^{-1}$  de ar seco).

O volume específico é a razão entre volume pela massa, descrito na Equação (3.14).

$$v = \frac{V}{\dot{m}_{ar}} \quad (3.14)$$

sendo:  $v$  = Volume específico ( $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}_{ar\ seco}$ );  $\dot{m}_{ar}$  = Taxa de ar seco do secador ( $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ );  $V$  = Vazão de ar na saída do secador ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ).

Utilizando a Equação (3.15) de volume específico (TREYBAL, 1981).

$$v = \left[ \frac{Y_s}{M_v} + \frac{1}{M_{ar}} \right] \cdot R \cdot \frac{T_{kv}}{P_{at}} \quad (3.15)$$

sendo:  $v$  = Volume específico ( $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}_{ar\ seco}$ );  $M_v$  = Massa molecular de vapor de água ( $\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$ );  $M_{ar}$  = Massa molecular de ar ( $\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$ );  $T_{kv}$  = Temperatura ( $^{\circ} \text{K}$ );  $P_{at}$  = Pressão atmosférica (Pa);  $R$  = Constante dos gases ( $\text{J} \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ );  $Y$  = Umidade absoluta do ar ( $\text{kg} \text{ água} \cdot \text{kg}^{-1}_{ar\ seco}$ ).

### 3.14 Equação para o cálculo da energia

A Equação (3.16) apresenta o cálculo da energia no sistema:

$$Q_k = \dot{m}_{ar} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (3.16)$$

sendo:  $Q_k$  = Calor ( $\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$ );  $\dot{m}_{ar}$  = Taxa de ar seco ( $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ );  $c_p$  = Calor específico ( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ );  $\Delta T$  = diferença de temperatura ( $\text{°C}$ ).

### 3.15 Equações para o cálculo da entalpia

A Equação (3.17), apresenta a relação da entalpia do ar úmido ( $H_{ar}$ ) com a umidade absoluta ( $Y$ ) e a temperatura ( $T$ ), (ASHRAE,2001).

$$H_{ar} = 1,005 \cdot T + (2051 + 1,805 \cdot T) \cdot Y \quad (3.17)$$

sendo:  $H_{ar}$  = Entalpia do ar úmido ( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}_{ar\ seco}$ );  $T$  = Temperatura ( $\text{°C}$ );  $Y$  = Umidade absoluta do ar ( $\text{kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}^{-1}_{ar\ seco}$ ).

A Equação (3.18), apresenta a equação para o cálculo do calor trocado.

$$q = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (3.18)$$

sendo:  $q$  = Calor trocado ( $\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$ );  $\dot{m}$  = Taxa mássica ( $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ );  $c_p$  = Calor específico ( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ );  $\Delta T$  = diferença de temperatura ( $\text{°C}$ ).

### 3.16 Equação para o cálculo da porosidade

A porosidade ( $\varepsilon$ ) é determinada pela Equação (3.19), é definida como sendo a relação entre o volume de vazios de uma substância ( $v_{va}$ ) e o volume total ( $v_{total}$ ), ARAUJO, (2013).

$$\varepsilon = v_{va}/v_{total} \quad (3.19)$$

sendo:  $\varepsilon$  = Porosidade;  $v_{va}$  = Volume vazio ( $\text{m}^{-3}$ );  $v_{total}$  = Volume total ( $\text{m}^{-3}$ ).

### 3.17 Tabela de dados para determinação da densidade do *liquor* através dos dados de sólidos totais

Usando-se uma tabela com conversões de DS (% sólidos totais) para *liquor* de malto dextrina, calcula-se a densidade do *liquor*. Os dados estão apresentados na Tabela 3.3.

**Tabela 3.3:** Dados de conversão de valor de sólidos totais (DS) em densidade do *liquor* obtida através do uso de uma tabela interna.

% DS	$\rho$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) (37,87°C)
69	1334,99
69,5	1338,56
70	1340,94
70,5	1344,50
71	1348,07

### 3.18 Equação para determinação da temperatura de transição vítrea

A Equação (3.20) de BUSIN et.al., (1996) descreve uma relação entre a DE e a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) para maltodextrina.

$$T_g = -1,4 \cdot DE + 176,4 \quad (3.20)$$

sendo: DE = Dextrose-equivalente (%);  $T_g$  = Temperatura de transição vítrea (°C).

### 3.19 Tratamento estatístico dos dados

Os resultados foram tratados estatisticamente utilizando a média dos valores e o desvio padrão e são apresentados da seguinte forma durante este documento,  $M \pm \sigma$ .

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Avaliação dos resultados dos seis lotes de produto final de maltodextrina

Os lotes industriais de maltodextrina foram amostrados e analisados para a verificação dos parâmetros de controle de qualidade. Os parâmetros de umidade (U), pH, sólidos totais (DS), dextrose-equivalente (DE) e densidade aparente ( $\rho_{r \text{ mtx}}$ ) foram analisados. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1:** Dados de análise da umidade, pH, sólidos totais (%DS), dextrose equivalente (%DE) e densidade aparente dos seis lotes de maltodextrina.

Parâmetros	Especificação	lote <sub>mtx</sub> 1	lote <sub>mtx</sub> 2	lote <sub>mtx</sub> 3	lote <sub>mtx</sub> 4	lote <sub>mtx</sub> 5	lote <sub>mtx</sub> 6
U (%)	< 5,00	4,93	4,48	4,22	4,75	4,24	4,37
pH	4,50- 5,50	4,94	4,80	4,90	4,97	4,92	4,91
DS (%)	> 95,00	95,07	95,52	95,78	95,25	95,76	95,64
DE (%)	17,00- 19,90	17,86	18,56	18,84	17,72	17,58	17,86
$\rho_{r \text{ mtx}}$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	470 (alvo)	446	419	434,1	482	477	469

Os resultados de umidade (U), pH, sólidos totais (DS) e dextrose-equivalente (DE) estão dentro do intervalo estabelecido da especificação do produto. A densidade aparente dos lotes 1,2 e 3 estão com resultados abaixo do alvo, e nos lotes 4,5 e 6 os dados estão próximos ao valor alvo, de  $470 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . O cálculo do DS (%) é realizado pelo cálculo pela subtração de 100 menos o valor da umidade.

### 4.2 Avaliação dos dados de operação do *spray dryer* durante a secagem da maltodextrina

As condições de operação do *spray dryer* foi monitorada a cada uma hora durante a secagem de cada lote de malto dextrina.

Os dados coletados no estudo são:  $T_{ek}$  a temperatura de entrada na câmara de secagem do *spray dryer* ( $^{\circ}\text{C}$ );  $V_{eir}$  a vazão de entrada do *liquor* no *spray dryer* ( $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ );  $T_{e \text{ lr}}$  a temperatura de entrada do *liquor* no *spray dryer* ( $^{\circ}\text{C}$ ); R a rotação do atomizador do *spray dryer* (rpm);  $V_k$  o vácuo na câmara de secagem do *spray dryer* (mmCa) e  $T_{s \text{ k}}$  a temperatura de saída do ar da câmara de secagem do *spray dryer* ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Os dados de operação do *spray dryer* dos lotes 1 a 6 de maltodextrina estão apresentadas nas Tabelas 4.2. a 4.7., respectivamente.

**Tabela 4.2:** Dados a cada hora de operação do *spray dryer* na secagem do lote 1 de maltodextrina.

lote <sub>mtx 1</sub>	T <sub>e k</sub>	V <sub>e lr</sub>	T <sub>e lr</sub>	R	V <sub>k</sub>	T <sub>sk</sub>
Hora em operação	°C	m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	°C	Rpm	mmCa	°C
1	113	1,80	94,0	11620	-14	116,0
2	186	1,89	110,0	11480	-31	106,0
3	193	2,11	110,0	11480	-34	106,0
4	196	2,44	110,0	11480	-34	106,0
5	197	2,43	110,0	11620	-32	105,0
6	195	2,43	110,0	11620	-31	105,9
7	196	2,42	110,0	11480	-30	106,0
8	194	2,42	110,0	11620	-33	105,0
9	196	2,44	110,0	11620	-32	105,0
10	196	2,44	110,0	11620	-34	105,0
11	195	2,45	110,0	11620	-39	106,2
12	194	2,45	110,0	11620	-36	106,1
13	195	2,45	110,0	11620	-38	106,0
14	195	2,46	110,0	11620	-34	105,9
15	196	2,46	113,0	11620	-38	106,7
16	195	2,45	109,2	11620	-37	106,4
17	195	2,43	109,7	11620	-39	105,4
18	197	2,47	111,2	11620	-42	106,2
19	197	2,47	110,0	11620	-38	107,0
20	198	2,47	110,2	11620	-42	107,6
21	198	2,47	110,5	11620	-39	107,6
22	197	2,47	110,8	11620	-35	107,9
23	197	2,51	109,2	11620	-35	107,9
24	195	2,45	109,0	11620	-36	107,2
25	196	2,44	109,0	11620	-35	106,6

**Tabela 4.3:** Dados a cada hora de operação do *spray dryer* na secagem do lote 2 de maltodextrina.

(continua)

lote <sub>mtx 2</sub>	T <sub>e k</sub>	V <sub>e lr</sub>	T <sub>e lr</sub>	R	V <sub>k</sub>	T <sub>sk</sub>
Hora em operação	°C	m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	°C	Rpm	mmCa	°C
1	197	2,52	110,1	11480	-37	105,8
2	197	2,52	110,6	11480	-36	106,3
3	197	1,99	118,1	11480	-31	108,3
4	187	2,07	112,0	11480	-35	107,5
5	197	2,53	112,6	11480	-37	106,3
6	197	2,55	100,0	11480	-33	107,4
7	197	2,52	104,0	11480	-36	107,5
8	197	2,52	105,0	11480	-31	107,1
9	197	2,56	112,2	11480	-24	106,2
10	197	1,99	118,0	11480	-24	108,4

**Tabela 4.3:**Dados a cada hora de operação do *spray dryer* na secagem do lote 2 de maltodextrina.  
(conclusão)

lote <sub>mtx 2</sub>	T <sub>e k</sub>	V <sub>e lr</sub>	T <sub>e lr</sub>	R	V <sub>k</sub>	T <sub>s k</sub>
Hora em operação	°C	m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	°C	Rpm	mmCa	°C
11	186	1,96	110,1	11480	-26	105,9
12	191	2,10	110,0	11480	-32	107,4
13	188	2,11	113,0	11480	-24	106,8
14	198	2,46	110,0	11480	-23	106,8
15	198	2,46	110,0	11480	-28	105,6
16	198	2,41	110,0	11480	-28	105,6
17	198	2,47	108,3	11480	-29	105,2
18	198	2,45	110,3	11480	-30	105,2
19	197	2,50	98,0	11480	-33	104,4
20	198	2,32	111,0	11480	-30	105,1
21	198	2,23	113,1	11480	-28	107,8
22	196	2,24	82,0	11480	-32	108,2
23	191	2,40	108,0	11480	-27	106,3
24	194	2,43	110,0	11480	-31	105,3

**Tabela 4.4:**Dados a cada hora de operação do *spray dryer* na secagem do lote 3 de maltodextrina.  
(continua)

lote <sub>mtx 3</sub>	T <sub>e k</sub>	V <sub>e lr</sub>	T <sub>e lr</sub>	R	V <sub>k</sub>	T <sub>sk</sub>
Hora em operação	°C	m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	°C	Rpm	mmCa	°C
1	199	2,52	110,6	11480	-37	108,7
2	199	2,52	110,0	11480	-31	108,3
3	198	2,53	107,8	11480	-35	108,1
4	191	2,41	110,7	11480	-32	107,8
5	192	2,40	110,7	11480	-35	106,4
6	192	2,34	110,4	11620	-31	106,8
7	190	2,34	110,0	11620	-33	106,8
8	193	2,34	110,0	11620	-33	106,6
9	191	2,34	110,0	11620	-39	106,5
10	198	2,47	106,0	11620	-31	106,9
11	198	2,50	109,9	11620	-34	106,8
12	198	2,54	106,7	11620	-32	106,0
13	198	2,46	107,3	11620	-29	106,7
14	198	2,51	98,0	11620	-34	106,8
15	198	2,49	111,0	11480	-37	107,0
16	197	2,50	11,9	11480	-35	106,6
17	197	2,49	112,8	11480	-31	106,2
18	199	2,48	110,5	11480	-34	106,7
19	198	2,51	109,0	11480	-34	107,0
20	198	2,55	102,0	11480	-30	107,1

**Tabela 4.4:** Dados a cada hora de operação do *spray dryer* na secagem do lote 3 de maltodextrina. (conclusão)

lote <sub>mtx</sub> 3	T <sub>ek</sub>	V <sub>elr</sub>	T <sub>elr</sub>	R	V <sub>k</sub>	T <sub>sk</sub>
Hora em operação	°C	m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	°C	Rpm	mmCa	°C
21	198	2,49	110,6	11480	-38	106,3
22	199	2,50	113,2	11480	-33	108,2
23	199	2,51	114,8	11480	-34	107,9

**Tabela 4.5:** Dados a cada hora de operação do *spray dryer* na secagem do lote 4 de maltodextrina.

lote <sub>mtx</sub> 4	T <sub>ek</sub>	V <sub>elr</sub>	T <sub>elr</sub>	R	V <sub>k</sub>	T <sub>sk</sub>
Hora em operação	°C	m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	°C	Rpm	mmCa	°C
1	192	2,55	111,0	11480	-44	106,3
2	196	2,52	109,0	11480	-41	106,4
3	194	2,53	95,0	11480	-48	105,9
4	194	2,47	109,7	11480	-42	106,0
5	194	2,43	109,0	11480	-42	105,7
6	194	2,47	110,9	11480	-46	105,7
7	194	2,48	109,7	11480	-41	105,5
8	193	2,45	109,0	11480	-48	105,4
9	194	2,45	119,2	11480	-48	105,4
10	195	2,43	108,7	11480	-45	106,3
11	194	2,42	109,0	11480	-42	106,2
12	195	2,42	108,5	11480	-40	106,0
13	195	2,37	112,0	11480	-50	105,9
14	194	2,45	104,3	11480	-46	106,3
15	194	2,46	110,0	11480	-41	106,6
16	195	2,46	110,2	11480	-37	107,0
17	195	2,47	111,0	11480	-39	103,8
18	195	2,52	118,0	11480	-36	107,2
19	190	2,51	104,0	11480	-42	105,0
20	196	2,50	110,2	11480	-42	107,5
21	189	2,49	104,0	11480	-42	107,9
22	189	2,48	106,0	11480	-41	108,0
23	186	2,48	110,0	11480	-37	107,4

**Tabela 4.6:** Dados a cada hora de operação do *spray dryer* na secagem do lote 5 de maltodextrina. (continua)

lote <sub>mtx</sub> 5	T <sub>ek</sub>	V <sub>elr</sub>	T <sub>elr</sub>	R	V <sub>k</sub>	T <sub>sk</sub>
Hora em operação	°C	m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	°C	Rpm	mmCa	°C
1	194	2,53	109	11200	-40	106,6
2	193	2,49	109	11340	-46	106,5
3	193	2,53	109	11340	-41	106,5

**Tabela 4.6:** Dados a cada hora de operação do *spray dryer* na secagem do lote 5 de maltodextrina.  
(conclusão)

lote <sub>mtx</sub> 5	T <sub>e k</sub>	V <sub>e lr</sub>	T <sub>e lr</sub>	R	V <sub>k</sub>	T <sub>sk</sub>
Hora em operação	° C	m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	° C	Rpm	mmCa	° C
4	194	2,53	109	11340	-40	106,1
5	195	2,52	109,7	11340	-47	105,9
6	196	2,53	110,8	11480	-41	106,5
7	191	2,53	110,7	11480	-48	105,4
8	196	2,53	109	11480	-44	106
9	196	2,54	109,6	11480	-49	106,6
10	195	2,54	110	11480	-42	105,8
11	193	2,51	110,7	11480	-48	106,6
12	195	2,24	112,8	11480	-43	104,9
13	195	2,53	110	11480	-46	106,3
14	196	2,54	103	11480	-41	107
15	196	2,52	111	11480	-45	107,4
16	196	2,52	108,3	11480	-42	107,4
17	196	2,52	115,6	11480	-44	107,5
18	193	2,51	111	11480	-44	105,7
19	192	2,52	110	11480	-47	106
20	193	2,53	110	11480	-47	106,4
21	196	2,51	107,3	11480	-50	106,5
22	195	2,52	110,6	11480	-43	107,2

**Tabela 4.7:** Dados a cada hora de operação do *spray dryer* na secagem do lote 6 de maltodextrina.  
(continua)

lote <sub>mtx</sub> 6	T <sub>e k</sub>	V <sub>e lr</sub>	T <sub>e lr</sub>	R	V <sub>k</sub>	T <sub>sk</sub>
Hora em operação	° C	m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	° C	Rpm	mmCa	° C
1	194	2,53	110,0	11480	-35	104,7
2	191	2,55	111,8	11480	-48	105,5
3	193	2,55	111,0	11480	-42	105,1
4	195	2,55	110,5	11480	-38	105,9
5	195	2,51	103,0	11480	-39	105,7
6	196	2,55	111,2	11480	-45	105,3
7	197	2,51	112,8	11480	-48	105,5
8	196	2,47	113,0	11480	-48	105,9
9	196	2,42	109,0	11480	-41	105,9
10	196	2,41	109,0	11480	-42	106,3
11	196	2,41	109,5	11480	-39	106,5
12	196	2,42	109,6	11480	-43	106,5
13	196	2,41	113,0	11480	-38	105,9
14	196	2,40	108,3	11480	-40	105,9
15	195	2,34	110,0	11480	-44	105,9

**Tabela 4.7:** Dados a cada hora de operação do *spray dryer* na secagem do lote 6 de maltodextrina. (conclusão)

lote <sub>mtx</sub> 6	T <sub>e k</sub>	V <sub>e lr</sub>	T <sub>e lr</sub>	R	V <sub>k</sub>	T <sub>sk</sub>
Hora em operação	° C	m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	° C	Rpm	mmCa	° C
16	195	2,36	109,6	11480	-44	106,3
17	195	2,41	109,3	11480	-41	106,3
18	196	2,44	110,3	11480	-48	105,9
19	196	2,47	110,0	11480	-52	106,5
20	196	2,50	110,6	11480	-51	106,1
21	196	2,48	111,3	11480	-42	107,2
22	195	2,49	110,0	11480	-46	107,2
23	193	2,47	110,8	11480	-44	106,8
24	193	2,46	112,5	11480	-43	106,7
25	192	2,48	107,3	11480	-42	107,0
26	191	2,53	107,8	11480	-44	106,7

#### 4.3 Avaliação dos impactos dos parâmetros após evaporação e antes do *spray dryer*

Os tanques onde ficam armazenados o *liquor* evaporado são analisados para a verificação dos parâmetros de sólidos totais (DS), pH, iodo e dextrose-equivalente (DE). As Tabelas 4.8. a 4.13. apresentam os resultados por tanque (tq) utilizados para a produção de cada lote de maltodextrina (lote<sub>mtx</sub>). Para o objetivo deste estudo, foi considerado o valor médio dos parâmetros dos tanques de *liquor* para cada lote de produção de maltodextrina.

**Tabela 4.8:** Resultados de DS, pH, Iodo e DE dos tanques de *liquor* utilizados para a produção do lote 1 de maltodextrina.

Lote <sub>mtx</sub> 1	Resultados típicos	tq- a	tq- b	tq- c	M
DS (%)	68,0 - 71,0	70,0	70,0	68,0	69,3
pH	4,0 - 5,5	5,0	4,9	4,9	4,9
Iodo	Marrom	RB	RB	RB	RB
DE (%)	17,0 - 19,9	18,28	17,72	17,44	17,81

Para a secagem por *spray dryer* de cada lote de maltodextrina, utilizaram-se tanques de *liquor* evaporados, apresentados em cada tabela (ver Tabela 4.8 a Tabela 4.13). Cada tanque foi analisado individualmente. A média dos resultados dos tanques de *liquor*(M), representa os valores médios dos parâmetros do *liquor* usado na secagem do produto seco final.

**Tabela 4.9:** Resultados de DS, pH, Iodo e DE dos tanques de *liquor* utilizados para a produção do lote 2 de maltodextrina.

Lote <sub>mtx</sub> 2	Resultados típicos	tq- a	tq- b	tq- c	M
DS (%)	68,0 - 71,0	70,0	70,0	70,5	70,2
pH	4,0 - 5,5	5,2	5,1	4,9	5,1
Iodo	Marrom	RB	RB	RB	RB
DE (%)	17,0 - 19,9	18,70	18,84	18,42	18,65

**Tabela 4.10:** Resultados de DS, pH, Iodo e DE dos tanques de *liquor* utilizados para a produção do lote 3 de maltodextrina.

Lote <sub>mtx</sub> 3	Resultados típicos	tq- a	tq- b	tq- c	M
DS (%)	68,0 - 71,0	70,0	69,0	68,0	69,0
pH	4,0 - 5,5	5,0	5,0	4,9	5,0
Iodo	Marrom	RB	RB	RB	RB
DE (%)	17,0 - 19,9	18,83	19,26	19,26	19,12

**Tabela 4.11:** Resultados de DS, pH, Iodo e DE dos tanques de *liquor* utilizados para a produção do lote 4 de maltodextrina.

Lote <sub>mtx</sub> 4	Resultados típicos	tq- a	tq- b	tq- c	M
DS (%)	68,0 - 71,0	70,0	70,0	69,5	69,8
pH	4,0 - 5,5	5,0	5,0	5,0	5,0
Iodo	Marrom	RB	RB	RB	RB
DE (%)	17,0 - 19,9	18,14	17,30	18,56	18,00

**Tabela 4.12:** Resultados de DS, pH, Iodo e DE dos tanques de *liquor* utilizados para a produção do lote 5 de maltodextrina.

Lote <sub>mtx</sub> 5	Resultados típicos	tq - a	tq- b	M
DS (%)	68,0 - 71,0	69,5	70,0	69,8
pH	4,0 - 5,5	4,9	4,9	4,9
Iodo	Marrom	RB	RB	RB
DE (%)	17,0 - 19,9	18,00	18,28	18,14

**Tabela 4.13:** Resultados de DS, pH, Iodo e DE dos tanques de *liquor* utilizados para a produção do lote 6 de maltodextrina.

Lote <sub>mtx</sub> 6	Resultados típicos	tq- a	tq- b	tq- c	M
DS (%)	68,0 - 71,0	70,0	70,0	71,0	70,3
pH	4,0 - 5,5	4,8	4,9	4,9	4,9
Iodo	Marrom	RB	RB	RB	RB
DE (%)	17,0 - 19,9	18,00	18,14	18,00	18,05

Avaliando os dados nas Tabelas 4.8 a 4.13, os resultados dos tanques de *liquor* estão dentro das especificações estabelecidas e resultados esperados.

#### 4.4 Avaliação dos impactos dos parâmetros do *spray dryer* na densidade do produto final

O cálculo das médias das temperaturas de admissão do ar de secagem e saída da câmara e vazão de entrada do *liquor* mostrou que a variação em 25 horas, quantificadas a cada hora, situaram-se em torno de um valor médio com baixa dispersão conforme descrito na Tabela 4.14.

**Tabela 4.14:** Valores médios e desvio padrão dos parâmetros de controle do *spray dryer* para os seis lotes de maltodextrina. Sendo: **M** o valor da média;  $\sigma$  o desvio padrão.

	Lote <sub>mtx1</sub>	Lote <sub>mtx2</sub>	Lote <sub>mtx3</sub>	Lote <sub>mtx4</sub>	Lote <sub>mtx5</sub>	Lote <sub>mtx6</sub>
	<b>M</b> $\pm\sigma$					
T <sub>ek</sub> (°C)	192,08 $\pm$ 16,64	195,4 $\pm$ 3,77	196,43 $\pm$ 3,09	193,35 $\pm$ 2,52	194,5 $\pm$ 1,54	194,85 $\pm$ 1,67
V <sub>elr</sub> (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	2,39 $\pm$ 0,18	2,35 $\pm$ 0,2	2,47 $\pm$ 0,07	2,47 $\pm$ 0,04	2,51 $\pm$ 0,06	2,47 $\pm$ 0,06
T <sub>elr</sub> (°C)	109,43 $\pm$ 3,31	108,6 $\pm$ 7,27	104,95 $\pm$ 20,59	109,06 $\pm$ 4,71	109,82 $\pm$ 2,26	110,05 $\pm$ 2,08
R (rpm)	11598 $\pm$ 38	11480 $\pm$ 0	11535 $\pm$ 67	11480 $\pm$ 0	11442 $\pm$ 59	11480 $\pm$ 0
V <sub>k</sub> (mmCa)	-34,72 $\pm$ 5,4	-30,21 $\pm$ 4,26	-33,57 $\pm$ 2,57	-42,61 $\pm$ 3,76	-44,45 $\pm$ 3,04	-43,35 $\pm$ 4,13
T <sub>sk</sub> (°C)	106,66 $\pm$ 2,13	106,52 $\pm$ 1,13	107,05 $\pm$ 0,74	106,23 $\pm$ 0,97	106,4 $\pm$ 0,66	106,12 $\pm$ 0,63

Contudo, o vácuo aplicado para os lotes 1 a 6 foram: -34,72; -30,21; -33,57; -42,61; -44,45 e -43,35 mmCa, respectivamente. Quando se aplica um vácuo mais pronunciado, mantendo-se a vazão e a temperatura do ar constantes assim como os outros parâmetros médios, a umidade das gotas é eliminada mais rapidamente e as partículas contraem mais e, portanto, apresentam menor porosidade quando contidas em recipientes. Apesar da tendência à maior porosidade interna, o que facilita a reidratação em termos de instantaneidade, a contração volumétrica (encolhimento) provavelmente foi dominante.

#### 4.5 Cálculo do calor específico do *liquor* e da maltodextrina

O calor específico do *liquor* ( $c_{plr}$ ) foi determinado utilizando-se a Equação (3.4). Como os valores médios de cinza, gordura e proteína são muito pequenos para o cálculo, considerou-se somente o calor específico do carboidrato e da água, calculados a partir da equação apresentada na Tabela 3.1, ver os resultados na Tabela 4.15. A temperatura utilizada para o cálculo foi a temperatura de entrada do *liquor* (T<sub>elr</sub>). Sendo:  $c_{pklr}$  o calor específico do carboidrato no licor (kJ·kg<sup>-1</sup>·°C<sup>-1</sup>);  $c_{palr}$  o calor específico da água no *liquor* (kJ·kg<sup>-1</sup>·°C<sup>-1</sup>); T<sub>elr</sub>a

temperatura de entrada do *liquor* no spray dryer ( $^{\circ}\text{C}$ );  $X_{\text{ktlr}}$  a fração mássica de carboidrato no *liquor*;  $X_{\text{alr}}$  a fração mássica de água no *liquor*;  $c_{\text{plr}}$  o calor específico do *liquor* ( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ ).

As Tabelas 4.15 e 4.16 mostram os dados para o cálculo do calor específico para o *liquor*. A Tabela 4.15 apresenta o cálculo do calor específico do carboidrato e da água no *liquor* através das equações da Tabela 3.1, utilizando as temperaturas de entrada no *liquor* na entrada do secador, ver Tabela 4.14.

**Tabela 4.15:** Dados do calor específico de carboidrato ( $c_{\text{pktlr}}$ ) e de água presentes ( $c_{\text{palr}}$ ) no *liquor* para a produção de cada lote de maltodextrina.

Lote <sub>mtx</sub>	$T_{e\text{ lr}} (^{\circ}\text{C})$	$c_{\text{pktlr}} (\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$	$c_{\text{palr}} (\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$
1	109,43	1,6925	4,2318
2	108,60	1,6919	4,2309
3	104,95	1,6894	4,2269
4	109,06	1,6922	4,2314
5	109,82	1,6927	4,2322
6	110,05	1,6929	4,2325

A Tabela 4.16 apresenta o cálculo do calor específico do *liquor* utilizado a Equação 3.4, aplicando os dados obtidos na Tabela 4.15 e a fração mássica do *liquor* do carboidrato, apresentada nos valores médios de DS nas Tabela 4.8 a 4.13. A fração mássica da água do *liquor* é calculada pela subtração de um menos o valor de DS.

**Tabela 4.16:** Dados do calor específico do carboidrato ( $c_{\text{pktlr}}$ ), calor específico da água ( $c_{\text{palr}}$ ), a fração mássica do carboidrato ( $X_{\text{ktlr}}$ ) e água ( $X_{\text{alr}}$ ) e o calor específico do *liquor* de cada lote ( $c_{\text{plr}}$ ).

Lote <sub>mtx</sub>	$c_{\text{p kt lr}} (\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$	$X_{\text{kt lr}}$	$c_{\text{p a lr}} (\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$	$X_{\text{a lr}}$	$c_{\text{p lr}} (\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$
1	1,6925	0,6933	4,2318	0,3067	2,4713
2	1,6919	0,7017	4,2309	0,2983	2,4493
3	1,6894	0,6900	4,2269	0,3100	2,4760
4	1,6922	0,6983	4,2314	0,3017	2,4583
5	1,6927	0,6975	4,2322	0,3025	2,4609
6	1,6929	0,7030	4,2325	0,2970	2,4471
				<b>M</b>	2,4605
				$\sigma$	0,0115

Assim, o valor do calor específico do *liquor* ( $c_{\text{plr}}$ ) corresponde a  $2,4605\pm 0,0115\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ , ver a Tabela 4.16.

O calor específico da malto dextrina ( $c_{\text{p mx}}$ ) foi determinado utilizando-se a Equação (3.4). Como os valores médios de cinza, gordura e proteína são muito pequenos para o cálculo, considerou-se somente o calor específico do carboidrato e da água, calculados pelas equações

apresentadas na Tabela 3.1. A temperatura utilizada foi a temperatura de saída da câmara de secagem que para o estudo atual foi considerada a temperatura de saída do produto seco ( $T_{sk}$ ), ver Tabela 4.17. Sendo:  $c_{p\text{ ktmx}}$  = Calor específico do carboidrato na maltodextrina ( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ );  $c_{p\text{ amtx}}$  = Calor específico da água na maltodextrina ( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ );  $T_{sk}$  = Temperatura de saída da câmara do spray dryer ( $^{\circ}\text{C}$ );  $X_{k\text{ mtx}}$  = Fração mássica de carboidrato na maltodextrina;  $X_{a\text{ mtx}}$  = Fração mássica de água na maltodextrina;  $c_{p\text{ mtx}}$  = Calor específico da maltodextrina ( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ ).

**Tabela 4.17:** Dados do calor específico do carboidrato ( $c_{p\text{ ktmx}}$ ) e água ( $c_{p\text{ amtx}}$ ) presentes na maltodextrina para cada lote produzido.

Lote <sub>mtx</sub>	$T_{sk}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$c_{p\text{ ktmx}}$ ( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	$c_{p\text{ amtx}}$ ( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ )
1	106,66	1,6906	4,2288
2	106,52	1,6905	4,2286
3	107,05	1,6909	4,2292
4	106,23	1,6903	4,2283
5	106,40	1,6904	4,2285
6	106,12	1,6902	4,2282

A Tabela 4.18 apresenta o cálculo do calor específico da maltodextrina cada lote de maltodextrina, utilizando para este cálculo os dados do calor específico de carboidrato e água, ver Tabela 4.17. A fração mássica de água, de cada lote de produto acabado está apresentada na Tabela 4.1. A fração mássica do carboidrato é calculada pela subtração entre um e a fração mássica da água.

**Tabela 4.18:** Dados do calor específico do carboidrato ( $c_{p\text{ ktmx}}$ ), calor específico da água ( $c_{p\text{ amtx}}$ ), a fração mássica do carboidrato ( $X_{k\text{ mtx}}$ ) e água ( $X_{a\text{ mtx}}$ ) e o calor específico da maltodextrina de cada lote ( $c_{p\text{ mtx}}$ ).

Lote <sub>mtx</sub>	$c_{p\text{ kt mtx}}$ ( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	$X_{k\text{ t mtx}}$	$c_{p\text{ a mtx}}$ ( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	$X_{a\text{ mtx}}$	$c_{p\text{ mtx}}$ ( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ )
1	1,6906	0,9507	4,2288	0,0493	1,8157
2	1,6905	0,9552	4,2286	0,0448	1,8042
3	1,6909	0,9578	4,2292	0,0422	1,7980
4	1,6903	0,9525	4,2283	0,0475	1,8108
5	1,6904	0,9576	4,2285	0,0424	1,7980
6	1,6902	0,9563	4,2282	0,0437	1,8011
				<b>M</b>	1,8046
				$\sigma$	0,0072

Assim, o valor do calor específico da maltodextrina ( $c_{p\text{ mtx}}$ ) corresponde a  $1,8046\pm 0,0072\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ , ver a Tabela 4.18.

#### 4.6 Cálculo da densidade do *liquor* e da maltodextrina

A densidade do *liquor* ( $\rho_{lr}$ ) foi determinado utilizando-se a Equação (3.5). Como os valores médios de cinza, gordura e proteína são muito pequenos para o cálculo, considerou-se somente a densidade do carboidrato e da água, calculados a partir das equações apresentadas na Tabela 3.2. A temperatura utilizada para o cálculo foi a temperatura de entrada do *liquor* ( $T_{elr}$ ), veja-se Tabela 4.19. Sendo:  $\rho_{alr}$  = Densidade da água no *liquor* ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ );  $\rho_{ktr}$  = Densidade do carboidrato no *liquor* ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ );  $T_{elr}$  = Temperatura de entrada do *liquor* ( $^{\circ}\text{C}$ );  $X_{ktr}$  = Fração mássica do carboidrato no *liquor*;  $X_{alr}$  = Fração mássica da água no *liquor*;  $\rho_{lr}$  = Densidade do *liquor* ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ );

A Tabela 4.20 apresenta o cálculo da densidade do *liquor* cada lote de maltodextrina, utilizando para este cálculo os dados da densidade do carboidrato e água, ver Tabela 4.19. A fração mássica de carboidrato do *liquor* usado para a produção de cada lote de maltodextrina está apresentada nas Tabelas 4.8 a 4.13, como valor de DS. A fração mássica da água do *liquor* é calculada pela subtração de um e a fração mássica do carboidrato do *liquor*.

**Tabela 4.19:** Dados da densidade do carboidrato ( $\rho_{ktr}$ ) e de água presentes ( $\rho_{alr}$ ) no *liquor* para a produção dos lotes de maltodextrina.

lote <sub>mtx</sub>	$T_{elr}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\rho_{alr}$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$\rho_{ktr}$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
1	109,43	952,53	1565,22
2	108,60	953,21	1565,47
3	104,95	956,12	1566,61
4	109,06	952,83	1565,33
5	109,82	952,21	1565,10
6	110,05	952,02	1565,02

**Tabela 4.20:** Dados da densidade do carboidrato ( $\rho_{ktr}$ ), a densidade da água ( $\rho_{alr}$ ), a fração mássica do carboidrato ( $X_{ktr}$ ) e água ( $X_{alr}$ ) e a densidade do *liquor* de cada lote ( $\rho_{lr}$ ).

Lote <sub>mtx</sub>	$\rho_{ktr}$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$X_{ktr}$	$\rho_{alr}$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$X_{alr}$	$\rho_{lr}$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
1	1565,22	0,6933	952,53	0,3067	1307,31
2	1565,47	0,7017	953,21	0,2983	1313,75
3	1566,61	0,6900	956,12	0,3100	1307,76
4	1565,33	0,6983	952,83	0,3017	1311,06
5	1565,10	0,6975	952,21	0,3025	1310,03
6	1565,02	0,7030	952,02	0,2970	1313,78
				<b>M</b>	1310,62
				$\sigma$	2,81

Assim, a densidade do *liquor* ( $\rho_{lr}$ ) é  $1310,62 \pm 2,81 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , ver Tabela 4.20.

A densidade da maltodextrina ( $\rho_{\text{mtx}}$ ) foi determinada utilizando-se a Equação (3.5). Como os valores médios de cinza, gordura e proteína são muito pequenos para o cálculo, considerou-se somente a densidade do carboidrato e da água, determinadas pelas equações apresentadas na Tabela 3.2. A temperatura utilizada foi a temperatura de saída da câmara de secagem que para o estudo atual foi considerada a temperatura de saída do produto seco ( $T_{\text{sk}}$ ). Sendo:  $\rho_{\text{kmtx}}$  = Densidade do carboidrato na maltodextrina ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ );  $\rho_{\text{a mtx}}$  = Densidade da água na maltodextrina ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ );  $T_{\text{sk}}$  = Temperatura de saída da câmara ( $^{\circ}\text{C}$ );  $X_{\text{kmtx}}$  = Fração mássica do carboidrato na maltodextrina;  $X_{\text{amtx}}$  = Fração mássica da água na maltodextrina;  $\rho_{\text{mtx}}$  = Densidade da maltodextrina ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

A Tabelas 4.21 e 4.22 apresentam os dados para a determinação da densidade da maltodextrina.

**Tabela 4.21:** Dados da densidade do carboidrato ( $\rho_{\text{kmtx}}$ ) e de água ( $\rho_{\text{amtx}}$ ) dos lotes de maltodextrina.

lote <sub>mtx</sub>	$T_{\text{sk}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\rho_{\text{amtx}}$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$\rho_{\text{kmtx}}$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
1	106,66	954,77	1566,08
2	106,52	954,88	1566,12
3	107,05	954,46	1565,96
4	106,23	955,11	1566,21
5	106,40	954,98	1566,16
6	106,12	955,20	1566,24

**Tabela 4.22:** Dados da densidade do carboidrato ( $\rho_{\text{kmtx}}$ ), a densidade da água ( $\rho_{\text{amtx}}$ ), a fração mássica do carboidrato ( $X_{\text{kmtx}}$ ) e água ( $X_{\text{amtx}}$ ) e a densidade da maltodextrina de cada lote ( $\rho_{\text{mtx}}$ ).

Lote <sub>mtx</sub>	$\rho_{\text{kmtx}}$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$X_{\text{kmtx}}$	$\rho_{\text{a mtx}}$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$X_{\text{a mtx}}$	$\rho_{\text{mtx}}$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
1	1566,08	0,9507	954,77	0,0493	1518,16
2	1566,12	0,9552	954,88	0,0448	1522,46
3	1565,96	0,9578	954,46	0,0422	1524,73
4	1566,21	0,9525	955,11	0,0475	1520,01
5	1566,16	0,9576	954,98	0,0424	1524,78
6	1566,24	0,9563	955,20	0,0437	1523,65
				<b>M</b>	1.522,30
				<b><math>\sigma</math></b>	2,70

Assim, a densidade média da maltodextrina ( $\rho_{\text{mtx}}$ ) é  $1522,30 \pm 2,70 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , ver Tabela 4.22.

#### 4.7 Balanço de massa da água no sistema de secagem do *spray dryer*

Para o balanço de massa da água no sistema é necessário determinar a taxa mássica de entrada do *liquor* no *spray dryer* que é calculada pela multiplicação da vazão do *liquor* no *spray* e a densidade do *liquor*.

Taxa de entrada do *liquor* no *spray dryer* ( $\dot{m}_{lr}$ ) é determinada pela Equação (4.1).

$$\dot{m}_{lr} = V_{elr} \cdot \rho_{lr} \quad (4.1)$$

sendo:  $\dot{m}_{lr}$  = Taxa de *liquor* na entrada do *spray dryer*( $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ );  $V_{elr}$  = Vazão de entrada do *liquor*( $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ );  $\rho_{lr}$ = Densidade do *liquor*( $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ ).

Para  $V_{elr} = 2,39 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$  e  $\rho_{lr} = 1310,62 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , determina-se  $\dot{m}_{lr} = 3132,38 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ . Desta forma foi calculada a taxa de *liquor* alimentada no secador para cada lote de maltodextrina.

O balanço de massa da água no sistema é calculado utilizando- se a Equação (3.7), aplicando-a para a água e considerando que existe uma parte da água que é evaporada no sistema. As Equações (4.2) e (4.3), descrevem este detalhamento. A Tabela 4.23., apresenta os dados de taxa mássica do *liquor* e maltodextrina, frações mássicas de água no *liquor* e na maltodextrina e a taxa de água evaporada no sistema,

$$\dot{m}_{alr} = \dot{m}_{amtx} + \dot{m}_{aev} \quad (4.2)$$

sendo:  $\dot{m}_{aev}$  = Taxa mássica da água evaporada na secagem ( $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ );  $\dot{m}_{amtx}$  = Taxa mássica de água da maltodextrina seca( $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ );  $\dot{m}_{alr}$  = Taxa mássica da água do *liquor*( $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ ).

Detalhando a Equação (4.2) acima tem-se:

$$\dot{m}_{lr} \cdot X_{alr} = \dot{m}_{mtx} \cdot X_{amtx} + \dot{m}_{aev} \quad (4.3)$$

**Tabela 4.23:** Taxa mássica do *liquor*( $\dot{m}_{lr}$ ) e malto dextrina( $\dot{m}_{mtx}$ ), frações mássicas de água no *liquor* ( $X_{alr}$ ) e na maltodextrina ( $X_{amtx}$ ) e a taxa de água evaporada( $\dot{m}_{aev}$ ) no sistema para cada lote produzido de maltodextrina.

lote <sub>mtx</sub>	$\dot{m}_{lr}$ ( $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ )	$X_{alr}$	$\dot{m}_{alr}$ ( $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ )	$\dot{m}_{mtx}$ ( $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ )	$X_{amtx}$	$\dot{m}_{amtx}$ ( $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ )	$\dot{m}_{aev}$ ( $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ )
1	3.130,81	0,31	960,22	2.097,92	0,05	103,43	856,79
2	3.079,96	0,30	918,75	2.009,58	0,04	90,03	828,72
3	3.237,23	0,31	1.003,54	2.235,42	0,04	94,33	909,21
4	3.237,23	0,30	976,67	2.046,25	0,05	97,20	879,48
5	3.289,66	0,30	995,12	1.972,92	0,04	83,65	911,47
6	3.237,23	0,30	960,49	1.972,92	0,04	86,22	874,27
<b>M</b>							<b>876,66</b>
<b><math>\sigma</math></b>							<b>31,55</b>

A taxa média de água evaporada no *spray dryer* é  $876,66 \pm 31,55 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ , ver Tabela 4.23.

#### 4.8 Balanço de massa da maltodextrina no sistema de secagem do *spray dryer*

Utilizando-se a Equação (3.8), aplicando-se a equação para o produto maltodextrina também se calcula a maltodextrina não recuperada no sistema de secagem e ensaue. A descrição dos termos utilizados para a realização deste cálculo está apresentada nas Equações (4.4) e (4.5) e a Tabela 4.24. apresenta os dados das taxas mássicas da maltodextrina( $\dot{m}_{\text{mtx}}$ ) e do *liquor* ( $\dot{m}_{\text{lr}}$ ), as frações mássicas da maltodextrina no *liquor* ( $1 - X_{a \text{ lr}}$ ) e na maltodextrina ( $1 - X_{a \text{ mtx}}$ ) e a taxa de perda de maltodextrina ( $\dot{m}_{\text{mtx p}}$ ) no sistema de secagem e ensaue.

O balanço de massa de maltodextrina no *spray dryer* é obtido através da Equação (4.4).

$$\dot{m}_{\text{mtx lr}} = \dot{m}_{\text{mtx mtx}} + \dot{m}_{\text{mtx p}} \quad (4.4)$$

sendo:  $\dot{m}_{\text{mtx lr}}$  = Taxa de malto dextrina no *liquor* ( $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ );  $\dot{m}_{\text{mtx mtx}}$  = Taxa de maltodextrina na maltodextrina ( $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ );  $\dot{m}_{\text{mtx p}}$  = Taxa de perda de maltodextrina( $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ ).

$$\dot{m}_{\text{lr}} \cdot (1 - X_{a \text{ lr}}) = \dot{m}_{\text{mtx}} \cdot (1 - X_{a \text{ mtx}}) + \dot{m}_{\text{mtx p}} \quad (4.5)$$

**Tabela 4.24:** Taxas mássicas da maltodextrina( $\dot{m}_{\text{mtx}}$ ) e do *liquor* ( $\dot{m}_{\text{lr}}$ ), as frações mássicas da maltodextrina no *liquor* ( $1 - X_{a \text{ lr}}$ ) e na maltodextrina( $1 - X_{a \text{ mtx}}$ ) e a taxa de perda de maltodextrina ( $\dot{m}_{\text{mtx p}}$ ) no sistema de secagem e ensaue para cada lote produzido de maltodextrina.

lote <sub>mtx</sub>	$\dot{m}_{\text{lr}}$ ( $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ )	$1 - X_{a \text{ lr}}$	$\dot{m}_{e \text{ mtx}}$ ( $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ )	$\dot{m}_{\text{mtx}}$ ( $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ )	$1 - X_{a \text{ mtx}}$	$\dot{m}_{\text{smtx}}$ ( $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ )	$\dot{m}_{\text{mtx p}}$ ( $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ )
1	3.130,81	0,69	2.170,59	2.097,92	0,95	1.994,49	176,10
2	3.079,96	0,70	2.161,21	2.009,58	0,96	1.919,55	241,65
3	3.237,23	0,69	2.233,69	2.235,42	0,96	2.141,08	92,61
4	3.237,23	0,70	2.260,56	2.046,25	0,95	1.949,05	311,51
5	3.289,66	0,70	2.294,54	1.972,92	0,96	1.889,27	405,27
6	3.237,23	0,70	2.276,74	1.972,92	0,96	1.886,70	390,04
						<b>M</b>	269,53
						$\sigma$	122,90

A taxa mássica média de maltodextrina não recuperada no processo, calculada através do balanço de massa é de  $269,53 \pm 122,90 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ . Sendo que os dados de densidade do *liquor* foram determinados pelas equações escritas na Tabela 4.20. Os dados de produção de maltodextrina por dia referem-se ao volume já ensacado. Assim, é necessário considerar as perdas aproximadas de processo, não consideradas neste estudo.

#### 4.9 Balanço de massa no secador utilizando dados medidos da densidade aparente da maltodextrina e a densidade do *liquor*

Utilizando-se os dados medidos de densidade aparente da maltodextrina e a densidade do *liquor* determinada através da leitura de sólidos totais (DS) o balanço de massa é calculado usando a Equação (4.5).

A Tabela 4.25 apresenta dos dados de densidade do *liquor* estabelecidos através da concentração de sólidos totais (%DS) utilizando-se a Tabela 3.3.

**Tabela 4.25:** Dados de sólidos totais (DS) e a sua densidade dos lotes de *liquor* ( $\rho_{r\ lr}$ ) utilizados na produção dos lotes de maltodextrina.

Lote <sub>mtx</sub>	DS (%)	$\rho_{r\ lr}(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
1	70,00	1340,94
2	70,00	1340,94
3	69,00	1334,99
4	70,00	1340,94
5	69,50	1338,56
6	70,50	1344,50
	<b>M</b>	1340,15
	$\sigma$	3,16

A Tabela 4.26 apresenta os dados de taxa mássica de *liquor* ( $\dot{m}_{lr}$ ) e de maltodextrina ( $\dot{m}_{mtx}$ ), a fração mássica da maltodextrina no *liquor* ( $1 - X_{a\ lr}$ ) e na maltodextrina ( $1 - X_{amtx}$ ) e a taxa de perda de maltodextrina ( $\dot{m}_{mtx\ p}$ ).

**Tabela 4.26:** Valores da taxa mássica de *liquor* ( $\dot{m}_{lr}$ ) e maltodextrina ( $\dot{m}_{mtx}$ ), fração mássica da maltodextrina no *liquor* ( $1 - X_{a\ lr}$ ) e na maltodextrina ( $1 - X_{amtx}$ ) e taxa de perda de maltodextrina calculados para cada lote de maltodextrina ( $\dot{m}_{mtx\ p}$ ).

lote <sub>mtx</sub>	$\dot{m}_{lr}(\text{kg}\cdot\text{h}^{-1})$	$1 - X_{a\ lr}$	$\dot{m}_{e\ mtx}(\text{kg}\cdot\text{h}^{-1})$	$\dot{m}_{mtx}(\text{kg}\cdot\text{h}^{-1})$	$1 - X_{amtx}$	$\dot{m}_{smtx}(\text{kg}\cdot\text{h}^{-1})$	$\dot{m}_{mtx\ p}(\text{kg}\cdot\text{h}^{-1})$
1	3.203,23	0,69	2.220,80	2.097,92	0,95	1.994,49	226,31
2	3.151,20	0,70	2.211,20	2.009,58	0,96	1.919,55	291,65
3	3.297,44	0,69	2.275,23	2.235,42	0,96	2.141,08	134,15
4	3.312,12	0,70	2.312,85	2.046,25	0,95	1.949,05	363,80
5	3.359,79	0,70	2.343,45	1.972,92	0,96	1.889,27	454,19
6	3.320,93	0,70	2.335,61	1.972,92	0,96	1.886,70	448,91
						<b>M</b>	319,83
						$\sigma$	127,01

A taxa mássica média de maltodextrina não recuperada, calculada através do balanço de massa é de  $319,83 \pm 127,01 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ . Para o cálculo deste balanço, foram considerados os dados de densidade do *liquor* calculada pela conversão de DS (Tabela 4.25) e a densidade aparente da maltodextrina, determinada pelo Método 3.4. Os dados de produção de maltodextrina por dia referem-se ao volume já ensacado. Assim, é necessário considerar as perdas aproximadas de processo, não consideradas neste estudo.

#### 4.10 Balanço de Energia no Secador

##### 4.10.1 Cálculo da Massa de Água Evaporada

A taxa da massa de água evaporada é realizada pela Equação (4.16) utilizando a taxa mássica de *liquor* ( $\dot{m}_{lr}$ ) e as frações mássicas de água no *liquor* ( $X_{alr}$ ) e da água na malto dextrina ( $X_{a\text{ mtx}}$ ) para cada lote de maltodextrina produzido. Como resultado determinou-se que a taxa mássica de água evaporada no sistema em média foi de  $825,19 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ .

$$\dot{m}_{ma\text{ ev}} = \dot{m}_{lr} \cdot (X_{alr} - X_{a\text{ mtx}}) \quad (4.16)$$

**Tabela 4.27:** Dados da taxa de água evaporada ( $\dot{m}_{ma\text{ ev}}$ ) do sistema.

lote <sub>mtx</sub>	$\dot{m}_{lr}$ (kg·h <sup>-1</sup> )	$X_{alr}$	$X_{a\text{ mtx}}$	$\dot{m}_{ma\text{ ev}}$ (kg·h <sup>-1</sup> )
1	3130,81	0,31	0,05	805,87
2	3079,96	0,30	0,04	780,77
3	3237,23	0,31	0,04	866,93
4	3237,23	0,30	0,05	822,90
5	3289,66	0,30	0,04	855,64
6	3237,23	0,30	0,04	819,02
<b>M</b>				825,19
<b>σ</b>				31,81

A taxa mássica de água evaporada ( $\dot{m}_{ma\text{ ev}}$ ) é de  $825,19 \pm 31,81 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ , ver a Tabela 4.27. De acordo com as informações do fabricante do secador por atomização, a capacidade de evaporação é de  $1200 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ , assim, o *spray dryer* estava operando com 69 % da capacidade de projeto.

#### 4.10.2 Cálculo da umidade absoluta do ar na entrada e saída do secador e a taxa mássica de ar seco

Para o cálculo da pressão atmosférica na cidade de Uberlândia, utilizou-se a Equação (3.12), onde a altitude de Uberlândia é de 854 m (IBGE,1955). A pressão atmosférica de Uberlândia é de  $91,1 \cdot 10^3 \text{Pa}$ .

Para a determinação da umidade absoluta do período de produção da maltodextrina, a temperatura média do mês de maio 2020 em Uberlândia foi  $19,5^\circ\text{C}$  e a umidade relativa do ar estimada, 40% (WEATHERSARK,2021). Determinou-se a umidade absoluta do ar, usando a carta psicrométrica (ASHRAE,2001). Assim, o valor da umidade absoluta de entrada ( $Y_e$ ) é de  $5,5 \cdot 10^{-3} \text{ kg água} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ ar seco}$  no ar de entrada do secador.

Para a determinação da umidade absoluta do ar na saída e da taxa de admissão de ar seco no *spray dryer*, utilizou-se a resolução das equações (3.13), (3.14) e (3.15).

$$\dot{m}_{\text{ar}} \cdot Y_e + \dot{m}_{\text{a ev}} = \dot{m}_{\text{ar}} \cdot Y_s \quad (3.13)$$

sendo:  $\dot{m}_{\text{ar}}$  = Taxa mássica de ar seco na entrada e saída do secador ( $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ );  $\dot{m}_{\text{a ev}}$  = Taxa mássica de água evaporada ( $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ );  $Y_e$  = Umidade absoluta do ar na entrada do secador ( $\text{kg água} \cdot \text{kg}^{-1}$  de ar seco);  $Y_s$  = Umidade absoluta do ar na saída no secador ( $\text{kg de água} \cdot \text{kg}^{-1}$  de ar seco).

Considerando que o volume específico é a razão entre volume e massa, Equação (3.14).

$$v = \frac{V}{\dot{m}_{\text{ar}}} \quad (3.14)$$

sendo:  $v$  = Volume específico ( $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  de ar seco);  $\dot{m}_{\text{ar}}$  = Taxa mássica de ar seco alimentada no secador ( $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ );  $V$  = Vazão de ar na saída do secador ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ).

Utilizando a Equação (3.15) de volume específico (TREYBAL, 1981)

$$v = \left[ \frac{Y_s}{M_v} + \frac{1}{M_{\text{ar}}} \right] \cdot R \cdot \frac{T_{\text{kv}}}{P_{\text{at}}} \quad (3.15)$$

sendo:  $v$  = Volume específico ( $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  ar seco);  $M_v$  = Massa molecular de vapor de água ( $\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$ );  $M_{\text{ar}}$  = Massa molecular de ar seco ( $\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$ );  $T_{\text{kv}}$  = Temperatura ( $^\circ \text{K}$ );  $P_{\text{at}}$  = Pressão atmosférica (Pa);  $R$  = Constantes dos gases ( $\text{J} \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot ^\circ \text{K}^{-1}$ );  $Y$  = Umidade absoluta do ar ( $\text{kg água} \cdot \text{kg}^{-1}$  ar seco).

Sendo conhecidas as seguintes variáveis das equações:

$V = 46400 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , que corresponde à vazão de ar na saída do *spray dryer*;

$R = 8.314,41 \text{ J} \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot ^\circ\text{K}^{-1}$

$T_k = T_{s\text{ mtx}} = 106,6 + 273 = 379,6^\circ \text{ K}$ , que corresponde à temperatura de saída da malto dextrina no secador;

$P_{at} = 91100 \text{ Pa}$ , a pressão atmosférica de Uberlândia;

$M_{ar} = 28,9645 \text{ kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$

$M_v = 18,01534 \text{ kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$

$\dot{m}_{a\text{ ev}} = 909,08 \text{ kg} \cdot \text{água} \cdot \text{h}^{-1}$

$Y_e = 5,5 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{água} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ ar seco}$  no ar de entrada do secador

Substituindo os valores conhecidos nas Equações (3.13), (3.14) (3.15), tem-se:

A Equação (3.13), é apresentada abaixo com a substituição do valor da umidade absoluta do ar na entrada do *spray dryer* ( $Y_e$ ):

$$\dot{m}_{ar} \cdot 0,0055 + 909,08 = \dot{m}_{ar} \cdot Y_s$$

A Equação (3.14), é descrita substituindo a vazão de ar na saída do *spray dryer* ( $V$ ):

$$v = \frac{46400}{\dot{m}_{ar}}$$

A Equação (3.15) é descrita, substituindo os valores da pressão atmosférica de Uberlândia ( $P_{at}$ ), a massa molecular de vapor de água ( $M_v$ ), a massa molecular de ar ( $M_{ar}$ ), a temperatura de saída da malto dextrina do *spray dryer* ( $T_{kv}$ ) e a constante dos gases ( $R$ ).

$$v = 1,9230 \cdot Y_s + 1,1964$$

Para a resolução destas três equações, simula-se o valor de  $Y_s$  na equação (3.15), calcula-se o volume específico ( $v$ ). Substitui-se e calcula-se a taxa mássica de ar ( $\dot{m}_{ar}$ ) utilizando a Equação (3.14). Aplica-se o valor de ( $v$ ) e ( $\dot{m}_{ar}$ ) na Equação (3.13), para que o primeiro termo da equação seja igual ao segundo termo. Determinando assim a taxa mássica de ar ( $\dot{m}_{ar}$ ) e a umidade absoluta do ar na saída ( $Y_s$ ).

$\dot{m}_{a\text{ ev}} = 909,08 \text{ kg} \cdot \text{água} \cdot \text{h}^{-1}$ , a taxa de água evaporada no sistema.

$\dot{m}_{ar} = 37.023,3 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \text{ ar seco}$ , que corresponde a taxa de ar seco no secador

$Y_s = 0,0301 \text{ kg} \cdot \text{de} \cdot \text{água} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ de} \cdot \text{ar}$ , que corresponde à umidade absoluta do ar na saída do secador.

#### 4.10.3 Cálculo da entalpia do ar úmido

A entalpia do ar úmido na entrada ( $H_{ar\text{ e}}$ ) e entalpia de saída ( $H_{ar\text{ s}}$ ) do secador é calculada pela Equação (3.17). Para este cálculo, foram utilizadas a temperatura de entrada da câmara do secador ( $T_{ek}$ ) e, para a saída, a temperatura de saída do ar do secador ( $T_{sk}$ ).

$$H_{ar} = 1,005 \cdot T + (2051 + 1,805 \cdot T) \cdot Y \quad (3.17)$$

sendo:  $H_{ar}$  = entalpia do ar úmido ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  ar seco);  $T$  = temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ );  $Y$  = umidade absoluta do ar ( $\text{kg} \text{ água} \cdot \text{kg}^{-1}$  ar seco).

Com esta operação calcula-se a entalpia do ar de entrada e na saída do secador, sendo a temperatura de referência igual a zero,  $T_{ref} = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

O cálculo de entalpia do ar úmido de entrada ( $H_{ar e}$ ) é calculado utilizando-se os dados da temperatura de entrada na câmara ( $T_{ek}$ ), ver Tabela 4.14, de cada lote de maltodextrina produzido, e a umidade absoluta do ar na entrada ( $Y_e$ ), ver Tabela 4.28.

O cálculo de entalpia do ar úmido de saída ( $H_{ar s}$ ) é calculado utilizando-se os dados da temperatura de saída na câmara ( $T_{sk}$ ), ver Tabela 4.14 de cada lote de maltodextrina produzido, e a umidade absoluta do ar na saída ( $Y_s$ ), ver Tabela 4.29.

**Tabela 4.28:** Dados da entalpia do ar úmido na entrada ( $H_{ar e}$ ) do *spray dryer*, considerando a temperatura de entrada na câmara ( $T_{ek}$ ) e a umidade absoluta do ar na entrada ( $Y_e$ ).

lote <sub>mtx</sub>	$H_{ar e}$ ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$T_{ek}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$Y_e$
1	206,2278	192,08	0,0055
2	209,5770	195,38	0,0055
3	210,6427	196,43	0,0055
4	207,5167	193,35	0,0055
5	208,6839	194,50	0,0055
6	209,0391	194,85	0,0055

<b>M</b>	208,61
$\sigma$	1,56

**Tabela 4.29:** Dados da entalpia do ar úmido na saída ( $H_{ar s}$ ) do *spray dryer* considerando a temperatura de saída na câmara ( $T_{sk}$ ) e a umidade absoluta do ar na saída ( $Y_s$ ).

lote <sub>mtx</sub>	$H_{ar s}$ ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$T_{sk}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$Y_s$
1	174,7233	106,66	0,0301
2	174,6068	106,55	0,0301
3	175,1364	107,05	0,0301
4	174,2678	106,23	0,0301
5	174,4479	106,40	0,0301
6	174,1513	106,12	0,0301

<b>M</b>	174,56
$\sigma$	0,35

O valor da entalpia do ar na entrada,  $H_{ar\ e}$ , é de  $208,61 \pm 1,56 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ ar seco}$  (ver Tabela 4.28) e o valor de entalpia do ar na saída,  $H_{ar\ s}$ , é de  $174,56 \pm 0,35 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ ar seco}$  (ver Tabela 4.29).

#### 4.10.4 Cálculo do calor trocado do *liquor* e da maltodextrina

Para o cálculo do calor trocado do *liquor* e da maltodextrina, utiliza-se a Equação (3.18). Considera-se a temperatura de referência,  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  e a taxa mássica ( $\dot{m}$ ) de  $1 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ . Os dados de cálculo estão apresentados na Tabela 4.30.e Tabela 4.31.

**Tabela 4.30:** Cálculo do calor trocado do *liquor* ( $q_{lr}$ ) para cada lote produzido de maltodextrina, utilizando na Equação (3.18), a temperatura de entrada do *liquor* ( $T_{elr}$ ).

lote <sub>mtx</sub>	$q_{lr} \text{ (kJ} \cdot \text{h}^{-1}\text{)}$	$\dot{m} \text{ (kg} \cdot \text{h}^{-1}\text{)}$	$c_{plr} \text{ (kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}\text{)}$	$(T_{elr} - 0) \text{ (}^\circ\text{C)}$
1	269,25	1	2,4605	109,43
2	267,21	1	2,4605	108,60
3	258,23	1	2,4605	104,95
4	268,34	1	2,4605	109,06
5	270,21	1	2,4605	109,82
6	270,78	1	2,4605	110,05

<b>M</b>	267,34
$\sigma$	4,64

**Tabela 4.31:** Cálculo do calor trocado da maltodextrina para cada lote produzido de maltodextrina ( $q_{mtx}$ ), utilizando na Equação (3.18), a temperatura de saída da câmara ( $T_{sk}$ ).

lote <sub>mtx</sub>	$q_{mtx} \text{ (kJ} \cdot \text{h}^{-1}\text{)}$	$\dot{m} \text{ (kg} \cdot \text{h}^{-1}\text{)}$	$c_{pmx} \text{ (kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}\text{)}$	$(T_{sk} - 0) \text{ (}^\circ\text{C)}$
1	192,48	1	1,8046	106,66
2	192,28	1	1,8046	106,55
3	193,19	1	1,8046	107,05
4	191,71	1	1,8046	106,23
5	192,01	1	1,8046	106,40
6	191,51	1	1,8046	106,12

<b>M</b>	192,20
$\sigma$	0,60

O valor de calor trocado médio da maltodextrina,  $q_{mtx}$ , é de  $192,20 \pm 0,60 \text{ kJ} \cdot \text{h}^{-1}$  (ver Tabela 4.31) e o valor do calor troca do médio do *liquor*,  $q_{lr}$ , é de  $267,34 \pm 4,64 \text{ kJ} \cdot \text{h}^{-1}$  (ver Tabela 4.30).

#### 4.10.5 Balanço geral do sistema de calor na secagem e eficiência térmica

A Equação (3.10), apresenta o balanço geral do sistema, onde se calcula a perda ou ganho de energia no sistema de secagem ( $Q$ ) para cada lote de maltodextrina produzido. A Tabela 4.32 apresenta os dados obtidos com o uso desta equação.

Os dados da taxa mássica de *liquor* e maltodextrina estão apresentadas na Tabela 4.23. Os valores do calor trocado do *liquor* e maltodextrina estão descritos na Tabela 4.30 e Tabela 4.31, respectivamente. Na Tabela 4.28 e Tabela 4.29, os valores de entalpia do ar de entrada e saída no secador, respectivamente. A taxa mássica de perda da maltodextrina que foi somada à taxa de maltodextrina para o balanço da energia, está calculada na Tabela 4.24. O valor da taxa de ar de entrada e saída do secador foi calculado no item 4.10.2.

**Tabela 4.32:** Dados da taxa mássica ( $\dot{m}$ ), calor trocado ( $q$ ) do *liquor* e maltodextrina, entalpia ( $H$ ) do ar úmido da entrada e saída e o cálculo da perda de calor ( $Q$ ) no sistema de secagem para cada lote de maltodextrina produzida.

lote $m_{tx}$	$\dot{m}_{lr}$ ( $kg \cdot h^{-1}$ )	$q_{lr}$ ( $kJ \cdot kg^{-1}$ )	$\dot{m}_{ars}$ ( $kg \cdot h^{-1}$ )	$H_{ar e}$ ( $kJ \cdot kg^{-1}$ )	$Q$ ( $kJ \cdot h^{-1}$ )	$\dot{m}_{m_{tx}}$ ( $kg \cdot h^{-1}$ )	$q_{m_{tx}}$ ( $kJ \cdot kg^{-1}$ )	$\dot{m}_{ars}$ ( $kg \cdot h^{-1}$ )	$H_{ars}$ ( $kJ \cdot kg^{-1}$ )	$\dot{m}_{m_{tx}}$ $n$ ( $kg \cdot h^{-1}$ )
1	3.130,81	269,25	37023,30	206,23	-1571664,41	2097,92	192,48	37023,30	174,72	176,10
2	3.079,96	267,21	37023,30	209,58	-1684829,44	2009,58	192,28	37023,30	174,61	241,65
3	3.237,23	258,23	37023,30	210,64	-1700760,52	2235,42	193,19	37023,30	175,14	92,61
4	3.237,23	268,34	37023,30	207,52	-1647669,08	2046,25	191,71	37023,30	174,27	311,51
5	3.289,66	270,21	37023,30	208,68	-1699786,92	1972,92	192,01	37023,30	174,45	405,27
6	3.237,23	270,78	37023,30	209,04	-1715703,84	1972,92	191,51	37023,30	174,15	390,04

<b>M</b>	-1.670.069,04
$\sigma$	53.499,07

Pela avaliação dos dados da Tabela 4.32.o sistema perdeu em média,  $1.670.069,04 \pm 53.499,07 \text{ kJ} \cdot \text{h}^{-1}$  durante a secagem da maltodextrina. O valor representa 19 %, quando se calcula a perda com base no valor de entrada da energia do *liquor* e do ar de entrada no sistema.

A eficiência térmica ( $\eta$ ) do sistema de secagem é determinada pela Equação (3.11). A pressão atmosférica na câmara ( $P_{at k}$ ) foi determinada pela subtração entre a pressão atmosférica de Uberlândia ( $P_{at}$ ) e o vácuo no interior na câmara de secagem. Para determinação do calor latente ( $\lambda_a$ ), utilizou-se tabela *dry saturated steam line* (SPIRAXSARCO).

**Tabela 4.33:** Dados da entalpia ( $H_{are}$ ) do ar de entrada, do calor trocado ( $q$ ) de *liquor* e maltodextrina, calor latente da água ( $\lambda_a$ ) e taxas mássicas ( $\dot{m}$ ) de maltodextrina, do *liquor*, e da massa da água evaporada para o cálculo da eficiência térmica ( $\eta$ ).

lote mtx	$(\dot{m}_{mtx} + \dot{m}_{mtp}) \cdot q_{mtx}$ (kJ.h <sup>-1</sup> )	$\dot{m}_{maev} \cdot \lambda_a$ (kJ.h <sup>-1</sup> )	$\dot{m}_{lr} \cdot q_{lr}$ (kJ.h <sup>-1</sup> )	$\dot{m}_{are} \cdot H_{are}$ (kJ.h <sup>-1</sup> )	$\eta$	$\lambda_a$ (kJ.kg <sup>-1</sup> )	$P_{at k}$ (kPa)	$\dot{m}_{maev}$ (kg.h <sup>-1</sup> )
1	437.710,65	1.777.008,37	7.635.232,75	842.975,13	0,26	2.205,08	90,76	805,87
2	432.878,58	1.721.642,71	7.759.233,44	822.993,22	0,25	2.205,06	90,80	780,77
3	449.744,60	1.911.642,59	7.798.688,20	835.945,51	0,27	2.205,07	90,77	866,93
4	451.999,28	1.814.594,33	7.682.954,23	868.682,39	0,27	2.205,11	90,68	822,90
5	456.645,72	1.886.787,95	7.726.166,59	888.901,69	0,27	2.205,12	90,66	855,64
6	452.528,18	1.806.036,38	7.739.318,18	876.567,92	0,26	2.205,12	90,67	819,02

O rendimento térmico médio do *spray dryer* foi de  $0,26 \pm 0,01$  (ver Tabela 4.33), isso significa que apenas 26% do calor é utilizado para evaporar a maltodextrina.

#### 4.11 Porosidade

Para a determinação da porosidade da maltodextrina produzida utiliza-se a Equação (3.19).

A porosidade de uma substância é calculada pela razão entre o volume vazio e o volume total. Para a determinação dos volumes vazios utilizou-se para o cálculo os valores de densidade aparente real do produto acabado,  $\rho_{r\text{ mtx}}$ , apresentada na Tabela (4.1) e a calculada, ( $\rho_{\text{mtx}}$ ), através na Tabela (4.22). Como base de cálculo, utilizou-se a base de cálculo de 1000kg de maltodextrina seca para os cálculos do volume de produto a partir da densidade aparente, ( $v_{st}$ ) e o volume do produto calculado a partir da densidade compactada, ( $v_{ka}$ ), respectivamente. O valor do volume vazio é a diferença volume de produto a partir da densidade aparente, ( $v_{st}$ ) e o volume do produto calculado a partir da densidade compactada, ( $v_{ka}$ ). O volume total, ( $v_{total}$ ), é soma do volume de produto a partir da densidade aparente, ( $v_{st}$ ) e o volume do produto calculado a partir da densidade compactada, ( $v_{ka}$ ).

A Tabela 4.34. apresenta os dados e cálculo da porosidade do produto final, considerando a densidade aparente real do produto acabado ( $\rho_{r\text{ mtx}}$ ), a densidade calculada do produto acabado ( $\rho_{\text{mtx}}$ ), o volume de produto a partir da densidade aparente ( $v_{st}$ ), o volume do produto calculado a partir da densidade compactada ( $v_{ka}$ ), o volume de vazios de uma substância ( $v_{va}$ ) e o volume total ( $v_{total}$ ).

**Tabela 4.34:** Dados do volume de vazios ( $v_{va}$ ), volume total ( $v_{total}$ ) e porosidade do produto ( $\epsilon$ ).

Lote <sub>mtx</sub>	m( $10^3 \cdot \text{kg}$ )	$\rho_{r \text{ mtx}}$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$V_{st}$ ( $\text{m}^3$ )	$\rho_{\text{mtx}}$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$v_{ka}$ ( $\text{m}^3$ )	$v_{va}$ ( $\text{m}^3$ )	$v_{total}$ ( $\text{m}^3$ )	$\epsilon$
1	1	446,00	2,2422	1522,30	0,6569	1,5853	2,2422	0,7070
2	1	419,00	2,3866	1522,30	0,6569	1,7297	2,3866	0,7248
3	1	431,10	2,3196	1522,30	0,6569	1,6627	2,3196	0,7168
4	1	482,00	2,0747	1522,30	0,6569	1,4178	2,0747	0,6834
5	1	477,00	2,0964	1522,30	0,6569	1,4395	2,0964	0,6867
6	1	469,00	2,1322	1522,30	0,6569	1,4753	2,1322	0,6919
<b>M</b>								0,7018
$\sigma$								0,0170

O valor da porosidade média da maltodextrina é de  $0,7018 \pm 0,017$ , ver Tabela 4.34. Este dado é uma nova informação sobre o produto.

#### 4.12 Temperatura de transição vítrea

Aplicando-se a Equação (3.20) e utilizando-se o valor de dextrose-equivalente, determina-se a temperatura de transição vítrea no sistema, para cada um dos lotes produzidos (Tabela 4.35.). O valor da temperatura de transição vítrea,  $T_g$  está entre  $150,0$  a  $151,8^\circ\text{C}$  e a temperatura de saída da câmara do secador, entre  $106,12$  a  $107,05^\circ\text{C}$  e a temperatura de entrada do ar no secador entre  $192,08$  a  $196,43^\circ\text{C}$  (Tabela 4.14.), de forma que a temperatura de operação interna do secador está abaixo da temperatura de transição vítrea do produto final. Isso possibilita classificar o produto como vítreo.

**Tabela 4.35:** Dados de dextrose-equivalente (DE) e a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) para os lotes de maltodextrina.

Lote <sub>mtx</sub>	DE (%)	$T_g$ ( $^\circ\text{C}$ )
1	17,86	151,4
2	18,56	150,4
3	18,84	150,0
4	17,72	151,6
5	17,58	151,8
6	17,86	151,4

## 5. CONCLUSÃO

O estudo mostrou que entre os parâmetros quantificados, o vácuo aplicado no secador por atomização (*spray dryer*) influenciou na densidade aparente da malto dextrina, cujo o valor padrão é de  $470 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Portanto, na operação do secador deve-se operar com um vácuo médio de 44 mmCa, o que possibilitou a obtenção do produto na densidade especificada. Valores de densidade aparente de  $433 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  mostraram-se abaixo do valor de especificação. Os outros parâmetros apresentaram valores similares e, portanto, sem influência na densidade aparente.

A porosidade média da malto dextrina foi de  $0,7018 \pm 0,017$  comparada com o padrão desejado para o produto, conclui-se, então, que a porosidade pode ser utilizada como um parâmetro adicional para a avaliação da qualidade do produto final, considerando-se a estocagem do produto.

Pelas informações do fabricante (NIRO-GEA), a capacidade de evaporação é de  $1200,00 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$  e a taxa da massa de água evaporada, calculada em média no sistema, é de  $825,19 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ , o que leva à conclusão de que o *spray dryer* estava operando com 69% da capacidade de projeto durante a produção.

A densidade do *liquor* calculado utilizando-se a Equação (3.5) é de  $1310,62 \pm 2,81 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  e calculado utilizando-se o valor do sólido total usando a Tabela 4.25. para conversão é de  $1340,15 \pm 3,16 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . O valor calculado pela Equação (3.5) é 2 % menor, o que pode ser explicado pelo cálculo não ter considerado os valores da densidade das cinzas, proteína e gordura que foram consideradas muito baixas, mostrando que o modelo utilizado representa bem o cálculo do *liquor*.

A taxa mássica média de maltodextrina não recuperada no processo, calculada através do balanço de massa, é de  $269,53 \pm 122,90 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ , sendo que os dados de densidade do *liquor* foram determinados pelas equações escritas na Tabela 4.20. Os dados de produção de maltodextrina, por dia, refere-se ao volume já ensacado. Assim, é necessário considerarem-se as perdas aproximadas de processo, não consideradas neste estudo.

O sistema de secagem apresentou uma taxa de perda de energia de  $1.670.069,04 \pm 53499,07 \text{ kJ}\cdot\text{h}^{-1}$ , que consiste na perda de 19%.

A eficiência térmica do sistema foi de  $0,26 \pm 0,01$ , o que significa que 26% da energia é utilizada para a secagem do produto.

O valor da temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ), calculada para este sistema de secagem, está entre 150,0 a 151,8°C, a temperatura de saída da câmara do secador entre 106,12°C a 107,05°C e a temperatura de entrada do ar no secador entre 192,08°C a 196,43°C (Tabela 4.14.).

Como conclusão, o produto obtido encontra-se em temperatura abaixo da transição vítrea e, portanto, no estado vítreo, não se aderindo por esta condição fenomenologicamente nas superfícies internas do secador.

## 6. REFERÊNCIAS

ARAÚJO, E.H.S.- Sistema Inteligente para estimar a porosidade em sedimentos a partir de análise de sinais GRP. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Ciência de Ciências Exatas e da Terra, 2013. 39 p.

ASHRAE Fundamentals Handbook –Chapter 6, 2001.

AZEREDO, H.M.C. - Encapsulação: aplicação à tecnologia de alimentos. Alim Nutr. v. 16, n. 1, 2005. 89-97 p.

BIBLIOTECA.IBGE.GOV.BR/VISUALIZAÇÃO/PERIODICOS/113/COL\_MONO\_N48\_U BERLANDIA.PDF,1955. 2p

CHANGZHOU JINQIAO SPRAY – Drying and Engineering CO.: Glucose, maltose / maltodextrin production line. Technical material. 2016.

CHENG, F.; ZHOU, X.; LIU, Y. -Methods for Improvement of the Thermal Efficiency during Spray Drying. E3S Web of conferences 53, 01031 – ICAEER 2018. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185301031>.

COKER, L.E.; KEOKUK. KALYANASUNDRAM, I. -Process for the manufacture of low DE Maltodextrins. United States Patent. 4,447,532. May, 1984.

COLLARES, F.P. -Despreendimento de filmes de pasta alimentícias durante a secagem sobre superfícies de sólidos e sua relação com a transição vítrea. Universidade Estadual de Campinas, 2001. 38-61p.

DENARDIN, C. C; SILVA L. P da. - Estrutura dos grânulos de amido e sua relação com propriedades físico-químicas. In Ciência Rural Santa Maria, V.39, n.3,2009,945-954 p.

ENGEL, B.; BACCAR, N. de M.; MARQUARDT, L.; ROHLFES, A. L. B. - Emprego de Spray Dryer na indústria de alimentos: Uma breve revisão - Doi: 10.17058/rjp. v7i2.9824.In Revista Jovens Pesquisadores, Santa Cruz do Sul, V.7, n. 2, 2017.5 p.

EUROPEAN PATENT APPLICATION (EP 2 368 443 A1) - Process for the production of maltodextrins, and maltodextrins, 2011 - Cargill Incorporated.

LUMDUBWONG N.; SEIB, P.A. –Low and medium DE maltodextrins from waxy wheat starch: preparation and properties. *Starch/Starke*. v. 53, 2001. 605-615 p.

MUZAFFAR, K., NAYIK, G. A.; KUMAR, P. – Stickiness Problem Associated with Spray Drying of Sugar and Acid Rich Foods; A Mini Review. In *Journal of Nutrition & Food Sciences*, 2015. S:12:003. DOI:10.4172/2155-9600.1000512003.

MUZAFFAR, K.; NAYIK, G.A.; KUMAR, P. Production of Fruit Juice Powders by Spray Drying Technology. In *International Journal of Advance Research in Science and Engineering*.v.07, 2018.

MORETTO, E., FETT, R., GONZAGA, L.V., KUSKOSKI, E.M. - Introdução à ciência de alimentos. Ed. UFSC, Florianópolis, 2002. 255 p.

MURUGESAN, R.; ORSAT, V. - Spray drying for the production of nutraceutical ingredients - a review. *Food Bioprocess Tech*. v. 8, 2011. 1-12 p.

PHISUT, N. - Spray drying technique of fruit juice powder: some factors influencing the properties of product. *Int Food Res J*. v. 19, n. 4, 2012.1297-1306 p.

RAMOS, F.M; UBBRINK, J; SILVEIRA, V; PRATA, A.S. –Drying of maltodextrin solution in a vacuum spray dryer. *Chemical Engineering Research and Design*, 2019. 78-86 p.

SAMUHASANEETOO S.; CHAISERI S., FARHAT I. A., SAJJAANANTAKUL T. and PONGSAWATMANIT R. –Application of the “dual sorption” model for water ad sorption of maltodextrinvarious DE. *Kasetsart J Nat Sci*. v. 38, 2004. 515-522 p.

SILVA, D. J. - Produção de Maltodextrina com Baixo Teor de Glicose. Dissertação. Universidade Estadual de Maringá. PEQ. Maringá, 1995. 77 p.

SILVA, M.V.; JUNIOR, B.D.; VISENTAINER, J.V. - Produção e caraterização de malto dextrina e sua aplicação na microencapsulação de compostos alimentícios por spraydrying. In *Revista Ciências Exatas e Naturais*.v.16, n.1,2014. 113-120 p.

SOTO, J.L.M.; GARCÍA, L.M.; GONZÁLEZ, J.V.; NICANOR, A.B.; CRUZ, L.G. –Influence of starch source in there quired hydrolysis time for the production of maltodextrins with different dextrose equivalent. *Afr J Biotechnol*. v. 11, n. 69, 2012.13428-13435 p.

SPIRAXSARCO. Disponível em <https://www.spiraxsarco.com/resources-and-design-tools/steam-tables/dry-saturated-steam-line#article-top>. Acesso em 28/02/2021.

TAKEITE, C.Y.; KIECKBUSCH, T.G., COLLARES-QUEIROZ, F.R. –Morphological and physicochemical characterization of comercial maltodextrin swith diferente degreed of dextrose – equivalente. International Journal of Food Properties. Volume 3, 2010. Doi.org/101080/10942910802181024.

TIEFENBACHER, K.F. Technology of Main Ingredients: Waferand Flours. In Wafer and Waffle, 2017. Chapter 2.3.6.2.

TREYBAL, R.E.– Mass-transfer Operations. 3ed. McGraw – Hill. 1981. p.784.

UNIVERSIDADE DE UBERABA. Apresentação de trabalhos acadêmicos de acordo com a ABNT: instruções básicas: Biblioteca Central. Uberaba, 2019, 69 p. il.

UNIVERSIDADE DE UBERABA. Vídeo institucional sobre formatação de dissertações e teses. Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=JX0nZPZOB58>. Acesso em 24/05/2021.

WANG, J., WANG, L. Structures and properties of commercial maltodextrins from corn, potato, and rice starches. Starch/Starke. v. 52, 2000. 296-304 p.

WANG. W.; DUFOUR.C.; ZHOU. W. –Impacts of spray-drying conditions on the physicochemical properties of soysauce powders using maltodextrin as auxiliary drying carrier. CyTA – Journal of Food. v.13,2015. Doiorg / 10.1080 / 19476337.2015.1014430. Published on line: 20 mar 2015. 548-555 p.

WEATHERSPARK. Disponível em <https://pt.weatherspark.com/y/30110/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Uberl%C3%A2ndia-Brasil-durante-o-ano>. Acesso em 5/01/2021