



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



**ESTUDO DA FLUIDODINÂMICA DE INERTES EM SECADOR
ROTATÓRIO NÃO-CONVENCIONAL E SUA RELAÇÃO COM A
SECAGEM DA POLPA DE CAMU-CAMU**

Raphael Lima Santos

Uberlândia – MG

2020



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



**ESTUDO DA FLUIDODINÂMICA DE INERTES EM SECADOR
ROTATÓRIO NÃO-CONVENCIONAL E SUA RELAÇÃO COM A
SECAGEM DA POLPA DE CAMU-CAMU**

Raphael Lima Santos

Orientadores:

Prof. Dr. Marcos Antônio de Souza Barrozo

Prof. Dr. Claudio Roberto Duarte

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Uberlândia – MG

2020

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S237 2020	<p>Santos, Raphael Lima, 1995- Estudo da fluidodinâmica de inertes em secador rotatório não-convencional e sua relação com a secagem da polpa de camu-camu [recurso eletrônico] / Raphael Lima Santos. - 2020.</p> <p>Orientador: Marcos Antônio de Souza Barrozo. Coorientador: Claudio Roberto Duarte. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Química. Modo de acesso: Internet. Disponível em: http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.213 Inclui bibliografia. Inclui ilustrações.</p> <p>1. Engenharia química. I. Barrozo, Marcos Antônio de Souza, 1961-, (Orient.). II. Duarte, Claudio Roberto, 1975-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Química. IV. Título.</p> <p>CDU: 66.0</p>
--------------	---

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química
 Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1K, Sala 206 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
 Telefone: (34)3239-4249 - www.ppgeq.feq.ufu.br - secppgeq@feq.ufu.br


ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Química				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado, 11/2020, PPGEQ				
Data:	28 de fevereiro de 2020	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	15:29
Matrícula do Discente:	11812EQU015				
Nome do Discente:	Raphael Lima Santos				
Título do Trabalho:	Estudo da fluidodinâmica de inertes em secador rotatório não-convencional e sua relação com a secagem da polpa de camu-camu				
Área de concentração:	Desenvolvimento de Processos Químicos				
Linha de pesquisa:	Processos de Separação				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Secagem de resíduos de frutas e vegetais: estudo experimental e de fluidodinâmica computacional (CFD)				

Reuniu-se na sala 1K224, *Campus Santa Mônica*, da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, assim composta: Professores Doutores: Jaqueline Costa Martins - ICT/UNIFAL; Ricardo Correa de Santana - PPGEA/UFU; Marina Seixas Pereira - PPGEQ/UFU; Claudio Roberto Duarte - PPGEQ/UFU, orientador e Marcos Antonio de Souza Barrozo - PPGEQ/UFU, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Barrozo, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Claudio Roberto Duarte, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/02/2020, às 15:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcos Antonio de Souza Barrozo, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/02/2020, às 15:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jaqueline Costa Martins, Usuário Externo**, em 28/02/2020, às 15:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marina Seixas Pereira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/02/2020, às 15:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Correa de Santana, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/02/2020, às 15:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1892986** e o código CRC **9CB67A9F**.

Dedico ao meu pai Romualdo, à minha mãe Edvânia, ao meu irmão Gabriel, à minha noiva Maria Wiliane e aos meus amigos que me acompanharam nesta jornada.

“Seja quem você for, seja qualquer posição que você tenha na vida, do nível altíssimo ou mais baixo, tenha sempre como meta muita força, muita determinação, e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá, de alguma maneira você chega lá”

Ayrton Senna da Silva

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por todos os momentos, pela oportunidade, pelo aprendizado, pela proteção e todo o discernimento.

Aos meus pais, Romualdo e Edvânia, e meu irmão Gabriel pelo carinho, amor, pelo cuidado, pelo esforço e por todo o incentivo ao longo desses anos.

À minha noiva, Maria Wiliane, pelo amor, paciência, compreensão, por acreditar sempre, por sonhar comigo, pelo aconchego e pelo apoio em todos os momentos, minha companheira de vida. À Giselia (Griselda) pelo carinho e acolhimento.

Aos meus amigos das Minas Gerais Gregori, Camila, Mara, Rondinelli, Rodolfo, Thais, Matheus, Jeniffer, Marcela, Angélica, Priscila, Robert, Geraldo, Neiton, Raissa, Janaína, Natália, Argileu, Grazielle, Ana Paula, Érica, Marcos Paulo, Carlos Pajé, Thessa, Ana Soldan, Nina e Larissa pelos agradáveis momentos de convivência.

Agradeço aos meus doutores Anderson e Angélica por serem tão especiais e importantes. Muito obrigado por todo o carinho.

Aos meus amigos/compadres Weverton e Amanda, e à minha linda e doce Catarina, pelo carinho e amizade.

Aos meus amigos, em especial, Joélington, Vinicius, Arthur, Antônio Carlos (Cacaio), Pe. Hélio, Aldo, Lourdes e Bianca, pelo carinho e amizade principalmente nesse período.

Aos caminhoneiros Nal, Guaraná, Queixão, Luiz Carlos, Laranjinha, Bibinho, Anselmo e Valmir e Furiba pelo acolhimento e por ajudar a encurtar a saudade de casa.

A todos os meus professores que, desde o ensino fundamental, contribuíram para minha formação e constituição enquanto ser humano, em especial à Teresinha, Josinaldo e João Baptista Severo Júnior, pela amizade, carinho e toda confiança.

A todos os professores, colegas e técnicos do PPGEQ/UFU pelo convívio e aprendizado.

Aos meus orientadores Prof. Marcos Barrozo e Prof. Claudio Duarte pela oportunidade de desenvolver o trabalho e por toda a confiança em mim depositada e pelos ensinamentos ao longo desse período.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, citados aqui ou não, contribuíram ao longo da vida, que me acompanharam e auxiliaram a constituir um pouco de quem eu sou.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	I
LISTA DE TABELAS	III
LISTA DE SÍMBOLOS	IV
RESUMO.....	VI
ABSTRACT	VIII
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	3
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Camu-Camu (<i>Myrciaria dubia</i>).....	4
2.2 Compostos Bioativos.....	5
2.2.1 Compostos Fenólicos	7
2.2.2 Flavonoides	7
2.3 Processo de Secagem.....	9
2.4 Secagem de materiais pastosos.....	10
2.5 Secagem de pastas com corpos inertes.....	12
2.6 Aditivos de secagem.....	13
2.7 Secadores rotativos.....	14
2.8 Secadores rotativos com recheio de inertes.....	16
2.9 Abordagem numérica: modelagem lagrangeana do escoamento granular- Método dos Elementos Discretos (DEM)	18
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1 Preparo da polpa do Camu-Camu	25
3.2 Análises Realizadas	25
3.2.1 Umidade e Atividade de Água	26
3.2.2 Densidade	26
3.2.3 Teor de Cinzas.....	26
3.2.4 pH	27
3.2.5 Compostos bioativos	27

3.2.5.1	Teor de Fenólicos Totais (TPC)	27
3.2.5.2	Teor de Flavonoides Totais (TFC)	28
3.2.5.3	Atividade Antioxidante	28
3.2.5.4	Teor de Ácido Ascórbico (AA)	29
3.3	Secador rotatório com recheio de inertes (SRRI)	29
3.3.1	Unidade Experimental	29
3.3.2	Partículas inertes	32
3.3.3	Ensaio de Secagem	34
3.4	Análise da dinâmica de colisões dos inertes durante a operação do tambor utilizando a abordagem DEM	37
3.4.1	Otimização das respostas DEM utilizando a função desejabilidade	41
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO		43
4.1	Investigação numérica da dinâmica de colisão entre os inertes e a relação com o rendimento do processo de secagem	43
4.2	Caracterização da polpa de camu-camu	56
4.3	Secagem da polpa de camu-camu em SRRI	58
4.3.1	Rendimento de secagem	60
4.3.2	Compostos bioativos	65
4.3.3	Otimização Multiresposta	73
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO		76
CAPÍTULO 6 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS		78
REFERÊNCIAS		79
APÊNDICE		92

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Camu-camu (<i>Myrciaria dubia</i>) (Fonte: https://www.escolaeducacao.com/bacia-amazonica).....	4
Figura 2 - Compostos bioativos algumas em frutas no Brasil (Fonte: Neri-Numa <i>et al.</i> , 2018) 6	
Figura 3 - Estrutura básica dos compostos flavonoides (Fonte: Erlund, 2004).....	8
Figura 4 - Estrutura geral dos principais grupos de flavonoides (Fonte: Erlund, 2004).	8
Figura 5- Mecanismo de secagem com partículas inertes. Adaptado de Grbavcic, Arsenijevic & Garic-Grulovic (2004).	12
Figura 6- Esquema ilustrativo de um secador rotatório com suspensores (Fonte: Genskow <i>et al.</i> , 2008).....	15
Figura 7 - Algoritmo empregado nas simulações DEM (Fonte: Lima, 2017).....	19
Figura 8 - Representação esquemática de uma colisão segundo a abordagem DEM considerando o modelo de esfera macia. Adaptado de Fries <i>et al.</i> (2013).	23
Figura 9 - Camu-camu <i>in natura</i> , polpa utilizada nos experimentos de secagem (a) e o produto obtido após a secagem na forma de pó (b).	25
Figura 10 - Representação esquemática da reação do radical DPPH com o antioxidante (Fonte: Vuolo <i>et al.</i> , 2019).....	29
Figura 11 – Representação do aparato experimental que compõe o secador rotatório com recheio de inertes e algumas estruturas que compõem o equipamento em detalhe.....	30
Figura 12 - Sistema de monitoramento da velocidade de rotação do tambor (a) e interface de aquisição de dados (b).	31
Figura 13 - Representação esquemática do tambor rotatório (a) e perspectiva do seu acoplamento na unidade experimental (b).....	32
Figura 14 – Partículas inertes de diâmetro: 25,40 mm (D1); 19,05 mm (D2) e 12,70 mm (D3) e as configurações de enchimento do secador rotatório (C1 a C6).	33
Figura 15 - Etapas do pós-processamento de dados para quantificação do número de colisões e força de colisão.....	41
Figura 16 - Distribuição de frequências log-normal (b) e probabilidade normal (a) para o número de colisões simulado.....	43
Figura 17- Distribuição de frequências log-normal (b) e probabilidade normal (a) para a força normal de colisão simulada.	44

Figura 18- Número de colisões obtidos para os inertes de tamanho 25,40 mm (C1), 19,05 mm (C2) e 12,70 mm (C3) para um grau de enchimento (E) de 30% e rotação (R) de 60 RPM....	45
Figura 19 - Número de colisões obtidos para os inertes de tamanho 25,40 mm (C1), 19,05 mm (C2) e 12,70 mm (C3) para um grau de enchimento (E) de 30% e rotação (R) de 60 RPM....	46
Figura 20 - Número de colisões obtidos para as configurações C4, C5 e C6 para um grau de enchimento (E) de 30% e rotação (R) de 60 RPM.	49
Figura 21 – Força normal de colisão obtida para as configurações C4, C5 e C6 para um grau de enchimento (E) de 30% e rotação (R) de 60 RPM.	50
Figura 22 - Número de colisões e rendimento de secagem obtidos com as configurações C1, C3 e C5 para valores de enchimento, rotação e fração entre inertes definidos via desejabilidade.....	54
Figura 23 – Força normal de colisão e rendimento de secagem obtidos com as configurações C1, C3 e C5 para valores de enchimento, rotação e fração entre inertes definidos via desejabilidade.	55
Figura 24- Atividade de água em função do teor de umidade do pó produzido (base seca) após a secagem em SRRI.	60
Figura 25 - Superfícies de resposta para o rendimento de secagem em função das variáveis independentes.	63
Figura 26 - Superfícies de resposta para o teor de fenólicos totais (TPC) em função das variáveis independentes.	66
Figura 27 - Superfícies de resposta para o teor de flavonoides totais (TFC) em função das variáveis independentes.	67
Figura 28 - Superfícies de resposta para o teor de ácido ascórbico (AA) em função das variáveis independentes.	69
Figura 29 - Superfícies de resposta para o índice de inibição IC ₅₀ (µg/mL) em função das variáveis independentes.....	70
Figura 30 - Comparação entre os teores de compostos bioativos da polpa de camu-camu <i>in natura</i> e após a secagem em SRRI - a) TPC, b) TFC, c) AA, d) IC ₅₀	72
Figura 31 - Análise de desejabilidade aplicada nos resultados do planejamento da secagem da polpa de camu-camu em SRRI.	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Planejamento composto central para a secagem do camu-camu em SRRI.....	36
Tabela 2 - Parâmetros DEM utilizados nas simulações.	38
Tabela 3- Configurações de enchimento utilizadas no estudo da dinâmica de partículas em tambor rotatório.	39
Tabela 4- Níveis dos PCC utilizados para simulação das configurações C1, C2 e C3 (partículas individuais).	40
Tabela 5- Níveis dos PCC utilizados para simulação das configurações C4, C5 e C6 (combinação entre partículas).....	40
Tabela 6 - Resultados obtidos para o número de colisões nos pontos ortogonais (PO) e no ponto central (PC) dos PCC realizados com os inertes de 25,40 mm (C1), 19,05 mm (C2) e 12,70 mm (C3).....	44
Tabela 7 - Resultados obtidos para a força colisional nos pontos ortogonais (PO) e no ponto central (PC) dos PCC realizados para os inertes de 25,40 mm (C1), 19,05 mm (C2) e 12,70 mm (C3).....	46
Tabela 8 - Resultados obtidos para o número de colisões para combinação entre os inertes de 25,40 mm e 19,05 mm (C4), 25,40 mm e 12,70 mm (C5) e 19,05 mm e 12,70 mm (C6).....	48
Tabela 9 - Resultados obtidos para a força de colisão para combinação entre os inertes de 25,40 mm e 19,05 mm (C4), 25,40 mm e 12,70 mm (C5) e 19,05 mm e 12,70 mm (C6).....	49
Tabela 10 - Condições operacionais definidas através da otimização multiresposta das respostas DEM.	52
Tabela 11 - Resultados simulados e preditos na condição otimizada.....	53
Tabela 12 - Rendimento calculado após a secagem em SRRI com as condições definidas por intermédio da simulação DEM e desejabilidade.	54
Tabela 13- Caracterização da polpa de camu-camu e comparação com valores obtidos na literatura.....	56
Tabela 14 - Resultados do planejamento composto central realizado para análise do teor de fenólicos (TPC), flavonoides (TFC), ácido ascórbico (AA), atividade antioxidante (IC50) e do rendimento na secagem da polpa de camu-camu.	59
Tabela 15 -Valores de rendimento obtidos nos pontos ortogonais e centrais do planejamento composto central completo.....	61
Tabela 16 – Condições ótimas encontradas pela aplicação da função desejabilidade para o planejamento de secagem em SRRI.	74

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Aceleração	$M^0L^1T^{-2}$
A_w	Atividade de água	$M^0L^0T^0$
AA	Teor de ácido ascórbico (mg/100 g amostra base seca)	$M^0L^0T^0$
C1	Configuração de enchimento com inertes de 25,40 mm	$M^0L^0T^0$
C2	Configuração de enchimento com inertes de 19,05 mm	$M^0L^0T^0$
C3	Configuração de enchimento com inertes de 12,70 mm	$M^0L^0T^0$
C4	Configuração de enchimento com inertes de 25,40 e 19,05 mm	$M^0L^0T^0$
C5	Configuração de enchimento com inertes de 25,40 e 12,70 mm	$M^0L^0T^0$
C6	Configuração de enchimento com inertes de 19,05 e 12,70 mm	$M^0L^0T^0$
D1	Partícula inerte de diâmetro 25,40 mm	$M^0L^1T^0$
D2	Partícula inerte de diâmetro 19,05 mm	$M^0L^1T^0$
D3	Partícula inerte de diâmetro 12,70 mm	$M^0L^1T^0$
E	Grau de enchimento	$M^0L^0T^0$
E^*	Módulo de Young equivalente	$M^1L^{-1}T^{-2}$
E_i	Módulo de Young da partícula i	$M^1L^{-1}T^{-2}$
E_j	Módulo de Young da partícula j	$M^1L^{-1}T^{-2}$
$F_{c,n,ij}$	Força de colisão entre as partículas i e j (normal)	$M^1L^1T^{-2}$
$F_{c,t,ij}$	Força de colisão entre as partículas i e j (tangencial)	$M^1L^1T^{-2}$
F_n^d	Força de amortecimento na direção normal	$M^1L^1T^{-2}$
F_t^d	Força de amortecimento na direção tangencial	$M^1L^1T^{-2}$
$F_{t,max}^d$	Força de amortecimento máxima na direção tangencial	$M^1L^1T^{-2}$
FI	Fração entre inertes	$M^0L^0T^0$
g	Gravidade	$M^0L^1T^{-2}$
G^*	Módulo de cisalhamento equivalente	$M^1L^{-1}T^{-2}$
G_i	Módulo de cisalhamento da partícula i	$M^1L^{-1}T^{-2}$
G_j	Módulo de cisalhamento da partícula j	$M^1L^{-1}T^{-2}$
I_i	Momento de inércia da partícula i	$M^1L^2T^0$
IC ₅₀	Índice de inibição	$\mu\text{g/mL}$
m^*	Massa equivalente	$M^1L^0T^0$
m_i	Massa da partícula i	$M^1L^0T^0$

n_p	Número de partículas	$M^0L^0T^0$
R^*	Raio de contato equivalente	$M^0L^1T^0$
R_i	Raio da partícula i	$M^0L^1T^0$
R_j	Raio da partícula j	$M^0L^1T^0$
R	Velocidade de rotação	$M^0L^0T^{-1}$
S_n	Rigidez normal do modelo não-linear	$M^1L^0T^{-2}$
S_t	Rigidez tangencial do modelo não-linear	$M^1L^0T^{-2}$
t	Tempo	$M^0L^0T^1$
T	Temperatura	$^{\circ}C$
TFC	Teor de flavonoides totais (mg/100g de amostra base seca)	$M^0L^0T^0$
TPC	Teor de fenólicos totais (mg/100g de amostra base seca)	$M^0L^0T^0$
v_i	Velocidade da partícula i	$M^0L^1T^{-1}$
v_n^{rel}	Velocidade relativa na direção normal	$M^0L^1T^{-1}$
v_t^{rel}	Velocidade relativa na direção tangencial	$M^0L^1T^{-1}$
x_i	Posição da partícula i	$M^1L^0T^0$

Símbolos gregos

β	Coeficiente de amortecimento	$M^1L^0T^{-1}$
θ_i	Posição angular da partícula i	$M^0L^0T^0$
δ_n	Sobreposição das partículas na direção normal	$M^0L^1T^0$
δ_t	Sobreposição das partículas na direção tangencial	$M^0L^1T^0$
ε	Coeficiente de restituição	$M^0L^0T^0$
μ_s	Coeficiente de atrito estático	$M^0L^0T^0$
μ_r	Coeficiente de atrito de rolamento	$M^0L^0T^0$
ρ_s	Densidade da partícula	$M^1L^{-3}T^0$
τ_{ij}	Torque entre as partículas i e j	$M^1L^2T^2$
ν_i	Razão de Poisson da partícula i	$M^0L^0T^0$
ν_j	Razão de Poisson da partícula j	$M^0L^0T^0$
ω_i	Velocidade angular da partícula i	$M^0L^1T^{-1}$

RESUMO

O camu-camu é um fruto nativo da região amazônica reconhecido por ser a principal fonte natural de vitamina C e uma importante fonte de compostos bioativos com um potencial benéfico para a saúde. Apesar disso, a alta perecibilidade e cultivo ainda não-domesticado ainda são fatores que dificultam sua comercialização fora do mercado local e no período pós-colheita. Nesse contexto, o secador rotatório com recheio de inertes (SRRI) apresenta-se como uma alternativa ao aproveitamento da polpa do camu-camu ao obter um produto na forma de pó e de alta qualidade no sentido da menor degradação dos bioativos. Na operação desse secador, a dinâmica dos inertes desempenha um papel fundamental na eficiência de processamento, as sucessivas colisões são responsáveis pela fragmentação da polpa já seca e na formação de pó. O presente trabalho teve por objetivo estudar experimental e numericamente os efeitos de variáveis operacionais de um SRRI no desempenho de secagem da polpa em termos do rendimento, do teor de bioativos (fenólicos, flavonoides e ácido ascórbico) e da atividade antioxidante do produto. Como inertes, foram utilizadas esferas de porcelana de calcita com diâmetros de 25,40, 19,05 e 12,70 mm. A dinâmica desses inertes foi avaliada aplicando-se a modelagem Lagrangeana através do método dos elementos discretos (DEM), cuja lei de contato permitiu obter informações de como as partículas interagem entre si e com o equipamento. Realizaram-se seis planejamentos composto central (PCC), três deles avaliando o tambor carregado com os inertes de apenas um diâmetro, e os demais avaliando o carregamento com a combinação binária entre inertes de diâmetros distintos. As variáveis independentes foram velocidade de rotação (R), grau de enchimento (E) e a fração entre inertes (FI), as respostas foram força de colisão e número de colisões partícula-partícula e partícula-parede obtidas via simulação. Com os resultados, realizou-se uma otimização no intuito de maximizar simultaneamente as duas respostas DEM em cada PCC, obtendo-se seis condições para operação do SRRI. Tais condições foram testadas experimentalmente e o maior rendimento de secagem verificado (86,66%) decorreu do uso dos inertes de 25,40 e 12,70 mm, que combinou o efeito da maior força de colisão dada pelo inerte de 25,40 mm e de um maior número de colisões dado pelo inerte de 12,70 mm. Essa configuração foi então explorada na secagem da polpa a partir de um PCC no qual avaliou-se a temperatura como quarta variável independente. Quanto as respostas, determinou-se o rendimento e o teor de compostos bioativos. Em todas as condições avaliadas, o produto apresentou atividade de água inferior a 0,28, indicando uma inibição o crescimento microbiano. Quanto ao rendimento, os principais efeitos foram identificados pelas variáveis enchimento e temperatura, no qual os maiores níveis das duas variáveis contribuíam ao aumento da resposta experimental. Verificou-se que uma maior proporção da partícula de 12,70 mm frente a 25,40 mm favorece o rendimento (maior número de colisões), enquanto que a rotação pouco

o influenciou. Quanto aos bioativos, o principal efeito foi verificado para temperatura. Maiores níveis de temperatura levaram a sua maior degradação dos compostos bioativos, reduzindo os teores de fenólicos totais, flavonoides e ácido ascórbico, e resultando em uma menor da capacidade antioxidante do produto. Verificou-se, também, que as condições de maior força de colisão acarretaram em maior degradação dos bioativos. Ao realizar uma otimização multi-resposta, o cálculo resultou em um FI de 26,28%, enchimento de 49,83%, e rotação de 74,82 RPM condições associadas principalmente a um maior rendimento do processo e temperatura de 44,30°C visando a menor degradação dos compostos bioativos.

Palavras-Chave: Camu-Camu; Secador Rotatório com Recheio de Inertes; Abordagem Lagrangeana; Compostos Bioativos.

ABSTRACT

Camu-Camu is a fruit native to the Amazon region, recognized for being the largest natural source of vitamin C, and an important source of bioactive compounds with a beneficial potential for health. Despite this, the high perishability and cultivation non-domesticated are still factors that hinder its commercialization outside the local market and in the post-harvest period. In this context, the rotary dryer with inert filling (SRRI) presents itself as an alternative to the use of camu-camu pulp when obtaining a product in the form of powder and high quality in the sense of less degradation of bioactive agents. In the operation of this dryer, the dynamics of the aggregates play a fundamental role in the processing efficiency, the successive collisions are responsible for the fragmentation of the already dried pulp and the formation of dust. The present work aimed to study the effects of operational variables of an SRRI on the drying performance of the pulp in terms of yield, bioactive content (phenolic, flavonoids and ascorbic acid) and the antioxidant capacity of the product. As inert, calcite porcelain spheres with diameters of 25.40, 19.05 and 12.70 mm were used. The dynamics of these aggregates were evaluated by applying Lagrangean modeling using the discrete element method (DEM), whose contact law allowed to obtain information on how the particles interact with each other and with the equipment. Six central composite plans (PCC) were carried out, three of them evaluating the drum loaded with aggregates of only one diameter, and the others evaluating the loading with the binary combination between aggregates of different diameters. The independent variables were rotation speed (R), filling degree (E) and the fraction between inerts (FI), the responses were collision force and number of particle-particle and particle-wall collisions obtained through simulation. With the results, an optimization was carried out in order to simultaneously maximize the two DEM responses in each CCP, obtaining six conditions for SRRI operation. Such conditions were tested experimentally and the highest drying efficiency verified (86.66%) resulted from the use of 25.40 and 12.70 mm aggregates, which combined the effect of the greater collision force given by the 25.40 mm aggregate and a greater number of collisions due to the 12.70 mm inert. This configuration was then explored in the drying of the pulp from a PCC in which the temperature was evaluated as the fourth independent variable. Regarding the responses, the yield and the content of bioactive compounds were determined. In all evaluated conditions, the product showed water activity below 0.28, indicating an inhibition of microbial growth. As for yield, the main effects were identified by the filling and temperature variables, in which the higher levels of the two variables contributed to the increase in the experimental response. It was found that a greater proportion of the particle of 12.70 mm compared to 25.40 mm favors the yield (greater number of collisions), while the rotation has little influence. As for bioactives, the main effect was verified for temperature. Higher temperature levels

led to a greater degradation of bioactive compounds, reducing the levels of total phenolics, flavonoids and ascorbic acid, and resulting in a lower antioxidant capacity of the product. It was also found that the conditions of greater collision force resulted in greater degradation of bioactive substances. When performing a multi-response optimization, the calculation resulted in an IF of 26.28%, filling of 49.83%, and rotation of 74.82 RPM conditions associated mainly with a higher process yield and a temperature of 44.30 °C aiming at less degradation of bioactive compounds.

Keywords: Camu-Camu; Rotary Dryer with Inert Bed; Lagrangian Approach; Bioactive Compounds.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

O camu-camu (*Myrciaria Dubia*), fruto nativo da região amazônica, é considerado um poderoso antioxidante por sua alta concentração de compostos bioativos e, em especial, por ser a maior fonte natural de vitamina C já estudada. Alguns trabalhos indicam que o teor de ácido ascórbico na fruta é cerca de 100 vezes maior que a concentração encontrada no limão e 20 vezes maior que a concentração presente na acerola, fruta já reconhecida por ser uma fonte natural importante dessa vitamina. Os benefícios do consumo do fruto estão relacionados à eliminação de radicais livres, retardo do envelhecimento, ação anti-hipertensiva, anti-inflamatória, anti-hiperglicêmica, dentre outras que têm despertado interesse da indústria na elaboração de medicamentos e na composição de alimentos funcionais (LANGLEY *et al.*, 2015).

De cultivo ainda não-domesticado, com relação a ausência de tecnologia agrícola desenvolvida para a produção em larga escala, e com alta perecibilidade, o camu-camu é consumido principalmente no mercado local amazônico. Nesse sentido, torna-se extremamente importante a busca por processos que explorem todos os benefícios do fruto, seja na elaboração de medicamentos pela indústria farmacêutica, seja para o consumo regular na dieta humana. O fruto geralmente é utilizado na elaboração de polpas, sucos, licores e geleias. Uma alternativa ao aproveitamento do excedente de produção e a disponibilidade ao consumo em períodos pós-colheita é a secagem da fruta. Ela pode ser realizada com o fruto inteiro ou na forma de polpa (KRISHNAIAH *et al.*, 2014).

Diferentes processos de secagem têm sido desenvolvidos na busca de uma maior eficiência de processamento e obtenção de um produto desidratado de alta qualidade. Essas técnicas devem apresentar um compromisso com as particularidades dos materiais a serem processados, no sentido das diferentes formas físicas nas quais eles podem se encontrar (pastas ou polpas, grãos, suspensões, entre outros) e das suas características químicas, bioquímicas, nutricionais e sensoriais que devem ser mantidas. Os alimentos desidratados em pó têm ganhado destaque na indústria por, além do elevado tempo de prateleira, apresentarem maior facilidade de armazenamento e poderem ser inseridos em formulações domésticas e industriais para produção de sucos, cereais matinais, na substituição da farinha de trigo, dentre outros.

As pastas são definidas como um sistema sólido-líquido constituído de partículas microscópicas ou coloidais dispersas em um meio líquido. Suas propriedades variam de acordo com a concentração de sólidos, tamanho e forma das partículas, e com as interações partícula-

partícula e partícula-fluido que constituem a dispersão. Quando submetido à processos térmicos, este tipo de material pode sofrer modificações em suas propriedades físicas e a escolha do processo de secagem passa a ser influenciada por essas mudanças. A secagem desse tipo de material pode ser realizada em *spray-dryers*, leito fluidizado, jorro e tambor rotatório, nos dois últimos, são utilizadas partículas inertes como suporte à secagem (GRBAVCIC *et al.*, 2004; ARPAGAUS *et al.*, 2018; DANTAS *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 2019).

A secagem de pastas, polpas e suspensões com recheio de inertes é uma alternativa ao método convencional de contato direto no que diz respeito a prevenção da degradação dos compostos orgânicos e obtenção de um material na forma de pó. Essa tecnologia consiste na dispersão da pasta sobre a superfície de partículas inertes, as quais funcionam como um suporte à secagem. O material alimentado forma uma fina camada, e com a redução da umidade e o efeito das colisões inerte-inerte e inerte-equipamento, a película seca é removida, sofre moagem e é arrastada pelo ar de secagem até um separador gás-sólido (FREIRE *et al.*, 2012).

Os secadores rotatórios são equipamentos largamente utilizados na indústria devido ao seu baixo custo operacional, simplicidade de construção e flexibilidade de processar os mais diversos tipos de materiais. Em uma de suas configurações, para a secagem de pastas, o tambor é recheado com partículas inertes e provido de suspensores longitudinais. Diferente do secador rotatório convencional, a configuração com recheio de inertes ainda não existe industrialmente e são poucos os trabalhos de pesquisa que estudaram essa configuração. A rotação do cilindro em conjunto com a ação dos suspensores provoca o revolvimento dos inertes e seu catarateamento através do ar de secagem. O fato de o ar não promover a movimentação das partículas confere ao fluido a função exclusiva de promover a secagem e o transporte do material seco, resultando em economia energética frente a outros equipamentos como leito de jorro e fluidizado (BURJAILI, 1996).

Nesse sentido, o estudo da obtenção de pó através da secagem da polpa de camu-camu em secador rotatório com recheio de inertes (SRRI) mostra-se como alternativa interessante de estudo, visando a obtenção de pó com composição homogênea, baixa degradação de bioativos e perecibilidade reduzida.

Como uma ferramenta complementar ao entendimento da dinâmica das partículas inertes, as simulações numéricas podem fornecer informações relevantes de fenômenos que ocorrem em um nível granular, as quais podem ser difíceis de serem medidas ou avaliadas experimentalmente. Na abordagem Lagrangeana (Método dos Elementos Discretos – DEM), a trajetória da partícula é acompanhada por meio de sucessivas integrações do balanço de forças

que atua sobre ela, e a forma que os elementos se comportam quando em contato uns com os outros é descrita por meio da aplicação de modelos de contato.

A simulação pode ser conduzida no sentido de fornecer informações sobre a força com que as partículas interagem na operação do tambor e a frequência com que essas colisões acontecem. Tais informações podem ser úteis na análise do desempenho do secador, uma vez que as colisões dos inertes têm papel fundamental nas etapas que envolvem na fragmentação do material seco e a formação de pó.

Diante dos aspectos mencionados, são apresentados a seguir os objetivos do trabalho.

1.1 Objetivos

Diante do que foi exposto, esse trabalho teve como objetivo geral estudar, os efeitos de variáveis operacionais de um secador rotatório com recheio de inertes (SRRI) experimental e numericamente no desempenho de secagem da polpa de camu-camu. Como objetivos específicos, cabe destacar:

- Avaliar numericamente a dinâmica de colisões na operação do tambor rotatório não convencional utilizando a abordagem Lagrangeana;
- Verificar a influência de diferentes configurações de enchimento do tambor rotatório no número de colisões e na força de colisão através da simulação DEM e suas relações com o desempenho do secador;
- Verificar a influência do diâmetro da partícula inerte, velocidade de rotação, grau de enchimento e temperatura no rendimento de secagem;
- Verificar os impactos da metodologia de secagem no teor de compostos bioativos (fenólicos totais, flavonoides totais e ácido ascórbico) e na capacidade antioxidante do material seco produzido com relação à polpa *in natura*.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Camu-Camu (*Myrciaria dubia*)

O camucamuzeiro é uma árvore nativa da Amazônia, com incidência na região que compreende a Bolívia, Brasil, Colômbia, Equador, Guiana, Peru e Venezuela. Tem formato arbustivo e pode atingir de 4 a 8 m de altura. Desenvolve-se naturalmente em regiões de várzea, onde o terreno é rico em matéria orgânica e frequentemente alagado pelas cheias dos rios, dado o alto índice pluviométrico da região (3000 mm/ano). A planta também pode ser cultivada em terra firme, em solos ácidos ou até com baixa fertilidade, apesar desses fatores possuírem impacto direto na floração e, conseqüentemente, na frutificação (RODRIGUES *et al.*, 2001; CASTRO; MADDOX; IMÁN, 2018).

O fruto possui cor avermelhada e formado ovalado (Figura 1), com comprimento que varia de 1,0 – 3,2 cm e diâmetro de 1,2 – 2,5 cm. Sua massa média é de 8,4 g, da qual 43,2%, 24,2% e 32,2% correspondem a polpa, casca e sementes, respectivamente. O camu-camu é conhecido por sua alta concentração de vitamina C, a qual varia entre 0,96-2,99 g/100g de polpa, valor aproximadamente 20 vezes maior que o encontrado na acerola e 60 vezes maior que no suco de laranja (CHIRINOS *et al.*, 2010; GONZÁLEZ; SERNA; ALZATE, 2015; CASTRO; MADDOX; IMÁN, 2018).



Figura 1 - Camu-camu (*Myrciaria dubia*) (Fonte: <https://www.escolaeducacao.com/bacia-amazonica>).

O fruto é fonte importante de vários compostos fitoquímicos bioativos com potencial benéfico para a saúde humana. Dentre eles, destacam-se os polifenóis (flavanóis, flavonóis,

flavononas e antocianinas) que possuem alto potencial antioxidante e protegem o organismo contra a ação dos radicais livres. Esses radicais podem afetar o funcionamento saudável das células, oxidando proteínas, lipídios e até o DNA, causando o envelhecimento celular (estresse oxidativo). Estão associados, também, à patogênese de doenças como câncer, diabetes, doenças cardíacas, neurodegenerativas, declínio do sistema imunológico e disfunção cerebral. Dessa forma, a alta atividade antioxidante dos compostos presentes no camu-camu atuam em benefício da saúde (LANGLEY *et al.*, 2015).

O uso popular do camu-camu no tratamento de doenças como arteriosclerose, asma, glaucoma, hepatite, osteoporose, Parkinson, dentre outras, instigou a realização pesquisas sobre os benefícios do fruto. Alguns trabalhos vêm demonstrando através de ensaios *in vitro* e *in vivo* propriedades anti-inflamatória, anti-hipertensiva, anti-hipoglicêmicas, antiobésicas, neuroprotetivas, antimicrobiana e antioxidante relacionadas a compostos como polifenóis, carotenoides, ácidos elágico e betulínico presentes no fruto. Além disso, soma-se o fato de ser fonte de minerais, aminoácidos, ácidos graxos e orgânicos, vitaminas A e do complexo B (ZANATTA *et al.*, 2005; INOUE *et al.*, 2008; CHIRINOS *et al.*, 2010; AZAWA *et al.*, 2011; FRACASSETTI *et al.*, 2013; AZEVÊDO *et al.*, 2015; BATAGLION *et al.*, 2015; GONZÁLEZ; SERNA; ALZATE, 2015; CASTRO; MADDOX; IMÁN, 2018).

O sabor fortemente ácido (pH 2,5-3,5) e a alta perecibilidade do fruto são fatores que dificultam sua comercialização fora do mercado local. Apesar disso, o alto conteúdo de vitamina C e compostos bioativos antioxidantes conduzem grande interesse na exploração do fruto, principalmente em mercados voltados à saúde e bem-estar. O fruto é comercializado na forma de polpa, extrato, pó, suco, vinhos, licores, néctar, geleia, doces, dentre outros, sendo os principais mercados consumidores o Japão, Estados Unidos e União Europeia (GONZÁLEZ; SERNA; ALZATE, 2015; LANGLEY *et al.*, 2015).

2.2 Compostos Bioativos

O mercado consumidor moderno tem se voltado para um tipo de alimentação que esteja em sintonia com a saúde e o bem-estar. Além das qualidades nutricionais básicas, o mercado mostra-se favorável ao consumo de alimentos que estejam relacionados a benefícios fisiológicos e principalmente a prevenção de doenças. Tais alimentos, sejam eles convencionais, melhorados, enriquecidos e/ou modificados, que além do conteúdo nutricional também agreguem benefícios às funções do organismo, são classificados como alimentos funcionais. Eles contêm quantidades aumentadas de compostos bioativos, como flavonoides,

isoflavonas, carotenoides, antocianinas, entre outros, e apresentam-se como um dos mais promissores segmentos da indústria alimentícia (SIRÓ *et al.*, 2008; SUN-WATERHOUSE; WADHWA, 2013).

A maioria dos compostos bioativos são produzidos através do metabolismo secundário de plantas, denominados de compostos fitoquímicos. No vegetal, não estão relacionados diretamente ao crescimento e desenvolvimento, mas sim na habilidade de sobreviver em locais adversos e interagir com as vizinhanças (HARBONE; MABRY, 1982). Quando consumidos na dieta humana, podem atuar em diversas atividades biológicas. Apesar de não estarem atrelados a funções essenciais, como estão os aminoácidos, carboidratos, proteínas e lipídios, seu consumo relaciona-se a funções biológicas específicas como, por exemplo: atividade anti-inflamatória, antioxidante, anti-hipertensiva, anti-carcinogênica, controle de doenças cardiovasculares, degenerativas, dentre outras (WALTHER; SIEBER, 2011; NASRI, 2017; VUOLO; LIMA; MARÓSTICA JUNIOR, 2019).

Os compostos bioativos são encontrados em sua grande maioria em frutas (Figura 2), legumes, cereais, algas, chás, grãos e plantas medicinais. Desse grupo, destacam-se os compostos fenólicos, os quais compreendem os flavonoides, ácidos fenólicos, taninos, dentre outros, que comprovadamente possuem efeitos benéficos à saúde humana (SUN-WATERHOUSE; WADHWA, 2013).

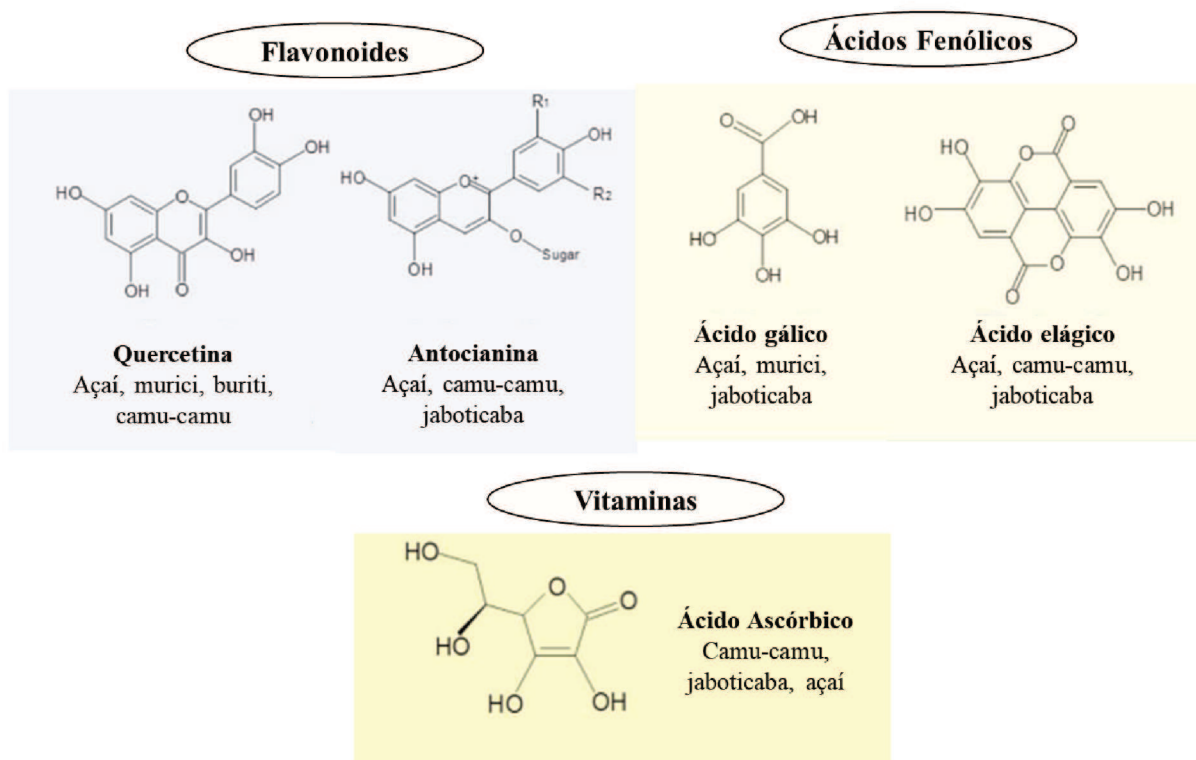


Figura 2 - Compostos bioativos algumas em frutas no Brasil (Fonte: Neri-Numa *et al.*, 2018)

2.2.1 Compostos Fenólicos

Os fenólicos, dentre todos os compostos bioativos, vêm sendo extensivamente estudados por desempenharem funções biológicas importantes. O seu consumo é considerado fundamental para a manutenção da saúde, uma vez que estão relacionados a propriedades anti-inflamatórias, neuroprotetivas, anti-alérgicas, antimicrobianas, anti-carcinogênicas dentre outras. Os compostos fenólicos protegem o organismo do estresse oxidativo causado tanto pela desordem metabólica quanto pelo desenvolvimento de patologias como obesidade e diabetes. Essa capacidade está atrelada à propriedade redutora, inibindo ou retardando os danos oxidativos a proteínas, ácidos nucleicos, lipídios poli-insaturados e carboidratos causados pela atuação de radicais livres (FURUKAWA *et al.*, 2004).

Os compostos fenólicos são produzidos pelo metabolismo secundário de plantas através das vias metabólicas da pentose fosfática e fenilpropanóide. Estão relacionados às características sensoriais dos frutos, como sabor, aroma e coloração (CHIKEZIE; IBEGBULEM; MBAGWU, 2015). Sua estrutura compreende um anel aromático, contendo um ou mais ligantes hidroxil, e podem variar desde simples moléculas fenólicas a compostos altamente polimerizados. A maior quantidade ocorre naturalmente conjugada a mono e polissacarídeos, associados a um ou mais grupos fenólicos, também podem estar ligados à ésteres e metil-ésteres. Devido a essa diversidade estrutural, existe uma larga variedade de grupos fenólicos que ocorrem na natureza. Atualmente, mais de 8000 fenólicos são conhecidos (DEL RIO *et al.*, 2010).

2.2.2 Flavonoides

Os flavonoides constituem o maior grupo de compostos fenólicos, estima-se que 4000 dos 8000 fenólicos identificados sejam compostos flavonoides. Possuem baixo peso molecular, e sua estrutura consiste basicamente em dois anéis aromáticos (A e B) unidos por uma ponte de três carbonos, geralmente em forma de um anel heterocíclico (C), conforme apresentado na Figura 3. As variações nas estruturas A, B e C ocorrem via oxigenação, alquilação, glicosilação, sulfatação, acilação, dentre outras reações orgânicas responsáveis pela variedade de classes de compostos dentro do grupo (Figura 4), como flavonas, flavononas, isoflavonas, flavanóis e antocianinas (BIRT; JEFFERY, 2013).

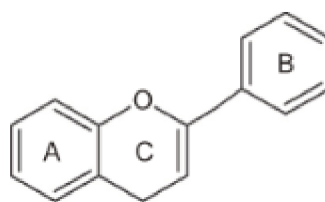


Figura 3 - Estrutura básica dos compostos flavonoides (Fonte: Erlund, 2004).

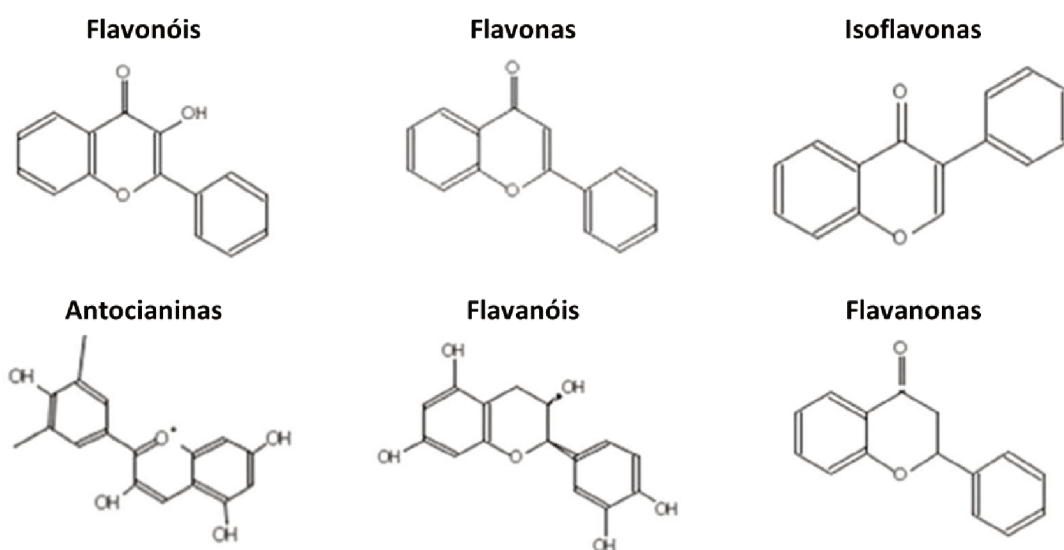


Figura 4 - Estrutura geral dos principais grupos de flavonoides (Fonte: Erlund, 2004).

Grande parte dos flavonoides atuam como substâncias cromóforas responsáveis por colorir flores, sementes e frutos (ERLUND, 2004). As antocianinas, por exemplo, conferem uma coloração vermelho-púrpura; flavononas e flavonóis geralmente apresentam-se na cor vermelha. Além da cor, os flavonóides também participam do sabor, proteção da peroxidação de lipídios, de enzimas e de compostos vitamínicos. A concentração desses compostos depende da espécie do vegetal, das condições edafoclimáticas e do grau de amadurecimento do fruto (FERRER *et al.*, 2008).

Estudos realizados *in vitro* e *in vivo* vem demonstrando que uma dieta rica em flavonoides está relacionada à inúmeros benefícios. Esses compostos podem atuar no controle metabólico em humanos, associam-se a propriedades antidiabéticas, neuroprotetoras e também a melhoria da atividade cardiovascular, uma vez que estão relacionados à vasodilatação e redução da pressão arterial (propriedades antifibróticas e anti-hipercolesterômicas) (ERLUND, 2004). Além de todas os benefícios citados, o consumo regular de compostos flavonoides também se associa à prevenção do câncer, devido a sua atividade inibitória das enzimas

envolvidas na ativação de carcinógenos, prevenindo a formação de tumores (LUNA-GUEVARA *et al.*, 2019).

Apesar dos flavonoides não serem caracterizados como nutrientes essenciais, uma vez que não estão associados ao crescimento e desenvolvimento, a sua presença na dieta pode reduzir o risco de doenças crônicas como as supracitadas. As principais fontes de compostos flavonoides incluem bebidas (chá verde, derivados de cacau, café e vinho tinto), frutas (bagas, maçã, frutas cítricas) e vegetais (vegetais de cor intensa; crucíferas como repolho, couve e nabo). O consumo diário de flavonoides na dieta é recomendado ser na faixa de em 20-200 mg/d (BIRT; JEFFERY, 2013).

2.3 Processo de Secagem

A desidratação ou secagem pode ser definida como uma operação de transferência simultânea de calor e massa com o objetivo de remover água ou substâncias voláteis de um material. Em geral, pode ser realizada por desidratação, absorção, adsorção, condensação, liofilização, entre outros. Porém, o termo comumente é restringido ao processo específico de desidratação com o fornecimento de calor ao material úmido, a fim de remover por evaporação parte da água do material, produzindo um produto sólido suficientemente seco (BERK, 2018).

A transferência de energia se dá entre as vizinhanças e a superfície do sólido, segundo mecanismos de condução, convecção, radiação, ou até pela combinação dos três. A superfície é aquecida e, como consequência disso, a água é transferida a partir do interior do material pelo gradiente de concentração formado e então é evaporada. Nesse sentido, variáveis que afetem os mecanismos de transferência de calor e massa, tais como temperatura, umidade e fluxo do ar de secagem, área superficial exposta à troca térmica, pressão, características relativas à natureza do sólido e seu teor de umidade podem ser limitantes na eficiência de um processo de secagem (MUJUMDAR, 2006).

Muitos produtos oriundos da indústria passam por algum processo de secagem em algum estágio da produção, seja no intuito de adequá-los para alguma operação unitária subsequente, seja para atender os requisitos do mercado. No caso particular de produtos da agroindústria, a desidratação tem como principal papel inibir o crescimento de microrganismos e assim evitar sua rápida degradação. Além disso, a secagem também atua de forma a reduzir o peso e volume dos produtos, alcançando uma forma mais conveniente para seu armazenamento e transporte, sem que este perca sensivelmente suas características biológicas e nutricionais.

Quando comparado com outros métodos de preservação de alimentos como os tratamentos químicos, irradiação, dentre outros, a secagem apresenta-se como uma operação simples e de menor custo (MOURA, 2016).

Dada a diferença entre os materiais no que diz respeito a composição, estrutura e dimensões, não existe uma única relação teórica que possibilite generalizações para os tratamentos de secagem. Alguns materiais podem apresentar-se sob forma pastosa, cristalina, outros podem possuir características químicas e bioquímicas particulares, como transição vítrea. Ainda há aqueles que podem requerer cuidados especiais com cor, textura, aroma e substâncias termossensíveis, que devem ser tratados em condições controladas de temperatura e luminosidade, dentre outros exemplos (SILVA, 2014).

2.4 Secagem de materiais pastosos

Considera-se como material pastoso um sistema sólido-líquido constituído de partículas dispersas em um meio líquido, comumente constituído por água. Ele pode ser classificado em dois grandes grupos de acordo com o conteúdo da fase dispersa. As pastas com o grupo disperso não-ligado, onde a fase dispersa apresenta movimento livre em relação à dispersante, têm como exemplos as emulsões, soluções e suspensões cuja fase dispersa é fina. Pastas com o grupo disperso ligado, nas quais a fase dispersa não apresenta movimento livre em relação à dispersante, têm como exemplos as tortas de filtração, precipitados e suspensões cuja fase dispersa é grosseira. Suas propriedades variam com a concentração de sólidos, tamanho e forma das partículas, e com as interações partícula-partícula e partícula-fluido que constituem a dispersão (WELTMANN, 1960; PASSOS *et al.*, 1997).

Quando submetido a determinados processos térmicos, este tipo de material pode sofrer modificações em suas propriedades físicas. A escolha do processo de secagem passa a depender tanto do teor de umidade inicial, quanto das características físicas e reológicas da pasta. Tais alterações podem resultar em uma aderência considerável nas paredes do equipamento e na formação de aglomerados que refletem em um maior tempo de processamento (BURJAILI, 1996). Quando o conteúdo de umidade da pasta é elevado, o comportamento reológico aproxima-se do newtoniano, para baixos valores, há uma tendência ao comportamento não-newtoniano (GRBAVCIC; ARSENIJEVIC; GARIC-GRULOVIC, 2004). O conhecimento adequado da reologia do material que se deseja secar é de fundamental importância no projeto do sistema de alimentação, na distribuição do material no interior do secador e na definição das melhores condições de processo.

Pastas de alimentos, por exemplo, tendem a se comportar como corpos coloidais porosos-capilares durante o processo de secagem. A remoção de umidade do corpo pelo efeito do processamento térmico induz a transformação de um estado elastoplástico a um elastoquebradiço, e tal alteração está condicionada à natureza da ligação da umidade com o material. Em materiais pastosos, esse tipo de ligação pode ser capilar, osmótica, química ou adsorptivas (STRUMILLO; MARKOWSKI; KAMINSKI, 1983).

Muitos processos da indústria química, farmacêutica e de alimentos realizam a secagem de pastas no intuito de obter produtos em forma de pó, seja para adequá-los a processos subsequentes realizados na planta, seja para contribuir com o prolongamento de sua vida útil, redução de volume ou peso, e até o aproveitamento dos excedentes de produção (BURJAILI, 1996). A secagem do material na forma de pastas também se torna interessante por permitir a realização de formulações em estágio que a antecede a operação, resultando em um produto final íntegro e homogêneo.

Na desidratação desse tipo de material, é interessante que as propriedades físicas, químicas, organolépticas e até nutricionais sejam mantidas em relação ao material *in natura*, em especial quando tais características atrelam-se a requisitos de qualidade decisivos na aceitação do mercado pelo produto (ALMEIDA, 2009). Alguns tipos de secadores têm sido desenvolvidos à essa finalidade, Strumillo, Markowski & Kaminski (1983) realizaram um estudo dos equipamentos de secagem mais adequados para um determinado tipo de pasta, os quais adequam-se tanto às propriedades quanto a qualidade do material e do produto seco produzido.

Na literatura, a secagem de suspensões e pastas pode ser realizada em secadores que realizam a atomização da pasta (*spray dryers*) (GRABOWSKI; TRUONG; DAUBERT, 2008; ARPAGAU *et al.*, 2018; BAMIDELE; DUODU; EMMAMBUX, 2019), utilizando a técnica de *cast-tape drying* (CTD) (DURIGON *et al.*, 2016), vapor superaquecido (KUDRA; MUJUMDAR, 2009), através de um leito fluidizado com recheio de partículas inertes (GRBAVCIC; ARSENIJEVIC; GARIC-GRULOVIC, 2004), leito de jorro com recheio de partículas inertes (MARKOWSKI, 1993; PASSOS *et al.*, 1997; COLLARES; FINZER; KIECKBUSCH, 2004; ALMEIDA, 2009; LAVOYER, 2012; NASCIMENTO, 2013; MACHADO, 2015; DANTAS *et al.*, 2018), tambor rotatório com recheio de partículas inertes (HONORATO, 2006; CABRERA-PADILHA *et al.*, 2014; VIEIRA, 2015; MOURA, 2016; DANTAS *et al.*, 2018).

2.5 Secagem de pastas com corpos inertes

A secagem com partículas inertes é tipicamente efetuada em uma variedade de equipamentos (jorro, fluidizado, vibratório, ciclone, entre outros). Segundo Benali (2004), este tipo de secagem é uma alternativa ao método convencional de contato direto no que diz respeito a prevenção da degradação de compostos orgânicos, além proporcionar a obtenção de pó em um secador muito menor que o *spray dryer*.

O princípio dessa tecnologia consiste na dispersão da alimentação sobre a superfície do suporte de sólidos inertes, formando uma fina camada de material. O calor empregado na secagem pode ser transferido ao filme pelo contato com a corrente de ar de secagem (transferência de calor por convecção) e através do contato direto com os inertes (transferência de calor por condução). A camada de pasta é gradualmente seca tornando-se frágil e quebradiça, conforme ilustrado na Figura 5. Com a umidade reduzida, as sucessivas colisões entre as partículas, bem como entre as partículas e a parede do equipamento, fornecem a energia necessária para fragmentar a camada de material e transformá-lo em pó, o qual é arrastado pela corrente de ar e coletado por intermédio de um dispositivo de separação gás-sólido, como um ciclone por exemplo (FREIRE *et al.*, 2012).

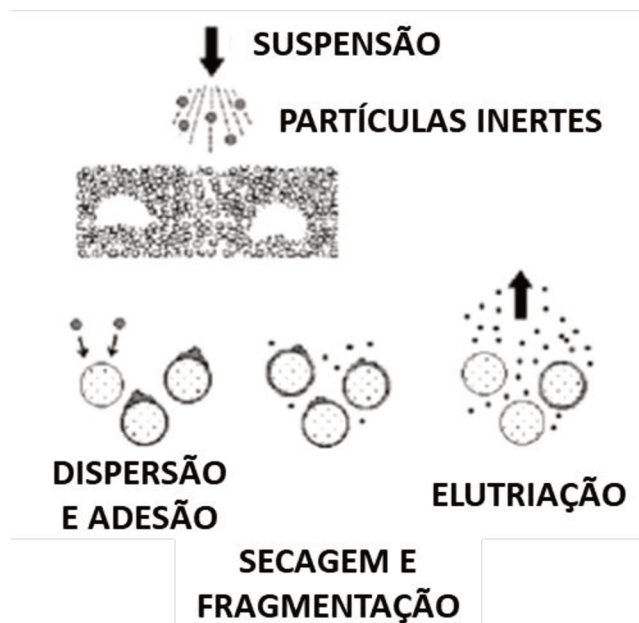


Figura 5- Mecanismo de secagem com partículas inertes. Adaptado de Grbavcic, Arsenijevic & Garic-Grulovic (2004).

Na operação desse tipo de secagem, a casca formada no suporte inerte não deve apresentar características elásticas em nenhum estágio do processo, ou então a força envolvida

na colisão entre os elementos pode não ser suficiente para quebrá-la quando suficientemente seca. Materiais fibrosos e gorduras, por exemplo, podem aderir às partículas e acumular-se dentro do secador reduzindo a eficiência de processamento. Além das propriedades do material, fatores como velocidade do ar, configuração do secador, dinâmica do leito, massa e propriedades dos inertes influenciam diretamente no desempenho do equipamento (KUDRA; MUJUMDAR, 2009).

As forças de adesão pasta-partícula são de natureza físico-química e atuam em uma escala molecular. Nos estágios iniciais de secagem, o filme de líquido recobre as partículas pela formação de pontes líquidas coesivas, cuja força de interação faz com que o filme se deforme pelo movimento dos inertes ao invés de ser destruído pela energia desprendida no choque. A medida que o teor de umidade da suspensão decresce, essas interações são gradualmente substituídas por outras mais frágeis de natureza química, mecânica ou molecular. Essas interações de superfície são dependentes das características reológicas da pasta (propriedades de adesão, atrito, dentre outras), do tempo de processamento da secagem, da dinâmica do leito e apresentam impacto direto no ciclo que envolve recobrimento, secagem, fratura do filme e elutriação do pó formado (KUDRA; MUJUMDAR, 2009; FREIRE *et al.*, 2012).

A secagem de pastas ocorre normalmente a uma taxa constante. Diferentemente da secagem de sólidos granulares, a evaporação é a etapa limitante do processo, uma vez que o material é alimentado com uma alta umidade no secador e a formação de uma fina camada na superfície das partículas de inertes minimiza a etapa de difusão. A medida que a umidade diminui, a dinâmica de partículas também passa a influenciar, principalmente na etapa de quebra da camada de material seco. A taxa de secagem, o número de colisões entre as partículas inertes e a força praticada nessa colisão devem ser suficientemente altos para que a taxa de remoção do filme não seja excedida pelo recobrimento, evitando, assim, a aglomeração de material não-processado nas paredes internas do secador e na superfície dos inertes (BARRET; FANE, 1989).

2.6 Aditivos de secagem

Os aditivos de secagem têm por objetivo facilitar o processo de secagem como intuito de melhorar a qualidade do produto final e reduzir os custos de processos. Alguns tipos de polpas e resíduos de frutas, por exemplo, podem possuir altas concentrações de lipídios e açúcares resultando em aglomeração das partículas dentro do secador e, conseqüentemente, redução do rendimento na operação do equipamento. Dessa forma, o uso de aditivos ou

adjuvantes atuam no intuito de facilitar o processo de secagem, reduzir os custos do processo e melhorar a qualidade do produto final (LAVOYER, 2012).

Alguns materiais como amidos e dextrinas podem ser utilizados como adjuntos de secagem, como: amidos modificados, féculas, pirodextrinas, dextrinas ácidas, maltodextrinas, ciclodextrinas, entre outros (LAVOYER, 2012). A maltodextrina, por exemplo, apresenta alta higroscopicidade, retém voláteis e evita aglomeração de partículas (OLIVEIRA; FIGUEIREDO; QUEIROZ, 2006).

2.7 Secadores rotativos

Diversas configurações de equipamentos estão disponíveis para a implementação de um processo de secagem. A exigência mínima para a escolha de um equipamento é que o mesmo alcance uma produtividade adequada, em um tempo de processamento aceitável, com o desenvolvimento de uma operação segura e economicamente rentável (MCCABE; SMITH; HARRIOTT, 1993). Dessa forma, as características do material a ser seco (aspectos físicos, termossensibilidade, entre outros), o contato entre o material e o fluido de secagem, a forma e a qualidade desejada no produto, o tipo de alimentação, a quantidade de material que deve ser processada, o regime de operação, dentre outros aspectos, são de fundamental importância na escolha de uma configuração do secador.

Os secadores rotativos são os mais utilizados na indústria devido, principalmente, ao seu baixo custo de operação, simplicidade de construção e flexibilidade em operar com os mais diversos tipos de materiais (SHEEHAN; BRITTON; SCHNEIDER, 2005). Eles são aplicados em usinas de produção de açúcar, no processamento de sais inorgânicos, de materiais cristalinos, e, particularmente, quando a carga é processada em altas temperaturas, como é o caso do clínquer (RICHARDSON; HARKER; BACKHURST, 2002).

Este tipo de secador consiste em um cilindro disposto na horizontal ou levemente inclinado. O comprimento do cilindro pode possuir de 4 a 10 vezes o diâmetro, o qual pode variar de 4 a 10 m. A classificação desse tipo de secador é realizada de acordo com a forma com que o calor é transferido para o material. Quando a transferência se dá pelo contato entre os sólidos e o gás aquecido (ar, gases de combustão), o secador é classificado como contato direto. Quando é realizada por intermédio da carcaça metálica ou por tubos, sem envolver contato entre o fluxo gasoso e o material, classifica-o como contato indireto (GENSKOW *et al.*, 2008).

A alimentação do material é realizada por uma das extremidades do secador e o produto descarregado pela outra, disposta de acordo com a configuração concorrente ou contracorrente com o gás de secagem. Na operação em contracorrente, os gases quentes entram em contato com o material relativamente seco, reduzindo o teor de umidade ao mínimo. Na secagem de materiais termossensíveis, entretanto, esta configuração não é adequada, uma vez que a carga tende a ser excessivamente aquecida. No fluxo concorrente, o contato entre o material úmido e os gases aumenta rapidamente a secagem superficial, evitando que o material a ser seco grude nas paredes do cilindro. Além disso, a queda da temperatura do próprio gás como resultado da interação com o sólido, possibilita que materiais sensíveis ao calor sejam secos adequadamente (RICHARDSON; HARKER; BACKHURST, 2002).

Muitos secadores são equipados com suspensores (“*flights*”), que são instalados na parede interna do cilindro para promover a movimentação do material da parte inferior para a superior da câmara, proporcionando sua queda livre através da corrente gasosa (catarata), de maneira a intensificar a transferência de calor e massa no sistema contribuir para o transporte do material de um lado a outro do equipamento. Um secador rotativo industrial convencional é apresentado na Figura 6.

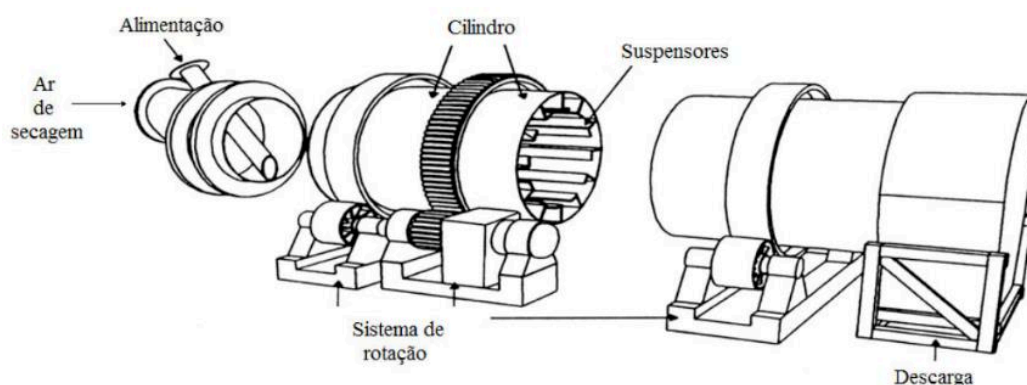


Figura 6- Esquema ilustrativo de um secador rotatório com suspensores (Fonte: Genskow *et al.*, 2008).

O movimento do material no secador deve-se à combinação dos efeitos de cascata, deslizamento e rolagem das partículas. Tal dinâmica está associada à fatores como comprimento, diâmetro, inclinação, velocidade de rotação do tambor, tipo e quantidade de suspensores, taxa de alimentação e distribuição granulométrica do material. A eficiência do secador, por sua vez, dependerá do tempo gasto no contato do material com o ar quente durante

a distribuição do material na seção transversal do tambor e esse deve-se, principalmente, aos formatos dos suspensores e inclinação do tambor (NASCIMENTO, 2014).

2.8 Secadores rotativos com recheio de inertes

O secador rotatório com recheio de inertes consiste em um cilindro horizontal, disposto de suspensores longitudinais e esferas de material inerte em seu interior. Os suspensores formam um corpo único com o cilindro e as esferas constituem um leito de inertes que ocupa uma parte do volume do cilindro. A rotação do cilindro em conjunto com a ação dos “*flights*” provoca o revolvimento dos inertes no interior do tambor e o catarateamento através do ar de secagem. A alimentação é realizada de forma concorrente com o fluido, sendo que a superfície dos inertes tornam-se recobertas com uma fina película do material pastoso alimentado, expondo-o ao fluido de secagem (BURJAILI, 1996).

As colisões entre as partículas e entre as partículas e a parede do cilindro são responsáveis pela cominuição do material seco ao longo do secador, de forma que o pó produzido é arrastado para o sistema de separação. A operação do secador passa a englobar a secagem por convecção e condução e a moagem, no sentido que o mecanismo do processo consiste em duas fases: a cinética do processo de secagem e a cinética de moagem (atrito e impacto). A grande influência do impacto dos inertes no desempenho do secador constitui uma peculiaridade do SRRI.

O fato do ar de secagem não ter a função de promover o movimento do leito, confere ao fluido a função exclusiva de promover a secagem e o transporte do material seco, resultando em economia energética frente a outros equipamentos como o leito de jorro e o leito fluidizado que também se fazem valer do suporte de inertes (BURJAILI, 1996).

O secador rotatório com recheio de inertes tem sido aplicado em trabalhos na literatura para a secagem de materiais pastosos. Burjaili (1996) realizou ensaios de secagem de uma pasta de levedura termolisada proveniente da indústria do açúcar e etanol. O autor avaliou o comportamento do leito de inertes, o qual era composto de partículas de polietileno e cerâmica, em relação à velocidade de rotação e aos parâmetros geométricos dos suspensores. O autor adequou a concentração de levedura (25%) através de estudos reológicos que envolveram jateamento e distribuição de pastas sobre o leito de inertes. A alimentação foi realizada de forma contínua (12 kg/h) e de modo intermitente para melhor aproveitamento do calor condutivo do leito. O pó produzido apresentou-se com 10% de umidade e a avaliação energética do secador sugeriu que cerca de 48% do calor da secagem era de natureza condutiva.

Silva *et al.* (2019) quantificaram o efeito de diferentes variáveis operacionais na secagem da microalga *spirulina platensis* em secador rotatório com recheio de inertes. Avaliou-se o efeito da temperatura do ar de secagem, taxa de alimentação da pasta, velocidade de rotação e grau de enchimento das partículas inertes utilizando um planejamento composto central (PCC). Verificou-se que a velocidade de rotação e o grau de enchimento apresentaram maior efeito no rendimento de secagem medido experimentalmente. De acordo com simulações realizadas, utilizando o método dos elementos discretos (DEM), foi possível relacionar o rendimento medido experimentalmente com o número de colisões ao longo do processo avaliados pelas simulações realizadas.

Moura (2016) realizou um estudo da secagem do resíduo de maracujá em um secador rotatório com recheio de inertes com alimentação intermitente de material. O autor utilizou diferentes condições de intermitência e da temperatura do ar de secagem e avaliou o comportamento da resposta na saída do secador no que diz respeito a umidade do sólido, umidade do ar, temperatura do ar e massa produzida ao longo da secagem. O autor desenvolveu um modelo matemático com base nos balanços microscópicos de massa e energia das fases fluida e particulada., analisando a influência das condições operacionais nos parâmetros do modelo.

Cabrera-Padilha *et al.* (2014) estudaram a secagem da pasta de banana “nanica” (*Musa acuminata*) em um secador rotativo com recheio de inertes, elaborando um planejamento composto central tendo como variáveis o tempo de secagem e massa de pasta alimentada e respostas o teor de umidade da farinha obtida e seu rendimento. Os autores verificaram a viabilidade da produção da farinha somente com a adição de Dimodan® (1%), dada adesão do produto às paredes do tambor e à superfície dos inertes. O produto obtido nas condições ótimas de operação apresentou umidade de 8% (base úmida) e um rendimento de 72,9% na operação do secador.

Maldonado, Finzer & Limaverde (2009) avaliaram a produção de biossólido oriundo do lodo biológico parcialmente estabilizado por processo anaeróbio de uma estação de tratamento de água. O lodo foi parcialmente digerido, estabilizado (5% de sólidos totais), concentrado em sedimentador. A secagem do lodo foi realizada em secador rotatório com recheio de inertes com capacidade de produção de até 143 Kg/h. O produto obtido rico em nitrogênio (4%), fósforo (2,5%), potássio (4%), baixo teor de metais pesados, foi viabilizado na agricultura, em especial horticultura.

Honorato (2006) estudou o processo de secagem do cefalotórax do camarão. Tomando como base os resultados em secador de bandeja e leito de jorro, no que diz respeito a umidade do produto, temperatura de secagem e tempo de intermitência da alimentação. O autor também utilizou um secador rotatório com recheio de inertes, sendo que a alimentação do material foi realizada em forma de pasta. A albumina foi utilizada como agente encapsulante, e a intermitência definida em 2 min. O autor buscou verificar a influência de variáveis como temperatura, concentração de albumina, vazão de alimentação, nas respostas: eficiência térmica, umidade do pó, tempo total do ensaio e eficiência de processamento do material.

2.9 Abordagem numérica: modelagem lagrangeana do escoamento granular- Método dos Elementos Discretos (DEM)

O método dos elementos discretos foi originalmente proposto por Cundall & Strack (1979) no estudo do comportamento mecânico de materiais granulares durante fratura de rochas, e vem sendo largamente utilizado no estudo de sistemas particulados. Na abordagem DEM, as trajetórias das partículas são acompanhadas e um balanço de forças é aplicado a cada uma, levando em consideração as interações partícula-partícula e partícula-parede. Esse balanço é integrado explicitamente no tempo, resultando na atualização da aceleração e posição da partícula (BRANDÃO, 2017).

A modelagem DEM possui basicamente duas etapas principais: a lei de deslocamento (*displacement law*), que contabiliza as forças de contato que ocorrem entre partículas e entre partículas-parede; e a segunda Lei de Newton, a qual é aplicada a cada partícula de forma a avaliar como as forças de contato e de campo determinam seu movimento. Dessa forma, a aceleração da partícula pode ser estimada através da força resultante dividida por sua massa. A partir desse valor, o algoritmo atualiza os valores de velocidade após sucessivas integrações temporais através de cada *time-step* e, com eles, o deslocamento, rotação e trajetória são recalculados (PENG, 2014).

Na Figura 7, é apresentado, de forma esquemática, o princípio de cálculo utilizado nas simulações DEM, onde cada ciclo representa um *time-step*. Segundo Cundall & Strack (1979), é necessário garantir que esse valor seja pequeno o suficiente para que os cálculos sejam realizados entre as partículas que estão em contato, não sendo afetados, portanto, por perturbações que possam ocorrer com partículas imediatamente vizinhas.

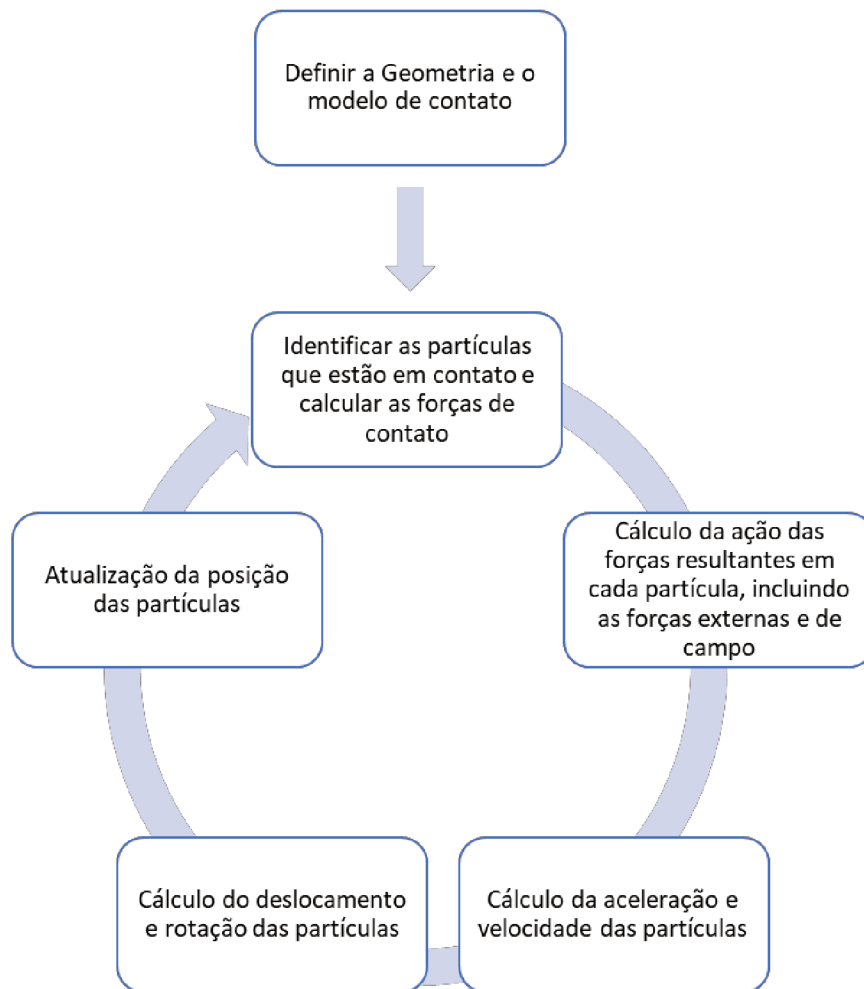


Figura 7 - Algoritmo empregado nas simulações DEM (Fonte: Lima, 2017).

Cleary (2010) destaca algumas suposições utilizadas nas simulações DEM elencadas a seguir:

- As partículas são tratadas como corpos rígidos;
- Os contatos ocorrem sobre uma área infinitesimal, considerada como um ponto;
- Permite-se a sobreposição das partículas (*overlap*) sobre o contorno rígido nos pontos de contato;
- A magnitude da sobreposição está relacionada uma força de contato determinada através de uma lei de deslocamento;
- As sobreposições são pequenas quando comparadas às dimensões das partículas.

Para uma partícula i com massa m_i e momento de inércia I_i dois tipos de força são, em geral, levados em consideração: a força peso $m_i \mathbf{g}$, resultado do campo gravitacional, e a força de contato. Quando uma partícula i colide com uma partícula j (ou parede j), a força de

contato é decomposta em duas componentes: normal $F_{c,n,ii}$ e tangencial $F_{c,t,ii}$ (PENG, 2014). A segunda Lei de Newton, então, pode ser escrita tal qual apresentado na Equação 2.1.

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = m_i g + \sum_{j=1}^{n_i} (F_{c,n,ij} + F_{c,t,ij}) \quad (2.1)$$

sendo v_i é a velocidade da partícula i e n_i é o número de colisões observadas nessa partícula.

Conforme destacado por Lima (2017), a velocidade v_i e a posição x_i são calculadas através das Equações 2.2 e 2.3, respectivamente.

$$v_i^{t+\frac{\Delta t}{2}} = v_i^{t-\frac{\Delta t}{2}} + \frac{1}{m_i} \left(m_i g + \sum_{j=1}^{n_i} (F_{c,n,ij} + F_{c,t,ij}) \right) \Delta t \quad (2.2)$$

$$x_i^{t+\frac{\Delta t}{2}} = x_i^t + x_i^{t-\frac{\Delta t}{2}} \Delta t \quad (2.3)$$

A velocidade e a posição angular da partícula, por sua vez, são determinadas pelas Equações 2.4 e 2.5, uma vez que o torque τ_{ij} exercido na partícula durante a colisão tende a provocar movimento rotacional na partícula em torno do próprio eixo.

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_j \tau_{ij} \quad (2.4)$$

$$\omega_i^{t+\frac{\Delta t}{2}} = \omega_i^{t-\frac{\Delta t}{2}} + \left(\frac{\sum \tau_{ij}}{I_i} \right) \Delta t \quad (2.5)$$

$$\theta_i^{t+\frac{\Delta t}{2}} = \theta_i^t + \omega_i^{t-\frac{\Delta t}{2}} \Delta t \quad (2.6)$$

sendo I_i , ω_i e θ_i o momento de inércia, velocidade e posição angular da partícula i , respectivamente.

Os modelos de contato descrevem como os elementos se comportam quando em contato uns com os outros. Os modelos utilizados em simulações DEM para o contato entre as partículas são classificados em: modelo de esfera rígida, proposto por Alder & Wainwright (1957), e modelo de esfera macia, proposto por Cundall & Strack (1979). Em simulações utilizando o primeiro modelo, as colisões são assumidas como binárias e instantâneas, tornando-se inadequado, por essa razão, para representar sistemas com alta concentração granular e contatos duradouros. As velocidades no pós-colisão são calculadas a partir do coeficiente de restituição, parâmetro que quantifica a dissipação de energia cinética, e o tempo até a próxima colisão é utilizado para atualizar a posição e as velocidades de todas as partículas pertencentes ao sistema (BUIST *et al.*, 2016; BRANDÃO, 2017).

O modelo de esfera macia é mais adequado para sistemas com alta concentração granular, no qual pode ser verificado colisões entre mais de uma partícula. Ele permite a análise de interações entre partículas e entre partícula-parede ao custo de um tempo computacional mais alto. Nessa abordagem, o modelo de contato é introduzido para contabilizar essas interações com base na deformação (*overlap*) das partículas em contato. A evolução força-velocidade-deslocamento no tempo é simulada durante a colisão, modelando o contato como um sistema mecânico linear ou um sistema não-linear mais complexo (DI RENZO; DI MAIO, 2004; BUIST *et al.*, 2016).

O modelo de contato linear (“*spring-dashpot*”), proposto por Cundall & Strack (1979), assume uma relação linear entre a força elástica e o deslocamento da partícula, e uma dependência linear entre a dissipação viscosa e a deformação da partícula, em analogia a um sistema mecânico do tipo mola-amortecedor. O termo repulsivo é calculado de acordo com uma relação baseada na Lei de Hooke, levando em consideração a rigidez das partículas, a constante de amortecimento e a deformação sofrida. O modelo adota um valor constante para o coeficiente de restituição e o tempo de colisão, apesar de alguns estudos já demonstrarem que tanto um quanto outro são dependentes da intensidade da força de contato (DI RENZO; DI MAIO, 2004; BRANDÃO, 2017).

O modelo não-linear para modelagem do contato entre partículas é resultado da combinação da teoria clássica de contato elástico desenvolvida por Hertz (1882) para a direção normal, e o modelo de não-deslizamento proposto por Mindlin & Deresiewicz (1953) para a direção tangencial. A teoria de Hertz provê relações compactas para a direção normal, derivadas da integração da distribuição de pressão através da área de contato normal. De acordo com este modelo, a força normal, dada pela Equação 2.7, é função da sobreposição normal (δ_n), do raio de contato equivalente (R^*) e do módulo de Young equivalente (E^*) (BRACEY; WEERASEKARA; POWELL, 2016; NASCIMENTO, 2018).

$$F_n = \frac{4}{3} E^* \delta_n^{3/2} \sqrt{R^*} \quad (2.7)$$

no qual o módulo de Young e o raio de contato equivalente são calculados de acordo com as Equações 2.8 e 2.9.

$$\frac{1}{E^*} = \frac{(1-\nu_i)^2}{E_i} + \frac{(1-\nu_j)^2}{E_j} \quad (2.8)$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j} \quad (2.9)$$

em que E_i , v_i , R_i e E_j , v_j , R_j são o módulo de Young, razão de Poisson e raio de cada partícula em contato para as partículas i e j , respectivamente.

A força resultante na direção normal será a soma da força normal elástica (F_n) e a força normal de amortecimento (F_n^d), apresentada na Equação 2.10, a qual inclui no modelo de Hertz o efeito da dissipação de energia (POWELL *et al.*, 2011).

$$F_n^d = -2\sqrt{\frac{5}{6}}\beta\sqrt{S_n m^*} v_n^{rel} \quad (2.10)$$

sendo v_n^{rel} a componente normal da velocidade relativa, m^* é a massa equivalente, β é o coeficiente de amortecimento que depende do coeficiente de restituição ε , conforme descrito na Equação 2.11, e S_n a rigidez normal, cuja forma de cálculo é apresentada na Equação 2.12.

$$\beta = \frac{\ln \varepsilon}{\sqrt{\ln^2 \varepsilon + \pi^2}} \quad (2.11)$$

$$S_n = 2E^* \sqrt{R^* \delta_n} \quad (2.12)$$

A componente tangencial da força elástica (F_t), por sua vez, é dada pela Equação 2.13.

$$F_t = -\delta_t S_t \quad (2.13)$$

sendo δ_t a sobreposição tangencial e S_t a rigidez tangencial, como apresentado na Equação 2.14.

$$S_t = 8G^* \sqrt{R^* \delta_n} \quad (2.14)$$

onde G^* é o módulo de cisalhamento equivalente, calculado por:

$$\frac{1}{G^*} = \frac{2-v_i}{G_i} + \frac{2-v_j}{G_j} \quad (2.15)$$

Assim como a força normal de amortecimento, a força tangencial é incorporada na modelagem DEM através da Equação 2.16.

$$F_t^d = -2\sqrt{\frac{5}{6}}\beta\sqrt{S_t m^*} v_t^{rel} \quad (2.16)$$

onde v_t^{rel} é a velocidade relativa tangencial. A máxima força tangencial ($F_{t,max}$) é limitada pela lei de atrito de Coulomb que, como pode ser visto na Equação 2.17, é função do coeficiente de atrito estático (μ_s) e da força normal (F_n).

$$F_{t,max}^d = \mu_s F_n \quad (2.17)$$

As simulações DEM fornecem informações relevantes da dinâmica das partículas que podem ser inviáveis ou difíceis de serem medidas ou avaliadas experimentalmente. Os resultados da simulação podem ser avaliados em termos do fluxo granular, da força com que as

partículas interagem, velocidade relativa de colisão e da frequência com que essas colisões acontecem. Essas observações podem ser úteis na análise da performance de equipamentos como o tambor rotatório com recheio de inertes, no qual os choques das partículas têm papel importante no desempenho do equipamento.

Na abordagem Lagrangeana, os conceitos de colisões e contatos apresentam diferenças significativas entre si. A colisão entre partículas (e parede) pode ser avaliada a partir de um processo dinâmico, na qual as partículas chocam-se com uma força suficiente para permitir uma sobreposição de pelo menos 1% em relação seu diâmetro. As colisões serão entendidas como impactos completos, independentemente de quanto tempo os elementos permanecerão em contato. Os contatos ou número de coordenação é uma aproximação mais adequada para leitos estáticos, o qual contabiliza a quantidade de partículas que estão no contorno e que não experimentam uma superposição (YANG; ZOU; YU, 2003).

De acordo com o modelo de esfera macia, duas partículas podem entrar em contato em um instante t_0 , sobrepõem-se por um determinado instante de tempo e separam-se em um instante t_1 . Como ilustrado na Figura 8, todo o evento é computado como uma colisão, independentemente do tempo em que elas permaneceram em contato. As colisões são contabilizadas sempre em pares, no sentido que se mais de duas colidirem simultaneamente, a separação de cada par passa a ser registrada como uma colisão (FRIES *et al.*, 2013).

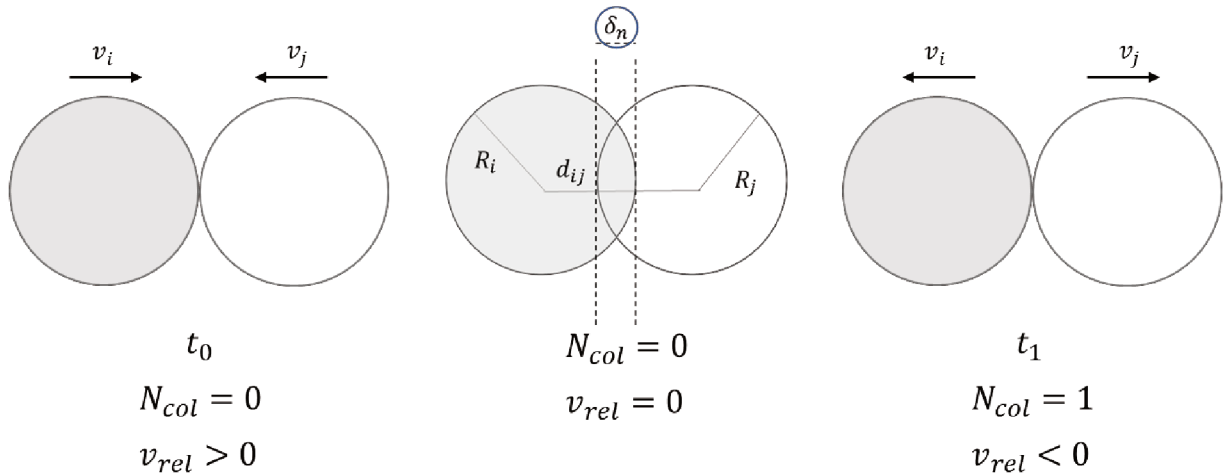


Figura 8 - Representação esquemática de uma colisão segundo a abordagem DEM considerando o modelo de esfera macia. Adaptado de Fries *et al.* (2013).

Quando as forças inter-partículas de longo alcance são desprezíveis (força eletrostática, formação de ponte de Van-der-Waals, entre outros), a contribuição mais importante ao movimento das partículas é devido às colisões que ocorrem no leito. Essas

interações, além de determinar a direção que as partículas adquirem, podem apresentar uma força muito maior que aquela exercida pelo campo gravitacional (DI RENZO; DI MAIO, 2004).

Na simulação DEM, o intervalo de tempo aplicado (*time-step*) deve apresentar um compromisso entre o custo computacional, o erro de cálculo e a estabilidade numérica da integração. Nesse sentido, em grande parte dos casos, o *time-step* deve ser escolhido de forma a não exceder o tempo crítico de integração de Rayleigh (Eq. 2.18). Esse intervalo refere-se ao tempo necessário para a onda mecânica de Rayleigh propagar-se ao longo da superfície da menor partícula quando se utiliza um modelo de contato não-linear (THORNTON; RANDALL, 1988). A escolha do passo de tempo tem importância fundamental para garantir que não haja sobreposições excessivas de partículas e que o movimento delas seja influenciado somente por perturbações oriundas da propagação das ondas de sua vizinhança local (DANBY; SHRIMPTON; PALMER, 2013).

$$T_R = \frac{\pi r^2 \sqrt{\frac{\rho_s}{G_i}}}{(0,1613 \cdot \nu_i + 0,8766)} \quad (2.18)$$

sendo r o raio da menor partícula do sistema, ρ_s a densidade da partícula, G_i o módulo de cisalhamento ν_i a razão de Poisson.

De acordo com Lima (2017) a literatura recomenda a utilização de, no máximo, 20% do passo de tempo crítico estipulado pela Equação 2.18 para sistemas dinâmicos.

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Preparo da polpa do Camu-Camu

O camu-camu (*Myrciaria dubia*) utilizado no desenvolvimento do trabalho foi colhido em uma propriedade particular localizada na cidade de Ibiá-MG. Os frutos, já maduros, foram colhidos manualmente, armazenados em embalagens de polietileno e envolvidos em papel alumínio. Os lotes foram armazenados em freezer a uma temperatura de -18 °C.

Os frutos do camu-camu foram previamente convertidos em polpa para a realização da secagem em SRRI. Para isso, adicionou-se água destilada proporção mássica de 3 g de água para 4 g de fruto. A mistura foi processada em liquidificador até a obtenção de uma pasta de aspecto homogêneo. O fruto *in natura* e a polpa produzida podem ser visualizadas na Figura 9. A polpa foi separada das sementes com o uso de uma peneira de 9 Mesh e armazenada em recipientes plásticos. Em cada recipiente, foi adicionada cerca de 100 g de polpa e, após isso, os recipientes foram envoltos por papel alumínio, selados e armazenados em freezer (-18 °C). Cerca de 6 h antes da realização dos experimentos, a polpa armazenada era retirada do freezer e descongelada à temperatura ambiente, mantendo-a sob o abrigo da luz.



Figura 9 - Camu-camu *in natura*, polpa utilizada nos experimentos de secagem (a) e o produto obtido após a secagem na forma de pó (b).

3.2 Análises Realizadas

A polpa foi caracterizada quanto à umidade, densidade, teor de cinzas, ácido ascórbico, compostos fenólicos totais, flavonoides totais e atividade antioxidante.

3.2.1 Umidade e Atividade de Água

A determinação do teor de umidade foi realizada de acordo com o método de estufa $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ por 24 h (AOAC, 1995), tanto para a polpa de camu-camu quanto do produto obtido na secagem no SRRI. A análise foi realizada no intuito de verificar o rendimento do processo de secagem, o qual é definido como a razão entre a massa seca de polpa alimentada e a massa seca de produto coletada ao final do processo (Equação 3.1). Para tal, utilizou-se uma estufa de convecção forçada de marca Marconi, modelo MA033.

$$\text{Rend (\%)} = \frac{m_{\text{produto}} \cdot (100 - U_{\text{produto}})}{m_{\text{alimentada}} \cdot (100 - U_{\text{polpa}})} \quad (3.1)$$

sendo m_{produto} a massa do pó de camu-camu produzido (g), $m_{\text{alimentada}}$ a massa total de polpa alimentada durante o processo de secagem (g), U_{produto} o teor de umidade calculado para o produto (%) e U_{polpa} o teor de umidade calculado para a polpa (%).

A atividade de água (a_w) foi medida através do equipamento de marca Novasina, modelo LabSwift. O equipamento dispõe de um sistema de medição de temperatura superficial da amostra por sensor infra-vermelho, e uma célula de medição eletrolítica para a aferição de umidade. Os valores de a_w são medidos em uma faixa de 0,030 a 1,000, com precisão de $\pm 0,003$.

3.2.2 Densidade

A densidade ou massa específica real foi determinada através de picnometria por gás Hélio. O picnômetro determina o volume verdadeiro dos sólidos por variação de pressão do gás em uma câmara de volume conhecido. O gás Hélio é empregado por ser leve, inerte e monoatômico, permitindo o acesso a poros e microestruturas não acessíveis a outros gases (WEBB; ORR, 1997). Para a realização da análise, foi utilizado o equipamento de marca Micromeritis, modelo AccuPyc 1330, sendo necessária a secagem prévia das amostras em estufa, $105 \pm 3^{\circ}\text{C}$ por 24 h, e moagem utilizando pistilo e almofariz até a homogeneidade.

3.2.3 Teor de Cinzas

A determinação do teor de cinzas foi realizada segundo a norma analítica E1755-01 (ASTM, 2003). A amostra a ser analisada foi previamente seca em estufa ($105 \pm 3^{\circ}\text{C}$ por 24 h) e armazenada em dessecador para resfriamento. Pesou-se cerca de 2,0 g do sólido seco em um cadinho de massa conhecida e o conjunto foi incinerado em mufla (Tecnal – EDG, modelo

1150-1P-W1) à 575 ± 25 °C por 4 h. Após o período, o cadinho foi acondicionado em dessecador até resfriamento à temperatura ambiente. O resultado foi expresso como percentual de cinzas em relação a massa inicial. O procedimento foi realizado em triplicata.

3.2.4 pH

O procedimento para a determinação do pH consistia na diluição de 10 g de amostra em 100 mL de água destilada. O conteúdo foi agitado até que as partículas que compunham a suspensão ficassem suspensas de maneira uniforme por cerca de 30 minutos utilizando um agitador magnético. A solução foi filtrada utilizando papel filtro, a qual teve o pH aferido com o auxílio do pHmetro Gehaka, modelo PG1800.

3.2.5 Compostos bioativos

Os compostos bioativos avaliados neste trabalho foram os compostos fenólicos, flavonoides e ácido ascórbico. As análises foram realizadas com luminosidade reduzida a fim de evitar a degradação desses compostos pela luz. Essas análises foram realizadas tanto para a polpa de camu-camu in natura quanto para o produto seco obtido no SRRI, no intuito de avaliar o efeito das diferentes condições operacionais estudadas na degradação dos compostos.

Para determinação da concentração de fenólicos e flavonoides presentes no analito, utilizou-se o metanol (VETEC®) como agente extrator. O reagente foi posto em contato com o pó em um tubo com tampa rosqueada, e o conjunto foi agitado em vórtex (KASVI/K45-2810) por de 3 min. Após a agitação, a mistura foi armazenada em local escuro por 1 h, a fim de maximizar a extração dos compostos presentes na amostra. Ao final desse período, a solução foi filtrada com o auxílio de papel filtro, e o extrato obtido foi utilizado para as análises posteriores.

3.2.5.1 Teor de Fenólicos Totais (TPC)

A concentração total de fenólicos foi determinada através do método de Folin-Ciocalteu (SINGLETON; ROSSI, 1965). É um método colorimétrico baseado na redução dos ácidos fosfotúngstico ($H_{13}PW_{12}O_{40}$) e fosfomolibdico ($H_{13}PMo_{12}O_{40}$) em um complexo W-Mo de coloração azul, através da interação com as substâncias fenólicas presentes no extrato. A concentração dos grupos cromóforos em solução é tão maior quanto a concentração de fenólicos, permitindo a aplicação de espectrofotometria. Maiores informações podem ser encontradas em Singleton *et al.* (1998). A leitura foi realizada em espectrofotômetro (Pró-

Análise/V-1200), com um comprimento de onda definido em 622 nm, e a curva de calibração foi determinada utilizando o ácido gálico como padrão ($C_7H_6O_5$). Os resultados foram expressos em mg de ácido gálico/100 g de amostra (base seca).

3.2.5.2 Teor de Flavonoides Totais (TFC)

O conteúdo total de compostos flavonoides foi determinado utilizando metodologia descrita por Zhishen *et al.* (1999). Nesse método, também colorimétrico, o íon alumínio (Al^{+3}) forma complexos estáveis com os grupos carbonil e hidroxil presentes na estrutura dos flavonoides, conferindo uma coloração amarelo-alaranjada à solução. A concentração desses compostos no extrato foi determinada por espectrofotometria, na qual a absorbância foi avaliada utilizando um comprimento de onda de 450 nm. Essa concentração foi calculada a partir de uma curva de calibração, tendo a rutina ($C_{27}H_{30}O_{16}$) como padrão. Os resultados foram expressos em mg de rutina/100 g de amostra (base seca).

3.2.5.3 Atividade Antioxidante

A atividade antioxidante do extrato foi determinada a partir da redução do 1,1-difenil-2-picril-hidrazil (DPPH). O procedimento utilizado foi descrito no trabalho de Brand-Williams *et al.* (1995) (Figura 10) com algumas modificações. A solução do extrato foi diluída em 2, 5, 10, 25 e 50 vezes. Adicionou-se 3,9 ml de DPPH (0,024 g/L) à uma alíquota de 0,1 mL de cada solução diluída, e a resultante foi mantida em repouso, no escuro, por 30 minutos. Após esse período, as amostras foram analisadas em espectrofotômetro (515 nm). A determinação da concentração do radical remanescente foi realizada utilizando os parâmetros de regressão linear da curva de calibração. O percentual de DPPH remanescente foi calculado de acordo com a Equação 3.2.

$$\% DPPH_{rem} = \frac{[DPPH]_{t=30\ min}}{[DPPH]_{t=0}} \quad (3.2)$$

sendo $[DPPH]_{t=30\ min}$ é a concentração do radical após o tempo de reação estipulado, enquanto que $[DPPH]_{t=0}$ é sua concentração da solução-controle.

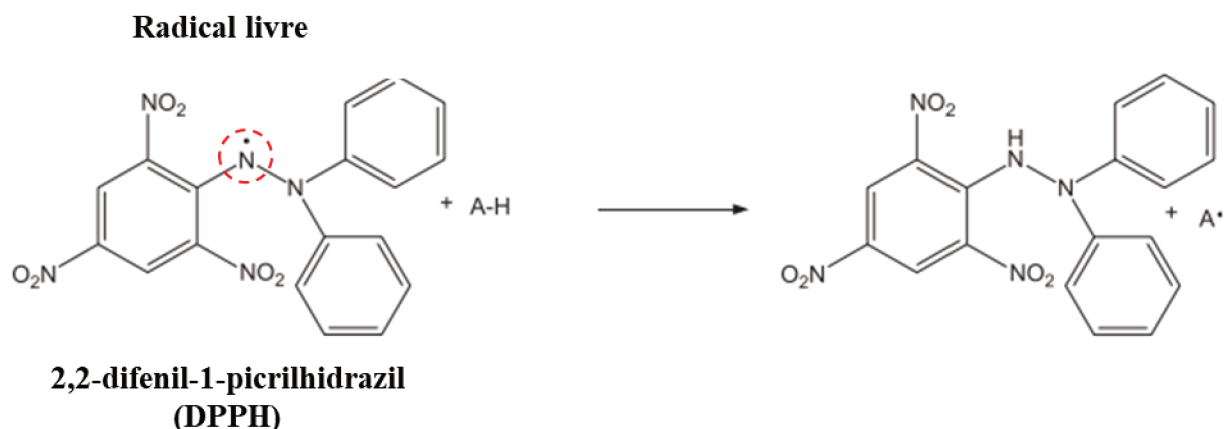


Figura 10 - Representação esquemática da reação do radical DPPH com o antioxidante
(Fonte: Vuolo *et al*, 2019).

O percentual remanescente do DPPH ($\% DPPH_{rem}$) foi plotado em relação à concentração das soluções analisadas. Com os parâmetros da regressão linear realizada, foi possível calcular a concentração de antioxidante necessária para reduzir a concentração inicial de DPPH em 50 %. Esse valor é definido como índice de inibição (IC_{50}).

3.2.5.4 Teor de Ácido Ascórbico (AA)

A determinação da concentração de vitamina C foi realizada segundo o método titulométrico AOAC 984.21 (AOAC, 1995) com modificações propostas por Benassi & Antunes, 1998. O procedimento baseia-se na redução do corante 2,6-dicloroindofenol (DCFI) pelo ácido ascórbico. A amostra a ser analisada foi macerada utilizando cadinho e pistilo na presença de água destilada. O extrato obtido foi misturado com uma solução de ácido oxálico (2%) na proporção de 1:1 (em volume) e a solução final foi titulada com o DCFI padronizado. Os resultados foram expressos em g de ácido ascórbico/100 g de amostra em base seca.

3.3 Secador rotatório com recheio de inertes (SRRI)

3.3.1 Unidade Experimental

Os experimentos foram realizados em um secador rotatório em escala de bancada localizada no Laboratório de Sistemas Particulados (LSP - FEQUI) da Universidade Federal de Uberlândia. A representação esquemática do secador é apresentada na Figura 11.

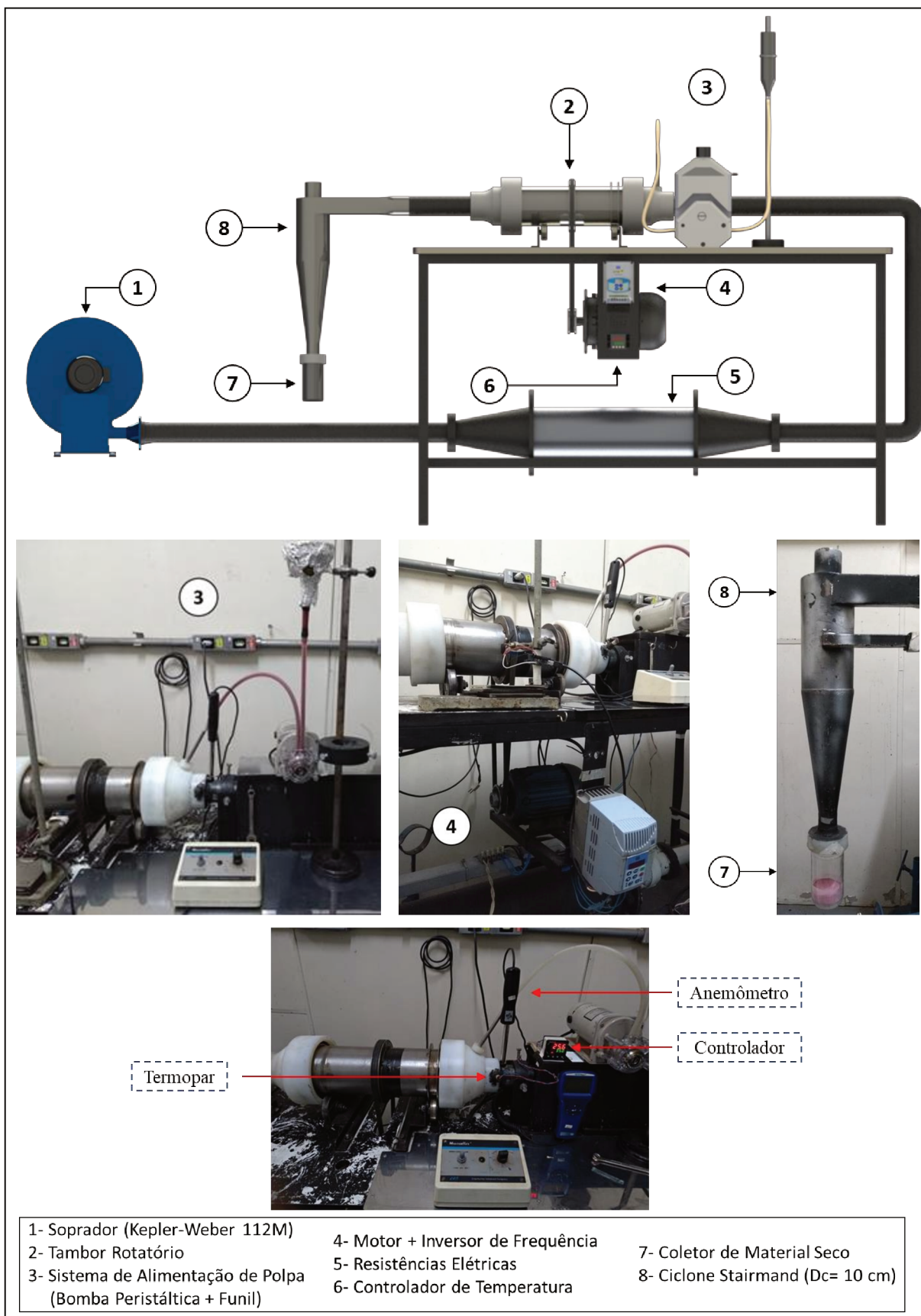


Figura 11 – Representação do aparato experimental que compõe o secador rotatório com recheio de inertes e algumas estruturas que compõem o equipamento em detalhe.

Assim como apresentado no esquema, a unidade experimental era composta de um soprador do tipo ventilador radial (1) (Kepler-Weber 112M), o qual promovia o escoamento do ar através de um conjunto de resistências elétricas (5), as quais o aqueciam. A velocidade de escoamento do ar foi monitorada utilizando um anemômetro de fio quente (Velocicalc® - TSI Instruments), cujo ponto de aferição situou-se à montante da câmara de secagem.

A temperatura do ar foi controlada utilizando dispositivo de controle da marca NOVUS e modelo N1030 ($\pm 0,1^{\circ}\text{C}$). A malha de controle era composta por um sensor termopar do tipo K, posicionado na entrada do tambor. O sinal era enviado ao controlador, que tomava a ação de controle atuando sobre um relé de estado sólido. Esse dispositivo interrompia a passagem de corrente elétrica para as resistências quando acionado. A estratégia de controle utilizada foi do tipo PID em que o controlador permitia, por intermédio do relé, a passagem de corrente pelo tempo suficiente para a temperatura atingir e manter-se no *set point*. O ar aquecido entrava no secador rotatório interagindo com os inertes e a amostra a ser seca.

O tambor foi acoplado a um sistema de rotação (4) composto de um motor elétrico (WEG - W22 Plus) e um inversor de frequência (WEG - CFW 08) utilizado com a finalidade de manter a velocidade angular do tambor em um valor operacional definido. A rotação foi monitorada utilizando um tacômetro (LM393) instalado em uma placa de prototipagem eletrônica *arduino* NANO® (Figura 12). A velocidade de rotação do tambor foi medida através dos sinais emitidos pelo tacômetro, que eram processados pela placa e exibidos na tela de um computador. O código utilizado foi implementado em linguagem C++ e compilado através da IDE do *arduino*.

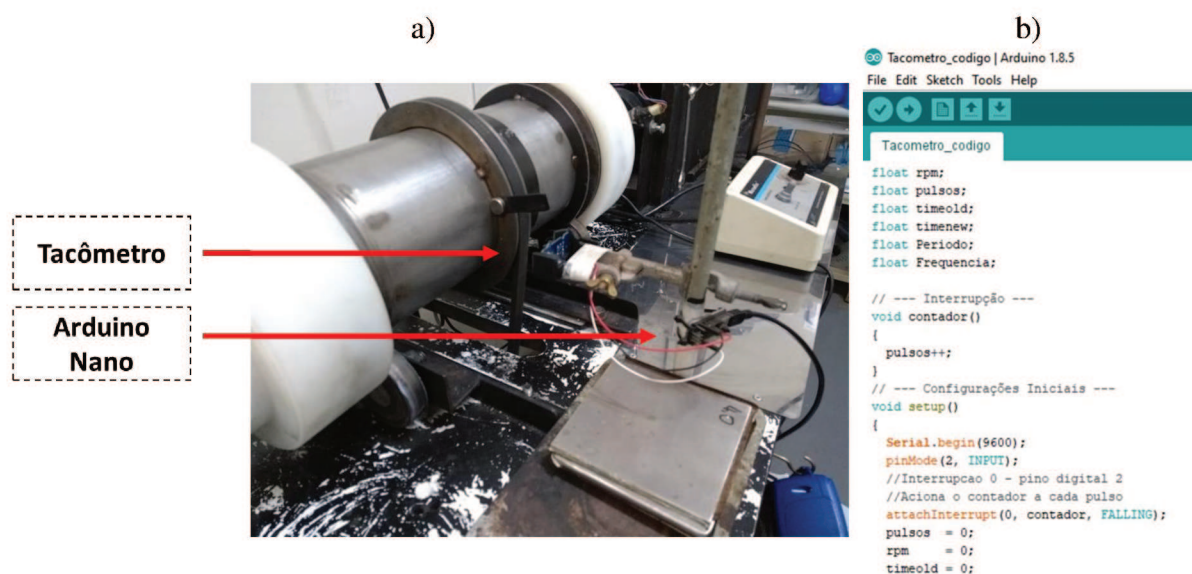


Figura 12 - Sistema de monitoramento da velocidade de rotação do tambor (a) e interface de aquisição de dados (b).

A alimentação da polpa, efetuada de maneira concorrente em relação ao ar quente, era realizada a partir de um tanque acoplado a uma bomba peristáltica (MasterFlex 7553-70) que promovia o escoamento da polpa até o tambor. O sistema de separação (8) gás-sólido era composto por um ciclone do tipo *Stairmand* ($D_c = 10$ cm) no qual um recipiente coletor foi alocado no *underflow* a fim de realizar a coleta do material seco processado.

O tambor rotatório utilizado neste trabalho, especificamente, foi construído em aço inox, com diâmetro de 12 cm e comprimento de 36 cm (razão $L/D = 3$) (Figura 13). Na região de contato entre tambor e as partes fixas, utilizou-se anéis de bronze e retentores. Além de prevenir o desgaste das peças do sistema, essa estrutura permitiu a livre rotação do tambor sem haver perdas de material nas juntas do sistema.



Figura 13 - Representação esquemática do tambor rotatório (a) e perspectiva do seu acoplamento na unidade experimental (b).

3.3.2 Partículas inertes

Esferas de porcelana de calcita foram utilizadas como os corpos inertes que compuseram o recheio no secador rotatório (densidade $\rho_s = 2322$ kg/m³). Elas foram classificadas em três diâmetros diferentes, a saber: 25,40 mm; 19,05 mm e 12,70 mm (D1, D2 e D3, respectivamente). Esse tipo de inerte cerâmico foi escolhido pela resistência à abrasão, impedindo que a perda de material decorrente dos choques contínuos na operação do tambor contaminasse o produto seco. Além da resistência mecânica, a menor condutividade térmica, quando comparada a outros materiais (metais, por exemplo), auxilia na retenção de calor e, consequentemente, no processo de secagem.

As partículas inertes puderam ser combinadas de seis maneiras distintas no carregamento do secador rotatório, como ilustrado na Figura 14. As configurações C1, C2 e C3 foram compostas exclusivamente de inertes de diâmetro 25,40 mm (D1), 19,05 mm (D2) e 12,70 mm (D3), respectivamente. As configurações C4, C5 e C6 foram constituídas com a combinação binária entre os três tipos de inertes disponíveis. Na configuração C4, a combinação se deu entre os inertes de 25,40 mm (D1) e 19,05 mm (D2). Na configuração C5, combinou-se inertes de 25,40 mm (D1) e 12,70 mm (D3), e na configuração C6, os inertes de 19,05 mm (D2) e 12,70 mm (D3). A representação esquemática dos tipos de configurações de enchimento avaliados no desenvolvimento do trabalho é apresentada na Figura 14.

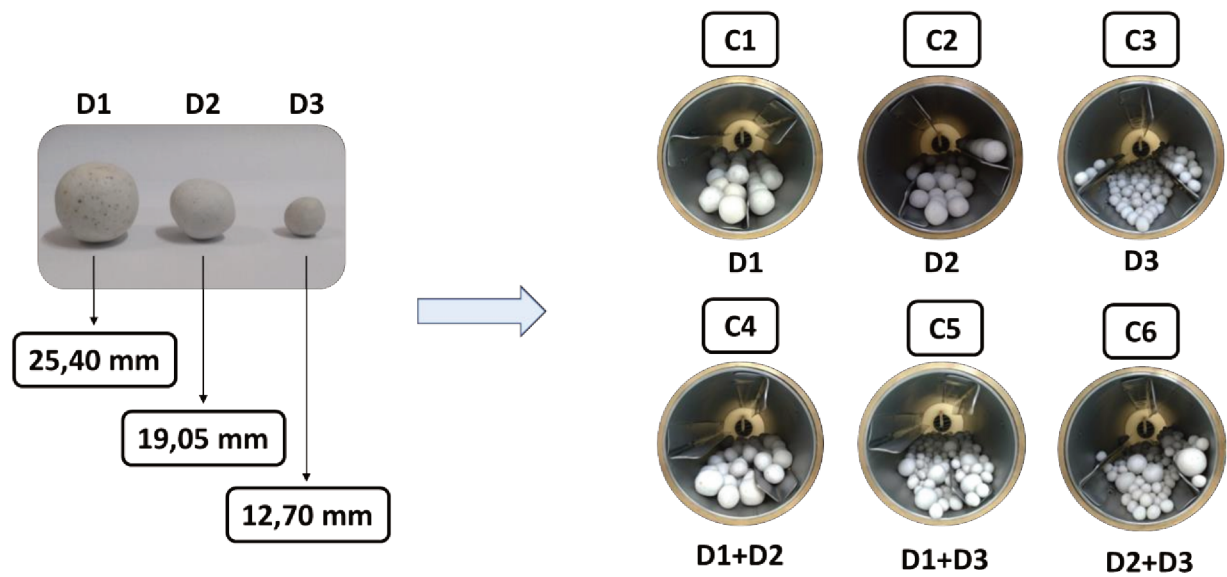


Figura 14 – Partículas inertes de diâmetro: 25,40 mm (D1); 19,05 mm (D2) e 12,70 mm (D3) e as configurações de enchimento do secador rotatório (C1 a C6).

A porosidade (ε_i) do leito composto por cada um dos três tipos de inerte e pela combinação dos mesmos foi medida diretamente. As esferas de massa (m_s) e densidade (ρ_i) previamente conhecidas, foram colocadas aleatoriamente em uma proveta graduada de 1 L. O nível de topo do leito foi aferido e então água foi adicionada até esse limite (V_f). Com o volume de água conhecido, a porosidade do leito foi determinada por meio da Equação 3.3. As medidas foram realizadas em triplicata.

$$\varepsilon_i = \frac{V_f}{V_f + \frac{m_s}{\rho_i}} \quad (3.3)$$

3.3.3 Ensaio de Secagem

No preparo da polpa, foi adicionado 15 % (em massa) de maltodextrina (DE 11) funcionando como um aditivo de secagem. De acordo com o trabalho de Silva (2019), o uso desse carboidrato contribuiu para o aumento do rendimento do processo de secagem da polpa de camu-camu em SRRI. O autor verificou que esse percentual permitiu o aumento da temperatura de transição vítrea do material, reduzindo sua pegajosidade (*stickness*) e facilitando a remoção da superfície dos inertes e das paredes do tambor.

Em cada experimento de secagem foram alimentadas 100 g da polpa, de maneira que 10 g eram bombeadas em intervalos de 5 min. A opção pela intermitência nesse tipo de secador, termo atribuído ao passo de tempo entre as alimentações, já havia sido realizada nos trabalhos de Burjaili (1996), Honorato (2006), Moura (2009) e Silva (2019). Os autores destacam que intermitência muito curta acarreta em um excesso de material úmido no secador, o qual tende a ficar aderido na superfície do tambor e nos inertes, tornando a transferência da umidade do material para a corrente de ar mais difícil. Ao final da alimentação, o secador rotatório era mantido em operação por 1 h e 30 min para garantir a máxima remoção do material seco das estruturas internas do equipamento.

Na operação do secador, estudou-se o efeito de quatro variáveis na secagem da polpa do camu-camu: temperatura do ar (T), fração entre inertes (FI), grau de enchimento (E) e velocidade de rotação (R). As respostas avaliadas foram rendimento de secagem, teor de compostos bioativos (TPC e TFC), teor de vitamina C (AA) e atividade antioxidante (IC₅₀).

- Temperatura (T):

A temperatura na qual o ar era admitido na câmara de secagem foi controlada por meio de um controlador modelo NOVUS® N1090. O aparelho recebia as informações de temperatura obtidas por meio de um termopar acoplado na entrada do tambor rotatório. A partir desse valor, o controlador aplicava a estratégia de controle PID, atuando sobre um relé de estado sólido (SSR), ajustando o intervalo de tempo em que as resistências elétricas eram acionadas. Com esse sistema, foi possível manter a temperatura no *set point* requerido, com precisão de 0,1 °C.

- Grau de Enchimento (E):

Essa variável foi definida como a razão entre o volume ocupado pelo conjunto de partículas inertes ($V_{Inertes}$) e o volume interno disponível do tambor rotatório (V_{Tambor} –

$V_{Suspendores}$). O cálculo da variável é apresentado na Equação 3.4. Como o volume do tambor se mantém constante, o grau de enchimento (E) é diretamente proporcional ao volume de inertes carregados no tambor. Na condução dos experimentos de secagem, essa quantidade é medida em termos da massa de inertes utilizada (m_s), que é uma função do grau de enchimento requerido, e é calculada através da Equação 3.5.

$$E(\%) = \frac{V_{Inertes}}{V_{Tambor} - V_{Suspendores}} \cdot 100 \quad (3.4)$$

$$m_s = (V_{Tambor} - V_{Suspendores}) \cdot (1 - \varepsilon_i) \cdot \rho_s \cdot E \quad (3.5)$$

sendo V_{Tambor} e $V_{Suspendores}$ o volume interno do tambor rotatório e o volume ocupado pelos três suspensores, respectivamente; ρ_s é a densidade da porcelana e ε_i a porosidade do leito composto pelo inerte avaliado.

- Fração entre Inertes (FI):

Para as configurações C4, C5 e C6, que utilizaram a combinação de dois diâmetros de inertes distintos, a fração entre inertes foi introduzida para estabelecer uma proporção, em volume, entre os tipos de inertes (D1, D2 e D3) que constituíram o enchimento do tambor Equação 3.6. O cálculo da massa de inertes utilizada nessas configurações é realizado utilizando a Equação 3.7 para a partícula de maior diâmetro empregada na configuração avaliada, e a Equação 3.8 para a partícula de menor diâmetro.

$$FI(\%) = \frac{V_{Maior\ Inerte}}{V_{Inertes}} \cdot 100 \quad (3.6)$$

$$m_1 = (V_{Tambor} - V_{Suspendores}) \cdot (1 - \varepsilon_i) \cdot \rho_s \cdot E \cdot FI \quad (3.7)$$

$$m_2 = (V_{Tambor} - V_{Suspendores}) \cdot (1 - \varepsilon_i) \cdot \rho_s \cdot E \cdot (1 - FI) \quad (3.8)$$

sendo ε_i a porosidade determinada para o leito de inertes, de acordo com as três configurações descritas (C4, C5 e C6).

Nessas situações em que mais de um tamanho de inerte é utilizado, é importante salientar que a variável fração entre inertes (FI) determina a quantidade de cada tipo de inerte no carregamento do tambor. Essa variável define uma proporção (valores percentuais) da maior partícula utilizada no enchimento do tambor rotatório frente o volume total delimitado pelo grau

de enchimento (E). A fração complementar desse cálculo representa a fração em volume da menor partícula. Um FI de 70 %, por exemplo, significa dizer que 70 % do volume ocupado pelo leito de inertes é dado pela maior partícula, enquanto que a menor partícula corresponde a 30 % desse volume.

- Rotação (RPM):

A velocidade de rotação (R) do tambor rotatório, como comentado, foi controlada utilizando um tacômetro conectado a um *arduino* NANO®.

- Planejamento de experimentos:

Os experimentos de secagem da polpa de camu-camu foram realizados de acordo com um planejamento composto central (PCC) com 26 experimentos conforme os níveis (codificados e originais) mostrados na Tabela 1. A configuração de enchimento do tambor rotatório utilizada no planejamento, no que diz respeito ao tamanho de inerte utilizado e à combinação de tamanhos distintos, foi definida através de uma análise numérica envolvendo a investigação das colisões das partículas inertes utilizando a abordagem Lagrangeana e sua relação com o rendimento de secagem.

Tabela 1- Planejamento composto central para a secagem do camu-camu em SRRI

Níveis	Variáveis Independentes			
	Temperatura (°C)	Fração entre Inertes (%)	Enchimento (%)	Rotação (RPM)
- α (-1,483)	40,3	20,35	20,17	45,17
-1	50,0	30,00	25,00	50,00
0	70,0	50,00	35,00	60,00
+1	90,0	70,00	45,00	70,00
+ α (+1,483)	99,6	79,65	49,82	74,82

Os níveis da variável temperatura foram definidos tomando como referência o efeito de aquecimento do ar de secagem pela operação do soprador radial sem o acionamento das resistências elétricas (35°C) e o valor máximo foi escolhido visando preservar as estruturas e conexões utilizadas no equipamento. Para a fração entre inertes, buscou-se avaliar toda região experimental, no sentido de utilizar condições de maior proporção de inertes de maior e menor tamanho, bem como na situação paritária dos mesmos. A variável rotação foi definida de acordo

com os limites de operação do motor elétrico e os níveis de enchimento foram definidos segundo observações apresentadas no trabalho de Silva (2019).

3.4 Análise da dinâmica de colisões dos inertes durante a operação do tambor utilizando a abordagem DEM

No estudo numérico, as simulações foram desenvolvidas com o objetivo de investigar a dinâmica das partículas durante a operação do tambor no que diz respeito à magnitude da força desenvolvida durante as colisões e a frequência dessas colisões entre as entidades simuladas. Para isso, foram avaliadas as variáveis independentes velocidade de rotação (R), grau de enchimento (E) e fração entre os inertes (FI).

As simulações realizadas no trabalho foram executadas aplicando a abordagem numérica Lagrangeana (Método dos Elementos Discretos – DEM) por meio do *software* EDEM®. Para viabilizá-las, utilizou-se um computador Xeon com 24 núcleos de processamento, situado no cluster do Laboratório de Sistemas Particulados (LSP) da Faculdade de Engenharia Química (FEQUI-UFU).

A geometria onde foi desenvolvido o cálculo DEM foi construída utilizando o *software* GMSH®. Todas as simulações foram realizadas utilizando o modelo de contato de Hertz-Mindlin (não-linear), e o passo de tempo aplicado foi de cerca de 10% do tempo de Rayleigh. Como destacado, esse parâmetro leva em consideração a densidade da partícula, o raio da menor partícula do sistema e módulo de cisalhamento. A literatura recomenda, no máximo, que se utilize um *time-step* de 20% do tempo de Rayleigh, cujo objetivo é garantir que o movimento das partículas não seja afetado pela propagação de ondas de perturbação das vizinhanças (LIMA, 2017). O tempo total de simulação foi de 60 s.

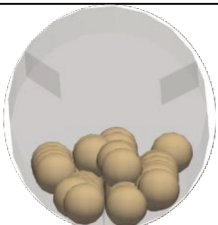
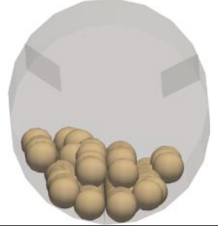
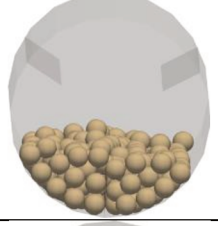
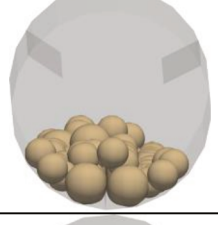
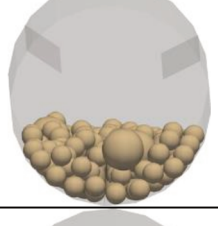
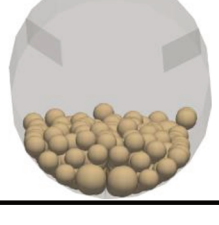
O cálculo DEM necessitou de alguns parâmetros de entrada utilizados em sua modelagem. Esses parâmetros são característicos do tipo de partícula utilizado, tais como densidade (ρ_i), módulo de cisalhamento (G_i) e razão de Poisson (ν_i). Outros parâmetros, como os coeficientes de restituição (ε_i), atrito estático (μ_s) e rolamento (μ_r) utilizados na modelagem do contato entre as entidades participantes da simulação, devem ser especificados para cada tipo de interação: partícula-partícula ou partícula-parede. A Tabela 2 apresenta os parâmetros DEM utilizados no desenvolvimento das simulações.

Tabela 2 - Parâmetros DEM utilizados nas simulações.

Parâmetro	Material	Valor	Referência
Densidade (kg.m ⁻³)	Porcelana	2230	Medido pelo autor Machado (2016)
	Aço Inoxidável	7800	
Razão de Poisson (-)	Porcelana	0,2	Silva <i>et al.</i> (2019)
	Aço Inoxidável	0,2	
Módulo de Cisalhamento (Pa)	Porcelana	1.10 ⁺⁶	Silva <i>et al.</i> (2019)
	Aço Inoxidável	1.10 ⁺⁶	
Coeficiente de Restituição	Partícula-Partícula	0,86	Tiscar <i>et al.</i> (2019)
	Partícula-Parede	0,86	
Coeficiente de Atrito Estático (-)	Partícula-Partícula	0,23	Barrios <i>et al.</i> (2013)
	Partícula-Parede	0,23	
Coeficiente de Atrito de Rolamento (-)	Partícula-Partícula	0,01	Silva <i>et al.</i> (2019)
	Partícula-Parede	0,01	
Tamanho de Célula	-	3.R _i (menor partícula)	-

Com relação ao carregamento do tambor, este pôde ser avaliado numericamente de acordo com as 6 configurações apresentadas anteriormente (C1 a C6). As simulações foram conduzidas aplicando as partículas de diâmetro de 25,40 mm, 19,05 mm e 12,70 mm individualmente (C1, C2 e C3), e também a combinação binária entre elas (C4, C5 e C6) conforme apresentado na Tabela 3. Nesse ponto, é importante destacar que o tambor rotatório com recheio de inertes tem sido estudado de forma experimental e numérica somente com partículas de mesmo tamanho no seu carregamento (BURJAILI, 1996; HONORATO, 2006; MOURA, 2016; SILVA *et al.*, 2019). Assim, a mistura de tamanhos diferentes é uma novidade deste trabalho.

Tabela 3- Configurações de enchimento utilizadas no estudo da dinâmica de partículas em tambor rotatório.

Configuração	Partícula 1 d (mm)	Partícula 2 d (mm)	Simulação DEM
C1	25,40	-	
C2	19,05	-	
C3	12,70	-	
C4	25,40	19,05	
C5	25,40	12,70	
C6	19,05	12,70	

Para a realização das simulações foi necessário determinar o número de partículas (n_p) aplicadas no cálculo DEM como função do grau enchimento avaliado. Esses valores foram calculados através das Equações 3.9 e 3.10. A primeira foi aplicada às configurações C1, C2 e C3, as quais apenas consideraram um tipo de partícula no carregamento do tambor. A segunda,

por sua vez, introduziu no cálculo a variável fração entre inertes (FI), dada a necessidade de definir as proporções entre os diferentes tipos de partículas nas configurações C4, C5 e C6.

$$n_p = \frac{(V_{Tambor} - V_{Suspensores}) \cdot (1 - \varepsilon)}{V_{Partícula}} \cdot E \quad (3.9)$$

$$n_p = \frac{(V_{Tambor} - V_{Suspensores}) \cdot (1 - \varepsilon)}{V_{Partícula}} \cdot E \cdot FI \quad (3.10)$$

Uma vez postuladas as variáveis independentes, as condições avaliadas nas simulações foram definidas utilizando um conjunto de planejamentos do tipo composto central (PCC). As configurações C1, C2 e C3 foram definidas segundo três PCC ortogonais, um para cada configuração, com duas variáveis independentes, enchimento (E) e velocidade de rotação (R), totalizando 27 simulações. Os níveis (codificados e originais) dessas variáveis podem ser consultados na Tabela 4.

Tabela 4- Níveis dos PCC utilizados para simulação das configurações C1, C2 e C3 (partículas individuais).

Níveis	Variáveis Independentes	
	Enchimento (%)	Rotação (RPM)
- α (-1,414)	22,93	45,86
-1	25,00	50,00
0	30,00	60,00
+1	35,00	70,00
+ α (+1,414)	37,07	74,14

Para as configurações C4, C5 e C6, cujo enchimento continha mais de um tipo de partícula, outros três planejamentos foram realizados para três variáveis independentes, resultando em 45 simulações. Vale destacar que nessas condições a variável fração entre inertes (FI) foi incluída na investigação numérica. Os níveis das três variáveis para essas configurações são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5- Níveis dos PCC utilizados para simulação das configurações C4, C5 e C6 (combinação entre partículas).

Níveis	Variáveis Independentes		
	Rotação (RPM)	Enchimento (%)	Fração entre Inertes (%)
- α (-1,681)	43,18	21,59	16,36
-1	50,00	25,00	30,00
0	60,00	30,00	50,00
+1	70,00	35,00	70,00
+ α (+1,681)	76,82	38,41	83,64

As respostas DEM obtidas foram o número total de colisões contabilizados entre as partículas e entre as partículas e o tambor, e a componente normal da força desenvolvida nesses eventos. A determinação dessas respostas foi realizada seguindo as etapas de pós-processamento apresentadas na Figura 15.

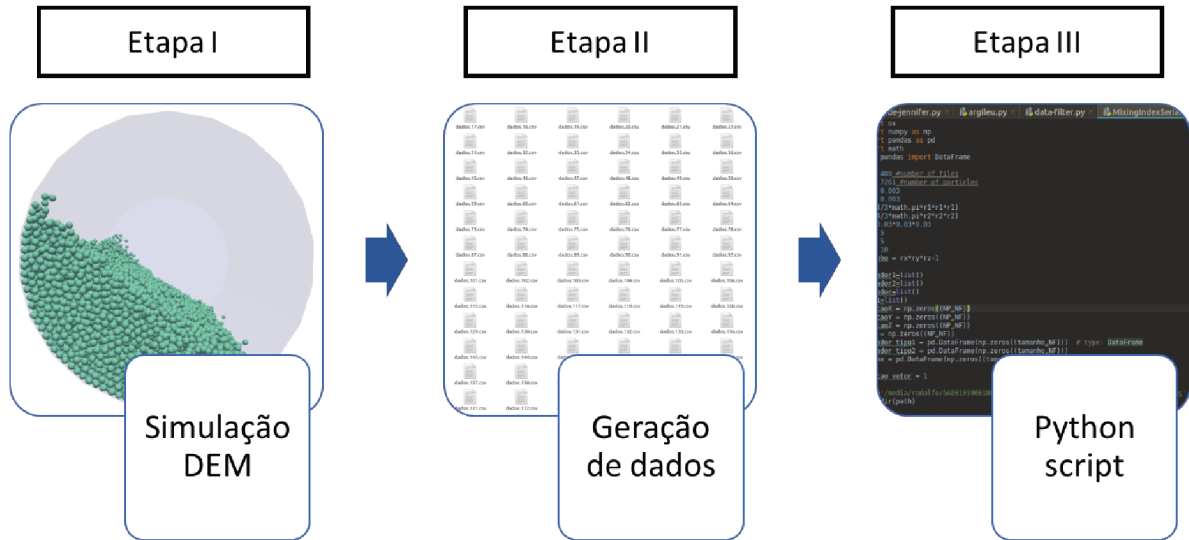


Figura 15 - Etapas do pós-processamento de dados para quantificação do número de colisões e força de colisão.

Na Etapa I, as simulações definidas na Tabela 4 e na Tabela 5 foram realizadas utilizando o resolvidor numérico EDEM[®]. Com os resultados obtidos, os arquivos com as informações de posição, velocidade e contatos das entidades simuladas eram exportados em arquivos de extensão .csv para cada *time-step*. A partir dessas informações obtidas, foi criado um código em linguagem *Python* para quantificar o número de colisões e a força de colisão em cada *time-step* e, conseqüentemente, ao longo de todo o período simulado.

3.4.1 Otimização das respostas DEM utilizando a função desejabilidade

A função desejabilidade (DERRINGER; SUICH, 1980) foi utilizada para a otimização multi-respostas das respostas DEM obtidas em cada PCC realizado. A desejabilidade permite a maximização ou minimização simultânea de um conjunto de respostas convertendo-as em uma função composta com valores compreendidos entre 0 e 1. O método procura alcançar o melhor equilíbrio entre as variáveis resposta diferentes, quanto menor esse valor, mais próximo ao 0, significa dizer que a resposta é completamente indesejável, assim como o maior valor indica um processo totalmente otimizado.

Com esse recurso, foi possível determinar seis condições de operação no tambor rotatório, que maximizam simultaneamente a força de contato e o número de colisões. Feito isso, com a finalidade de se comparar as informações oriundas da modelagem DEM com os dados experimentais da secagem da polpa de camu-camu, foram realizados seis experimentos confirmatórios com as condições operacionais de enchimento (E), rotação (R) e fração entre inertes (FI) definidas pela otimização. A temperatura do processo foi fixada em 90°C para todas as condições. A resposta experimental avaliada foi o rendimento do processo de secagem.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados da caracterização da polpa do camu-camu, da secagem e das análises realizadas no material obtido, visando avaliar o desempenho do secador rotatório com recheio de inertes na manutenção da potencialidade do fruto *in natura* e as relações entre o desempenho do secador e a modelagem Lagrangeana do movimento das partículas inertes.

4.1 Investigação numérica da dinâmica de colisão entre os inertes e a relação com o rendimento do processo de secagem

Nesse tópico serão abordados os resultados obtidos com a aplicação da modelagem DEM nos planejamentos compostos centrais (PCC) para as diferentes configurações de enchimento avaliadas (C1 a C6), os resultados da otimização simultânea do número de colisões e da força normal de colisão obtidos em cada PCC e a avaliação experimental realizada com as condições otimizadas por meio das respostas DEM.

As simulações DEM realizadas resultaram em um conjunto de informações da dinâmica de partículas para cada *time-step*. Avaliando as distribuições de frequência das colisões e da força normal de colisão obtidos ao longo do tempo, observa-se que o número de colisões (Figura 16a) e a força normal de colisão (Figura 17a) apresentam desvios com relação à distribuição normal sendo mais adequada a aplicação de uma distribuição do tipo log-normal, conforme apresentado nas Figura 16b e Figura 17b. Essa informação permite a utilização da média logarítmica como um valor representativo do conjunto de dados obtidos.

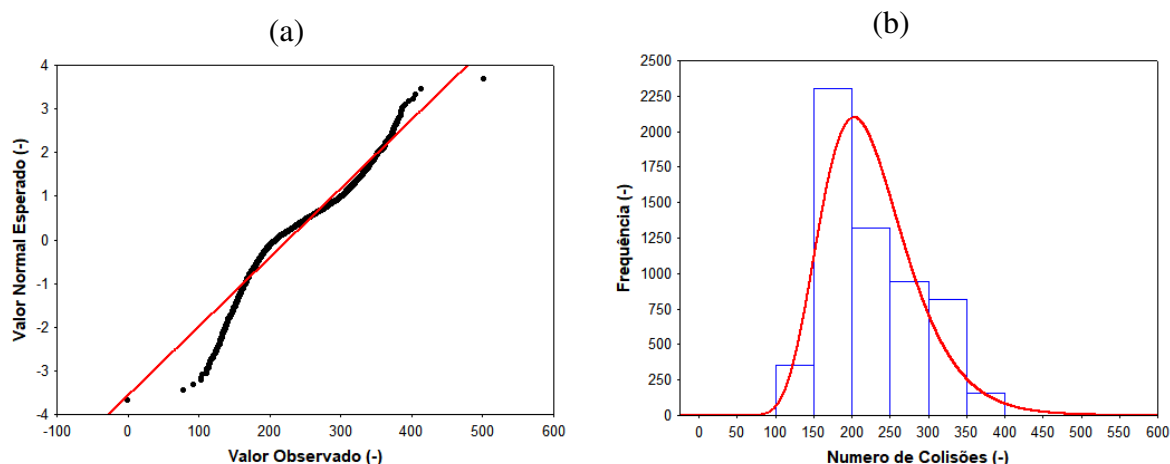


Figura 16 - Distribuição de frequências log-normal (b) e probabilidade normal (a) para o número de colisões simulado.

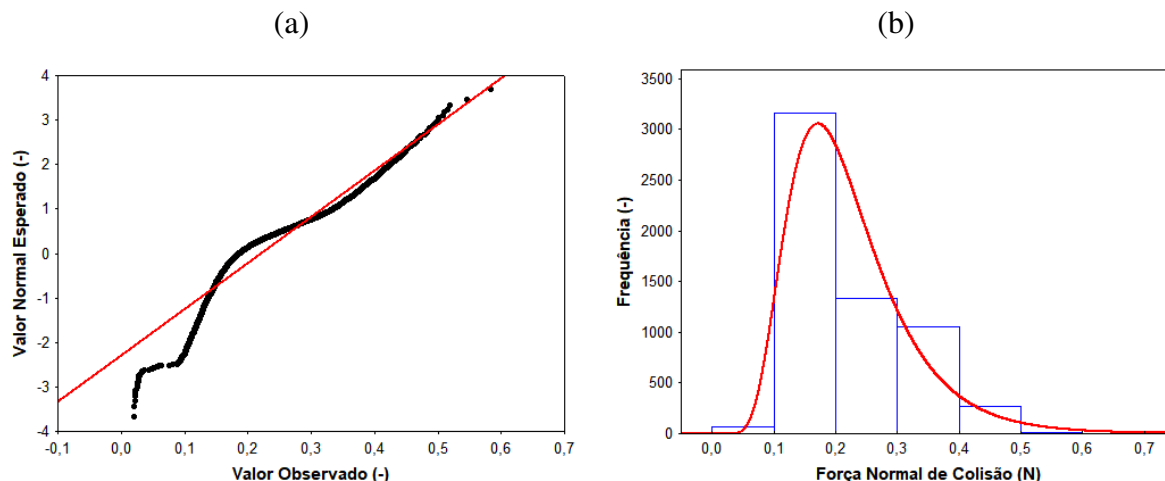


Figura 17- Distribuição de frequências log-normal (b) e probabilidade normal (a) para a força normal de colisão simulada.

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos com os pontos ortogonais (PO) e o ponto central (PC) dos planejamentos compostos centrais (PCC) propostos para avaliar o efeito do tamanho da partícula no número de colisões durante a operação do tambor. Como mencionado no capítulo anterior, em cada PCC avaliou-se apenas um tamanho de partícula (25,40 mm, 19,05 mm e 12,70 mm; C1, C2 e C3, respectivamente) e duas variáveis independentes: grau de enchimento (E) e velocidade de rotação (R). Os três planejamentos completos, com 9 simulações cada, podem ser consultados no Apêndice A.

Tabela 6 - Resultados obtidos para o número de colisões nos pontos ortogonais (PO) e no ponto central (PC) dos PCC realizados com os inertes de 25,40 mm (C1), 19,05 mm (C2) e 12,70 mm (C3).

Condição	E (%)	R (RPM)	Número de Colisões (-)		
			C1 25,40 mm	C2 19,05 mm	C3 12,70 mm
PO 1	22,93	60,00	17	37	284
PO 2	37,07	60,00	32	68	545
PO 3	30,00	45,86	22	49	416
PO 4	30,00	74,14	24	54	408
PC	30,00	60,00	25	53	406

Observou-se que o número de colisões sofreu um aumento no sentido da maior para a menor partícula utilizada, comportamento que se estendeu em todas as condições de enchimento e rotação avaliadas no planejamento. Isso se explica pela diferença entre o número

de partículas utilizadas em cada configuração. Quanto menor o diâmetro do inerte, mais partículas são necessárias para atingir o volume determinado pelo grau de enchimento, e essa maior quantidade acaba por atrelar-se à maior frequência que o evento de colisão ocorre durante a operação do tambor. Esse comportamento é ilustrado na Figura 18.

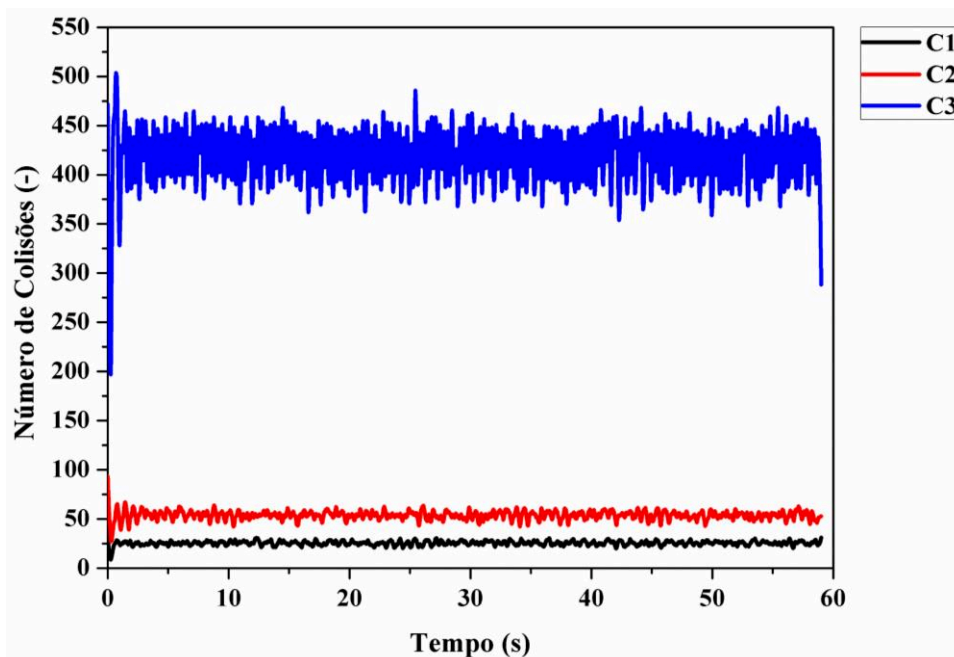


Figura 18- Número de colisões obtidos para os inertes de tamanho 25,40 mm (C1), 19,05 mm (C2) e 12,70 mm (C3) para um grau de enchimento (E) de 30% e rotação (R) de 60 RPM.

As sucessivas colisões são responsáveis por promover a fragmentação da película de material seco que envolve a superfície do inerte e também a sua remoção (FREIRE *et al.*, 2012). Nesse sentido, uma informação relevante a esse estudo é a força de colisão, que pode fornecer a energia necessária para promover a cominuição do pó. O entendimento aqui é que o rendimento pode estar atrelado não só à frequência com que os choques ocorrem entre os inertes, mas também à contribuição exercida pela força desenvolvida nessas colisões (intensidade da colisão).

Além do número de colisões, as simulações que compuseram as configurações C1, C2 e C3 também apresentaram os valores de força normal durante esses choques. Os resultados dos pontos ortogonais (PO) e central (PC) desses três PCC são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados obtidos para a força colisional nos pontos ortogonais (PO) e no ponto central (PC) dos PCC realizados para os inertes de 25,40 mm (C1), 19,05 mm (C2) e 12,70 mm (C3).

Condição	E (%)	R (RPM)	Força Normal de Colisão (N)		
			C1	C2	C3
			25,40 mm	19,05 mm	12,70 mm
PO 1	22,93	60,00	1,4324	0,6200	0,2070
PO 2	37,07	60,00	1,0916	0,5438	0,1690
PO 3	30,00	45,86	0,9386	0,4949	0,1532
PO 4	30,00	74,14	1,4643	0,5784	0,2018
PC	30,00	60,00	1,2233	0,5803	0,1868

Ao analisar a força de colisão como função do tamanho da partícula, verifica-se que há um ganho no módulo dessa força com o aumento do diâmetro. Como as três partículas possuem a mesma densidade, um aumento no seu diâmetro reflete diretamente em um aumento de massa que, de acordo com a segunda lei de Newton, é diretamente proporcional à magnitude da força. As colisões verificadas para os inertes de 25,40 mm são cerca de 2 vezes mais intensas em relação à força de contato entre as partículas de 19,05 mm e aproximadamente 6 vezes maior do que aquelas obtidas com as esferas de 12,70 mm. Esse comportamento é ilustrado na Figura 19.

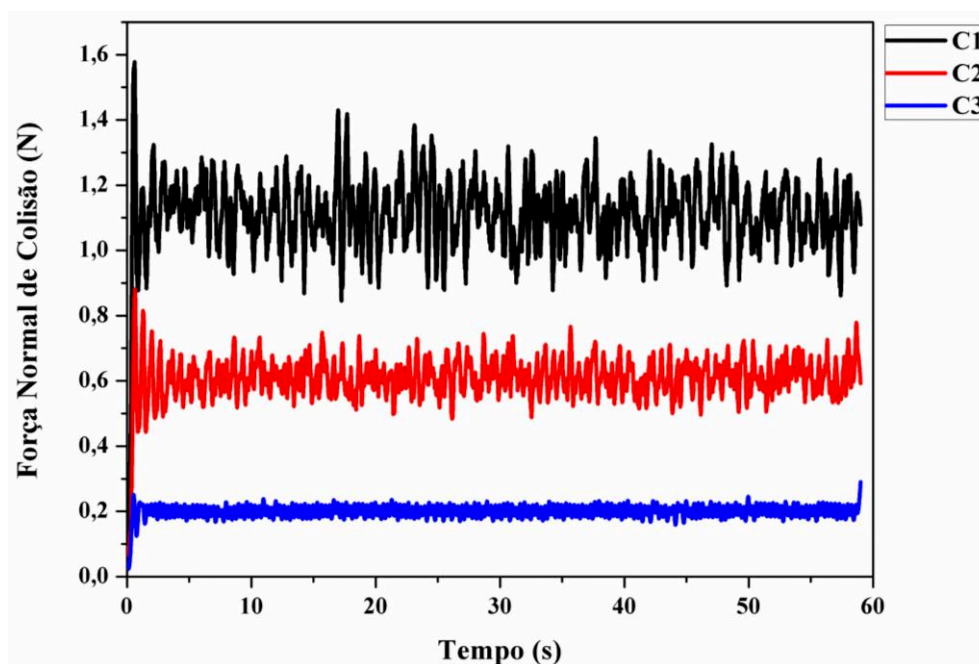


Figura 19 - Número de colisões obtidos para os inertes de tamanho 25,40 mm (C1), 19,05 mm (C2) e 12,70 mm (C3) para um grau de enchimento (E) de 30% e rotação (R) de 60 RPM.

A partir dos resultados das simulações desenvolvidas com as condições definidas nos três PCC, foram realizadas regressões não-lineares avaliando a força de colisão e o número de colisões como função das variáveis independentes (grau de enchimento e velocidade de rotação). A análise de variância (ANOVA) foi realizada para avaliar a adequação dessas equações e a significância dos fatores. Os modelos completos apresentaram coeficientes de correlação (R^2) maiores que 98%, indicando um bom ajuste das equações aos dados obtidos.

Os modelos reduzidos após eliminação das variáveis e interações com efeitos estatisticamente não significativos (nível de significância de 0,05) são apresentados nas Equações 4.1 a 4.3 para o número de colisões e Equações 4.4 a 4.6 para força colisional. Os resíduos do modelo de regressão apresentaram-se normal e aleatoriamente distribuídos.

$$NC_{C1} = 24,72 + 5,15.\bar{E} + 0,85.\bar{R} - 0,82.\bar{R}^2 \quad (4.1)$$

$$R^2 = 0,9973$$

$$NC_{C2} = 51,66 + 10,73.\bar{E} + 1,13.\bar{R} \quad (4.2)$$

$$R^2 = 0,9901$$

$$NC_{C3} = 405,99 + 91,77.\bar{E} + 4,62.\bar{E}^2 - 2,53.\bar{R} + 3,37.\bar{R}^2 \quad (4.3)$$

$$R^2 = 0,9998$$

$$FC_{C1} = 1,2385 - 0,1087.\bar{E} + 0,2042.\bar{R} - 0,0620.\bar{E}.\bar{R} \quad (4.4)$$

$$R^2 = 0,9815$$

$$FC_{C2} = 0,5803 - 0,0225.\bar{E} + 0,0311.\bar{R} - 0,0231.\bar{R}^2 - 0,0055.\bar{E}.\bar{R} \quad (4.5)$$

$$R^2 = 0,9841$$

$$FC_{C3} = 0,1865 - 0,0121.\bar{E} + 0,0164.\bar{R} - 0,0052.\bar{E}.\bar{R} \quad (4.6)$$

$$R^2 = 0,9893$$

sendo \bar{E} e \bar{R} as variáveis grau de enchimento e velocidade de rotação codificadas $\left(\bar{E} = \frac{E-30}{5}; \bar{R} = \frac{R-60}{10}\right)$.

A variável grau de enchimento (E) apresentou grande efeito sobre as duas respostas. O maior enchimento do tambor atrela-se a uma maior quantidade de partículas e isso acaba por refletir na frequência com que as partículas interagem, o que explica sua contribuição positiva nas equações de previsão do número de colisões. Com relação a força colisional, o maior enchimento contribuiu de forma negativa à sua magnitude. Um enchimento maior diminui a altura livre na qual as partículas são arremessadas na seção transversal do tambor. Essa menor

altura reflete em uma menor energia potencial acumulada nas partículas que, no momento do choque, conduz a uma colisão menos intensa.

Para a velocidade de rotação, analisando o valor dos parâmetros de uma forma global, observa-se que essa variável contribui ao aumento do número de colisões no tambor, apesar do seu efeito ter sido significativamente menor que o efeito do grau de enchimento. Isso está relacionado a maior frequência na qual as partículas são catarateadas, aumentando a dinâmica dos inertes. Na força de colisão, o efeito da variável atuou no sentido de aumentar a intensidade da colisão dos corpos inertes. Isso relaciona-se à maior energia fornecida às partículas pela rotação do tambor, as quais consequentemente apresentam interações mais intensas entre si e com o próprio equipamento. No caso particular da configuração C2, o efeito quadrático negativo indica a redução da resposta principalmente nos níveis extremos da variável ($\pm\alpha$).

Com relação à combinação entre os diferentes tipos de partícula, foram avaliadas as configurações C4, C5 e C6 que correspondem, respectivamente, a combinação entre os inertes de 25,40 mm e 19,05 mm; 25,40 mm e 12,70 mm; 19,05 mm e 12,70 mm. A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos com os pontos ortogonais (PO) e o ponto central (PC) dos PCC propostos para avaliar o efeito do uso de mais de um tipo de partícula no número de colisões durante a operação do tambor.

Tabela 8 - Resultados obtidos para o número de colisões para combinação entre os inertes de 25,40 mm e 19,05 mm (C4), 25,40 mm e 12,70 mm (C5) e 19,05 mm e 12,70 mm (C6).

Condição	FI (%)	E (%)	R (RPM)	Número de Colisões (-)		
				C4	C5	C6
				25,40-19,05 mm	25,40-12,70 mm	19,05-12,70 mm
PO 1	16,36	30,00	60,00	47	332	337
PO 2	83,64	30,00	60,00	29	74	97
PO 3	50,00	21,59	60,00	25	128	139
PO 4	50,00	38,41	60,00	51	268	288
PO 5	50,00	30,00	43,18	34	191	208
PO 6	50,00	30,00	76,82	40	213	228
PC	50,00	30,00	60,00	38	192	208

Percebe-se, de uma maneira geral, que o número de colisões é maior quando se utiliza a menor partícula (12,70 mm). Isso pode ser verificado na comparação das configurações C5 e C6, que possuem o menor inerte, com a configuração C4, que aplicam partículas de 25,40 mm e 19,05 mm no enchimento do tambor. Além disso, dentre as três combinações avaliadas, a

configuração C6 (19,05 e 12,70 mm) apresenta maior contato entre os inertes. Nesse ponto, vale a observação que uma maior quantidade de partículas é utilizada quando se aplica um diâmetro de inerte menor. Esse aumento repercute em mais interações dentro do tambor, no sentido da maior probabilidade de uma partícula se chocar com outra e colidir com o próprio equipamento. Esse comportamento pode ser visualizado na Figura 20.

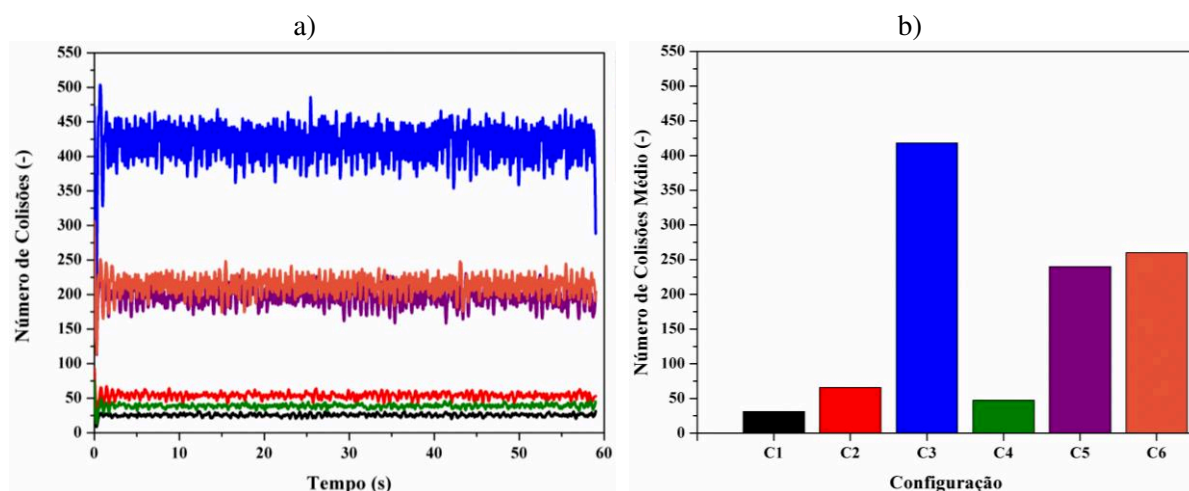


Figura 20 - Número de colisões obtidos para as configurações C4, C5 e C6 para um grau de enchimento (E) de 30% e rotação (R) de 60 RPM.

Os resultados de força de colisão nos pontos ortogonais e central do PCC apresentados na Tabela 9. Essas informações são provenientes do grupo de simulações que avaliam as configurações C4, C5 e C6 (25,40 mm e 19,05 mm; 25,40 mm e 12,70 mm; 19,05 mm e 12,70 mm, respectivamente). Os três planejamentos completos podem ser consultados no Apêndice B.

Tabela 9 - Resultados obtidos para a força de colisão para combinação entre os inertes de 25,40 mm e 19,05 mm (C4), 25,40 mm e 12,70 mm (C5) e 19,05 mm e 12,70 mm (C6).

Condição	FI (%)	E (%)	R (RPM)	Força Normal de Colisão (N)		
				C4	C5	C6
				25,40-19,05 mm	25,40-12,70 mm	19,05-12,70 mm
PO 1	16,36	30,00	60,00	0,6350	0,2064	0,2037
PO 2	83,64	30,00	60,00	0,9317	0,4871	0,3889
PO 3	50,00	21,59	60,00	0,8230	0,2958	0,2784
PO 4	50,00	38,41	60,00	0,7080	0,2482	0,2367
PO 5	50,00	30,00	43,18	0,6400	0,2192	0,2052
PO 6	50,00	30,00	76,82	0,7362	0,2615	0,2521
PC	50,00	30,00	60,00	0,7637	0,2732	0,2571

Com base nesses resultados, observa-se que a força de colisão é maior quando se utiliza a maior partícula (25,40 mm), o que pode ser verificado na comparação das configurações C4 e C5, com a configuração C6, a qual aplica partículas de 19,05 mm e 12,70 mm. Esse comportamento é ilustrado na Figura 21, e é um reflexo da maior massa que essa partícula tem durante um evento colisional.

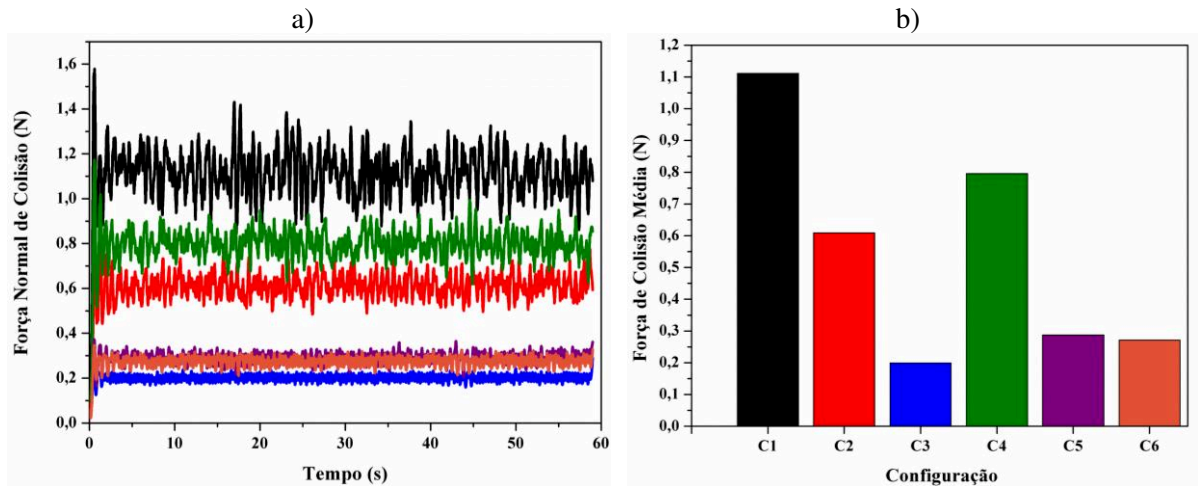


Figura 21 – Força normal de colisão obtida para as configurações C4, C5 e C6 para um grau de enchimento (E) de 30% e rotação (R) de 60 RPM.

De uma maneira geral, partículas de 12,70 mm apresentaram maior número de colisões e partículas de 25,40 mm maior força de colisão. As configurações que aplicaram a combinação entre inertes de tamanhos diferentes apresentaram uma característica somativa, uma vez que, em uma dada configuração (C4, C5 ou C6), as partículas menores contribuíram para o aumento da frequência com que as colisões se sucedem, e as partículas maiores contribuíram no aumento magnitude da força envolvida nesses contatos.

Os modelos reduzidos após a eliminação das variáveis e interações não-significativas ($\alpha = 95\%$) são apresentados nas Equações 4.7 a 4.9 para o número de colisões e Equações 4.10 a 4.12 para a força de colisão. Os resíduos do modelo de regressão apresentaram-se normal e aleatoriamente distribuídos.

$$NC_{C4} = 37,34 - 5,43.\overline{FI} + 7,44.\overline{E} + 1,25.\overline{R} - 1,06.\overline{FI}.\overline{E} \quad (4.7)$$

$$R^2 = 0,9947$$

$$NC_{C5} = 200,77 - 78,72.\overline{FI} + 42,21.\overline{E} + 4,92.\overline{R} - 16,76.\overline{FI}.\overline{E} \quad (4.8)$$

$$R^2 = 0,9983$$

$$NC_{C6} = 216,29 - 72,47.\overline{FI} + 45,39.\overline{E} + 3,95.\overline{R} - 16,10.\overline{FI}.\overline{E} \quad (4.9)$$

$$R^2 = 0,9983$$

$$FC_{C4} = 0,7604 + 0,0815.\overline{FI} - 0,0241.\overline{E} + 0,0219.\overline{R} - 0,0312.\overline{R}^2 \quad (4.10)$$

$$R^2 = 0,9531$$

$$FC_{C5} = 0,2623 + 0,0811.\overline{FI} + 0,0311.\overline{FI}^2 - 0,0266.\overline{E} + 0,0245.\overline{R} - 0,0228.\overline{FI}.\overline{E} + 0,0210.\overline{FI}.\overline{R} - 0,0186.\overline{E}.\overline{R} \quad (4.11)$$

$$R^2 = 0,9401$$

$$FC_{C6} = 0,2542 + 0,0475.\overline{FI} + 0,0128.\overline{FI}^2 - 0,0114.\overline{E} + 0,0140.\overline{R} - 0,0110.\overline{R}^2 \quad (4.12)$$

$$R^2 = 0,9785$$

sendo \overline{FI} , \overline{E} e \overline{R} as variáveis fração entre inertes, grau de enchimento e velocidade de rotação codificadas, respectivamente $\left(\overline{FI} = \frac{FI-50}{20}; \overline{E} = \frac{E-30}{5}; \overline{R} = \frac{R-60}{10}\right)$.

O efeito da variável fração entre inertes (FI) foi significativo em todos os PCC avaliados, apresentando-se principalmente na forma linear, mas também contribuindo na forma quadrática e em algumas interações. De uma forma geral, essa variável contribuiu negativamente para o número de colisões verificados no tambor. Isso pode ser explicado pelo fato de que um maior valor de FI leva a uma maior proporção do inerte de maior diâmetro, partícula que, em uma dada configuração, apresenta um menor número de colisões. Com relação à força colisional, analisando o valor dos parâmetros de uma forma global, verificou-se que a fração entre inertes possuiu efeito positivo, aumentando o valor da resposta. O resultado é coerente fisicamente, uma vez que maiores valores de FI refletem em maior proporção dos inertes de maior diâmetro, os quais contribuem em choques mais intensos na configuração analisada.

As variáveis grau de enchimento (E) e rotação (R) apresentaram um impacto nas respostas semelhante ao que foi verificado para as partículas individuais. A primeira possui um efeito no sentido do aumento do número de colisões e na redução da força de colisão. A segunda demonstrou um efeito menor que as outras variáveis no número de colisões e, de maneira geral, repercutiu em um aumento dessa resposta, e na força colisional, uma análise geral dos parâmetros mostra um efeito positivo na resposta com o aumento do valor da variável.

Otimização multi-respostas utilizando a função desejabilidade:

A função desejabilidade (DERRINGER; SUICH, 1980) foi utilizada para maximizar simultaneamente o número de colisões e a força de colisão. O entendimento aqui é que o rendimento do processo de secagem em suporte de inertes está atrelado a uma combinação entre um maior número de colisões com uma maior força de contato. Um grande número de contatos expõe a película de material à abrasão de uma forma mais frequente e uma maior força de contato fornece a energia necessária para o desprendimento da camada e formação do pó de material que é arrastado pelo ar de secagem até o ciclone.

A otimização foi realizada em cada uma das 6 configurações avaliadas e está detalhadamente apresentada no Apêndice C. As condições operacionais ótimas obtidas para as respostas DEM são apresentadas na Tabela 10. É importante ressaltar que a função calcula as condições mais favoráveis em ambas as respostas, o que não significa dizer que seriam os valores máximos que as respostas poderiam apresentar individualmente.

Tabela 10 - Condições operacionais definidas através da otimização multiresposta das respostas DEM.

Configuração	Inertes Utilizados	Condições Otimizadas			Desejabilidade
		FI (%)	E (%)	R (RPM)	
C1	25,40 mm	-	37,07	69,90	0,506
C2	19,05 mm	-	37,07	72,73	0,624
C3	12,70 mm	-	37,07	59,24	0,871
C4	25,40 e 19,05 mm	83,63	38,41	49,21	0,744
C5	25,40 e 12,70 mm	63,45	38,41	61,12	0,418
C6	19,05 e 12,70 mm	54,48	38,41	66,72	0,504

De acordo com os resultados apresentados, o grau de enchimento (E) calculado pela otimização multivariada se situa no nível $+\alpha$ de cada planejamento (37,07% para as configurações C1, C2 e C3, e 38,41% para as configurações C4, C5 e C6). De acordo com a análise de efeitos dessa variável ao longo das simulações realizadas, seu alto valor atua no sentido de aumentar o número de colisões entre os inertes. A velocidade de rotação (R) calculada flutua sobre a faixa operacional (50 – 70 RPM), apresentando um valor particular em cada configuração.

Com relação às combinações (configurações C4, C5 e C6), especificamente, a variável fração entre inertes (FI) foi calculada no sentido de aumentar a proporção dos inertes de maior

diâmetro no tambor rotatório na condição ótima calculada ($FI > 50\%$). Enquanto o maior nível de enchimento atuou principalmente no sentido de elevar a frequência das colisões entre os inertes, a maior partícula insere colisões com uma magnitude de força maior.

Seis simulações foram realizadas nas condições definidas pela otimização multi-resposta no intuito de testar a previsibilidade do modelo. Os resultados da força de colisão e o número de colisões preditos pela otimização e simulados estão dispostos na Tabela 11.

Tabela 11 - Resultados simulados e preditos na condição otimizada.

Configuração	Número de Colisões (-)			Força de Colisão (N)		
	Preditos	Simulados	Erro (%)	Preditos	Simulados	Erro (%)
C1	32	32	$< 10^{-4}$	0,95	0,93	2,40
C2	72	74	3,33	0,58	0,56	3,07
C3	544	545	0,25	0,17	0,17	$< 10^{-4}$
C4	40	38	6,09	0,89	0,80	11,62
C5	190	197	3,40	0,30	0,30	$< 10^{-4}$
C6	269	268	0,27	0,25	0,25	$< 10^{-4}$

Observa-se uma boa concordância entre as respostas preditas pela função desejabilidade e as simulações realizadas, com um erro de, no máximo, 11,62%. Foram, então, realizadas seis corridas experimentais com a fração entre inertes (FI), enchimento (E) e velocidade de rotação (R) determinados pela otimização. A resposta experimental avaliada foi o rendimento de secagem, que é a razão entre a massa seca da polpa alimentada no secador rotatório e a massa seca obtida ao final da operação de secagem. A temperatura (T) foi mantida em 90°C em todos os seis testes de secagem, a qual segundo por Silva (2019) é o nível que resultou em um maior rendimento de secagem da polpa de camu-camu. Os resultados podem ser verificados na Tabela 12.

Tabela 12 - Rendimento calculado após a secagem em SRRI com as condições definidas por intermédio da simulação DEM e desejabilidade.

Configuração	Partículas Utilizadas	Rendimento (%)
C1	25,40 mm	71,10
C2	19,05 mm	71,57
C3	12,70 mm	75,83
C4	25,40 e 19,05 mm	75,00
C5	25,40 e 12,70 mm	86,66
C6	19,05 e 12,70 mm	82,98

O maior rendimento obtido (86,66 %) foi obtido aplicando a configuração C5, a qual utiliza partículas de 25,40 e 12,70 mm. Essa configuração se insere em uma condição intermediária com relação às respostas DEM, ao passo que não apresentou colisões tão intensas quanto a configuração C1 (partículas de 25,40 mm) (Figura 22), nem o maior valor de número de colisões dentre as configurações estudadas, posto ocupado pela configuração C3 (partículas de 12,70 mm) (Figura 23).

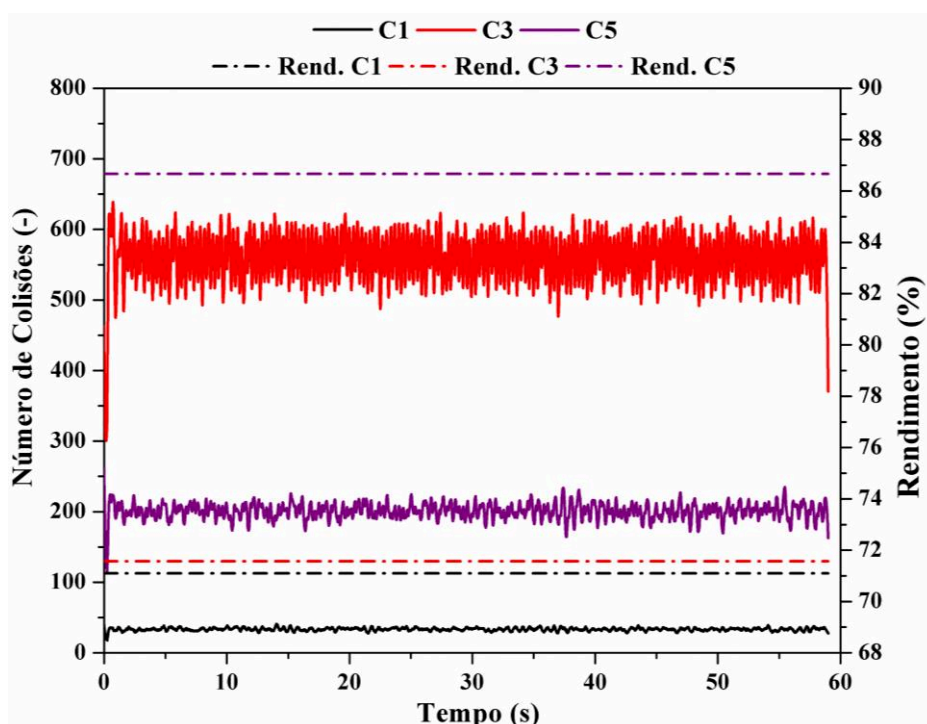


Figura 22 - Número de colisões e rendimento de secagem obtidos com as configurações C1, C3 e C5 para valores de enchimento, rotação e fração entre inertes definidos via desejabilidade.

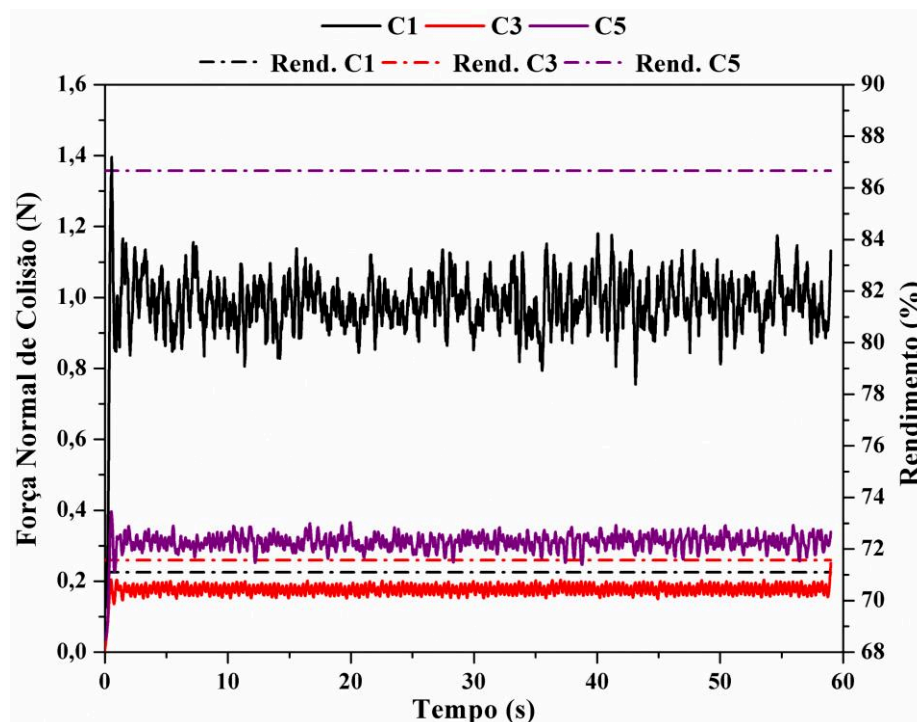


Figura 23 – Força normal de colisão e rendimento de secagem obtidos com as configurações C1, C3 e C5 para valores de enchimento, rotação e fração entre inertes definidos via desejabilidade.

Isso corrobora a tese que o rendimento de secagem não está atrelado somente a força ou frequência com que as partículas interagem isoladamente, mas sim a uma combinação entre os dois fatores. A configuração C5 evidencia que o rendimento se associa a uma maior frequência de colisões gerados pela utilização das partículas de 12,70 mm e uma maior força de colisão verificada no uso das partículas de 25,40 mm. O rendimento de 86,66 % encontrado é superior a outros trabalhos dispostos na literatura que utilizaram também o secador rotatório com recheio de inertes. Silva (2019) na secagem do camu-camu reportou 55,33% como o maior rendimento obtido, Cabrera-Padilha *et al.* (2014) encontrou, para secagem da pasta de banana, um rendimento de 72,90 % e Moura (2016), na secagem do resíduo de maracujá, encontrou a melhor condição de secagem com um rendimento de 73,50 %. Dessa forma, a partir da combinação de partículas de tamanho distintos e a maximização simultânea do número de colisões e força de colisão entre elas, foi possível obter a melhor performance desse tipo de secador com relação ao rendimento de secagem.

Diante disso, dado potencial de exploração da configuração de enchimento C5 (25,40 mm e 12,70 mm), ela foi utilizada em todos os testes de secagem realizados a posteriori no trabalho.

4.2 Caracterização da polpa de camu-camu

Os resultados obtidos na caracterização da polpa de camu-camu bem como aqueles reportados na literatura para esse material estão apresentados na Tabela 13. As análises foram realizadas no intuito de verificar o potencial do fruto e estabelecer uma base de comparação para o método de secagem empregado no trabalho.

Tabela 13- Caracterização da polpa de camu-camu e comparação com valores obtidos na literatura.

Análise Realizada	Resultado Obtido	Literatura	
Umidade (%)	86,07 ± 0,09% (polpa)	90,2 ± 0,3	Genovese <i>et al.</i> (2008)
	72,43 ± 0,97% (fruto)		
Atividade de Água (A _w) (-)	0,973 (polpa)	0,968	Silva (2019)
	0,965 (fruto)		
pH (-)	3,28 ± 0,03	2,81	Silva <i>et al.</i> (2005)
Densidade(g/cm ³)	1,422 ± 0,002	1,470	Silva (2019)
Acidez (ATT) (mg ac. cit/100 g b.s.)	20376,88 ± 176,46	24642,84	Silva (2019)
Teor de Ácido Ascórbico (AA) (mg/100 g b.s.)	5043,51 ± 203,78	1882 ± 43,2	Rufino <i>et al.</i> (2010)
		5980 ± 330	Carla <i>et al.</i> (2019)
		13756,79 ± 233,34	Ferreira <i>et al.</i> (2016)
Teor de Fenólicos Totais (TPC) (mg GAE/100 g b.s.)	1461,44 ± 4,65	1431,32 ± 61,54	Moraes-de-Souza (2011)
Teor de Flavonoides Totais (TFC) (mg rut./100g b.s.)	4,40 ± 0,19	19,2 ± 0,1	Chirinos <i>et al.</i> (2010)
Atividade Antioxidante (IC ₅₀) (µg/mL)	20,51 ± 0,10	20,7 ± 0,9	Myoda <i>et al.</i> (2015)

A polpa de camu-camu utilizada no estudo apresentou um elevado teor de umidade e, por conta disso, um elevado valor de atividade de água (0,973). Conforme descrito na literatura, valores de a_w maior que 0,9, levam a formação de soluções diluídas dos compostos orgânicos presentes na amostra, funcionando como substrato para a proliferação de microorganismos e favorecendo a ocorrência de reações químicas e enzimáticas (CELESTINO, 2010). A alta

perecibilidade causada por esse conjunto de fatores fazem da secagem uma etapa necessária ao aproveitamento do potencial da polpa de camu-camu.

A amostra apresentou um pH de 3,28, conferindo ao fruto uma característica muito ácida. Esse valor é ligeiramente superior àqueles encontrados por Castro *et al* (2018) e Myoda *et al.* (2015), os quais foram 2,51 e 2,64, respectivamente. Segundo Castro, Maddox & Imán (2018) a elevada acidez é uma característica da fruta e está relacionada ao alto conteúdo de ácido ascórbico e de compostos fenólicos ácidos, afetando sua palatabilidade e dificultando o consumo *in natura*.

A literatura apresenta grandes variações com relação à concentração de ácido ascórbico na polpa do camu-camu. Enquanto alguns trabalhos reportam concentrações da ordem de 1882 mg/100g de polpa (base seca – b.s.), outros apresentam um teor de 13756,79 mg/100g (b.s.) (RUFINO *et al.*, 2010; GONÇALVES, 2012; RIBEIRO *et al.*, 2015). O valor encontrado neste trabalho foi 5043,51 mg/100 g de polpa (b.s.), valor próximo ao reportado por Carla *et al.* (2019) de 5980 mg/100g (b.s.). Ressalta-se que o regulamento técnico sobre a ingestão diária recomendada (IDR) da ANVISA preconiza para adultos não-lactentes a ingestão de 45 mg de vitamina C (ANVISA, 2005), valor atendido por cerca de 0,89 g da polpa de camu-camu (em base seca).

Quanto aos teores de compostos bioativos, a polpa apresentou uma concentração de fenólicos totais de 1461,44 mg de GAE/100 g (b.s.), valor próximo ao encontrado nos trabalhos de Genovese *et al.* (2008), Moraes-de-Souza (2011), Myoda *et al.* (2015) e Villanueva-Tiburcio (2010), que oscilaram entre 862 a 1797 mg GAE/ 100g (b.s.). Segundo Vasco *et al.* (2008), tomando como referência o conteúdo total de fenólicos (TPC), a polpa de camu-camu pode ser classificada em alta capacidade antioxidante (> 1000 mg GAE/100 g b.s.).

Quanto aos flavonoides, a polpa apresentou uma concentração de 4,40 mg/100 g (b.s.), valor inferior àqueles reportados por Chirinos *et al.* (2010) e Maeda *et al.* (2006), 19,2 e 6,4 mg/100g (b.s.), respectivamente. Em termos comparativos, destaca-se que a ingestão diária recomendada de flavonoides é estimada na faixa de 20-200 mg/dia (BIRT; JEFFERY, 2013), confirmando o potencial de consumo da polpa *in natura*, na composição de alimentos, bebidas, e também na exploração pela indústria farmacêutica.

No que diz respeito à variabilidade encontrada nas concentrações dos compostos bioativos do camu-camu utilizado com relação à outros trabalhos da literatura, cabe destacar que a composição das frutas pode ser influenciada pela localização geográfica, clima, regime

pluvial, variedade da espécie, qualidade do solo, grau de amadurecimento, dentre outros fatores (SILVA *et al*, 2016).

A atividade antioxidante da polpa encontrada nesse trabalho foi 20,51 µg/mL de extrato. De acordo com Reynertson *et al.* (2005), os extratos podem ser classificados em quatro categorias: muito ativos- apresentam $IC_{50} < 50$ µg/mL; moderadamente ativos - $50 < IC_{50} < 100$ µg/ mL; ligeiramente ativos- $100 < IC_{50} < 200$ µg/mL; e inativos- > 200 µg/mL. Portanto, a polpa pode ser classificada como muito ativa, sendo uma fonte potencial de antioxidantes naturais.

4.3 Secagem da polpa de camu-camu em SRRI

A secagem da polpa de camu-camu foi realizada seguindo um planejamento composto central completo, com 4 variáveis e 2 réplicas no ponto central, totalizando 26 experimentos. Quanto às variáveis independentes, avaliou-se a temperatura (T), grau de enchimento (E), fração entre inertes (FI) e velocidade de rotação (R). Com relação às respostas experimentais, determinou-se o rendimento do processo, o teor de fenólicos e flavonoides totais (TPC e TFC, respectivamente), índice de inibição (IC_{50}) e teor de ácido ascórbico (AA). Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Resultados do planejamento composto central realizado para análise do teor de fenólicos (TPC), flavonoides (TFC), ácido ascórbico (AA), atividade antioxidante (IC50) e do rendimento na secagem da polpa de camu-camu.

Exp.	FI (%)	E (%)	R (RPM)	T (°C)	TPC (mg/100g)	TFC (mg/100g)	IC₅₀ (µg/mL)	AA (mg/100 g)	Rend (%)
1	30	25	50	50	488,59	1,76	50,12	2424,69	56,38
2	30	25	50	90	470,56	1,72	67,78	2344,75	73,40
3	30	25	70	50	484,38	1,76	44,72	2421,20	67,11
4	30	25	70	90	465,68	1,69	58,34	2385,26	76,13
5	30	45	50	50	483,54	1,78	25,37	2461,78	75,20
6	30	45	50	90	470,32	1,53	35,23	2315,68	84,79
7	30	45	70	50	483,32	1,79	26,66	2484,09	79,37
8	30	45	70	90	461,64	1,69	32,88	2336,44	80,67
9	70	25	50	50	485,36	1,58	29,28	2497,36	57,40
10	70	25	50	90	450,09	1,36	45,95	2328,75	70,74
11	70	25	70	50	472,00	1,60	42,73	2444,24	57,40
12	70	25	70	90	452,85	1,41	51,86	2357,16	69,92
13	70	45	50	50	493,30	1,67	56,48	2440,94	71,86
14	70	45	50	90	469,11	1,28	69,37	2347,51	73,37
15	70	45	70	50	487,23	1,69	45,20	2410,46	72,97
16	70	45	70	90	462,81	1,43	58,23	2302,17	83,83
17	20,35	35	60	70	455,21	1,69	50,32	2344,37	81,24
18	79,65	35	60	70	446,74	1,47	51,58	2393,06	76,22
19	50	20,17	60	70	465,95	1,70	54,34	2326,49	61,96
20	50	49,83	60	70	463,03	1,63	55,24	2337,68	82,53
21	50	35	45,17	70	479,66	1,59	52,97	2323,34	76,00
22	50	35	74,83	70	470,88	1,57	56,75	2307,32	75,25
23	50	35	60	40,35	479,70	1,76	35,06	2516,56	68,54
24	50	35	60	99,65	457,24	1,40	65,70	2321,04	79,26
25(C)	50	35	60	70	463,36	1,66	53,10	2332,56	77,04
26(C)	50	35	60	70	461,45	1,68	52,29	2304,79	76,26

Em todos os 26 testes de secagem realizados, foram obtidas informações acerca da atividade de água do pó produzido no secador rotatório com recheio de inertes (SRRI) como função da umidade do material. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 24.

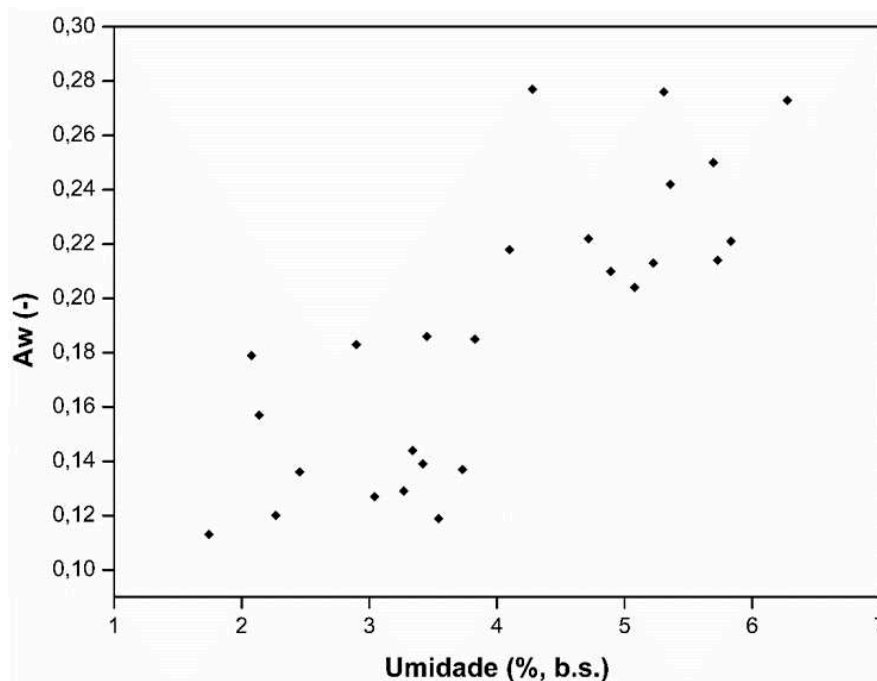


Figura 24- Atividade de água em função do teor de umidade do pó produzido (base seca) após a secagem em SRRI.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 24, é possível observar a relação de proporcionalidade entre a atividade de água e a umidade do produto. Quanto mais úmido o material, maior a razão entre a pressão de vapor da água residual na amostra e a pressão de saturação, resultando em um maior valor de atividade de água. Em todos os ensaios de secagem, a atividade de água do pó produzido manteve-se inferior à 0,28. Segundo Celestino (2010), nas regiões onde $a_w < 0,3$ atinge-se uma zona de absorção primária, na qual as moléculas de água estão fortemente ligadas ao alimento, inibindo o desenvolvimento de microorganismos por não ser utilizada para dissolver os componentes orgânicos, e o não-favorecimento de reações degradativas de natureza química e enzimática.

4.3.1 Rendimento de secagem

Dentre todos os experimentos realizados, obteve-se uma faixa de rendimento de secagem de 56,38% a 84,79%. Em termos comparativos, Honorato (2006) reportou rendimentos de 32,10% a 83,19 % na secagem do cefalotórax do camarão; Moura (2009) obteve

valores que flutuaram entre 46,0% e 73,5% na secagem dos resíduos de maracujá, Cabrera-Padilha *et al.* (2014), na condição otimizada de secagem da pasta de banana, reportou um rendimento de 72,9% e Silva (2019) apresentou rendimento de 55,33 % na melhor condição de secagem da polpa de camu-camu, todos eles utilizando o secador rotatório com recheio de inertes.

A perda de rendimento ocorre pelo acúmulo de massa nas regiões de conexão entre as partes móveis e fixas do secador, pelo arraste de finos no *overflow* do ciclone e, principalmente, pela adesão na superfície dos inertes, suspensores e na parede interna do tambor (SILVA, 2019). Esse acúmulo está intimamente ligado às diferentes condições de secagem utilizadas. Em algumas situações, o processo de remoção da umidade da polpa, formação de pó e elutriação é facilitado, conduzindo a altos valores de rendimento (Exp.6 - 84,79%; Exp.16 – 83,83%; Exp. 20 - 82,53%). Outras, no entanto, há uma maior dificuldade na remoção de umidade da polpa alimentada, produzindo aglomerados de material na estrutura interna do secador e nos inertes (Exp.1 - 56,38%; Exp.7 – 57,40%; Exp.11 – 57,40%).

Na Tabela 15 os experimentos do planejamento realizados nos pontos ortogonais (17 a 24) e central (25 e 26) são apresentados. Com eles, é possível verificar qualitativamente a variação do rendimento de secagem com base na alteração do nível de uma variável, mantendo as demais em valores constantes.

Tabela 15 -Valores de rendimento obtidos nos pontos ortogonais e centrais do planejamento composto central completo.

Exp.	FI (%)	E (%)	R (RPM)	T(°C)	Rend. (%)
17	20,35	35	60	70	81,24
18	79,65	35	60	70	76,22
19	50	20,17	60	70	61,96
20	50	49,83	60	70	82,53
21	50	35	45,17	70	76,00
22	50	35	74,83	70	75,25
23	50	35	60	40,35	68,54
24	50	35	60	99,65	79,26
25(C)	50	35	60	70	77,04
26(C)	50	35	60	70	76,26

Os valores obtidos nos experimentos 25-26 (réplicas no ponto central) indicam uma baixa variabilidade nos testes experimentais, refletindo em uma boa reprodutibilidade experimental. Ao comparar os experimentos 17 e 18, nota-se que as variáveis independentes foram mantidas em um mesmo nível, a exceção da fração entre inertes (FI) que sofreu passou de 20,35% a 79,65%. Essa variação resultou em uma queda de rendimento em torno de 5 pontos percentuais, sugerindo que uma maior proporção de partículas menores (para essa configuração) atua no sentido de aumentar o rendimento do processo.

O aumento no grau de enchimento (E) do tambor, conforme verificado nos experimentos 19 e 20, impactou consideravelmente o valor de rendimento, configurando um ganho de cerca de 21 pontos percentuais. Um comportamento similar é verificado para a variável temperatura, que causou um aumento de 11 pontos percentuais no rendimento, quando foi utilizado 99,65°C (exp. 19) em relação à condição de 40,35°C (exp. 23). A rotação, segundo os valores apresentados, pouco impactou na resposta experimental, sendo que o aumento de 45,17 RPM (exp.21) para 74,83 RPM (exp. 22) reduziu o rendimento na ordem de 0,75%.

A análise da dependência da resposta com relação às condições operacionais do tambor deve ser estendida para os 26 experimentos do planejamento. Para isso, uma equação para predição do rendimento em função das quatro variáveis independentes foi ajustada aos dados experimentais utilizando técnicas de regressão. A partir dessa equação, os efeitos dessas variáveis na resposta puderam ser quantificados. Na Equação 4.13 pode ser verificado o modelo reduzido de regressão ($R^2 = 0,9115$), o qual contabiliza apenas as variáveis significativas com um nível de significância (α) de 0,10.

$$\begin{aligned} \text{Rendimento}(\%) = & 77,28 - 2,11 \cdot \overline{FI} + 6,08 \cdot \overline{E} - 2,88 \cdot \overline{E}^2 + 1,13 \cdot \overline{R} + 4,46 \cdot \overline{T} \\ & - 2,13 \cdot \overline{T}^2 - 1,78 \cdot \overline{E} \cdot \overline{T} \end{aligned} \quad (4.13)$$

sendo \overline{FI} , \overline{E} , \overline{R} e \overline{T} as variáveis fração entre inertes, grau de enchimento, velocidade de rotação e temperatura codificadas, respectivamente $\left(\overline{FI} = \frac{FI-50}{20}; \overline{E} = \frac{E-30}{5}; \overline{R} = \frac{R-60}{10}; \overline{T} = \frac{T-70}{20} \right)$.

Com base na equação apresentada, todas as variáveis apresentaram efeitos lineares significativos, o que reflete na operação do equipamento, uma vez que o aumento do rendimento passa pela correta seleção de todas as variáveis. Destacam-se, dentre as quatro, o grau de enchimento (E) e temperatura (T), que além da contribuição linear, também apresentaram os termos quadráticos e de interação estatisticamente significativos. A fim de visualizar os efeitos,

as superfícies de resposta avaliando o rendimento de secagem em função das variáveis independentes ao longo da faixa experimental são apresentadas na Figura 25.

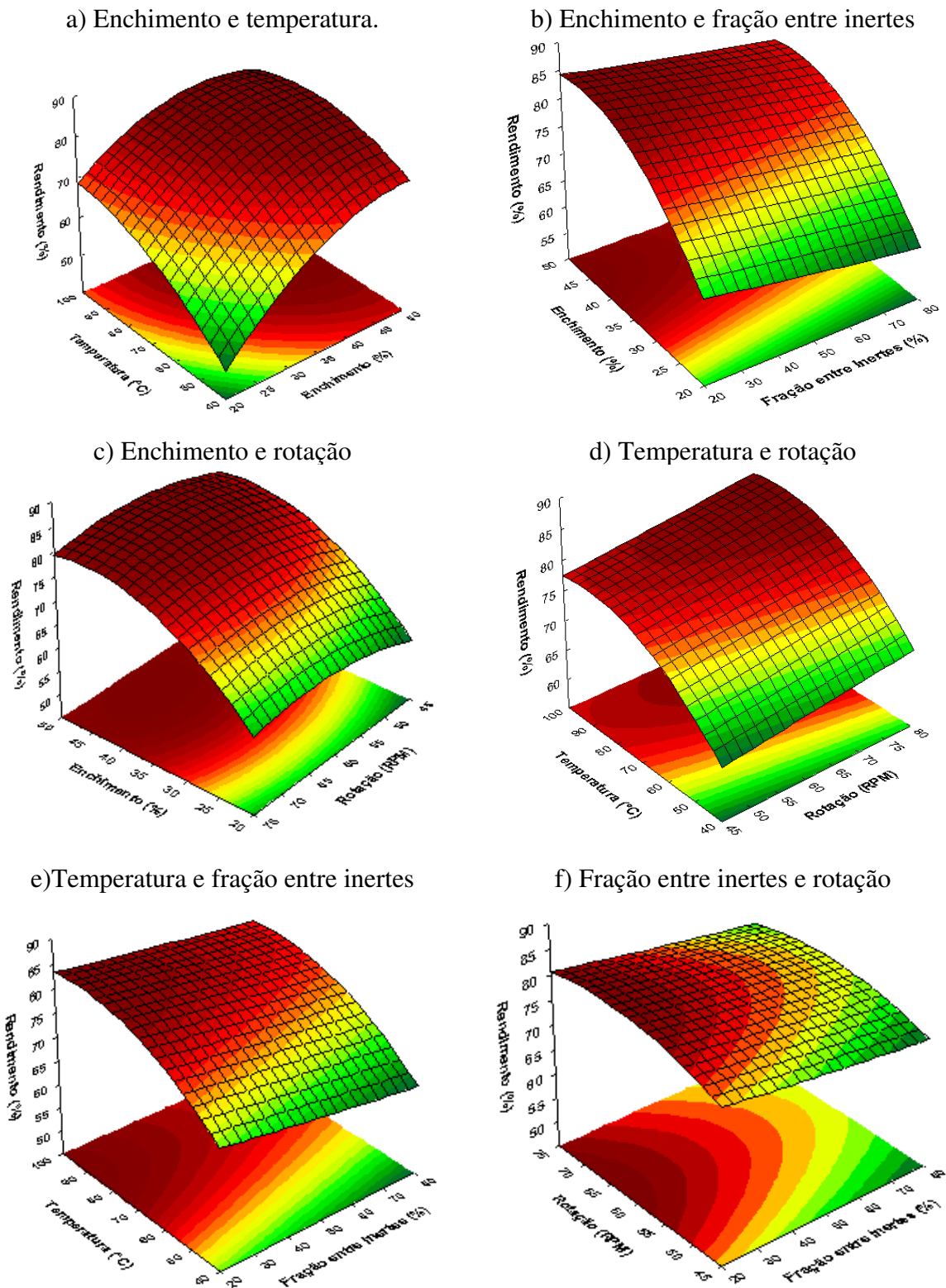


Figura 25 - Superfícies de resposta para o rendimento de secagem em função das variáveis independentes.

Observa-se que os maiores rendimentos são obtidos nas condições de maior enchimento do tambor, como pode ser verificado na Figura 25a, 25b e 25c. Na região experimental explorada, um elevado valor de enchimento conduziu a maiores rendimentos do processo. Fazendo-se valer dos resultados obtidos com a modelagem Lagrangeana, a principal contribuição de um maior grau de enchimento se dá com a intensificação do número de colisões entre as partículas, as quais ao interagir favorecem a remoção do material de sua superfície e das paredes do tambor. Além disso, um maior enchimento também resulta na maximização da superfície de contato entre o material e o ar de secagem (BURJAILI, 1996).

A temperatura e o grau de enchimento foram as variáveis que apresentaram maior efeito sobre o rendimento de secagem, o que pode ser confirmado na Figura 25a, onde é possível verificar grandes variações do rendimento para os diferentes valores assumidos por ambas as variáveis. Um aumento no nível de temperatura conduz a um maior rendimento de secagem (Figura 25d e Figura 25e), uma vez que esse aumento conduz a uma maior taxa de evaporação da umidade na polpa e a uma redução da aglomeração de material semi-úmido, principalmente na região de alimentação (BURJAILI, 1996; HONORATO, 2006). Nas situações onde a variável aproxima-se do nível $+ \alpha$ (99,65°C), já seja possível observar uma tendência de declínio do rendimento (efeito não-linear). Essas observações corroboram com o trabalho de Silva (2019), que identificou um aumento no rendimento de secagem da polpa de camu-camu em SRRI até a temperatura de 90°C, além dela, percebeu-se o declínio da resposta.

A rotação e a fração entre inertes apresentaram um efeito menor no rendimento que as outras duas variáveis supracitadas. Como é possível observar na Figura 25d, o rendimento apresentou um leve crescimento com o aumento da velocidade de rotação. Esse aumento, ainda que reduzido, está relacionado ao favorecimento dos choques entre os inertes, tanto em relação ao número de colisões quanto em relação à força de colisão, como verificado nas simulações DEM realizadas, o que favorece a formação do pó.

Observa-se, através da Figura 25b e Figura 25e, que um menor valor de fração entre inertes conduziu a um maior rendimento do processo (para essa configuração de inertes). Isso reflete no tipo de enchimento do tambor, que nesse caso conduz a uma maior proporção do inerte de menor diâmetro (12,70 mm). Essa configuração, conforme visto pelas simulações DEM, agrega, principalmente, em um maior número de colisões na operação do tambor rotatório, prevalecendo sobre o efeito da força de colisão. A ocorrência eventual de colisões mais intensas pela interação com o inerte de diâmetro de 25,40 mm, tende a auxiliar na fragmentação do filme de material seco.

4.3.2 Compostos bioativos

Além do rendimento, verificou-se também o impacto da temperatura (T), enchimento (E), fração entre inertes (FI) e rotação (R) no conteúdo de compostos bioativos presentes no pó de camu-camu produzido. Esses compostos foram avaliados em termos do teor de fenólicos totais (TPC – mg_{GAE}/100g), flavonoides totais (TFC - mg_{rutina}/100g) e ácido ascórbico (AA – mg/100g), além da capacidade antioxidante (IC₅₀ – µg/100g). Os resultados obtidos na execução do planejamento composto central são apresentados no Apêndice D.

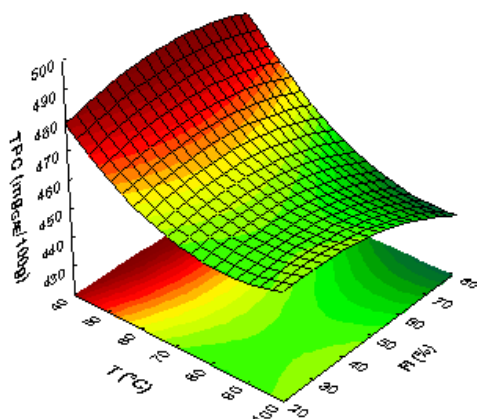
Os efeitos das variáveis independentes nas quatro respostas (TPC, TFC, AA e IC₅₀) foram quantificados utilizando técnicas de regressão. Os valores do coeficiente de correlação (R²) para os modelos obtidos mantiveram-se entre 0,8866 e 0,9703, indicando que as equações empíricas se mostraram apropriadas para descrever o projeto experimental. Os resíduos do modelo de regressão apresentaram-se normal e aleatoriamente distribuídos.

Os resultados obtidos para o teor de fenólicos (TPC) são apresentados em termos do modelo reduzido de regressão (Equação 4.14; R² = 0,9423), o qual contabiliza as variáveis significativas em um nível (α) de 10%, e das superfícies de resposta apresentadas na Figura 26.

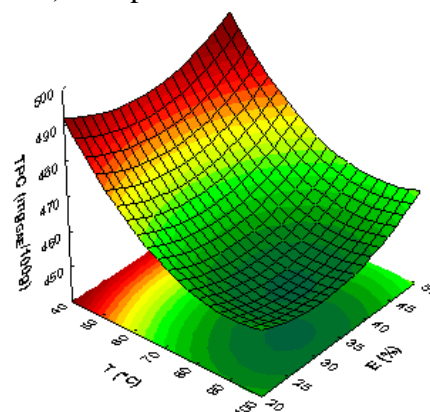
$$\begin{aligned} TPC = & 458,85 - 2,34.\overline{FI} - 2,68.\overline{FI}^2 + 1,83.\overline{E} + 3,45.\overline{E}^2 - 2,64.\overline{R} + 8,36.\overline{R}^2 \\ & - 10,19.\overline{T} + 5,27.\overline{T}^2 + 3,90.\overline{FI}.\overline{E} - 1,96.\overline{FI}.\overline{T} \end{aligned} \quad (4.14)$$

sendo \overline{FI} , \overline{E} , \overline{R} e \overline{T} as variáveis fração entre inertes, grau de enchimento, velocidade de rotação e temperatura codificadas, respectivamente $\left(\overline{FI} = \frac{FI-50}{20}; \overline{E} = \frac{E-30}{5}; \overline{R} = \frac{R-60}{10}; \overline{T} = \frac{T-70}{20}\right)$.

a) Temperatura e fração entre inertes



b) Temperatura e enchimento



c) Temperatura e rotação

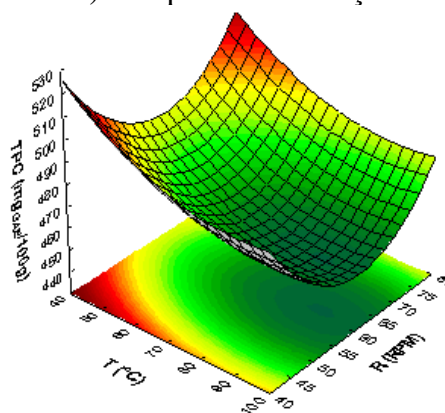


Figura 26 - Superfícies de resposta para o teor de fenólicos totais (TPC) em função das variáveis independentes.

De acordo com os resultados apresentados no modelo, as quatro variáveis estudadas apresentaram influência nos resultados obtidos, com efeitos contabilizados na forma linear, quadrática e combinada (FI e T; FI e E). O maior efeito foi verificado na variável temperatura (T), a qual contribuiu negativamente para o TPC. Altos níveis dessa variável resultaram em uma maior degradação dos compostos fenólicos, o que está associado à condensação oxidativa ou decomposição de compostos voláteis pela temperatura do ar de secagem (NÓBREGA *et al.*, 2015). Isso corrobora as observações realizadas por Silva (2019) na secagem da microalga *spirulina platensis* em SRRI e Silva (2018b), na secagem do resíduo de acerola em secador roto-aerado. Apesar de estatisticamente significativas, o efeito das demais variáveis foi inferior àquele verificado para a temperatura do ar de secagem.

Ao analisar as demais variáveis, verificou-se que menores valores da fração entre inertes (FI) e maiores valores de enchimento (E) conduzem a uma maior concentração de compostos fenólicos no produto final obtido. Essas condições estão associadas a uma colisão

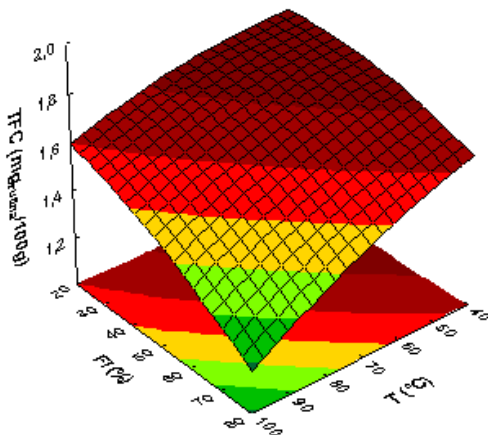
menos intensa das partículas durante a operação do equipamento, sugerindo que a menor degradação do bioativo tem relação com menores forças de colisão das partículas inertes. Ainda assim, é importante frisar que o efeito da temperatura foi bem superior ao efeito das demais variáveis (Figura 26).

Com relação aos compostos flavonoides, os resultados da regressão são apresentados através do modelo reduzido (Equação 4.15, $R^2 = 0,9126$) e das superfícies de resposta (Figura 27). Os resíduos do modelo de regressão apresentaram-se normal e aleatoriamente distribuídos.

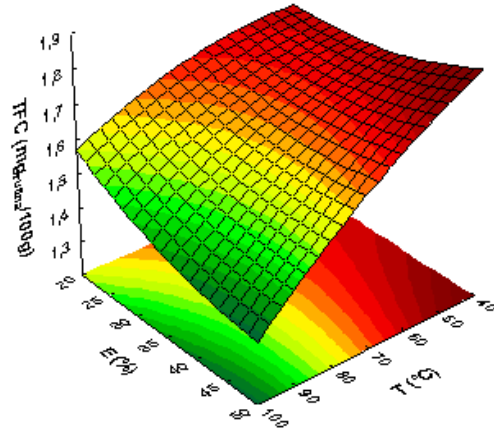
$$TFC = 1,60 - 0,09 \cdot \bar{FI} - 0,10 \cdot \bar{T} + 0,02 \cdot \bar{FI} \cdot \bar{E} - 0,03 \cdot \bar{FI} \cdot \bar{T} - 0,03 \cdot \bar{E} \cdot \bar{T} \quad (4.15)$$

sendo \bar{FI} , \bar{E} , \bar{R} e \bar{T} as variáveis fração entre inertes, grau de enchimento, velocidade de rotação e temperatura codificadas, respectivamente $\left(\bar{FI} = \frac{FI-50}{20}; \bar{E} = \frac{E-30}{5}; \bar{R} = \frac{R-60}{10}; \bar{T} = \frac{T-70}{20}\right)$.

a) Temperatura e fração entre inertes



b) Temperatura e enchimento



c) Temperatura e rotação

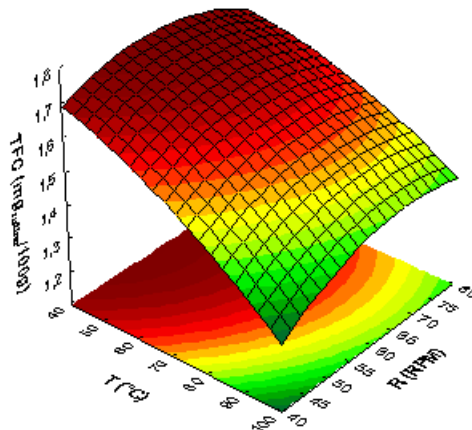


Figura 27 - Superfícies de resposta para o teor de flavonoides totais (TFC) em função das variáveis independentes.

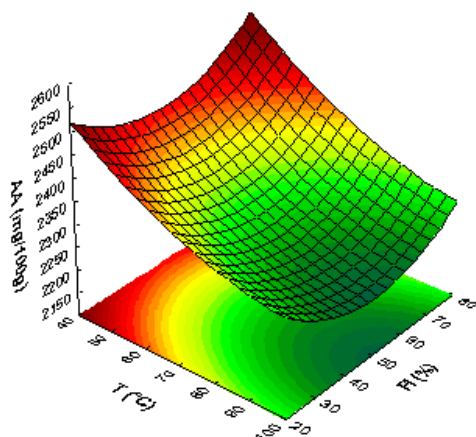
Assim como observado para os fenólicos, a temperatura apresentou o maior efeito na resposta experimental. O aumento do teor de flavonoides no produto é obtido utilizando, principalmente, menor temperatura durante a secagem e uma menor fração entre inertes (Figura 27a). Enquanto os menores níveis de temperatura reduzem a degradação desse bioativo, a menor fração de inertes está associada a uma menor força de colisão. Isso corrobora as observações realizadas para os compostos fenólicos (TPC), que também apresentou uma relação entre a menor intensidade de colisão e a maior preservação dos bioativos. As demais variáveis apresentaram um efeito menor na resposta experimental avaliada, de maneira que a rotação não possuiu termos estatisticamente significativos e o enchimento apenas foi contabilizado em interação com as variáveis que apresentaram maior efeito no geral (FI e T).

Com relação ao teor de ácido ascórbico obtido, os resultados da regressão são apresentados através do modelo reduzido (Equação 4.16, $R^2 = 0,8872$) e de algumas superfícies de resposta (Figura 28).

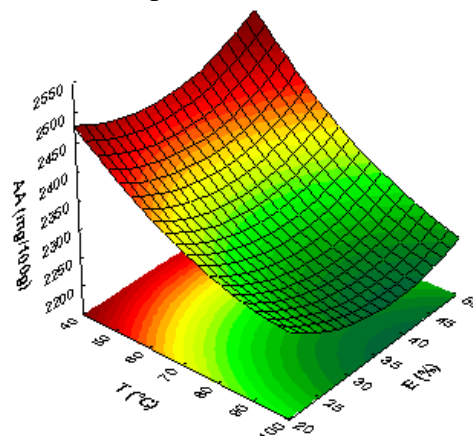
$$AA = 2322,39 - 23,59.\overline{FI}^2 - 56,72.\overline{T} - 46,38.\overline{T}^2 - 11,28.\overline{FI}.\overline{R} \quad (4.16)$$

sendo \overline{FI} , \overline{E} , \overline{R} e \overline{T} as variáveis fração entre inertes, grau de enchimento, velocidade de rotação e temperatura codificadas, respectivamente $\left(\overline{FI} = \frac{FI-50}{20}; \overline{E} = \frac{E-30}{5}; \overline{R} = \frac{R-60}{10}; \overline{T} = \frac{T-70}{20}\right)$.

a) Temperatura e fração entre inertes



b) Temperatura e enchimento



c) Temperatura e rotação

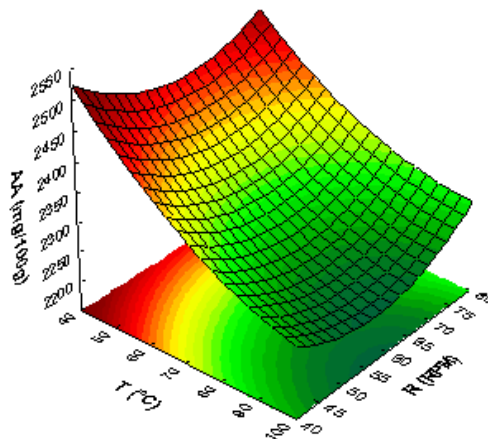


Figura 28 - Superfícies de resposta para o teor de ácido ascórbico (AA) em função das variáveis independentes.

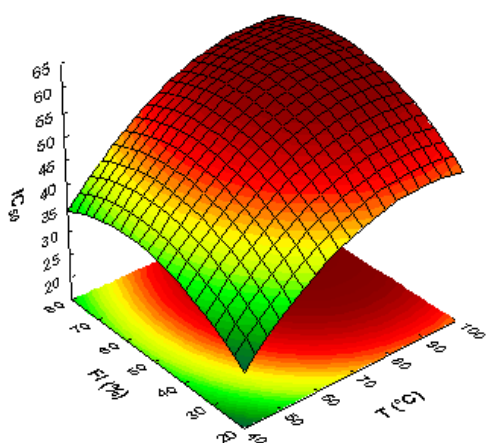
Os resultados apresentados indicam uma alta sensibilidade do bioativo nas condições de alta temperatura utilizadas. Isso pode ser evidenciado no valor dos parâmetros do modelo estimados para essa variável que, além de apresentarem os maiores coeficientes, contribuem de forma negativa à resposta experimental. Alguns trabalhos também evidenciaram uma maior degradação desse composto quando submetido à temperaturas de secagem mais elevadas (DA SILVA; PINEDO; KIECKBUSCH, 2007; FUJITA *et al.*, 2013; NÓBREGA *et al.*, 2015). Nota-se, também, assim como verificado para os compostos fenólicos e flavonoides, TPC e TFC, respectivamente, que menores valores de FI contribuem à manutenção do bioativo no produto obtido, no sentido da menor força de colisão evidenciada nessas condições.

A atividade antioxidante, mensurada em termos do índice de inibição (IC_{50}) tem os resultados da regressão dispostos em termos do modelo reduzido (Equação 4.17; $R^2 = 0,8283$) e de algumas superfícies de resposta apresentando o comportamento das variáveis significativas

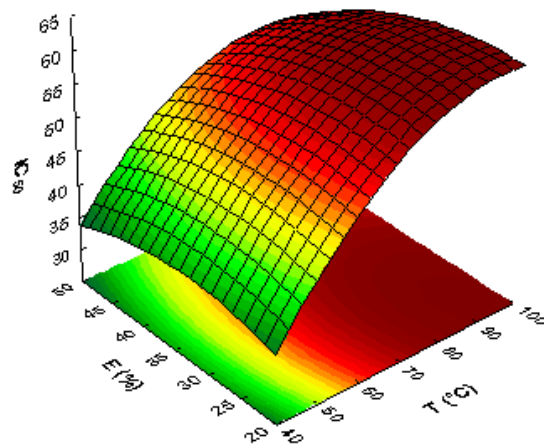
(Figura 29). Vale ressaltar que a atividade antioxidante do material é inversamente proporcional à magnitude do índice de inibição. Dessa forma, quanto menor o valor do IC₅₀, maior a capacidade do produto em atuar contra os radicais livres.

$$IC_{50} = 53,85 + 2,93.\overline{FI} - 3,12.\overline{FI}^2 + 7,08.\overline{T} - 3,38.\overline{T}^2 - 10,01.\overline{FI}.\overline{E} \quad (4.17)$$

a) Temperatura e fração entre inertes



b) Temperatura e enchimento



c) Temperatura e rotação

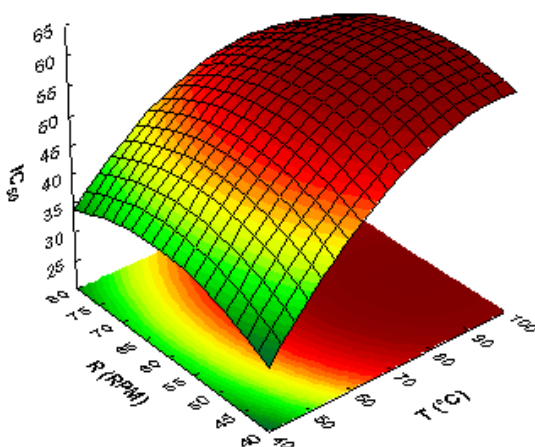


Figura 29 - Superfícies de resposta para o índice de inibição IC₅₀ (μg/mL) em função das variáveis independentes.

Observa-se que a temperatura e a fração entre inertes foram estatisticamente significativas na resposta em relação aos seus termos lineares e quadráticos. A variável enchimento foi computada somente como um fator de interação (FI e E). Observa-se que a temperatura apresentou um efeito no sentido do aumento do valor do índice de inibição em grande parte da região experimental avaliada, o que acaba por reduzir, dessa forma, a atividade antioxidante do produto. Essa dependência também foi verificada no trabalhos de Fujita *et al.*

(2013) e Nóbrega *et al.* (2015). Com relação à fração entre inertes (FI), nota-se que os menores valores da variável favorecem a capacidade antioxidante do produto (Figura 29a), ressaltando que a situação de maior força de colisão tende a ser mais degradante à atividade antioxidante do material produzido.

Verifica-se que as condições de secagem que preservam a capacidade antioxidante (menor valor do índice IC₅₀) do material também atuam no sentido manter um maior conteúdo de bioativos no produto obtido, principalmente com relação a variável temperatura. Esse resultado corrobora a correlação entre o teor de fenólicos, flavonoides e ácido ascórbico do material com a sua capacidade antioxidante (GENOVESE; PINTO; SCHMIDT, 2008; RUFINO *et al.*, 2010; BABA; MALIK, 2014).

Em todos os experimentos de secagem realizados, a maior concentração de fenólicos observada foi 488,59 mg_{GAE}/100g (Experimento 1); a maior concentração de flavonoides foi 1,79 mg_{rutina}/100g (Experimento 7); o maior teor de ácido ascórbico obtido foi 2516,56 mg/100g (Experimento 23); e a maior capacidade antioxidante, 25,37 µg/100g (Experimento 5). A menor concentração de fenólicos foi 457,24 mg_{GAE}/100g (Experimento 24); menor TFC obtido foi 1,43 mg_{rutina}/100g (Experimento 16); menor teor de AA foi 2121,04 mg/100g (Experimento 24); e a menor capacidade antioxidante foi 65,70 µg/100g (Experimento 24). Tais valores são ilustrados na Figura 30, comparando-os com os teores de bioativos verificados na polpa de camu-camu in natura.

Nota-se que os experimentos nos quais os compostos bioativos apresentaram maior prejuízo foram realizados nos níveis +1 (90°C) e +α (99,65°C) da variável temperatura. O experimento 24, por exemplo, que apresentou as concentrações mínimas de fenólicos totais (TPC), ácido ascórbico (AA) e capacidade antioxidante (IC₅₀), foi realizado com uma condição de temperatura de 99,65°C. Isso reforça o impacto que essa variável tem sobre a degradação dos compostos bioativos na secagem em SRRI.

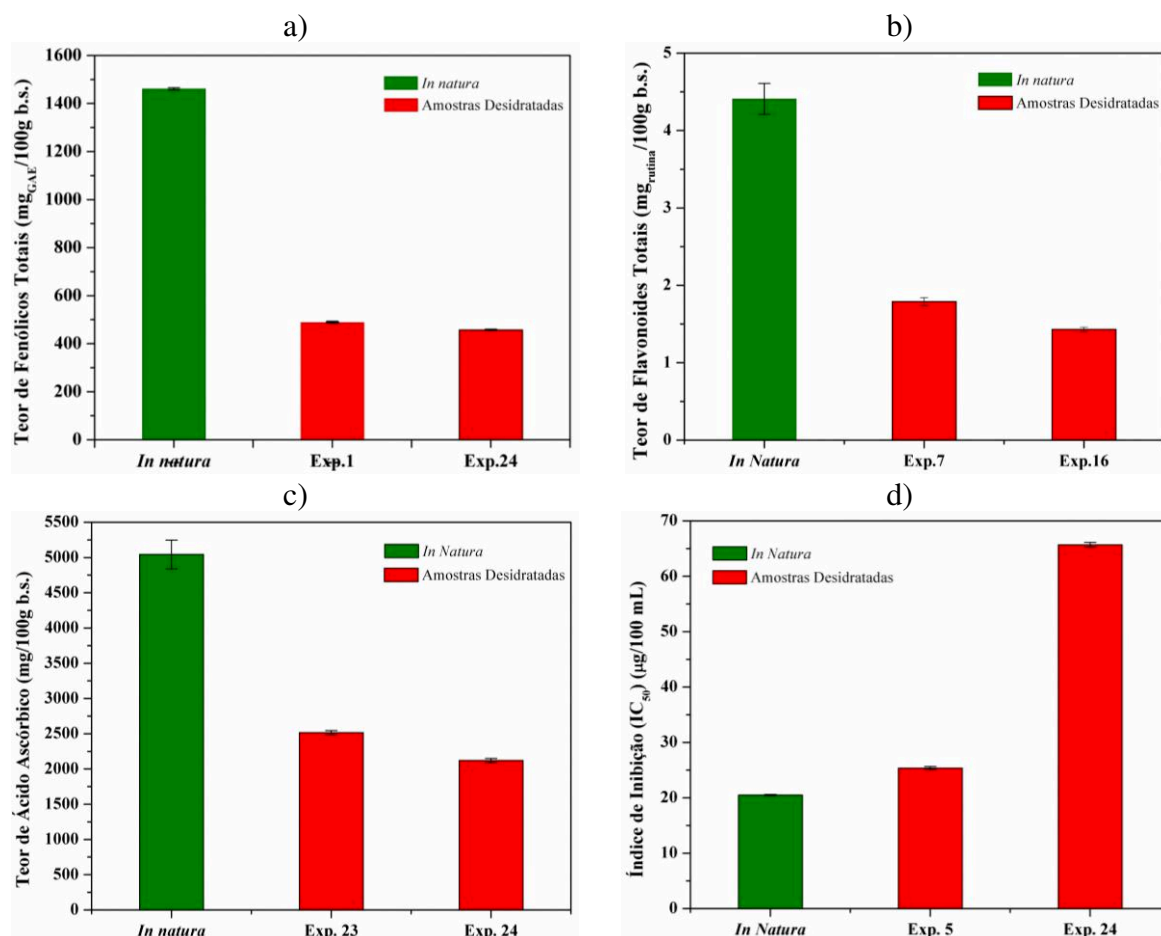


Figura 30 - Comparação entre os teores de compostos bioativos da polpa de camu-camu *in natura* e após a secagem em SRRI - a) TPC, b) TFC, c) AA, d) IC₅₀.

Com essas informações, tomando como referência a concentração dos compostos bioativos encontrados na polpa de camu-camu *in natura*, destaca-se que, nas situações de maior degradação, o teor de fenólicos totais (TPC) apresentou concentração cerca de 3,2 vezes menor (Fig. 30a) e o teor de flavonoides totais (TFC) foi reduzido em, aproximadamente, 3 vezes (Fig. 30b). O conteúdo de ácido ascórbico (AA), por sua vez, foi reduzido 2,5 vezes (Fig. 30c) e o índice de inibição (IC₅₀) um aumento de 3,2 vezes. Vale ressaltar que esse índice é inversamente proporcional à capacidade antioxidante do material em análise, logo é possível inferir que o produto obtido na situação de maior prejuízo à atividade antioxidante (Exp. 24) teve sua atividade reduzida cerca de 3,2 vezes.

O material seco, segundo classificação apresentada no trabalho de Reynertson; Basile; Kennelly (2005) para a atividade antioxidante, em grande parte dos experimentos realizados pôde ser classificado como muito ativo (IC₅₀ < 50 µg/mL), e nas condições nas quais houve maior perda da capacidade antioxidante, pôde ser definido como moderadamente ativos (50 <

$IC_{50} < 100 \mu\text{g/mL}$). Com relação ao teor de fenólicos, o produto obtido apresentou maiores concentrações que aquelas verificadas em frutas comumente consumidas no mercado, como o caju ($234 \pm 11 \text{ mg}_{\text{GAE}}/100\text{g}$), morango ($229 \pm 00 \text{ mg}_{\text{GAE}}/100\text{g}$), goiaba ($156 \pm 6 \text{ mg}_{\text{GAE}}/100\text{g}$), manga ($60 \pm 26 \text{ mg}_{\text{GAE}}/100\text{g}$) (VASCO; RUALES; KAMAL-ELDIN, 2008; MESQUITA *et al.*, 2012).

Com relação ao teor de ácido ascórbico, o produto desidratado apresentou concentração superior à maioria das frutas e polpa de frutas comercializadas. A acerola, por exemplo, reconhecida por seu alto conteúdo dessa vitamina, apresentou concentração entre $1.336,42 \pm 18,45 \text{ mg}/100\text{g}$ e $1.823,52 \pm 72,58 \text{ mg}/100\text{g}$ quando analisada *in natura*, e como polpa congelada, o teor de vitamina C variou entre $1.298,14 \pm 9,62 \text{ mg}/100\text{g}$ e $1.442,07 \pm 26,44 \text{ mg}/100\text{g}$ segundo trabalho desenvolvido por Mesquita *et al.* (2012). Utilizando o secador rotatório com recheio de inertes, mesmo na condição menos favorável, o produto ainda apresentou concentração de vitamina C da ordem de $2121,04 \pm 27,76 \text{ mg}/100\text{g}$.

4.3.3 Otimização Multiresposta

Com o objetivo de determinar as condições operacionais que aliassem um maior rendimento do processo de secagem com a menor degradação dos compostos orgânicos bioativos presentes no camu-camu, realizou-se uma otimização multi-resposta utilizando a técnica da desejabilidade. O método considera as respostas obtidas experimentalmente (TPC, TFC, AA, IC_{50} , Rendimento) e procura determinar valores das variáveis independentes que favoreçam as cinco respostas simultaneamente, maximizando os bioativos (TPC, TFC e AA) e o rendimento de secagem, e minimizando o índice IC_{50} (maximizando a atividade antioxidante). A análise realizada é apresentada na Figura 31 e os resultados obtidos com os níveis ótimos das variáveis independentes são apresentados na Tabela 16.

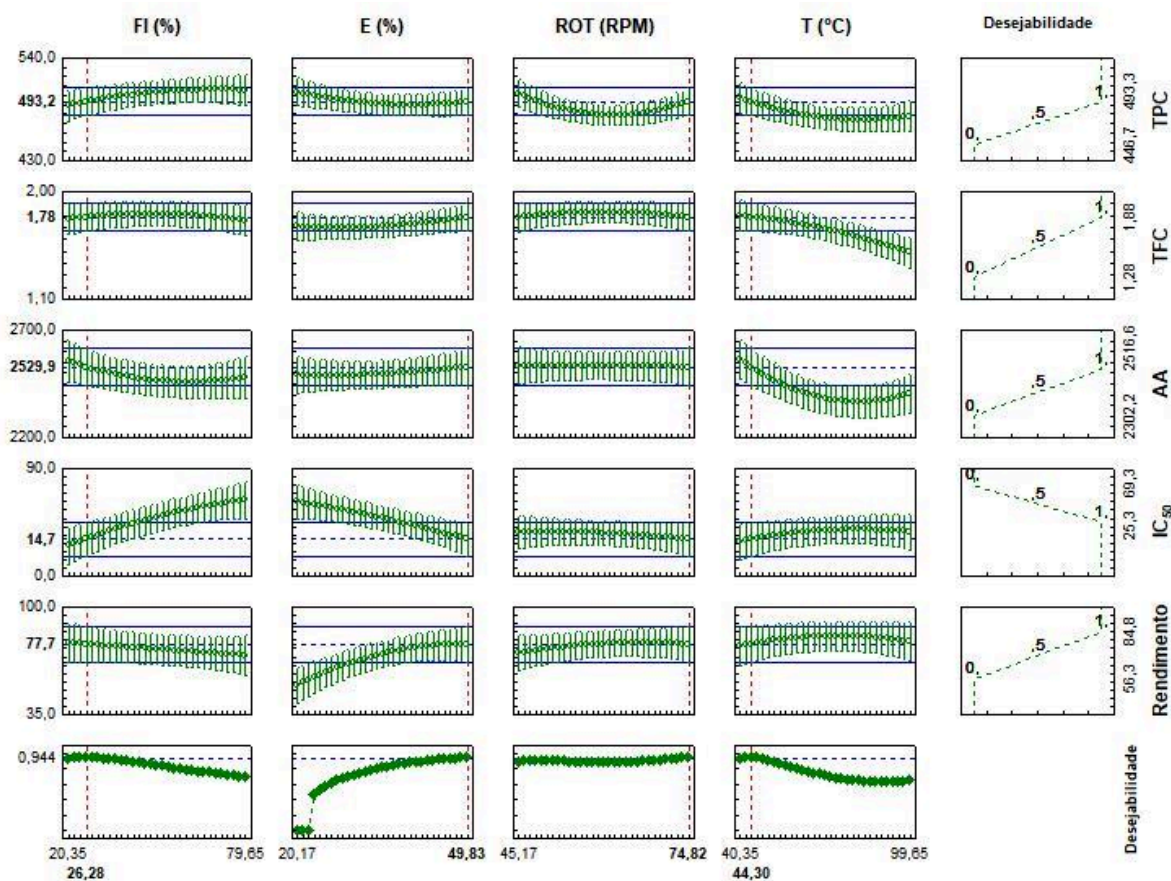


Figura 31 - Análise de desejabilidade aplicada nos resultados do planejamento da secagem da polpa de camu-camu em SRRI.

Tabela 16 – Condições ótimas encontradas pela aplicação da função desejabilidade para o planejamento de secagem em SRRI.

Variável Independente	FI (%)	E (%)	R (RPM)	T(°C)
Valor calculado	26,28	49,83	74,82	44,30
Desejabilidade	0,944			

Com os resultados obtidos é possível verificar que se determinou uma fração entre inertes (FI) próxima ao nível mínimo da variável (20,35%) e o grau de enchimento no maior nível explorado na região experimental (49,83%). Essa combinação explora uma situação de maior colisão entre os inertes, como verificado nas simulações DEM (alto enchimento - maior frequência de colisão; menor FI - maior proporção do inerte de 12,70 mm). A velocidade de rotação foi calculada no maior nível, situação que se verificou favorável ao rendimento de secagem. Como foi observado, os compostos bioativos apresentaram alta sensibilidade com a temperatura de processo, esta foi calculada no sentido do menor nível da variável (40,35°C).

De maneira geral, pode-se concluir que o secador rotatório com recheio de inertes foi eficiente na secagem da polpa de camu-camu, apresentando um alto teor de compostos bioativos, inclusive nas condições menos favoráveis de operação. Foi possível identificar as relações das variáveis de operação com a qualidade do produto obtido, sendo possível, inclusive, tecer relações entre o bioativo e a dinâmica dos inertes pautado no estudo numérico previamente realizado. A produção de um material na forma de pó, com um rendimento elevado, e com um conteúdo de compostos orgânicos que conferem-no grande potencial de exploração na indústria de variados segmentos, incentiva o estudo e o aperfeiçoamento da técnica e para esse fruto e outros materiais.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO

Com base nos objetivos propostos e diante dos resultados obtidos acerca da secagem da polpa de camu-camu em um secador rotatório com recheio de inertes, tem-se as conclusões descritas a seguir:

- ✓ Os resultados obtidos com a modelagem Lagrangeana da dinâmica dos inertes no secador rotatório mostrou importância fundamental no entendimento das colisões enfrentadas por esses elementos durante a operação do secador diante dos diferentes níveis de enchimento e rotação utilizados, e suas relações com o rendimento de secagem da polpa de camu-camu.
- ✓ De acordo com os resultados obtidos pela simulação, o tamanho do inerte apresentou influência direta na força e no número de colisões. Enquanto que o inerte de maior diâmetro (25,40 mm) apresentou maior força de colisão por efeito de sua maior massa e menor número de colisões como resultado do menor número de elementos utilizados, o menor inerte (12,70 mm) apesar de resultar em interações menos intensas, apresentou um número de colisões significativamente maior;
- ✓ De acordo com as simulações realizadas para o tambor carregado com um tipo de partícula, verificou-se que o efeito do grau de enchimento foi significativamente superior que o da rotação no número de colisões, uma vez que a variável requer um maior número de partículas no carregamento do tambor. Com relação a força, a variável conduziu a interações menos intensas, já que reduz a altura de queda das partículas e, por conseguinte, a energia acumulada pelas mesmas;
- ✓ No que diz respeito a velocidade de rotação, apesar de pouco influenciar no número de colisões, apresentou maior impacto na força colisional, principalmente no sentido do aumento da variável por efeito da maior energia cedida às partículas e maior catarateamento das mesmas no tambor rotatório;
- ✓ Na combinação entre inertes de diâmetros distintos, o maior número de colisões era verificado quando os menores inertes apresentaram maior proporção no carregamento do tambor, e, de maneira similar, a maior força era verificada quando a proporção das maiores partículas sobrepujava;
- ✓ Com as condições operacionais definidas pela otimização, no sentido de maximizar simultaneamente as respostas DEM, foi possível obter um rendimento de secagem de 86,66%, combinando o efeito da maior intensidade de choque proporcionada pela

partícula de 25,40 mm e a maior frequência de colisões obtida pela partícula de 12,70 mm. Quando utilizadas individualmente, o rendimento obtido foi de 71,10% e 75,83%, respectivamente, indicando que mais colisões e choques mais intensos, isoladamente, não necessariamente conduzem a um melhor rendimento. O rendimento obtido com a combinação de tamanho de inerte distintos e as condições obtidas via análise da simulação foi o maior já reportado na literatura;

- ✓ Ao incluir a variável temperatura no estudo experimental, verificou-se que o produto obtido apresentou uma atividade de água sempre inferior à 0,28, evidenciando o potencial do secador na produção de um material que além de ter um aspecto homogêneo e versatilidade de aplicação, também apresenta menor perecibilidade. Nessa zona, as moléculas de água estão fortemente ligadas às moléculas do produto, inibindo reações oxidativas e a proliferação de microorganismos;
- ✓ Com relação aos compostos bioativos presentes no camu-camu, verificou-se que a temperatura foi a variável de processo mais influenciou na sua manutenção no produto final. Os maiores níveis da variável conduziram a redução do teor de fenólicos, flavonoides, ácido ascórbico e da capacidade antioxidante do produto. As maiores concentrações desses compostos foram obtidas nos níveis -1 (50°C) e -α (40,35°C) do planejamento composto central executado. Os efeitos verificados para as demais variáveis influenciaram em uma força de colisão menor, inferindo que choques mais intensos tendem a degradar os bioativos;
- ✓ Tomando como referência a capacidade antioxidante do produto, verificou-se que em grande parte dos experimentos executados, o mesmo pode ser classificado em muito ativo. O teor de ácido ascórbico obtido, mesmo nas situações de alta degradação, foi superior ao encontrado para a acerola, por exemplo, indicando a alta qualidade do produto obtido utilizando o secador rotatório com recheio de inertes;

As observações numéricas realizadas no trabalho aliadas à investigação experimental permitiram um melhor entendimento de como condições operacionais do secador influenciam no comportamento dos inertes e consequentemente no desempenho global do secador. Esse conhecimento foi fundamental para a obtenção de um produto de qualidade, com alto potencial de aproveitamento industrial e em um processo mais eficiente.

CAPÍTULO 6 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- ✓ Investigação numérica da operação do tambor rotatório utilizando um outro tipo de recheio de inertes, verificando o efeito da densidade da partícula nos rendimentos de secagem;
- ✓ Avaliação da geometria e quantidade de suspensores na dinâmica dos corpos inertes e suas relações com o desempenho do secador;
- ✓ Uso do equipamento na secagem de outros materiais e/ou com o uso de diferentes aditivos;
- ✓ Análise nutricional e sensorial do produto obtido;
- ✓ Uso de outras metodologias na avaliação do teor de compostos bioativos como a cromatografia líquida (HPLC), investigando compostos relevantes no produto obtido;
- ✓ Verificação do consumo energético do secador rotatório com recheio de inertes em comparação com outros tipos de equipamentos.

REFERÊNCIAS

ALDER, B. J.; WAINWRIGHT, T. E. Phase Transition for a Hard Sphere System. *The Journal of Chemical Physics*, v. 27, n. 5, p. 1208–1209, 1957. <https://doi.org/10.1063/1.1743957>

ALMEIDA, A. R. F. Análise da secagem de pastas em leito de jorro, 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil, 2009.

ANVISA. RDC 269/2005: Regulamento Técnico sobre a ingestão diária recomendada (IDR) de proteína, vitaminas e minerais - ANVISA - Agência Nacional de Vigilância Sanitária, 2005.

ARPAGAU, C. *et al.* Nano spray drying for encapsulation of pharmaceuticals. *International Journal of Pharmaceutics*, v. 546, n. 1–2, p. 194–214, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2018.05.037>

ASTM. Standard method for the determination of ash in biomass. In: 2003 Annual book of ASTM standards. Philadelphia: American Society for Testing Materials, International, 2003.

AZAWA, K. Y. *et al.* Anti-Inflammatory Effects of Seeds of the Tropical Fruit Camu-Camu (*Myrciaria dubia*). v. 7, p. 104–107, 2011. <https://doi.org/10.3177/jnsv.57.104>

AZEVÊDO, J. C. S. *et al.* Neuroprotective effects of dried camu-camu (*Myrciaria dubia* HBK McVaugh) residue in *C. elegans*. *FRIN*, v. 73, p. 135–141, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.02.015>

BABA, S. A.; MALIK, S. A. Determination of total phenolic and flavonoid content, antimicrobial and antioxidant activity of a root extract of *Arisaema jacquemontii* Blume. *Journal of Taibah University for Science*, v. 9, n. 4, p. 449–454, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jtusci.2014.11.001>

BAMIDELE, O. P.; DUODU, K. G.; EMMAMBUX, M. N. Encapsulation and antioxidant activity of ascorbyl palmitate with normal and high amylose maize starch by spray

drying. Food Hydrocolloids, v. 86, p. 124–133, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.03.008>

BARRET, N.; FANE, A. Drying liquid materials in a spouted bed. In: Drying'89. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1989. p. 415–420.

BARRIOS, G. K. P. *et al.* Contact parameter estimation for DEM simulation of iron ore pellet handling. Powder Technology, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.01.063>

BATAGLION, G. A. *et al.* Determination of the phenolic composition from Brazilian tropical fruits by UHPLC – MS / MS. Food Chemistry, v. 180, p. 280–287, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.02.059>

BENALI, M. Thermal drying of foods: Loss of nutritive content and spoilage issues. Drying of products of biological origin. India: Oxford IBH and Science Publishers, 2004. <https://doi.org/10.1081/DRT-120028239>

BENASSI, M. T.; ANTUNES, A. J. A comparison of meta-phosphoric and oxalic acids as extractant solutions for the determination of vitamin c in selected vegetables. Arquivos de Biologia e Tecnologia, v. 31, n. 4, p. 507–513, 1998.

BERK, Z. Dehydration. In: Food Process Engineering and Technology. 3. ed. Elsevier, 2018. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812018-7.00022-1>

BIRT, D. F.; JEFFERY, E. Nutrient Information of Flavonoids. Advances in Nutrition, n. 1, p. 576–577, 2013. <https://doi.org/10.3945/an.113.004465>

BRACEY, R. J.; WEERASEKARA, N. S.; POWELL, M. S. Performance evaluation of the novel multi-shaft mill using DEM modelling. Minerals Engineering, v. 98, p. 251–260, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.09.007>

BRAND-WILLIAMS, W.; CUVELIER, M. E.; BERSET, C. Use of a Free Radical Method to Evaluate Antioxidant Activity. IWT, v. 28, n. 1, p. 25–30, 1995. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)

BRANDÃO, R. J. Estudo da Segregação de Material Granular Abordagem Numérica Lagrangeana, 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017. <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2017.56>

BUIST, K. A. *et al.* On an efficient hybrid soft and hard sphere collision integration scheme for DEM. *Chemical Engineering Science*, v. 153, p. 363–373, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.07.030>

BURJAILI, M. M. Desenvolvimento de um secador rotatório com recheio de inertes. 1996. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 1996.

CABRERA-PADILHA, R. Y. *et al.* Drying of banana paste in rotatory dryer with inert bed. *Brazilian Journal of Food Technology*, v. 17, p. 41–50, 2014. <https://doi.org/10.1590/bjft.2014.007>

CARLA, E. *et al.* Vitamin C in camu-camu [*Myrciaria dubia* (H.B.K.) McVaugh]: evaluation of extraction and analytical methods. *Food Research International*, v. 115, n. August 2018, p.160–166, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.08.031>

CASTRO, J. C.; MADDUX, J. D.; IMÁN, S. A. Camu-camu- *Myrciaria dubia* (Kunth) McVaugh. In: *Exotic Fruits Reference Guide*. Elsevier Inc., 2018. p. 97–105. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803138-4.00014-9>

CELESTINO, S. M. C. Princípios de Secagem de Alimentos. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, n. 2176–5081, p. 50, 2010.

CHIKEZIE, P. C.; IBEGBULEM, C. O.; MBAGWU, F. N. Bioactive Principles from Medicinal Plants. *Research Journal of Phytochemistry*, v. 9, n. 3, p. 88–115, 2015. <https://doi.org/10.3923/rjphyto.2015.88.115>

CHIRINOS, R. *et al.* Antioxidant compounds and antioxidant capacity of Peruvian camu camu (*Myrciaria dubia* (H.B.K.) McVaugh) fruit at different maturity stages. *Food Chemistry*, v. 120, n. 4, p. 1019–1024, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.11.041>

CLEARY, P. DEM prediction of industrial and geophysical particle flows. *Particuology*, v. 8, n. 2, p. 106–118, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2009.05.006>

COLLARES, F. P.; FINZER, J. R. D.; KIECKBUSCH, T. G. Glass transition control of the detachment of food pastes dried over glass plates. *Journal of Food Engineering*, v. 61, n. 2, p. 261–267, 2004. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00098-0](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00098-0)

CUNDALL, P. A.; STRACK, O. D. L. A discrete numerical model for granular assemblies. *v. Géotechniq*, n. 1, p. 47–65, 1979. <https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.1.47>

DA SILVA, M. A.; PINEDO, R. A.; KIECKBUSCH, T. G. Ascorbic Acid Thermal Degradation during Hot Air Drying of Camu-Camu (*Myrciaria dubia* [H.B.K.] McVaugh) Slices at Different Air Temperatures. *Drying Technology*, v. 23, p. 2277–2287, 2007. <https://doi.org/10.1080/07373930500212784>

DANBY, M.; SHRIMPTON, J.; PALMER, M. On the optimal numerical time integration for DEM using Hertzian force models. *Computers & Chemical Engineering*, v. 58, p. 211–222, 11 nov. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2013.06.018>

DANTAS, T. N. P. *et al.* Study of model application for drying of pulp fruit in spouted bed with intermittent feeding and accumulation. *Drying Technology*, v. 36, n. 11, p. 1349–1366, 2018. <https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1402785>

DEL RIO, D. *et al.* Polyphenols and health: What compounds are involved? *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*, v. 20, n. 1, p. 1–6, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.numecd.2009.05.015>

DERRINGER, G.; SUICH, R. Simultaneous Optimization of Several Response Variables. *Journal of Quality Technology*, v. 12, n. 4, p. 214–219, 1980. <https://doi.org/10.1080/00224065.1980.11980968>

DI RENZO, A.; DI MAIO, F. P. Comparison of contact-force models for the simulation of collisions in DEM-based granular flow codes. *Chemical Engineering Science*, v. 59, n. 3, p. 525–541, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2003.09.037>

ERLUND, I. Review of the flavonoids quercetin, hesperetin, and naringenin. Dietary sources, bioactivities, bioavailability, and epidemiology. *Nutrition Research*, v. 24, n. 10, p. 851–874, 1 out. 2004. <https://doi.org/10.1016/j.nutres.2004.07.005>

FERREIRA, P.; RIBEIRO, D. A.; STRINGHETA, P. C. Teor de vitamina C, β -caroteno e minerais em camu-camu cultivado em diferentes ambientes. *Ciência Rural*, v.46, n. 3, p. 567–572, 2016. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20150024>

FERRER, J.-L. *et al.* Structure and function of enzymes involved in the biosynthesis of phenylpropanoids. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 46, n. 3, p. 356–370, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2007.12.009>

FRACASSETTI, D. *et al.* Ellagic acid derivatives , ellagitannins , proanthocyanidins and other phenolics , vitamin C and antioxidant capacity of two powder products from camu-camu fruit (*Myrciaria dubia*). *Food Chemistry*, v. 139, n. 1–4, p. 578–588, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.01.121>

FREIRE, J. T. *et al.* A Review on Paste Drying with Inert Particles as Support Medium. *Drying Technology*, v. 30, n. 4, p. 330–341, 2012. <https://doi.org/10.1080/07373937.2011.638149>

FRIES, L. *et al.* Collision dynamics in fluidised bed granulators: A DEM-CFD study. *Chemical Engineering Science*, v. 86, p. 108–123, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2012.06.026>

FUJITA, A. *et al.* Impact of spouted bed drying on bioactive compounds, antimicrobial and antioxidant activities of commercial frozen pulp of camu-camu (*Myrciaria dubia* Mc. Vaugh). *Food Research International*, v. 54, n. 1, p. 495–500, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.07.025>

FURUKAWA, S. *et al.* Increased oxidative stress in obesity and its impact on metabolic syndrome. *The Journal of Clinical Investigation*, v. 114, n. 12, p. 1752–1761, 2004. <https://doi.org/10.1172/JCI21625>

GENOVESE, M. I.; PINTO, M. D. S.; SCHMIDT, A. E. D. S. Bioactive Compounds and Antioxidant Capacity of Exotic Fruits and Commercial Frozen Pulps from Brazil. p. 207–214, 2008. <https://doi.org/10.1177/1082013208092151>

GENSKOW, L. R. *et al.* Psychrometry, evaporative cooling, and solids drying. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, v. 8, 2008.

GONÇALVES, A. E. de S. S. Compostos bioativos do camu-camu (*Myrciaria dubia* McVaugh): caracterização e atividade biológica. 2012. Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2012.

GONZÁLEZ, A. A.; SERNA, L. V. D.; ALZATE, Ca. A. C. The Antioxidants From Amazon: Status and Perspectives. In: WARNER, L. M. (Ed.). Handbook of Anthocyanins. 1. ed. New York: Nova Science Publishers, Inc., 2015. p. 319–349.

GRABOWSKI, J. A.; TRUONG, V.; DAUBERT, C. R. Nutritional and rheological characterization of spray dried sweetpotato powder \$. v. 41, p. 206–216, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.02.019>

GRBAVCIC, Z. B.; ARSENIJEVIC, Z. L.; GARIC-GRULOVIC, R. V. Drying of slurries in fluidized bed of inert particles. Drying Technology, v. 22, n. 8, p. 1793–1812, 2004. <https://doi.org/10.1081/DRT-200032742>

HARBONE, J. B.; MABRY, T. J. The Flavonoids: advances in research. Chapman and Hall Ltd., 1982.

HERTZ, H. R. Über die Berührung fester elastischer Körper und Über die Harte. Verhandlung des Vereins zur Beförderung des Gewerbefleißes, Berlin, p. 449, 1882. <https://doi.org/10.1515/crll.1882.92.156>

HONORATO, G. C. Conceção de um secador rotatório para secagem do camarão. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

INOUE, T. *et al.* Tropical fruit camu-camu (*Myrciaria dubia*) has anti-oxidative and anti-inflammatory properties. Journal of Cardiology, v. 52, n. 2, p. 127–132, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jjcc.2008.06.004>

KRISHNAIAH, D.; NITHYANANDAM, R.; SARBATLY, R. A Critical Review on the Spray Drying of Fruit Extract: Effect of Additives on Physicochemical Properties. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, v. 54, n. 4, p. 449–473, 2014. <https://doi.org/10.1080/10408398.2011.587038>

KUDRA, T.; MUJUMDAR, A. S. Advanced drying technologies. CRC press, 2009. <https://doi.org/10.1201/9781420073898>

LANGLEY, P. C. *et al.* Antioxidant and Associated Capacities of Camu Camu (*Myrciaria dubia*): A Systematic Review 1. The Journal of Alternative and Complementary Medicine, v. 21, n. 1, p. 8–14, 2015. <https://doi.org/10.1089/acm.2014.0130>

LAVOYER, F. C. G. Estudo da secagem de polpa de coco verde em leite de jorro e viabilidade de sua utilização na indústria. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Estadual Paulista, São José do Rio Preto, Brasil, 2012.

LIMA, R. M. Estudo da dinâmica de partículas em tambores rotatórios empregando a abordagem numérica Lagrangeana, 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, 2017. <https://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.98>

LUNA-GUEVARA, M. L. *et al.* Phenolic Compounds: A Good Choice Against Chronic Degenerative Diseases. In: ATTA-UR-RAHMAN (Ed.). Studies in Natural Products Chemistry. Elsevier B.V., 2019. 59p. 79–82. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64179-3.00003-7>

MACHADO, I. P. Avaliação térmica e desempenho do processo de secagem de misturas de graviola e leite em secador de leite do jorro, 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

MACHADO, M. V. C. Estudo experimental e numérico da dinâmica de corpos moedores em moinhos de bola. 2016. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, 2016.

MAEDA, R. N. *et al.* Determinação da formulação e caracterização do néctar de camu-camu (*Myrciaria dubia* McVaugh). Ciencia e Tecnologia de Alimentos, v. 26, n. 1, p. 70–74, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612006000100012>

MALDONADO, A. C. D.; FINZER, J. R. D.; LIMAVERDE, J. R. Secagem de lodo de reator anaeróbio em secador rotativo com recheio de inertes. Engenharia de Alimentos/Food Engineering, v. 6, p. 69–75, 2009.

MARKOWSKI, A. S. Quality Interaction in a Jet Spouted Bed Dryer for Bio-Products. *Drying Technology*, v. 11, n. 2, p. 369–387, 1993. <https://doi.org/10.1080/07373939308916825>

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. Unit operations of chemical engineering. McGraw-hill New York, 1993. v. 1130

MESQUITA, J. *et al.* Quantificação de compostos fenólicos e ácido ascórbico em frutos e polpas congeladas de acerola, caju, goiaba e morango. *Ciência Rural*, 2012.

MINDLIN, R. D.; DERESIEWICZ, H. Elastic Spheres in Contact under Varying Oblique Force. *Journal of Applied Mechanics*, v. 20, p. 327–344, 1953.

MORAES-DE-SOUZA, R. A. Qualidade de polpa de camu-camu [*Myrciaria dubia* (H.B.K.) McVaugh], submetida aos processos de congelamento, pasteurização, alta pressão hidrostática e liofilização e armazenada por quatro meses. 2011. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, Brasil, 2011.

MOURA, B. D. Automação de um sistema rotatório para secagem do rejeito de maracujá, 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

MOURA, B. D. Secador Rotatório com Alimentação Intermitente, 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

MUJUMDAR, A. S. Handbook of industrial drying. CRC press, 2006. <https://doi.org/10.1201/9781420017618>

MYODA, T. *et al.* Antioxidative and antimicrobial potential of residues of camu-camu juice production. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, v.8, p. 304-307, 2010.

NASCIMENTO, B. S. Análise do efeito da composição química na secagem de pasta em leite de jorro, 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.

NASCIMENTO, S. M. Estudo experimental e de simulação da dinâmica de material particulado em tambor rotatório com suspensores, 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

NASCIMENTO, S. M. Estudo da dinâmica de partículas em tambor rotatório com suspensores: análise experimental e numérica utilizando abordagens euleriana e lagrangeana, 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2018.775>

NASRI, M. Protein Hydrolysates and Biopeptides: Production, Biological Activities, and Applications in Foods and Health Benefits. A Review. *Advances in Food and Nutrition Research*, v. 81, p. 109–159, 1 jan. 2017. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2016.10.003>

NERI-NUMA, I. A. *et al.* Small Brazilian wild fruits: Nutrients, bioactive compounds, health-promotion properties and commercial interest. *Food Research International*, v. 103, n. May 2017, p. 345–360, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.10.053>

NÓBREGA, E. M. *et al.* The impact of hot air drying on the physical-chemical characteristics, bioactive compounds and antioxidant activity of acerola (*Malphigia emarginata*) residue. *Journal of Food Processing and Preservation*, v. 39, n. 2, p. 131–141, 2015. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12213>

OLIVEIRA, F. M.; FIGUEIREDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. de M. Análise comparativa de polpas de pitanga integral, formulada e em pó. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v.8, p. 25–33, 2006. <https://doi.org/10.15871/1517-8595/rbpa.v8n1p25-33>

PASSOS, M. L. *et al.* Drying of pastes in spouted beds of inert particles: Design criteria and modeling. *Drying Technology*, v. 15, n. 2, p. 605–624, 1997. <https://doi.org/10.1080/07373939708917249>

PENG, B. Discrete Element Method (DEM) contact models applied to pavement Simulation, 2014. Thesis (Master of Science) - Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2014.

POWELL, M. S. *et al.* DEM modelling of liner evolution and its influence on grinding rate in ball mills. *Minerals Engineering*, v. 24, n. 3–4, p. 341–351, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2010.12.012>

REYNERTSON, K. A.; BASILE, M. J.; KENNELLY, E. J. Antioxidant Potential of Seven Myrtaceous Fruits. *Ethnobotany Research and Applications*, v. 3, p. 025, 2005. <https://doi.org/10.17348/era.3.0.25-36>

RICHARDSON, J. F.; HARKER, J. H.; BACKHURST, J. R. CHAPTER 16 - Drying. In: RICHARDSON, J. F.; HARKER, J. H.; BACKHURST, J. R. B. T.-C. E. (FIFTH E. (Ed.)). Chemical Engineering Series. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. p. 901–969. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-049064-9.50027-8>

RODRIGUES, R. *et al.* An Amazonian fruit with a high potential as a natural source of vitamin C: the camu-camu (*Myrciaria dubia*). Fruits, v. 56, n. 5, p. 345–354, 2001. <https://doi.org/10.1051/fruits:2001135>

RUFINO, S. M. *et al.* Bioactive compounds and antioxidant capacities of 18 non-traditional tropical fruits from Brazil. Food Chemistry, v. 121, n. 4, p. 996–1002, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.01.037>

SANTOS, D. A. Estudo experimental e numérico da dinâmica de partículas granulares em um tambor rotatório, 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Química) Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.

SHEEHAN, M. E.; BRITTON, P. F.; SCHNEIDER, P. A. A model for solids transport in flighted rotary dryers based on physical considerations. Chemical Engineering Science, v.60, p. 4171–4182, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2005.02.055>

SILVA, N. C. Uso de metodologias alternativas na secagem de diferentes materiais visando a preservação de compostos bioativos, 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, 2019. <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2019.2066>

SILVA, N. C. *et al.* Dehydration of microalgae *Spirulina platensis* in a rotary drum with inert bed. Powder Technology, v. 351, p. 178–185, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.04.025>

SILVA, P. B. Secagem de resíduos de frutas em secador roto-aerado, 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, 2014.

SILVA, P. B. Secagem híbrida do resíduo de acerola em secador roto-aerado com infravermelho e extração de compostos bioativos, 2018. Tese (Doutorado em Engenharia

Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, 2018.
<http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2018.793>

SILVA, P. B.; DUARTE, C. R.; BARROZO, M. A. S. Dehydration of acerola (*Malpighia emarginata* D.C.) residue in a new designed rotary dryer: Effect of process variables on main bioactive compounds. *Food and Bioproducts Processing*, v. 98, p. 62–70, 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.fbp.2015.12.008>

SINGLETON, V. L.; ORTHOFER, R.; LAMUELA-RAVENTÓS, R. M. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. *Methods in Enzymology*, v. 299, n. 1974, p. 152–178, 1998.
[https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(99\)99017-1](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(99)99017-1)

SINGLETON, V. L.; ROSSI, J. A. Colorimetry of Total Phenolics with Phosphomolybdic-Phosphotungstic Acid Reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, v. 16, n. 3, p. 144 LP – 158, 1965.

SIRÓ, I. *et al.* Functional food. Product development, marketing and consumer acceptance-A review. *Appetite*, v. 51, n. 3, p. 456–467, 2008.
<https://doi.org/10.1016/j.appet.2008.05.060>

STRUMILLO, C.; MARKOWSKI, A.; KAMINSKI, W. Modern developments in drying of pastelike materials. In: MUJUMDAR, A. S. (Ed.). *Advances in Drying*. Washington: McGraw Hill, 1983. p. 193–231.

SUN-WATERHOUSE, D.; WADHWA, S. S. Industry-Relevant Approaches for Minimising the Bitterness of Bioactive Compounds in Functional Foods: A Review. p. 607–627, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0829-2>

THORNTON, C.; RANDALL, C. W. Applications of Theoretical Contact Mechanics to Solid Particle System Simulation. *Studies in Applied Mechanics*, v. 20, p. 133–142, 1 jan. 1988. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-70523-5.50023-0>

TISCAR, J. M. *et al.* DEM-based modelling framework for spray-dried powders in ceramic tiles industry. Part I: Calibration procedure. *Powder Technology*, v. 356, p. 818–831, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.08.053>

VASCO, C.; RUALES, J.; KAMAL-ELDIN, A. Total phenolic compounds and antioxidant capacities of major fruits from Ecuador. *Food Chemistry*, v. 111, n. 4, p. 816–823, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.04.054>

VIEIRA, G. Monitoramento em tempo real e simulação de controle da umidade de pós produzidos pela secagem de pastas em leite de jorro, 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2015.

VILLANUEVA-TIBURCIO, J. E.; CONDEZO-HOYOS, L. A.; ASQUIERI, E. R. Antocianinas, ácido ascórbico, polifenoles totales y actividad antioxidante, en la cáscara de camu-camu (*Myrciaria dubia* (H.B.K) McVaugh). *Ciencia e Tecnologia de Alimentos*, v. 30, n. SUPPL. 1, p. 151–160, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612010000500023>

VUOLO, M. M.; LIMA, V. S.; MARÓSTICA JUNIOR, M. R. Phenolic Compounds: structure, classification, and antioxidant power. In: CAMPOS, M. R. S. (Ed.). *Bioactive Compounds: health benefits and potential applications*. Duxford: Woodhead Publishing Limited, 2019. p. 294. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814774-0.00002-5>

WALTHER, B.; SIEBER, R. Bioactive Proteins and Peptides in Foods. *International journal of vitamin and nutrition research*, v. 81, n. 2–3, p. 181–191, 2011. <https://doi.org/10.1024/0300-9831/a000054>

WEBB, P. A.; ORR, C. Analytical methods in fine particle technology. Micromeritics Instrument Corp, 1997.

WELTMANN, R. N. Rheology of pastes and paints. In: EIRICH, F. R. (Ed.). *Rheology: Theory and Applications*. 1. ed. New York: Academic Press, 1960. p. 680. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-395696-5.50011-3>

YANG, R. Y.; ZOU, R. P.; YU, A. B. Microdynamic analysis of particle flow in a horizontal rotating drum. *Powder Technology*, v. 130, n. 1–3, p. 138–146, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(02\)00257-7](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(02)00257-7)

ZANATTA, C. F. *et al.* Determination of Anthocyanins from Camu-camu (*Myrciaria dubia*) by HPLC–PDA , HPLC–MS , and NMR. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 53, n. 24, p. 9531–9535, 2005. <https://doi.org/10.1021/jf051357v>

ZHISHEN, J.; MENGCHENG, T.; JIANMING, W. The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. Food Chemistry, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(98\)00102-2](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(98)00102-2)

APÊNDICE

Apêndice A – Conjunto de Planejamentos Composto Central (PCC) para análise numérica do número de colisões e força de colisão na direção normal para as configurações de enchimento C1, C2 e C3.

Tabela A.1 – Planejamento Composto Central realizado para análise do número de colisões e força de colisão com a configuração de enchimento C1 (inertes de 25,40 mm).

Simulação	E (%)	R (RPM)	Número de Colisões (-)	Força Normal (N)
1	25,00	50,00	18	1,0615
2	25,00	70,00	20	1,6308
3	35,00	50,00	28	0,9915
4	35,00	70,00	30	1,3127
5	22,93	60,00	17	1,4324
6	37,07	60,00	32	1,0916
7	30,00	45,86	22	0,9386
8	30,00	74,14	24	1,4643
9	30,00	60,00	25	1,2233

Tabela A.2 – Planejamento Composto Central realizado para análise do número de colisões e força de colisão com a configuração de enchimento C2 (inertes de 19,05 mm).

Simulação	E (%)	R (RPM)	Número de Colisões (-)	Força Normal (N)
1	25,00	50,00	40	0,5448
2	25,00	70,00	41	0,5994
3	35,00	50,00	61	0,4976
4	35,00	70,00	62	0,5742
5	22,93	60,00	37	0,6200
6	37,07	60,00	68	0,5438
7	30,00	45,86	49	0,4949
8	30,00	74,14	54	0,5784
9	30,00	60,00	53	0,5803

Tabela A.3 – Planejamento Composto Central realizado para análise do número de colisões e força de colisão com a configuração de enchimento C3 (inertes de 12,70 mm).

Simulação	E (%)	R (RPM)	Número de Colisões (-)	Força Normal (N)
1	25,00	50,00	325	0,1742
2	25,00	70,00	322	0,2070
3	35,00	50,00	509	0,1538
4	35,00	70,00	503	0,1840
5	22,93	60,00	284	0,2070
6	37,07	60,00	545	0,1690
7	30,00	45,86	416	0,1532
8	30,00	74,14	408	0,2018
9	30,00	60,00	406	0,1868

Apêndice B – Conjunto de Planejamentos Composto Central (PCC) para análise numérica do número de colisões e força de colisão na direção normal para as configurações de enchimento C4, C5 e C6.

Tabela B.1 – Planejamento Composto Central realizado para análise do número de colisões e força de colisão com a configuração de enchimento C4 (inertes de 25,40 mm e 19,05 mm).

Simulação	FI (%)	E (%)	R (RPM)	Número de Colisões (-)	Força Normal (N)
1	30,00	25,00	50,00	33	0,6391
2	30,00	25,00	70,00	35	0,6764
3	30,00	35,00	50,00	50	0,5904
4	30,00	35,00	70,00	52	0,6576
5	70,00	25,00	50,00	24	0,8139
6	70,00	25,00	70,00	26	0,8103
7	70,00	35,00	50,00	37	0,7591
8	70,00	35,00	70,00	39	0,7958
9	16,36	30,00	60,00	47	0,6350
10	83,64	30,00	60,00	29	0,9317
11	50,00	21,59	60,00	25	0,8230
12	50,00	38,41	60,00	51	0,7080
13	50,00	30,00	43,18	34	0,6400
14	50,00	30,00	76,82	40	0,7362
15	50,00	30,00	60,00	38	0,7637

Tabela B.2 – Planejamento Composto Central realizado para análise do número de colisões e força de colisão com a configuração de enchimento C5 (inertes de 25,40 mm e 12,70 mm).

Simulação	FI (%)	E (%)	R (RPM)	Número de Colisões (-)	Força Normal (N)
1	30,00	25,00	50,00	218	0,2210
2	30,00	25,00	70,00	226	0,2379
3	30,00	35,00	50,00	339	0,1886
4	30,00	35,00	70,00	344	0,2195
5	70,00	25,00	50,00	92	0,3393
6	70,00	25,00	70,00	100	0,5290
7	70,00	35,00	50,00	144	0,3042
8	70,00	35,00	70,00	152	0,3305
9	16,36	30,00	60,00	332	0,2064
10	83,64	30,00	60,00	74	0,4871
11	50,00	21,59	60,00	128	0,2958
12	50,00	38,41	60,00	268	0,2482
13	50,00	30,00	43,18	191	0,2192
14	50,00	30,00	76,82	213	0,2615
15	50,00	30,00	60,00	192	0,2732

Tabela B.3 – Planejamento Composto Central realizado para análise do número de colisões e força de colisão com a configuração de enchimento C6 (inertes de 19,05 mm e 12,70 mm).

Simulação	FI (%)	E (%)	R (RPM)	Número de Colisões (-)	Força Normal (N)
1	30,00	25,00	50,00	225	0,2068
2	30,00	25,00	70,00	232	0,2326
3	30,00	35,00	50,00	352	0,1847
4	30,00	35,00	70,00	354	0,2156
5	70,00	25,00	50,00	111	0,2942
6	70,00	25,00	70,00	118	0,3178
7	70,00	35,00	50,00	172	0,2665
8	70,00	35,00	70,00	177	0,2987
9	16,36	30,00	60,00	337	0,2037
10	83,64	30,00	60,00	97	0,3889
11	50,00	21,59	60,00	139	0,2784
12	50,00	38,41	60,00	288	0,2367
13	50,00	30,00	43,18	208	0,2052
14	50,00	30,00	76,82	228	0,2521
15	50,00	30,00	60,00	208	0,2571

Apêndice C – Otimização simultânea do número de colisões e força normal de colisão realizada nas seis configurações de enchimento utilizando a função desejabilidade.

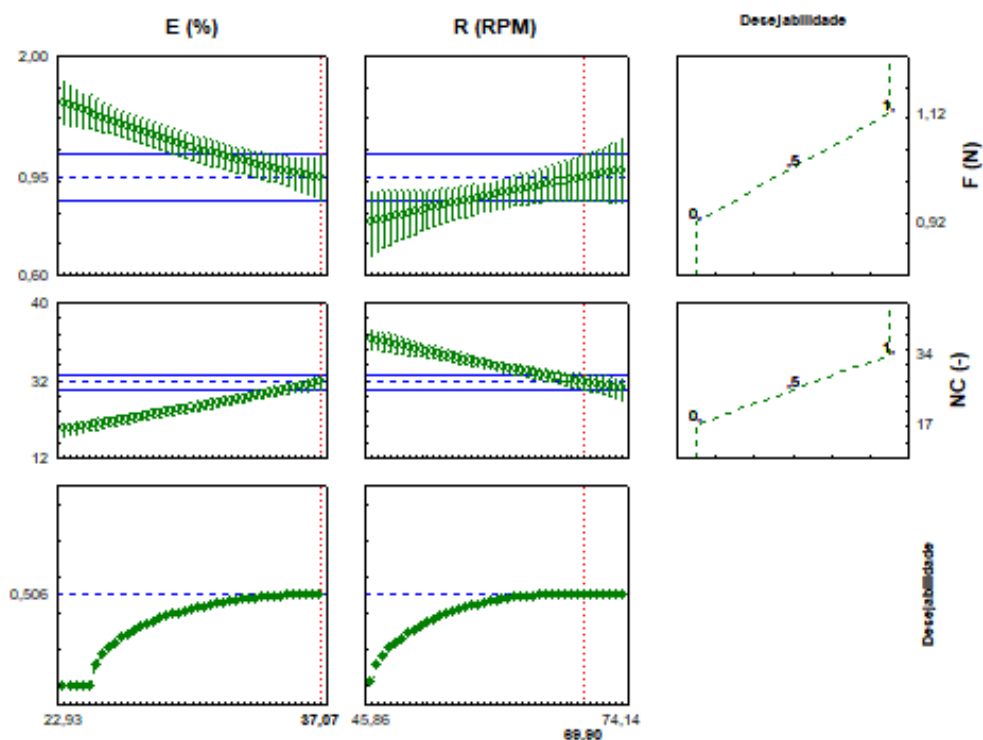


Figura C1 – Análise de desejabilidade para maximização simultânea do número de colisões (NC) e a força de colisão (F) na configuração C1 (25,40 mm).

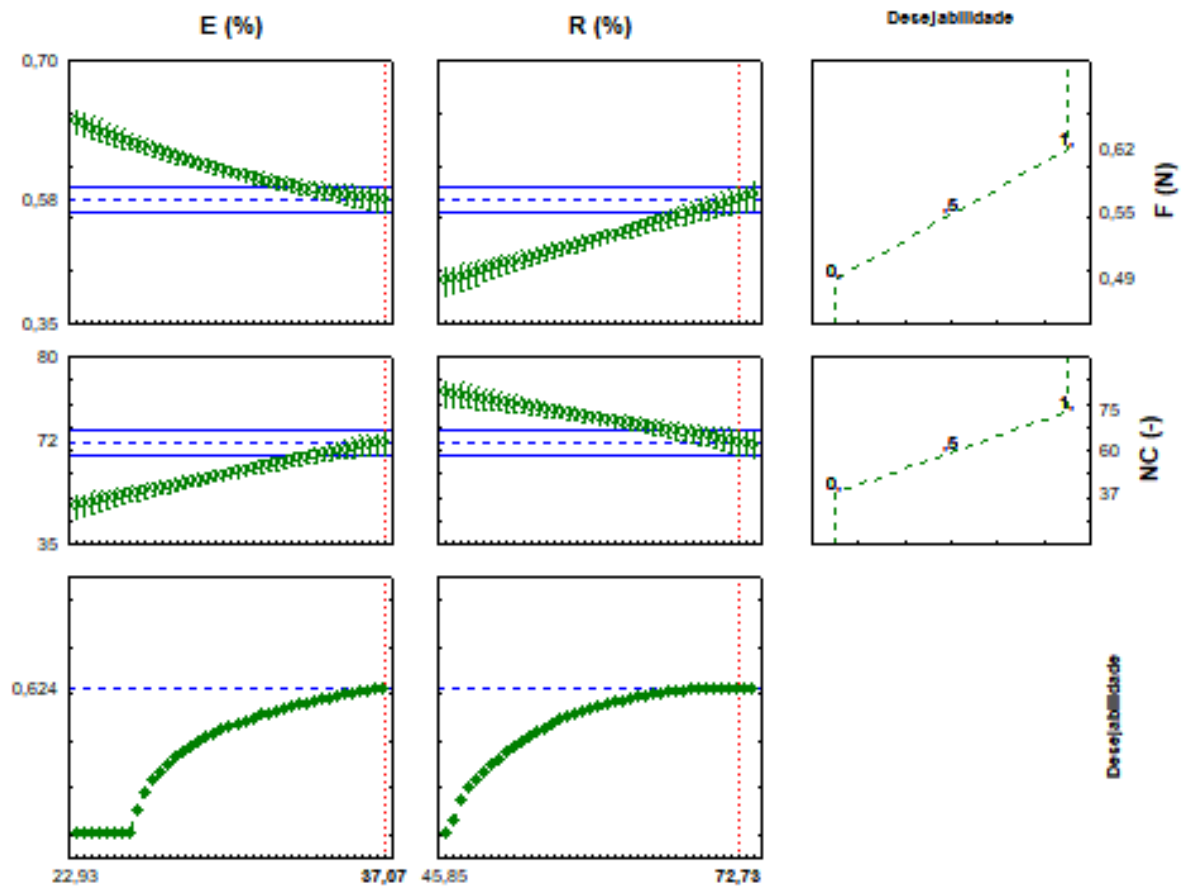


Figura C2 – Análise de desejabilidade para maximização simultânea do número de colisões (NC) e a força de colisão (F) na configuração C2 (19,05 mm).

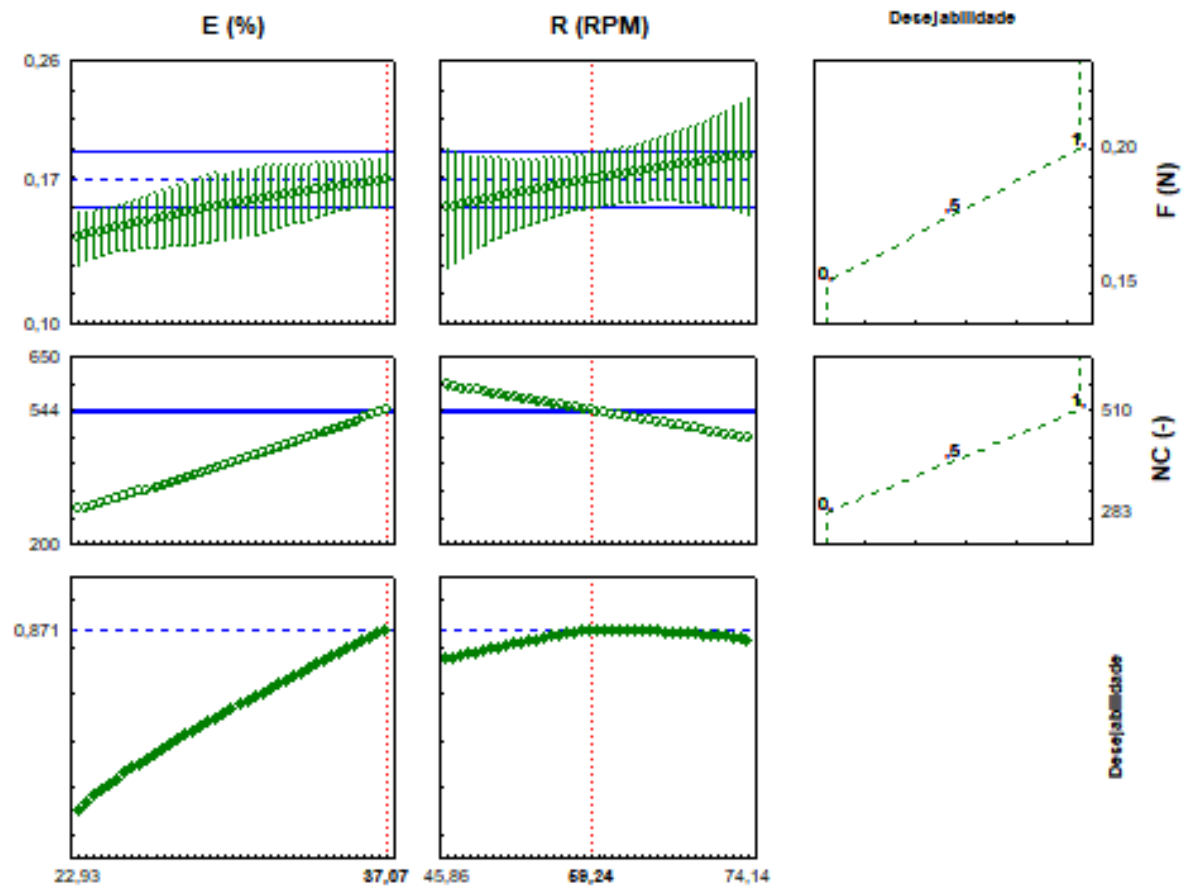


Figura C3 – Análise de desejabilidade para maximização simultânea do número de colisões (NC) e a força de colisão (F) na configuração C3 (12,70 mm).

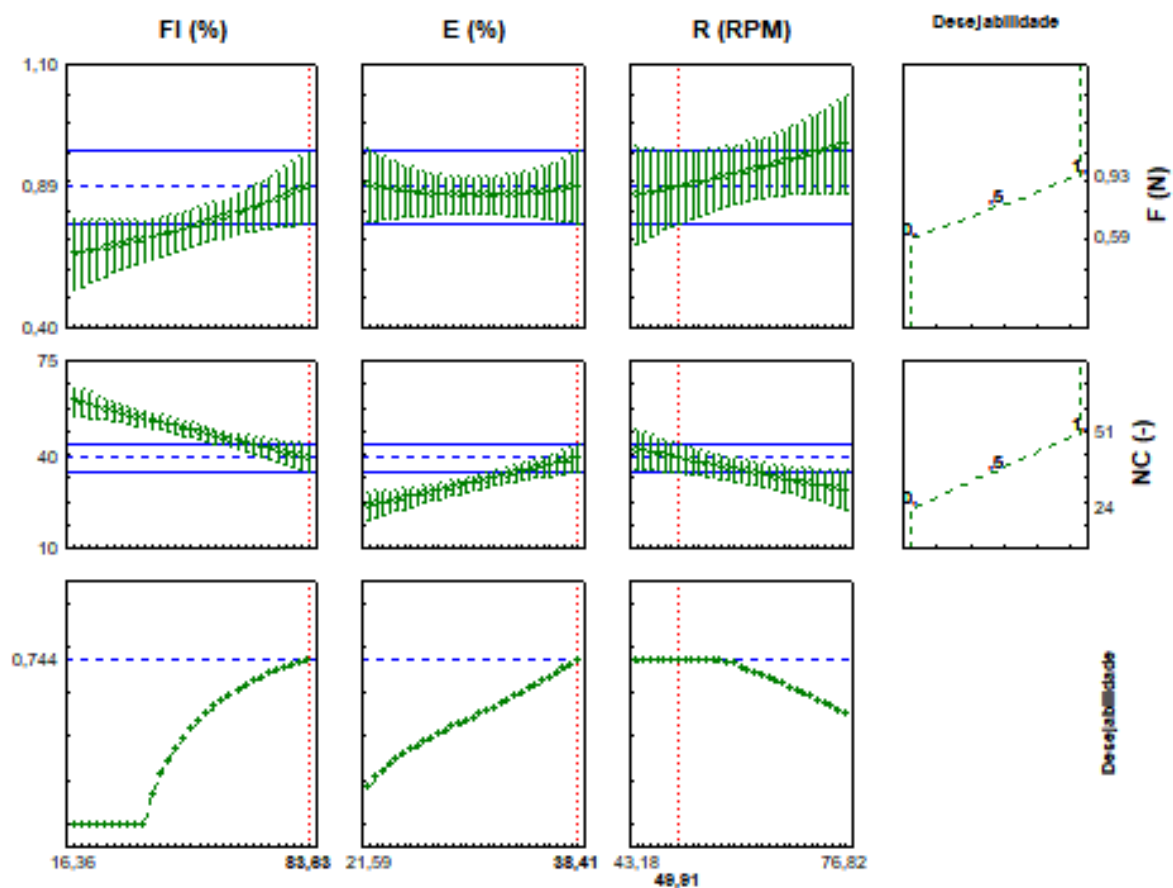


Figura C4 – Análise de desejabilidade para maximização simultânea do número de colisões (NC) e a força de colisão (F) na configuração C4 (25,40 e 19,05 mm).

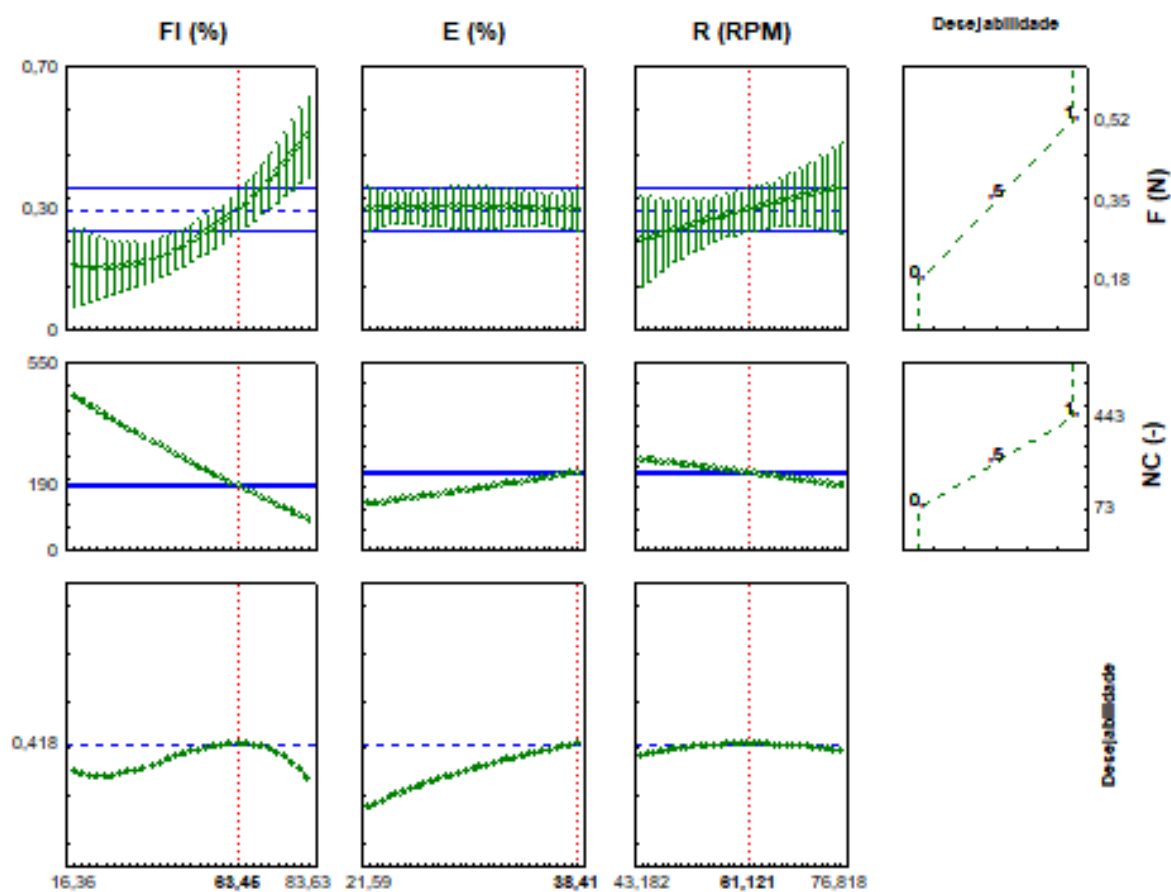


Figura C5 – Análise de desejabilidade para maximização simultânea do número de colisões (NC) e a força de colisão (F) na configuração C5 (25,40 e 12,70 mm).

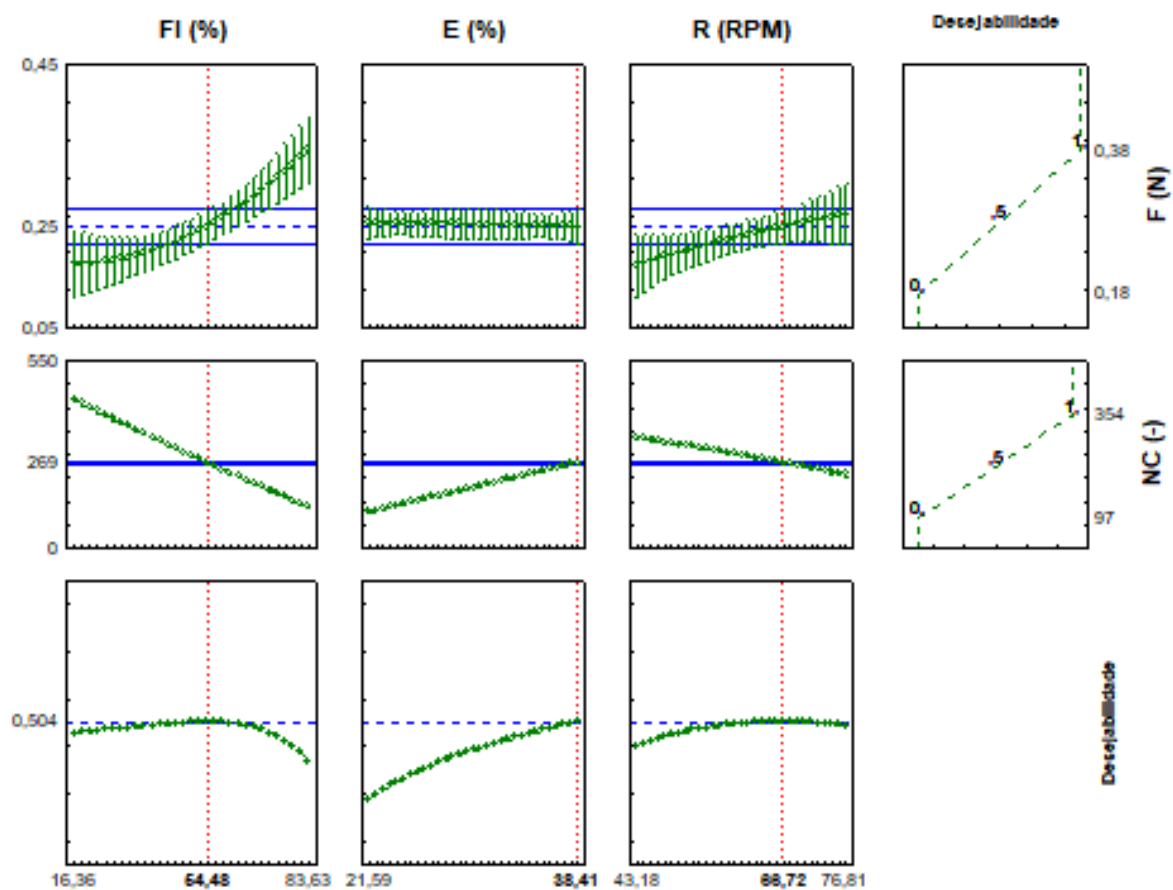


Figura C6 – Análise de desejabilidade para maximização simultânea do número de colisões (NC) e a força de colisão (F) na configuração C6 (19,05 e 12,70 mm).

Apêndice D – Resultados obtidos através da análise de variâncias das condições obtidas com o Planejamento Composto Central realizado na secagem da polpa de camu-camu em secador rotatório com recheio de inertes (SRRI).

Tabela D – Resultados da análise de variância para os bioativos após a secagem da polpa de camu-camu em SRRI.

Fator	TPC		TFC		AA		IC 50	
	Efeito	p	Efeito	p	Efeito	p	Efeito	p
Média	458,86	< 10 ⁻⁴	1,64	< 10 ⁻⁴	2317,50	< 10 ⁻⁴	55,99	< 10 ⁻⁴
FI	-4,69	0,0407	0,19	< 10 ⁻⁴	2,64	0,8248	5,87	0,0531
FI²	-5,38	0,0943	0,04	0,0850	47,20	0,0175	-6,24	0,1411
E	3,67	0,0968	0,02	0,2138	-8,61	0,4750	-3,93	0,1753
E²	6,92	0,0382	0,04	0,1502	13,87	0,4294	-2,75	0,4997
R	-5,29	0,0239	0,03	0,1491	-4,33	0,7166	-1,31	0,6380
R²	16,73	0,0001	0,04	0,1358	-1,38	0,9365	-2,69	0,5093
T	-20,39	< 10 ⁻⁴	0,21	< 10 ⁻⁴	-113,45	< 10 ⁻⁴	14,17	0,0003
T²	10,54	0,0043	0,04	0,1196	92,77	0,0002	-6,76	0,1138
FI . E	7,82	0,0057	0,05	0,0300	-18,56	0,1853	20,04	< 10 ⁻⁴
FI . R	-0,62	0,7899	0,03	0,1952	-22,58	0,1136	1,61	0,6096
FI . T	-3,92	0,1136	0,06	0,0074	-5,97	0,6582	0,54	0,8620
E . R	-0,20	0,9329	0,03	0,1781	-5,64	0,6762	-3,50	0,2768
E . T	0,95	0,6843	0,07	0,0029	-15,49	0,2632	-1,88	0,5505
R . T	0,85	0,7182	0,02	0,2005	13,64	0,3213	-1,88	0,5504