



PPGIES
Programa de Pós-Graduação
Interdisciplinar em
Energia e Sustentabilidade

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA INTEGRAÇÃO
LATINO-AMERICANA
INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
INTERDISCIPLINAR EM ENERGIA E
SUSTENTABILIDADE**

**OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DO PROCESSO DE ENCAPSULAÇÃO DE RESÍDUO DO
ABATE DE AVES VISANDO APLICAÇÃO COSMÉTICA**

CAROLINE MACHADO DA SILVA

Foz do Iguaçu - PR
2023



PPGIES
Programa de Pós-Graduação
Interdisciplinar em
Energia e Sustentabilidade

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA INTEGRAÇÃO
LATINO-AMERICANA
INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
INTERDISCIPLINAR EM ENERGIA E
SUSTENTABILIDADE**

OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DO PROCESSO DE ENCAPSULAÇÃO DE RESÍDUO DO ABATE DE AVES VISANDO APLICAÇÃO COSMÉTICA

CAROLINE MACHADO DA SILVA

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade do Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Energia e Sustentabilidade.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª Caroline da Costa Silva
Gonçalves

Coorientador: Prof. Dr. Leonardo da Silva Arrieche

Foz do Iguaçu - PR
2023

Catálogo elaborado pelo Setor de Tratamento da Informação
Catálogo de Publicação na Fonte. UNILA - BIBLIOTECA LATINO-AMERICANA - PTI

S586o

Silva, Caroline Machado da.

Otimização estrutural do processo de encapsulação de resíduo do abate de aves visando aplicação cosmoética /
Caroline Machado da Silva. - Foz do Iguaçu, 2023.
93 fls.: il.

Universidade Federal da Integração Latino-Americana, PRPPG, PPGIES.

Orientador: Caroline da Costa Silva Gonçalves.

Coorientador: Leonardo da Silva Arrieche.


1. Resíduos industriais - Aspectos ambientais. 2. Cosméticos - Indústria. 3. Engenharia de produção. 4.
otimização estrutural. I. Gonçalves, Caroline da Costa Silva. II. Arrieche, Leonardo da Silva. III. Título.

CDU 628.4


OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DO PROCESSO DE ENCAPSULAÇÃO DE RESÍDUO DO ABATE DE AVES VISANDO APLICAÇÃO COSMÉTICA

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade do Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito para à obtenção do título de Mestre em Energia e Sustentabilidade.


BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 CAROLINE DA COSTA SILVA GONCALVES
Data: 24/01/2023 19:05:48-0300
Verifique em <https://verificador.itl.br>


Orientadora: Prof^ª. Dr^ª Caroline da Costa Silva Gonçalves
UNILA

Documento assinado digitalmente
 LEONARDO DA SILVA ARRIECHE
Data: 26/01/2023 14:20:25-0300
Verifique em <https://verificador.itl.br>

Coorientador: Prof. Dr. Leonardo da Silva Arrieche
UNILA

Documento assinado digitalmente
 JANINE PADILHA BOTTON
Data: 24/01/2023 22:10:37-0300
Verifique em <https://verificador.itl.br>

Prof. Dr^ª. Janine Padilha Botton
UNILA

Documento assinado digitalmente
 LUIS ANTONIO LOURENCO
Data: 26/01/2023 15:02:00-0300
Verifique em <https://verificador.itl.br>

Prof. Dr. Luís Antonio Lourenço
UFSC

Foz do Iguaçu, 20 de janeiro de 2023.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer meus orientadores Caroline da Costa Silva Gonçalves e Leonardo da Silva Arrieche pelos ensinamentos, apoio e confiança desde os tempos da graduação.

Aos membros da banca: Luís Antonio Lourenço e Janine Padilha Botton pelas contribuições.

Gostaria de agradecer aos meus pais pelo amor e apoio incondicional em todas minhas decisões desde sempre. Assim como meu irmão Christopher, que mesmo longe sempre se fez presente.

Ao meu namorado, Nicolas, que ajudou durante todas as turbulências e sempre me incentivou a continuar.

Agradeço aos professores e demais membros do PPGIES pelos conhecimentos transmitidos e auxílio quando necessário. Assim como os colegas que dividiram tempo comigo, mesmo que não de forma presencial.

Ao meu grupo de amigos de longa data: Brenda, Débora, Fabiana, Gabriel, Karin, Luciana, Milton, Nicole e Raquel.

Agradecimento a UNILA pela oportunidade de realizar um Mestrado de excelência em minha cidade natal e a CAPES pela bolsa concedida para realização desse título.

Por fim, agradeço a todos que possam ter contribuído de forma direta, ou indireta, para esse trabalho.

*Explore o mundo. Quase tudo é realmente interessante se
você se aprofundar o suficiente. **Richard P. Feynman***

RESUMO

A grande geração de resíduos proveniente do abate de frangos no país gera a necessidade de inovações para aproveitamento desses materiais. O soro sanguíneo, rico em albumina e globulinas, por exemplo, pode ser utilizado como matéria-prima da indústria de cosméticos, minimizando seu impacto ambiental e agregando valor a esse material. Normalmente, para evitar degradação e aumentar seu tempo de vida o soro é comercializado em forma de cápsulas, que podem ser utilizadas na formulação de diversos produtos, como cremes, pomadas, loções, entre outros. A encapsulação pode ser realizada com diferentes materiais e técnicas, gerando uma vasta gama de possibilidades de aplicação. Para minimizar o tempo e custo de produção, podem ser utilizados métodos da Engenharia de Processos para otimização de processos industriais. Logo, esse trabalho visa otimizar o processo de encapsulação de soro sanguíneo residual do abate de aves, objetivando cápsulas de soro aplicáveis em cosméticos como produto. Para obtenção de um fluxograma base utilizou-se a representação do processo por meio de árvore de estados seguida pela análise com método heurístico acoplado a lógica fuzzy. A validação do fluxograma base como ótimo, ou não, foi realizada pelo método evolutivo. Para a elaboração da árvore de estados foram consideradas 5 diferentes rotas tecnológicas (polimerização, coacervação, extrusão, emulsificação e secagem), o que originou um total de 3.808 fluxogramas. Para cada rota e seus subsistemas, 42 regras heurísticas foram definidas. A aplicação dos métodos foi realizada em dois cenários: o primeiro consiste em uma empresa com alto valor de investimento visando nanocápsulas e o segundo em uma microindústria com poucos recursos com o objetivo de microcápsulas. O primeiro cenário resultou em um fluxograma base da rota de polimerização contendo as etapas de: homogeneização do material encapsulante, encapsulação em reator em batelada, separação em centrífuga e lavagem. No segundo cenário o resultado foi um fluxograma base da rota de secagem com duas etapas: homogeneização do material encapsulante e encapsulação em spray dryer. Após aplicado o método evolutivo, ambos os fluxogramas base foram considerados ótimos, para as condições definidas em cada cenário. O primeiro cenário apresenta 16 vizinhos estruturais e tem sua análise realizada de forma qualitativa. Enquanto o segundo cenário apresenta 15 vizinhos estruturais e sua análise foi feita de forma quantitativa, utilizando uma análise de margem de lucro bruto como parâmetro base. Deste modo, o trabalho permitiu a otimização do processo de produção de cápsulas de soro a partir desse resíduo de forma promissora, minimizando possíveis gastos e promovendo o desenvolvimento sustentável.

Palavras-chave: encapsulação de soro, cosméticos, árvore de estados, método heurístico-evolutivo, lógica fuzzy e otimização estrutural.

RESUMEN

La gran generación de residuos proveniente del abate de pollos en país genera la necesidad de innovaciones para aprovechamiento de estos materiales. El suero sanguíneo, rico en albumina y globulinas, por ejemplo, puede ser utilizado como materia-prima de la industria de cosméticos, minimizando su impacto ambiental y agregando valor a eso material. Normalmente, para evitar degradación y aumentar su tiempo de vida el suero es comercializado en forma de capsulas, que pueden ser utilizadas en la formulación de diversos productos, como cremas, pomadas, lociones, entre otros. La encapsulación puede ser realizada con diferentes materiales y técnicas, generando una vasta gama de posibilidades de aplicación. Para minimizar el tiempo y costo de producción, pueden ser utilizados métodos de la Ingeniería de Procesos para optimización de procesos industriales. Pronto, este trabajo visa optimizar el proceso de encapsulación del suero sanguíneo residual de lo abate de aves, objetivando capsulas de suero aplicables en cosméticos como producto. Para obtención de un flujograma base se utilizó la representación de lo proceso por medio de árbol de estados seguida por el análisis con método heurístico acoplado con lógica fuzzy. La validación del flujograma base como optimo, o no, fue realizada por lo método evolutivo. Para la elaboración del árbol de estados fueron consideradas 5 diferentes rotas tecnológicas (polimerización, coacervación, extrusión, emulsificación y secado), que originó un total de 3.808 flujogramas. Para cada rota y sus subsistemas, 42 reglas heurísticas fueron definidas. La aplicación de los métodos fue realizada en dos escenarios: el primero consiste en una empresa con alto valor de investimento visando nanocápsulas y el segundo en una microindustria con pocos recursos con el objetivo de microcápsulas. El primer escenario resultó en un flujograma base de la rota de polimerización que contiene las etapas de: homogenización de lo material encapsulante, encapsulación en reactor en lote, separación en centrifuga y lavaje. En lo segundo escenario el resultado fue un flujograma base de la rota de secado con dos etapas: homogenización del material encapsulante y encapsulación en spray dryer. Después de aplicado lo método evolutivo, ambos los flujogramas base fueron considerados óptimos para las condiciones definidas en cada escenario. El primer escenario presenta 16 vecinos estructurales y tiene su análisis realizada de forma cualitativa. Mientras el segundo escenario presenta 15 vecinos estructurales y su análisis fue hecha de forma cuantitativa, utilizando un análisis de margen de lucro bruto como parámetro base. De este modo, el trabajo he permitido la optimización del proecso de producción de capsulas de suero de esto residuo de forma prometedora, minimizando posibles gastos y promoviendo el desarrollo sustentable.

Palabras clave: encapsulación de suero, cosméticos, árbol de estados, método heurístico-evolutivo, lógica fuzzy e optimización estructural.

ABSTRACT

Great generation of waste from chicken slaughter in the country creates the need of innovations regarding the use of these materials. Blood serum, rich in albumin and globulins, for instance, can be utilized as raw material to the cosmetics industry, minimizing its environmental impact and adding value to this material. Usually, to avoid degradation and also to increase shelf-life serum is commercialized in form of capsules, that can be in different products – creams, ointments, lotions, among others. Encapsulation can be realized with distinct materials and techniques, generating a wide range of project possibilities. In order of minimizing production time and cost, Process Engineering methods can be utilized for industrial process optimization. Therefore, this work aims to optimize the encapsulation of residual blood serum from poultry slaughter, intending to obtain serum capsules that can be inserted in cosmetic products. To obtain a base flowchart a process representation by analytical hierarchy process (also known as state tree) followed by analysis by heuristic method coupled with fuzzy logic. An evolutionary method is used to validate if the base flowchart is optimum or not. For elaborating the state tree, 5 different technological routes were considered (polymerization, coacervation, extrusion, emulsification and drying), originating 3.808 flowcharts. For each route and its subsystems, 42 heuristics rules are defined. The method's enforcement is realized in two scenarios: first consist of a company with a high value of investment aiming for nanocapsules and the second one in a micro industry with scarce resources with the goal of microcapsules. The first scenario results in a base flowchart of the polymerization route with the following steps: homogenization of encapsulating material, encapsulation in batch reactor, separation in centrifuge and washing. In the second scenario the result was a base flowchart of the drying route with two steps: homogenization of encapsulating material and encapsulation in spray dryer. After the evolutionary method was executed, both base flowcharts were considered optimum, for the defined conditions in each scenario. First scenario presented 11 structural neighbors and had its analysis done in a qualitative manner. While the second scenario possessed 14 structural neighbors and its analysis was made in a quantitative manner, utilizing a rough profit margin analysis as a basis parameter. In this way, this work achieved a process optimization of serum capsules production from this waste in a promising way, minimizing expenses and promoting a sustainable development.

Keywords: serum encapsulation, cosmetics, analytical hierarchy process, heuristic-evolutionary method, fuzzy logic and structural optimization.

LISTA DE SIGLAS

PIB	Produto interno bruto
ONG	Organização não governamental
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
SPA	Secretaria de Política Agrícola
VBP	Valor bruto da produção agropecuária
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> – Organização Internacional de Normalização
NBR	Norma técnica brasileira
pH	Potencial hidrogeniônico
AHP	<i>Analytical hierarchy process</i> – Processo hierárquico analítico
FAHP	<i>Fuzzy analytical hierarchy process</i> – Processo hierárquico analítico difuso
PO	Rota de polimerização
EM	Rota de emulsificação
SE	Rota de secagem
EX	Rota de extrusão
CO	Rota de coacervação
SPT	Sem pré-tratamento do soro
TM	Tanque de mistura
SHME	Sem homogeneização do material encapsulante
RB	Reator em batelada
RSB	Reator semibatelada
PFR	<i>Plug flow reactor</i> – Reator de fluxo em pistão
CSTR	<i>Continuous stirred-tank reactor</i> – Reator tanque agitado contínuo
RLF	Reator de leito fluidizado
MEB	Misturador emulsificador em batelada
MEC	Misturador emulsificador contínuo
SLJ	Secador de leite em jorro
SLF	Secador de leite fluidizado
SP	<i>Spray dryer</i> – Secador por atomização

LI	Liofilizador
TMQJ	Tanque de mistura acoplado com dispositivo de quebra por jato vibratório
TMDR	Tanque de mistura acoplado com dispositivo de disco rotatório
TMME	Tanque de mistura acoplado com múltiplos bocais
MD	Misturador decantador
SS	Sem separação
SPE	Separação por peneiramento
SF	Separação por filtração
SC	Separação por centrifugação
SL	Sem lavagem
SSC	Sem secagem
STU	Secador de túnel
STA	Secador de tambor

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Desenho esquemático de uma microcápsula.....	20
Figura 2 – Esquematização do processo de <i>spray-drying</i>	24
Figura 3 - Esquematização do processo de recobrimento em leito fluidizado: (a) recobrimento pelo topo, (b) recobrimento pelo fundo e (c) recobrimento tangencial.....	25
Figura 4 – Esquematização do processo de <i>spray-cooling</i>	26
Figura 5 - Representação de árvore de estados genérica.	32
Figura 6 - Função de pertinência trapezoidal da entrada do exemplo.....	35
Figura 7 - Esquematização da metodologia do projeto.	37
Figura 8 - Subsistemas envolvidos no processo de encapsulação.	38
Figura 9 - Árvore de estados simplificada.....	45
Figura 10 - Regras heurísticas para rota tecnológica.....	46
Figura 11 - Regras heurísticas para rota de polimerização.....	47
Figura 12 - Regras heurísticas para rota de secagem.	48
Figura 13 – Regras heurísticas para rota de emulsificação.	48
Figura 14 - Regras heurísticas para o subsistema de separação.	49
Figura 15 - Regras heurísticas para o subsistema de secagem das cápsulas.	50

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Possível destinação de cada resíduo da indústria de abate de aves.	18
Quadro 2 – Exemplos de métodos para encapsulação.....	23
Quadro 3 - Vantagens e desvantagens de métodos utilizados para encapsulação.....	28
Quadro 4 – Relação entre técnicas de encapsulação e tamanho de partículas.	29
Quadro 5 – Relação entre materiais encapsulantes e técnicas de encapsulação.....	38
Quadro 6 – Fontes utilizadas para definição de regras para cada subsistema.	39
Quadro 7 – Variáveis de entrada e saída, seus códigos, universo e conjuntos <i>fuzzy</i>	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Análise de preços de materiais encapsulantes.	43
Tabela 2 – Valores de entrada e seus equivalentes linguísticos (cenário 1).....	51
Tabela 3 – Valores de saída e seus equivalentes linguísticos (cenário 1).	52
Tabela 4 – Valores de entrada e seus equivalentes linguísticos (cenário 2).....	53
Tabela 5 – Valores de saída e seus equivalentes linguísticos (cenário 2).	54
Tabela 6 – Determinação dos vizinhos estruturais (cenário 1).....	55
Tabela 7 – Determinação dos vizinhos estruturais e seus custos (cenário 2).....	58

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS	16
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	17
2.1 RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS	17
2.1.1 Resíduos do abate de aves	18
2.1.2 Utilização do soro sanguíneo em formulações cosméticas	19
2.2 ENCAPSULAÇÃO	20
2.2.1 Escolha de materiais encapsulantes	21
2.2.2 Técnicas de encapsulação	23
2.2.3 Secagem de cápsulas	30
2.3 ENGENHARIA DE PROCESSOS	31
2.3.1 Árvore de estados	31
2.3.2 Métodos heurístico e evolutivo.....	32
2.3.3 Lógica fuzzy	34
3 METODOLOGIA.....	37
3.1 SÍNTESE DA ÁRVORE DE ESTADOS.....	37
3.2 MÉTODO HEURÍSTICO	39
3.2.1 Lógica fuzzy	40
3.3 MÉTODO EVOLUTIVO	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1 ÁRVORE DE ESTADOS	43
4.1.1 Materiais encapsulantes	43
4.1.2 Rotas tecnológicas e subsistemas	44
4.2 REGRAS HEURÍSTICAS	46
4.2.1 Rota tecnológica	46
4.2.2 Pré-tratamento do soro.....	46

4.2.3 Homogeneização do material encapsulante.....	47
4.2.4 Encapsulação	47
4.2.5 Separação.....	49
4.2.6 Lavagem.....	49
4.2.7 Secagem das cápsulas	50
4.3 MÉTODO HEURÍSTICO ALIADO A LÓGICA FUZZY	50
4.3.1 Primeiro cenário: nanocápsulas com valor de investimento alto	50
4.3.2 Segundo cenário: microcápsulas com valor de investimento baixo	52
4.4 APLICAÇÃO DO MÉTODO EVOLUTIVO	55
4.4.1 Determinação dos vizinhos estruturais do primeiro cenário	55
4.4.2 Determinação dos vizinhos estruturais e seus custos (segundo cenário).....	57
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	59
REFERÊNCIAS	61
APÊNDICES.....	68
APÊNDICE A – PLANILHA DE ORÇAMENTOS DOS MATERIAIS ENCAPSULANTES.....	70
APÊNDICE B – PLANILHA DE ORÇAMENTOS DE PRODUTOS COSMÉTICOS COM CÁPSULAS.....	73
APÊNDICE C – PLANILHA DE ORÇAMENTOS DOS EQUIPAMENTOS	74
APÊNDICE D – PONTOS UTILIZADOS NAS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA	78
APÊNDICE E – CÓDIGO PARA DETERMINAÇÃO DOS VIZINHOS E SEUS CUSTOS.....	80
APÊNDICE F – RESULTADOS DA MODELAGEM DO CENÁRIO 1	85
APÊNDICE G – RESULTADOS DA MODELAGEM DO CENÁRIO 2.....	86
APÊNDICE H – REGRAS HEURÍSTICAS APLICADAS NA TOOLBOX.....	87
APÊNDICE I – FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA DAS VÁRIÁVEIS DE ENTRADA.....	88
APÊNDICE J – FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE SAÍDA	91

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o terceiro maior produtor de frangos do mundo, sendo o estado do Paraná o maior responsável por essa produção, em torno de 32% (EMBRAPA, 2020). O abate de frango gera diversos resíduos, tais como: fezes, penas, sangue, vísceras, ossos, couro e gordura, os quais podem ser reaproveitados, gerando novos produtos e materiais. Logo, é essencial a agregação de valor e utilização sustentável desses resíduos.

Dentre os resíduos de abate de frango, o sangue é pouco empregado comercialmente (com apenas 3% sendo reutilizado) apesar de apresentar grande valor industrial devido a sua composição (PINTO et al., 2015). A albumina e globulinas presentes no soro sanguíneo, por exemplo, possuem capacidade de gelatinização e emulsificação – características de grande interesse na indústria cosmética (SORAPUKDEE; NARUNATSOPANON, 2017). Além disso, a albumina possui propriedades de suavização da pele, assim é ideal para produtos antirrugas (BENNET; HELENE CURTIS INDUSTRIES, 2017). Consequentemente, visando o aumento de valor desse resíduo e minimização do seu impacto ambiental, o soro sanguíneo pode ser utilizado em produtos cosméticos, considerados de alto valor econômico.

O soro sanguíneo necessita de proteção das condições ambientais pois pode sofrer processos de oxidação, degradação ou decomposição (SHAHGHOLIAN; RAJABZADEH, 2019). Assim, a fim de melhorar as propriedades deste material, ele pode ser encapsulado, aumentando sua estabilidade e biodisponibilidade, além de permitir a liberação controlada do material ativo (SHARMA; PORAT; GEDANKEN, 2021). Esse controle de liberação em conjunto com o fato de permitir a permeação dos seus agentes ativos na pele humana, torna as cápsulas muito valiosas na indústria cosmética (POLETTTO et al., 2011). Atualmente, diversas empresas possuem produtos (cremes, pomadas, sabonetes, loções, géis, óleos, etc) com microcápsulas ou nanocápsulas como, por exemplo, a L'Óreal, Lâncome e Nivea (EKPA EFFIONG et al., 2020).

A encapsulação consiste no aprisionamento de um material ativo em uma matriz polimérica e pode ser realizada com diversos materiais e técnicas – físicas, químicas ou físico-químicas (CASANOVA; SANTOS, 2016). Além disso, essas técnicas podem empregar diferentes equipamentos (secadores, tanques, reatores, entre outros). As variadas combinações possíveis de materiais, técnicas e equipamentos geram dificuldade na obtenção de um fluxograma ótimo de processo. Nesse contexto, a Engenharia de Processos, que tem por objetivo minimizar o tempo e custo de processos, oferece diferentes técnicas para otimização desses (PERLINGEIRO, 2018). Uma dessas técnicas é a representação de fluxogramas

plausíveis por meio de árvore de estados, seguida de método heurístico e evolutivo para resolução da sua otimização (PERLINGEIRO, 2018). Para simplificar a análise, esses podem ser utilizados em conjunto com a Lógica *Fuzzy*, que utiliza de entradas e saídas difusas representando expressões linguísticas vagas, facilitando sua conversão para informações que o computador possa entender (LIU; ECKERT; EARL, 2020).

1.1 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

Esse trabalho objetiva otimizar, de forma estrutural, o processo de encapsulação do soro sanguíneo residual proveniente do abate de aves, visando aplicação futura dessas cápsulas em cosméticos, agregando valor a esse resíduo. Os objetivos específicos são:

- Realizar uma revisão bibliográfica de materiais, técnicas e equipamentos utilizados na encapsulação de proteínas;
- Sistematizar o processo de encapsulação utilizando árvore de estados;
- Definir regras heurísticas para cada subsistema da árvore;
- Aplicar a lógica *fuzzy*, em conjunto com as regras definidas, para obtenção do fluxograma base do processo;
- Utilizar o método evolutivo para definição do fluxograma ótimo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

O presente capítulo aborda a fundamentação teórica para desenvolvimento e compreensão da pesquisa. Inicialmente, discorre acerca de resíduos agroindustriais, especialmente no abate de aves. Após, fundamenta a encapsulação e suas técnicas, com especial importância em sua aplicação industrial, visando fundamentar a otimização do processo. Por fim, são discutidas a representação estrutural por árvore de estados e técnicas de otimização – método heurístico, método evolutivo e lógica *fuzzy*.

2.1 RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS

A agroindústria no Brasil apresentou uma taxa de 2,36% de crescimento acumulado em 2019 e foi responsável por 20% do PIB (produto interno bruto) do país (IPEA; EMBRAPA; UDOP, 2020). Os principais estados responsáveis pela agropecuária-agroindústria em 2021 foram: Mato Grosso, Paraná, São Paulo, Rio Grande do Sul e Minas Gerais, sendo que o Paraná respondeu por 13% dessa produção (SPA, 2021).

Os resíduos são gerados no processo produtivo e podem possuir grande valor econômico, logo podem ser reaproveitados em outro processo industrial. Eles podem ser provenientes de desperdício de insumos, perdas na produção e materiais gerados ao longo do processamento. Esses resíduos podem poluir solos e corpos hídricos e têm efeito direto no preço final do produto, devido ao custo associado a tratamento, transporte e disposição desse. Além disso, recentemente as questões relacionadas com meio ambiente se tornaram uma preocupação constante de empresas, comunidades, governantes, ONGs e indústrias. A certificação pelas normas ISO 14000 (no Brasil, NBR ISO 14001) – que estabelece diretrizes para a área de gestão ambiental - é primordial para uma empresa se manter no mercado atual (HAYASHI, 2020).

Nesse contexto, o aproveitamento de resíduos agroindustriais se mostra essencial para agregação de valor perdido e utilização sustentável desses produtos. Os materiais orgânicos que não podem ser reciclados, por exemplo, são aproveitados como ingredientes em formulações de novos produtos (SANTOS, 2012): rações, biodiesel, materiais biodegradáveis, resinas, geração de gás, papéis, esponjas, compósitos, entre muitos outros (SANTOS, 2012). O uso de técnicas que agreguem valor e promovam a destinação adequada dos resíduos é fundamental para otimizar a eficiência e reduzir o impacto ambiental de agroindústrias.

2.1.1 Resíduos do abate de aves

Os resíduos, subprodutos e rejeitos encontrados no abate de aves são chamados de “resíduos agrossilvopastoris” e são: fezes, penas, água de limpeza, sangue, gordura, vísceras, carcaças e pequenos pedaços de carne (PINTO et al., 2015). No Quadro 1 é apresentado a destinação usual de cada resíduo na maior parte das indústrias.

Quadro 1 – Possível destinação de cada resíduo da indústria de abate de aves.

Resíduo	Possível destinação
Fezes	Fertilização
Penas	Reutilizado no processo (etapa de cozimento), ração
Água de limpeza	Estação de tratamento de efluentes
Sangue	Reutilizado no processo (etapa de cozimento), compostagem
Gordura	Ração
Vísceras	Ração
Carcaças	Ração, compostagem, enterro
Pequenos pedaços de carne	Ração, compostagem

Fonte: Pinto *et. al.* (2015) e Padilha, Leavy e Jerônimo (2005).

No Quadro 1 é possível notar que apesar de já existirem alguns fins comerciais para os resíduos gerados no abate de aves – em sua maioria se torna ração animal – ainda há espaço para grandes avanços, em relação ao desenvolvimento de alternativas de tratamento e destinação. Essa área é de extrema importância pois em uma indústria de abate de grande porte são produzidos, em torno de, 94.875 kg de resíduos por dia, a partir de 165.000 aves por dia (PADILHA; LEAVY; JERÔNIMO, 2005).

Assim, devido a relevância do abate de aves no Brasil - terceiro maior produtor de frangos do mundo (EMBRAPA, 2020) e o terceiro maior exportador mundial (ESTADÃO CONTEÚDO, 2018) - os resíduos e subprodutos do abate de aves devem ter gerenciamento adequado, de forma que propiciem a recuperação, aproveitamento desses materiais e minimização do impacto ambiental (PINTO et al., 2015).

2.1.2 Utilização do soro sanguíneo em formulações cosméticas

O sangue é composto de células sanguíneas e materiais suspensos no plasma – albumina (56%), globulinas (40,2%) e fibrinogênio (0,6%) (SORAPUKDEE; NARUNATSOPANON, 2017). O soro sanguíneo (plasma sem fibrinogênio e fatores de coagulação) apresenta grande interesse na indústria alimentícia devido às suas propriedades de gelatinização, emulsificação, estabilização, substituição de gorduras e formação de espumas (SORAPUKDEE; NARUNATSOPANON, 2017). Adicionalmente, estas propriedades despertam também o interesse da indústria cosmética. Por exemplo, o soro sanguíneo bovino vem sendo utilizado para produtos antirrugas desde 1960, devido a sua facilidade de extração e alto conteúdo de albumina (entre 80 e 95%) (BENNET; HELENE CURTIS INDUSTRIES, 2017). O sangue de aves apresenta maior tendência à gelatinização e emulsificação (provavelmente devido à diferença na composição de aminoácidos de cada um) em relação ao de porco e boi (SORAPUKDEE; NARUNATSOPANON, 2017). Essas são características importantes para a indústria de cosméticos em diversos produtos como cremes, loções, pomadas, produtos para cabelo, entre outros.

De forma simples, uma loção antirrugas pode ser produzida com uma fonte de albumina, um adstringente e um óleo que não irrita a pele (BENNET; HELENE CURTIS INDUSTRIES, 2017). A albumina é extraída de soro (normalmente humano) e é utilizada como agente hipoalergênico dermatológico, condicionante, cosmético ou de limpeza para tratamento de pele ou cabelo (GROSSER, 2010). Nesse caso, ela é extremamente versátil, podendo ser usada na formulação de sabão, xampu, creme, óleo, loção, gel, pomada e similares, sendo absorvida na superfície da pele ou cabelo (GROSSER, 2010). Devido a sua característica hidratante e de suavização da pele, a albumina extraída de soro humano também é aplicada em loções, cremes, óleos e géis para tratamento cosmético de rugas, cicatrizes e queimaduras (THOTTAN; CHUANYI, 2006). As globulinas, embora em menor concentração, também apresentam características importantes, pois possuem atividade antioxidante e podem ser carreadoras de diferentes agentes (DE WIT, 1998). No mais, o soro ou plasma umbilical pode ser utilizado em pomadas de cuidados da pele e outras preparações cosméticas, melhorando textura da pele e reduzindo rugas (FRIEDLANDER, 2012). Nesse contexto se fortalece o potencial de utilizar o soro sanguíneo de aves para aplicação em cosméticos.

2.2 ENCAPSULAÇÃO

A encapsulação é uma técnica utilizada para “aprisionar” partículas de líquidos, sólidos ou gases em uma matriz que pode ser constituída de um ou dois polímeros combinados (PEANPARKDEE; IWAMOTO; YAMAUCHI, 2016). Na Figura 1 é apresentado um exemplo, onde o componente encapsulado é chamado de caroço ou núcleo (*core*) e o componente encapsulante é chamado de parede ou casca (*shell*).

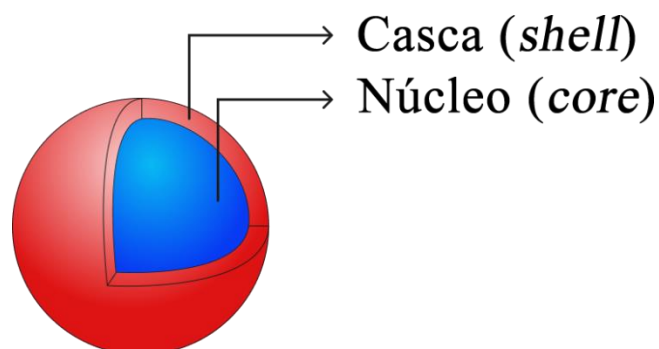


Figura 1 – Desenho esquemático de uma microcápsula.
Fonte: A autora.

O objetivo da encapsulação é proteger o material encapsulado de intempéries (luz, umidade, temperatura e oxigênio), aumentar a estabilidade do produto e melhorar sua biodisponibilidade, sendo esta técnica utilizada na indústria de alimentos, farmacêutica, têxtil e de cosméticos (PEANPARKDEE; IWAMOTO; YAMAUCHI, 2016).

A encapsulação é interessante para produtos cosméticos, pois a entrada tópica e transdermal dos ingredientes ativos requer meios seguros e atóxicos que não causem irritação na pele ou dano ao cabelo. Além disso, durante a formulação, armazenamento e aplicação é necessária a preservação do agente ativo (AMMALA, 2013). Muitos dos agentes ativos são sensíveis à luz, pH, temperatura e oxidação, sendo a encapsulação ideal para evitar sua degradação e permitir a liberação controlada da substância (AMMALA, 2013; CASANOVA; SANTOS, 2016). A microencapsulação já foi utilizada em produtos de banho, loções, cremes, produtos de cabelo, protetores solares, cremes de bronzamento, maquiagem, perfumes, sabonetes, esfoliantes, cremes dentais, entre outros (CASANOVA; SANTOS, 2016).

Várias indústrias possuem patentes de processos envolvendo encapsulação em cosméticos. Como exemplo, a Unilever tem produtos com pigmentos colorantes encapsulados (GHATLIA; SONA; ANG, 2007), a Coreana Cosmetics CO utiliza uma tripla encapsulação (duas por lipossomos e uma por emulsão) de retinol (LEE et al., 2005) e a Maybelline que

utiliza um componente hidratante (como proteínas) encapsulado por lipossomos em maquiagem (COHEN; ROSS; SUSS, 2002).

Três fatores são essenciais para a encapsulação: a escolha de técnica, escolha de materiais (núcleo e casca) e a otimização das condições para o processo (PEANPARKDEE; IWAMOTO; YAMAUCHI, 2016). Esses fatores serão discutidos nas seções seguintes.

2.2.1 Escolha de materiais encapsulantes

A utilização de materiais poliméricos para encapsulação de agentes ativos se faz bastante interessante, pois estes aumentam a permeação da pele, interferindo na organização intercelular lipídica do estrato córneo (camada mais externa da pele) (AMMALA, 2013). Nesse contexto, é interessante o uso de biopolímeros pois esses não reagem quando em contato com a pele humana e são metabolizados pelo organismo, logo não se acumulam em tecidos e não causam irritações (CASANOVA; SANTOS, 2016). Exemplos de materiais que são encapsulantes e utilizados em cosméticos: colágeno, quitosana, ácido hialurônico, alginatos, carragenas, gomas, gelatina, celulose, pectinas, ciclodextrinas, amido e polímeros sintéticos (AMMALA, 2013; MITURA; SIONKOWSKA; JAISWAL, 2020).

O alginato é um polímero de ocorrência natural não-tóxico, extraído de algas marrons, muito utilizado na indústria biotecnológica por apresentar características espessantes, gelificantes e ser um estabilizador coloidal (CHING; BANSAL; BHANDARI, 2017). Além disso, apresenta propriedades que favorecem sua utilização como encapsulante para a liberação de diversas proteínas e células: condição inerte em sua matriz, permite encapsulação em temperatura ambiente sem uso de solventes orgânicos, porosidade alta que permite a difusão em altas taxas de macromoléculas, possibilidade de controle da porosidade com procedimentos de recobrimento e dissolução e biodegradabilidade do sistema em condições normais (GOMBOTZ; WEE, 1998). O alginato é muito utilizado na liberação controlada de proteínas encapsuladas, variando sua concentração (AMMALA, 2013). A encapsulação de proteínas com alginato é bastante comum, pois não costuma ter impacto em suas propriedades funcionais (ZHANG et al., 2016).

Outro polímero de ocorrência natural que pode ser utilizado é a quitosana, especialmente em uso tópico e de liberação transdermal, devido à não-toxicidade, biocompatibilidade e adesão (AMMALA, 2013; MITURA; SIONKOWSKA; JAISWAL, 2020). Além disso, a quitosana pode aumentar a permeação através da pele, alterando a estrutura da queratina (AMMALA, 2013). Aplicada na pele, a quitosana permite a liberação

controlada dos ativos e funciona como umectante, aumentando o teor de água e mantendo a pele macia e lisa (MITURA; SIONKOWSKA; JAISWAL, 2020).

Ciclodextrinas são oligossacarídeos que têm a característica de formar complexos de inclusão com moléculas hidrofóbicas dentro de sua cavidade interna e são utilizadas em cosméticos para controle de liberação dos ativos e melhor permeação através da pele (AMMALA, 2013). Dentre suas vantagens, o uso de ciclodextrinas aumenta a solubilidade e biodisponibilidade das moléculas, é atóxica, pode ser produzida a partir de amido com técnicas de química verde e tem sua liberação controlada por pH, temperatura ou presença de aditivos (DA ROSA et al., 2013; ZARZYCKI; FENERT; GŁÓD, 2016).

A gelatina é um polímero derivado do colágeno que é solúvel em água quente e gelifica em, aproximadamente, 36 °C e é um dos materiais encapsulantes mais clássicos para diversas aplicações (LI; WANG; WU, 1998; MITURA; SIONKOWSKA; JAISWAL, 2020), pois não é tóxico, é biodegradável, de baixo custo e não imunogênico (ULUBAYRAM; EROGLU; HASIRCI, 2002). Esse polímero pode ser extraído de diversas fontes animais: pele de porco, couro de boi, ossos de boi/porco e até de pele/ossos de peixe, podendo também ser proveniente de resíduos agroindustriais (DUONSEILLE et al., 2015; NURILMALA et al., 2020). Embora mais empregada oralmente, pode ser utilizada para aplicações na pele, tendo uma liberação controlada, evitando a overdose de ativos (CHENG et al., 2009).

As carragenas – biopolímeros derivados de algas - possuem diversas propriedades: hidrofiliabilidade, dureza, biocompatibilidade e biodegradabilidade (MITURA; SIONKOWSKA; JAISWAL, 2020) e são utilizadas para liberação controlada de ativos como material encapsulante (DEWI; PURNAMAYATI; KURNIASIH, 2016). Seu alto peso molecular, alta viscosidade e capacidade de gelatinização permitem seu uso em diversas formulações cosméticas, encapsulando sabores, fragrâncias, probióticos, entre outros (CHAKRABORTY, 2017).

Além de polímeros, podem ser utilizadas vesículas nanocarreadoras, como lipossomos que melhoram a eficácia de liberação na pele e facilitam a permeação devido a sua composição lipídica (CAMPANI et al., 2020). Os lipossomos são vesículas compostas de bicamadas fosfolípídicas delimitando um compartimento aquoso, podendo ser utilizado para encapsular substâncias hidrofílicas, hidrofóbicas e anfifílicas (MAIONE-SILVA et al., 2019; SHERRY et al., 2013). Eles são biodegradáveis, biocompatíveis, não tóxicos e não imunogênicos (SHERRY et al., 2013) e são ideais para liberação de ativos na camada superficial da pele, sem ocorrer a absorção sistêmica desses (GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ; RABASCO, 2011).

2.2.2 Técnicas de encapsulação

Diferentes metodologias químicas, físicas ou físico-químicas podem ser empregadas na obtenção de cápsulas, alguns exemplos são descritos no Quadro 2 (PEANPARKDEE; IWAMOTO; YAMAUCHI, 2016).

Quadro 2 – Exemplos de métodos para encapsulação.

Métodos químicos	Referências
Polimerização	Casanova; Santos (2016); FIB (2013); Peanparkdee; Iwamoto; Yamauchi (2016)
Uso de lipossomos (inclusão molecular)	Peanparkdee; Iwamoto; Yamauchi (2016); Zuidam; Shimon (2010)
Métodos físicos	Referências
<i>Spray-drying</i>	Casanova; Santos (2016); FIB (2013); Peanparkdee; Iwamoto; Yamauchi (2016); Zuidam; Shimoni (2010)
Recobrimento em leito fluidizado	Casanova; Santos (2016); FIB (2013); Peanparkdee; Iwamoto; Yamauchi (2016); Zuidam; Shimoni (2010)
<i>Spray-cooling</i> ou <i>spray-chilling</i>	Casanova; Santos (2016); FIB, (2013); Zuidam; Shimoni (2010)
Extrusão	FIB (2013); Zuidam; Shimoni (2010)
Liofilização (<i>freeze-drying</i>)	Fang; Bhandari (2012)
Recobrimento em leito de jorro	Oliveira <i>et al.</i> (2007); Velázquez-Contreras; Osorio-Revilla; Gallardo-Velázquez (2014)
Métodos físico-químicos	Referências
Coacervação	Casanova; Santos (2016); FIB (2013); Peanparkdee; Iwamoto; Yamauchi (2016); Zuidam; Shimoni (2010)
Sol-gel	Casanova; Santos (2016); Peanparkdee; Iwamoto; Yamauchi (2016)
Emulsificação	Zuidam; Shimoni (2010)
Extração-evaporação de solvente	Casanova; Santos (2016); FIB (2013)
Assistido por fluido supercrítico	Zuidam; Shimoni (2010)

Fonte: A autora.

A encapsulação por polimerização pode ocorrer de diversas formas: *in situ*, interfacial, emulsão, suspensão, entre outros (CASANOVA; SANTOS, 2016; FIB, 2013; PEANPARKDEE; IWAMOTO; YAMAUCHI, 2016). Em todas, basicamente é utilizado um polímero insolúvel (normalmente, um monômero) em soluções aquosas que formam uma

transição sol-gel e encapsulam o material (CASANOVA; SANTOS, 2016; PEANPARKDEE; IWAMOTO; YAMAUCHI, 2016).

As diferentes técnicas de polimerização envolvem reações químicas, necessitando de reatores, onde o grau de agitação, temperatura e o projeto (tipo e tamanho) de reator influencia o diâmetro das cápsulas formadas (NGUON et al., 2018; TROJANOWSKA et al., 2017). Os principais reatores utilizados são de batelada e semibatelada (NGUON et al., 2018), porém também podem ser utilizados reatores-tanque agitado contínuo, de fluxo em pistão e de leito fluidizado (RODRIGUES, 2018),

Os lipossomos formam uma camada fosfolipídica que encapsulam o material no seu interior, caso seja um material hidrofílico, ou na sua própria membrana, no caso de materiais lipofílicos (PEANPARKDEE; IWAMOTO; YAMAUCHI, 2016).

Em larga escala, podem ser utilizados tanques de misturas com aquecimento, reatores em batelada ou técnica de microfluidização como reatores de leito fluidizado, que realizam o processo em uma só etapa (SUBRAMANI; GANAPATHYSWAMY, 2020).

A técnica de *spray-drying* consiste na dissolução, emulsificação ou dispersão do material ativo em solução aquosa do material encapsulante, seguida de atomização através do bocal do *spray dryer* e pulverização (*spraying*) em um câmara quente, após a separação pelo ciclone do equipamento (BURGAIN et al., 2011; ZUIDAM; SHIMONI, 2010). O equipamento pode ser observado na Figura 2.

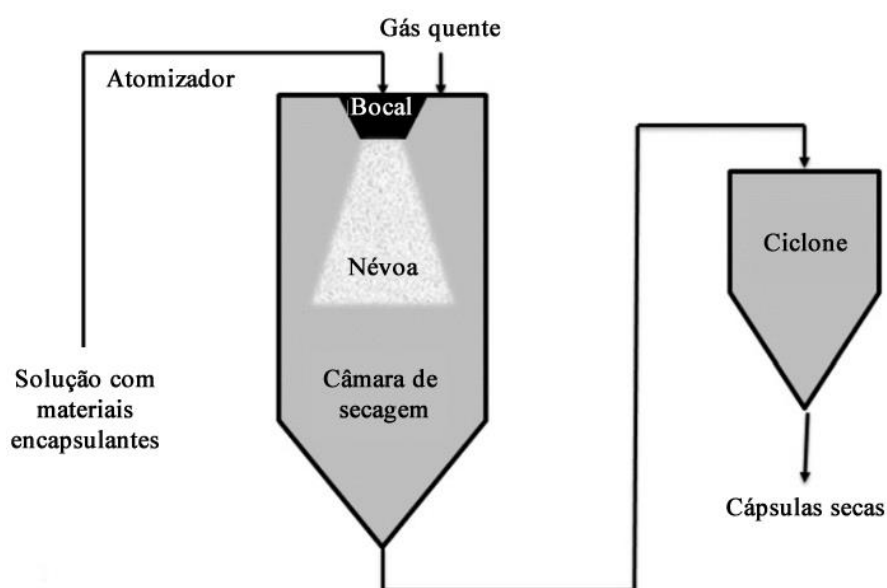


Figura 2 – Esquematização do processo de *spray-drying*.
Fonte: Adaptado de Burgain *et al.* (2011).

Na encapsulação por recobrimento em leito (fluidizado ou em jorro) as partículas são suspensas em câmara e a solução polimérica é pulverizada em sua superfície. No fim as gotas formadas são evaporadas e se tornam microcápsulas (PEANPARKDEE; IWAMOTO; YAMAUCHI, 2016).

O recobrimento em leito fluidizado também é bastante usado em larga escala, podendo ser feito várias vezes seguidas para gerar multicamadas de parede. Porém é uma técnica difícil de dominar e necessita do material de núcleo em sua forma sólida, necessitando de secagem do material ativo antes de ser realizada (BURGAIN et al., 2011; ESTEVINHO et al., 2013). O recobrimento pode ser realizado de diferentes maneiras, como visto na Figura 3.

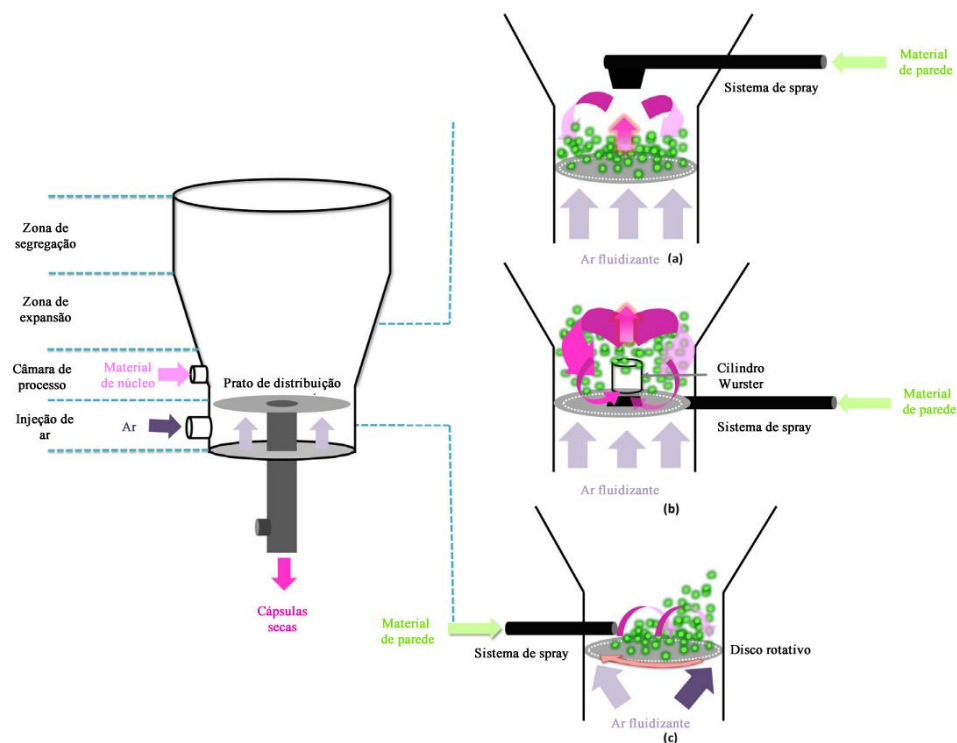


Figura 3 - Esquemática do processo de recobrimento em leito fluidizado: (a) recobrimento pelo topo, (b) recobrimento pelo fundo e (c) recobrimento tangencial.

Fonte: Adaptado de Burgain *et al.* (2011).

No geral, pode ser observado (Figura 3) que o processo inicia com a inserção do material de núcleo na câmara de processo sob um prato de distribuição com injeção de ar. O material de parede é atomizado sobre o material ativo, para recobrir o mesmo até formar as cápsulas que já saem secas. A Figura 3b apresenta o recobrimento em leito de jorro – um tipo específico de leito fluidizado (GUIGNON; DUQUENOY; DUMOULIN, 2002) – que apresenta menor consumo de energia, embora tenha um tempo de secagem maior (JITTANIT; SRZEDNICKI; DRISCOLL, 2013). Além disso, a técnica de leito de jorro apresenta partículas menos aglomeradas que o leito fluidizado (CUNHA; MAIALLE; MENEGALLI, 2000).

O método de *spray-cooling* ou *spray-chilling* funciona para materiais lipídicos e consiste na atomização de lipídios fundidos em uma câmara fria, resultando em sua solidificação e recuperação em microcápsulas (ZUIDAM; SHIMONI, 2010).

Em nível industrial, esse equipamento vem sendo utilizado para encapsular minerais, vitaminas, leveduras, saborizantes e adoçantes (ABD EL KADER; ABU HASHISH, 2020) e uma representação de seu processo pode ser visualizado na Figura 4.

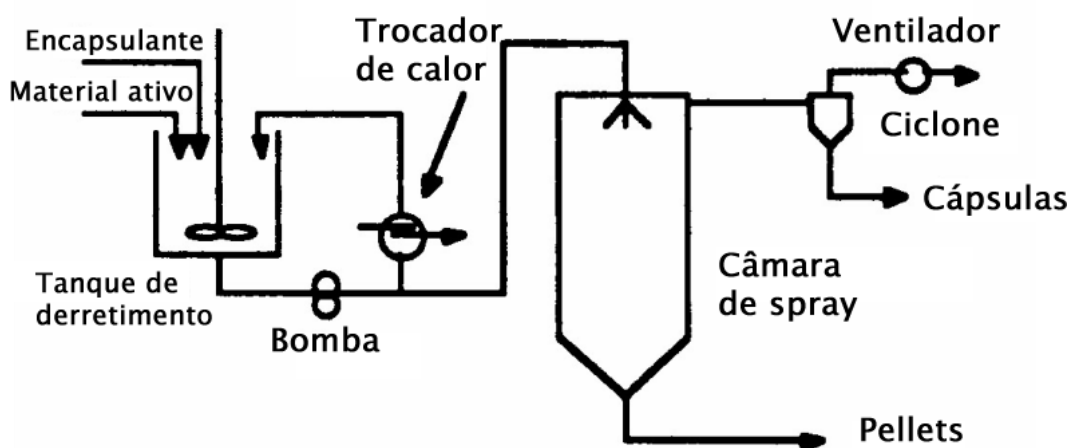


Figura 4 – Esquemática do processo de *spray-cooling*.
Fonte: Adaptado de Abd El Kader; Abu Hashish (2020).

Na Figura 4, pode-se notar que o material ativo e o encapsulante são inseridos juntos em um tanque de derretimento para fundirem e depois solidificam na câmara de spray, seguida de separação por ciclone até obtenção de cápsulas secas.

Na extrusão, uma solução do material ativo e do polímero é gotejada em um banho gelificante com o uso de uma seringa, pipeta, bocais (vibratórios, múltiplos), jatos (de corte, vibratórios) ou discos (rotativos, atomizadores) (NEDOVIC et al., 2011).

Embora muito utilizada em laboratórios, em larga escala a extrusão necessita de dispositivos, acoplados a tanques de mistura, que geram gotas (múltiplos bocais, disco rotativo e jato vibratório - ĐORĐEVIĆ et al., 2015) e é difícil de ser aplicada pois a formação de cápsulas nessa técnica é muito lenta (BURGAIN et al., 2011). Dificilmente, ocorre a produção de cápsulas menores que 500 μm fora de laboratório, exceto em produções de 1 a 2 L h^{-1} com até 10 L de capacidade (NEUFELD; PONCELET, 2004). Os dispositivos de disco rotativo e jato vibratório podem ter melhores taxas de produção, em comparação aos múltiplos bocais e seriam os mais indicados em escala industrial (TRIFKOVIC; TADIĆ; BUGARSKI, 2017).

A liofilização é um processo de secagem de quatro etapas: etapa de congelamento (cristalização do material), secagem primária (remoção de gelo), secagem secundária (remoção

da umidade até 5%) e tratamento final (injeção de gás inerte para preservação do material). A encapsulação ocorre por dissolução, dispersão ou emulsificação do material de núcleo em material de parede (usualmente proteínas, maltodextrinas, dissacarídeos ou gomas) (FANG; BHANDARI, 2012).

O processo ocorre sob baixa temperatura e pressão (diferente da técnica de *spray-drying*), porém demanda um elevado tempo e leva a formação de partículas irregulares (SAIFULLAH et al., 2019). Embora mais cara, no geral a liofilização garante maior estabilidade quando comparada com *spray-drying* (RAVICHANDRAN et al. 2014).

A coacervação envolve a separação de fase de um ou mais hidrocolóides de uma camada de solução polimérica em volta do material do núcleo que está suspenso na mesma fase da reação (PEANPARKDEE; IWAMOTO; YAMAUCHI, 2016).

A técnica de coacervação depende de ajustes de pH ou temperatura, necessitando de agitação na primeira etapa, seguida de uma etapa de endurecimento sem agitação onde haverá a formação de uma pasta, que deve ser filtrada e lavada para formação de cápsulas (ABD EL KADER; ABU HASHISH, 2020). Ela pode ser realizada em um tanque de mistura ou um equipamento próprio para métodos que apresentam etapa de coalescência – um misturador decantador (MAYO; DE DIETRICH, 2018).

Os métodos sol-gel utilizam adsorção em superfície de vidro, aprisionamento em uma matriz polimérica ou incorporação em pó de vidro poroso (VEMMER; PATEL, 2013).

Aplicações recentes utilizam a sílica como sol e encapsulam óleos essenciais quimicamente instáveis, estabilizando fragrâncias e aromas por tempos maiores (ASHRAF et al., 2015), podendo ser utilizados tanques de mistura como equipamentos.

As técnicas de emulsificação necessitam da dissolução do material e emulsificantes em solução de fase aquosa ou oleosa, seguida da mistura das fases sobre tensão (ZUIDAM; SHIMONI, 2010).

A emulsificação pode ser escalável facilmente e tem como desvantagem a produção de cápsulas em tamanhos grandes e com morfologias diferentes, dependendo da velocidade de agitação e razão óleo/água (BURGAIN et al., 2011). Comum nas indústrias de alimentos, cosméticos e fármacos, a emulsificação pode ser realizada em um equipamento específico – misturador emulsificador - (SOLUÇÕES INDUSTRIAIS, 2018) ou em tanque de mistura.

Quando se utiliza a encapsulação por extração-evaporação o agente ativo é dissolvido na fase interna (onde há o polímero). Logo a fase interna é extraída e o solvente orgânico é removido por evaporação ou extração, formando glóbulos poliméricos que serão

separados, lavados e secados para obtenção das cápsulas (ABD EL KADER; ABU HASHISH, 2020).

Esse processo pode ter seu *scale up* realizador por meio de tanques de mistura, seguido por uma etapa de secagem ou extração (MIRZATAHERIA; MAHTABANIB; LOTFALIEIC, 2014).

Finalmente, quando se utiliza um fluido supercrítico é criada uma dispersão de material ativo dissolvido ou material da casca no fluido e depois é liberado o fluido para precipitação da casca no núcleo (ZUIDAM; SHIMONI, 2010).

Similar à extrusão, essa técnica precisa de dispositivos para atomização da solução, como discos, jatos e bocais, acoplados em tanques de mistura (ABD EL KADER; ABU HASHISH, 2020).

Todas as técnicas discutidas possuem diferentes vantagens e desvantagens, sendo algumas sintetizadas no Quadro 3.

Quadro 3 - Vantagens e desvantagens de métodos utilizados para encapsulação.

Método	Vantagens	Desvantagens
Polimerização	Variedade de técnicas	Possível toxicidade dos monômeros
<i>Spray-drying</i>	Facilidade de uso, alta produtividade, reprodutibilidade, variedade de materiais ativos, formação e secagem simultânea	Dificuldade de controle do tamanho da partícula, não adequada para ativos sensíveis a altas temperaturas
Recobrimento em leito fluidizado	Baixo custo, controle do tamanho da partícula	Pode degradar ativos sensíveis a temperatura
<i>Spray-cooling</i>	Mais barato que <i>spray-drying</i> , adequada para agentes sensíveis a calor	Não adequada para ativos sensíveis à baixas temperaturas, dificuldade de controle do tamanho da partícula Funciona apenas em materiais lipídicos
Extrusão	Bom custo-benefício, pode ser realizada em diferentes condições (pH, temperatura, oxigênio), não utiliza solventes orgânicos	Dificuldade em larga escala

Método	Vantagens	Desvantagens
Recobrimento em leito de jorro	Baixo custo, construção simples, fácil de controlar	Poucos trabalhos utilizam essa técnica para encapsulação
Sol-gel	Biocompatibilidade	Química e mecanicamente instável Funciona apenas para materiais inorgânicos
Emulsificação	Baixo custo, mais fácil em larga escala que extrusão, variedade de técnicas	Mais cara que extrusão, maior dificuldade de controle do processo
Extração-evaporação do solvente	Simplicidade, obtenção de diferentes características de partículas	Uso de solvente orgânico Geralmente, funciona apenas com polímeros sintéticos
Assistido por fluido supercrítico	Não utiliza solventes orgânicos	Dificuldade de controle do processo Funciona apenas materiais altamente solúveis nos fluidos supercríticos

Fonte: Abd El Kader; Abu Hashish (2020), FIB (2013), Peanparkdee; Iwamoto; Yamauchi (2016) e Burgain *et al.* (2011).

A escolha da técnica influencia no tamanho de cápsula que será obtido, uma característica essencial para produtos cosméticos com cápsulas. Normalmente, suas cápsulas apresentam tamanhos em escala micro de com valores entre 1 μm e 1000 μm e em escala nano variando entre 0,001 e 1 μm (SAIFULLAH *et al.*, 2019). O Quadro 4 apresenta uma relação entre a técnica de encapsulação e tamanho de partículas.

Quadro 4 – Relação entre técnicas de encapsulação e tamanho de partículas.

Técnica	Tamanho de partículas (μm)	Referência
<i>Spray-drying</i>	10 a 400	Abd El Kader; Abu Hashish (2020); Burgain <i>et al.</i> (2011)
Emulsificação	0,2 a 5000	
Extrusão	200 a 5000	
Recobrimento em leito fluidizado	5 a 5000	
<i>Spray-cooling</i>	20 a 200	
Assistido por fluido supercrítico	1,4 a 650	
Coacervação	10 a 800	Trojanowska <i>et al.</i> (2017)
Polimerização	1 a 1000	

Técnica	Tamanho de partículas (µm)	Referência
Liofilização	100 a 500	(Guo <i>et al.</i> (2020); Piovesana; Noreña (2018)
Recobrimento em leito de jorro	5 a 5000	Burgain <i>et al.</i> (2011); Guignon; Duquenoy; Dumoulin (2002)
Sol-gel	2 a 20	Mirzataheria; Mahtabanib; Lotfalieic (2014)
Extração-evaporação do solvente	0,5 a 1000	

Fonte: A autora.

2.2.3 Secagem de cápsulas

Dependendo da técnica utilizada é comum a secagem das cápsulas após sua formação, gerando mais estabilidade ao produto ao retirar sua umidade em excesso (ABUBAKR; LIN; CHEN, 2009).

Quando não usados como técnicas de encapsulação, os métodos de *spray-drying* e liofilização são utilizados para secagem das cápsulas, por serem comuns em escala industrial nos setores alimentícios e farmacêuticos (RAVICHANDRAN *et al.*, 2014).

Outros equipamentos utilizados nesses setores são os secadores de leito (fluidizado ou de jorro) que possuem altas taxas de secagem, alta eficiência térmica e facilidade de controle (CHUA; MUJUMDAR; CHOU, 2003). Por apresentar uma área mais concentrada de ar, o secador de leito de jorro é escolhido na secagem de partículas maiores, em relação ao secador de leito fluidizado (GUIGNON; DUQUENOY; DUMOULIN, 2002). Além disso, o secador de leito de jorro apresenta menor consumo de energia, embora o secador de leito de jorro possui menor tempo de secagem (JITTANIT; SRZEDNICKI; DRISCOLL, 2013).

Secadores de túnel e secadores de tambor também são alternativas menos custosas para a secagem de cápsulas, porém necessitam de um nível alto de controle e sensibilidade para atingir resultados adequados que não estraguem o produto (SAINTYCO, 2018).

Uma forma de escolher o melhor secador é o tempo de residência da partícula no equipamento para secagem completa: *spray dryer* e secador de tambor levam de 10 a 30 segundos, secadores de leito e secador de túnel entre 10 e 60 minutos. Outra maneira é pelo tamanho das partículas, no geral, partículas maiores podem ser secadas em equipamentos mais simples como secador de tambor e de túnel enquanto partículas em escala micro ou nanométrica necessitam de equipamentos mais sensíveis como secadores de leito, liofilizador ou *spray dryer* (MUJUMDAR, 2006).

2.3 ENGENHARIA DE PROCESSOS

Visando maior rapidez, segurança e menor custo em projetos industriais, surge a Engenharia de Processos, que utiliza ferramentas de outros campos de conhecimento (engenharia de sistemas, inteligência artificial) para sua otimização (PERLINGEIRO, 2018). Para sistematizar um projeto é necessário o seu equacionamento sob a forma de um problema, determinando a melhor estrutura para cumprir seu objetivo, constituído de dois subproblemas: síntese (geração do universo de estruturas viáveis para o sistema) e análise (previsão e avaliação do desempenho de cada estrutura) (PERLINGEIRO, 2018).

Geralmente, a síntese inicia após obtidas informações básicas de forma experimental – tais reagentes se tornam tal produto – e são necessárias suposições (baseadas na literatura ou conhecimento empírico) para gerar as alternativas viáveis para o processo (DOUGLAS, 1988).

O processo possui restrições externas: normas de segurança, recursos, leis da física, restrições econômicas, controles governamentais e regulamentos e restrições internas: escolhas do processo, condições, materiais, métodos, tempo e decisões do projetista (TOWLER; SINNOTT, 2013). Essas restrições servem para nortear a síntese do processo, como possíveis funções objetivo.

Após a etapa de síntese e análise é possível encontrar problemas com mais de uma solução, sendo necessária a busca por uma solução ótima (NISHIDA; STEPHANOPOULOS; WESTERBERG, 1981) que dependendo do número de estruturas pode precisar de técnicas computacionais para ser encontrada (PERLINGEIRO, 2018).

2.3.1 Árvore de estados

Uma forma de sistematizar o projeto de processos é decompô-lo em subproblemas tecnológico (rotas), estrutural (síntese) e paramétrico (análise). A árvore de estados surge como uma forma de representação estrutural e é composta de raiz (finalidade do processo), ramos (“caminhos” do processo) e folhas (soluções do processo) - para representá-lo (PERLINGEIRO, 2018). Um exemplo de árvore de estados se encontra representado na Figura 5.

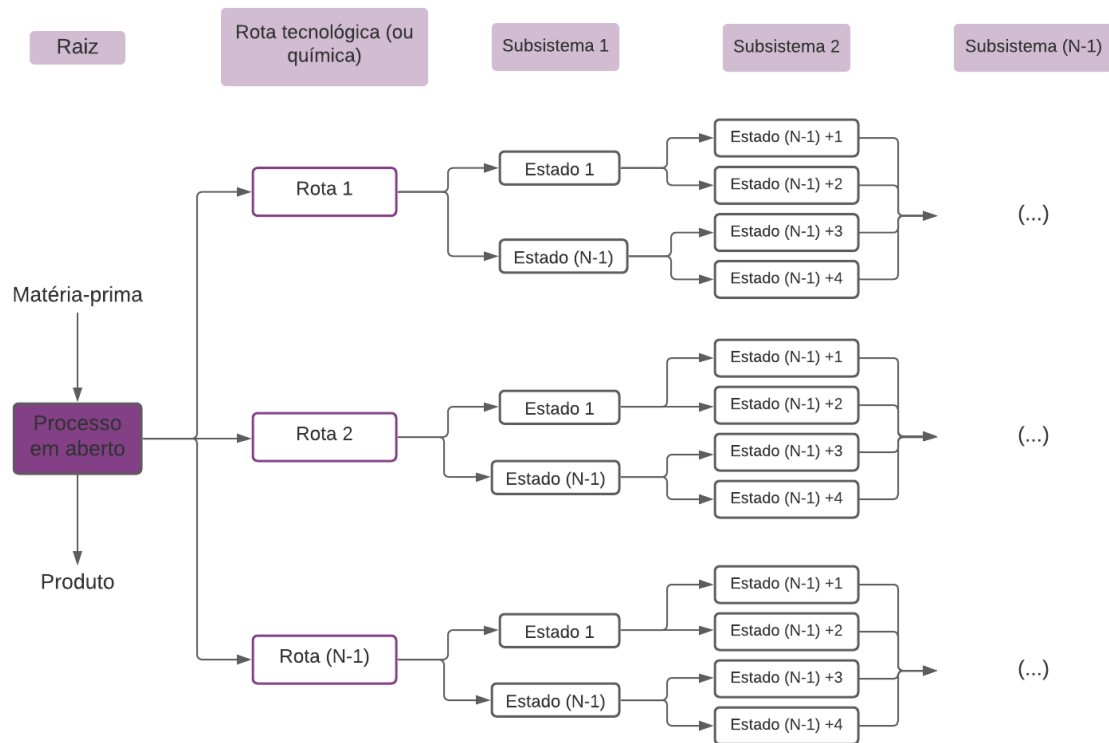


Figura 5 - Representação de árvore de estados genérica.
Fonte: A autora.

A árvore de estados permite a visualização dos fluxogramas possíveis para um determinado processo, sendo necessário percorrer todos até encontrar a solução ótima da sua função objetivo, com base em critérios definidos pelo projetista. Para problemas complexos, de acordo com o número de fluxogramas encontrados, torna-se inviável a resolução manual. Assim podem ser utilizadas técnicas que simplifiquem sua resolução, como método heurístico e método evolutivo (PERLINGEIRO, 2018).

2.3.2 Métodos heurístico e evolutivo

O método heurístico consiste em utilizar regras comprovadas empiricamente (não deduzidas matematicamente) em cada estado, resultando em apenas um fluxograma que pode ser, ou não, a solução ótima (PERLINGEIRO, 2018). Ele pode ser utilizado como ponto de partida, seguido pelo método evolutivo, que utiliza o conceito de fluxogramas vizinhos (que diferem apenas por um elemento estrutural) guiando o projeto até sua solução ótima (PERLINGEIRO, 2018). Logo, a otimização ocorreria seguindo os passos, supondo que a função objetivo fosse menor custo:

1. Gerar o fluxograma base utilizando o método heurístico;
2. Gerar os fluxogramas vizinhos;

3. Identificar o vizinho com custo menor;
4. Se o custo do vizinho for menor que o custo do fluxograma base, ele se torna o fluxograma base e se repete as etapas 2, 3 e 4 até encontrar o fluxograma de menor custo;
5. Se não, seu fluxograma base é a solução ótima.

Em vários casos, o custo de investimento é estimado, de forma aproximada, para comparação entre os fluxogramas do processo (DOUGLAS, 1988; SEIDER et al., 2017), visto que o menor custo é normalmente objetivado. Quando os fluxogramas possuem valores similares, se utiliza objetivos auxiliares para escolha – segurança, qualidade, tempo de operação, entre outros (TOWLER; SINNOTT, 2013).

As regras heurísticas são montadas com base na função objetivo e por permitir a obtenção de um fluxograma base otimizado de forma simples é rápida, são bastante utilizadas na análise de processos (SEIDER et al., 2017).

Sínteses de processo por evolução partem de um fluxograma base, que pode ser a solução ótima e utiliza métodos para detectar as partes fracas desse ou encontrar partes melhores em outros fluxogramas, obtendo sempre melhores soluções (RUDD; POWERS; SIROLA, 1973). O método evolutivo utilizando vizinhos estruturais é uma forma ordenada de síntese de processo por evolução.

Alguns exemplos de uso de árvore de estados, método heurístico e evolutivo serão sintetizados nesse parágrafo. Batista et al. (2014) utilizaram representação por meio de árvore de estados para sistematizar alternativas para aproveitamento energético de casca de café e casca de cacau obtendo três diferentes rotas (biodigestão anaeróbica, pirólise e combustão direta) e por meio do método heurístico adquirir a melhor rota para cada resíduo. Nascimento; Arrieche (2015) conseguiram otimizar o processo de um produto à base de cacau, visando melhores propriedades antioxidantes e sensoriais, usando a determinação por árvore de estados (200 fluxogramas) e método heurístico obtendo um fluxograma principal e seus vizinhos estruturais, por meio do método evolutivo. Dal-Bó; Lira; Arrieche (2016) também empregaram os métodos para obtenção de um fluxograma-base e seus 11 vizinhos, a partir de uma árvore com 1404 ramos. Logo, a técnica apresenta grande interesse em diferentes processos, podendo gerar árvores com diferentes números de ramos e subsistemas. Independentemente do número de ramos, o método heurístico pode ser realizado para obtenção de um fluxograma-base, em conjunto com o método evolutivo para encontrar os vizinhos estruturais.

2.3.3 Lógica fuzzy

Existem limitações para o nível de precisão que o ser humano consegue atingir em solução de problemas: a falta de informação ou o uso de linguagens naturais que tornam as informações vagas (muito, alto, maior que, jovem – que são verdadeiras até certo grau e falsas em outro) (ROSS, 2004; SIVANANDAM; SUMATHI; DEEPA, 2007). Esse tipo de informação é processado pelo cérebro humano, mas não por computadores que utilizam strings de 0 e 1 para leitura de informações, tornando-os conceitos difusos (*fuzzy*) (SIVANANDAM; SUMATHI; DEEPA, 2007).

Nesse contexto, o Dr. Lofti Zadeh introduziu a ferramenta denominada Lógica *Fuzzy* fornecendo uma maneira de lidar com a incerteza desse tipo de informação (SIVANANDAM; SUMATHI; DEEPA, 2007; ZADEH, 1988). Como já mencionado, os sistemas lógicos comuns apresentam dois valores: verdadeiro ou falso, já em sistemas multivalorados, as proposições podem ser verdadeiras ou falsas até certo valor (finito ou não) (ZADEH, 1988).

A técnica pode ser aplicada utilizando três etapas (BAI; WANG, 2006):

- Fuzzificação: converter as informações de linguagem (entradas e saídas) em data difusa ou funções de pertinência;
- Processo de inferência *fuzzy*: combinar as funções de pertinência em regras para saída da solução *fuzzy*;
- Defuzzificação: utilizar diferentes métodos para calcular cada saída e criar uma tabela com esses resultados.

Funções de pertinência podem ser de diferentes tipos – triangular, trapezoidal, gaussiana, em forma de sino, senoidal, em forma de s – dependendo do tipo de problema analisado (BAI; WANG, 2006). Exemplificando, pode-se tomar um sistema que envolve um rádio que deve ser desligado quando o volume está alto e pode ficar ligado quando o volume está baixo. Digamos que o volume varie entre 0 e 30, pode-se dividir o volume em faixas de volume: volume baixo – 0 a 15, volume médio – 10 a 20 e volume alto – 18 a 30. De forma simples, pode-se utilizar uma onda trapezoidal para a fuzzificação da entrada, conforme Figura 6.

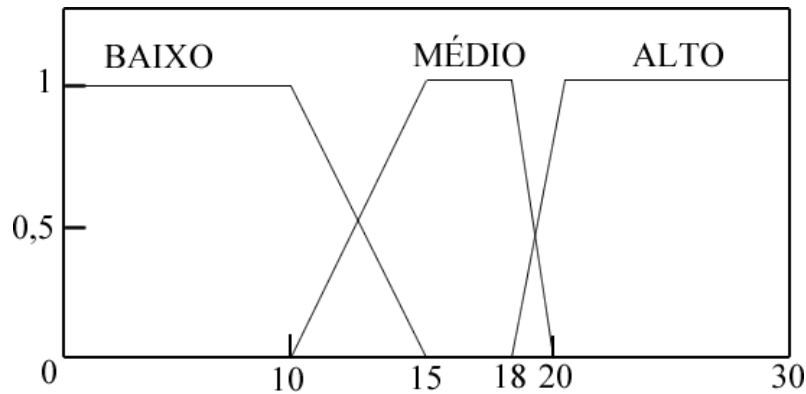


Figura 6 - Função de pertinência trapezoidal da entrada do exemplo.

Fonte: A autora.

Após a fuzzificação as regras na forma IF-THEN (SE-ENTÃO) são geradas, descrevendo o que deve ser a saída quando dada entrada ocorre (BAI; WANG, 2006). Por exemplo: SE o volume está ALTO, ENTÃO o rádio deve ser desligado. Nesse contexto, podem ser utilizadas as regras heurísticas previamente explicadas.

A defuzzificação pode ser realizada utilizando sete métodos diferentes: princípio da máxima-pertinência, método centroide (ou método do centro de gravidade), método da média ponderada, pertinência média-máximo, centro das somas, centro da maior área e primeira ou última máxima (SIVANANDAM; SUMATHI; DEEPA, 2007). O mais utilizado é o método centroide (BAI; WANG, 2006; SIVANANDAM; SUMATHI; DEEPA, 2007), que é análogo ao cálculo de centro de gravidade em física, sendo determinado segundo a Equação 1:

$$z^* = \frac{\sum_x \mu_{saída}(x) * x}{\sum_x \mu_{saída}(x)}, \quad \text{Equação 1}$$

onde z^* representa o valor defuzzificado da saída, $\mu_{saída}(x)$ é o valor entre 0 e 1 referente a função de pertinência (eixo y do gráfico) referente ao centro de gravidade da figura e x é o valor numérico da saída referente ao centro de gravidade da figura (eixo x do gráfico).

O processo de formulação do mapeamento dos dados de entrada gerando os dados de saída se chama inferência e pode ser implementado com dois tipos principais de sistemas: Mamdani e Sugeno (MATHWORKS, 1999). A principal diferença entre eles é que o método Sugeno tem saídas lineares ou constantes como resposta, enquanto o Mamdani tem saídas difusas (SIVANANDAM; SUMATHI; DEEPA, 2007). Para entradas linguísticas “humanas” o método Mamdani é mais aconselhado, sendo o mais utilizado (MATHWORKS, 1999; SIVANANDAM; SUMATHI; DEEPA, 2007).

Alguns trabalhos aliam técnicas similares a de árvore de estados com a lógica *fuzzy* como Topuz; Van Gestel (2016) que realizaram uma avaliação de risco de nanomateriais utilizando AHP (*analytical hierarchy process* – análogo a árvore de estados) alinhado com

regras de inferência *fuzzy*, Dayanandan; Kalimuthu (2018) que criaram um *software* de modelagem de avaliação de qualidade estrutural arquitetônica usando o método FAHP (*fuzzy analytical hierarchy process*) e Nguyen; LE Hoang ThuyY To Nguyen (2020) que integram AHP com lógica *fuzzy* para determinar os fatores críticos que afetam preços de construção. O método FAHP consiste nas seguintes etapas: estruturação do problema por árvore de estados, definição das variáveis *fuzzy*, criação de regras por diferentes critérios, cálculo dos pontos e funções de pertinência e defuzzificação das variáveis (LIU; ECKERT; EARL, 2020).

Logo, é possível aliar a técnica de representação com árvore de estados, fuzzificando suas entradas e saídas (com posterior defuzzificação) e utilizando as regras heurísticas para determinação do fluxograma base.

3 METODOLOGIA

Esse capítulo aborda a estruturação do projeto, dividido em: construção da árvore de estados, método heurístico e método evolutivo, conforme apresentado na Figura 7.

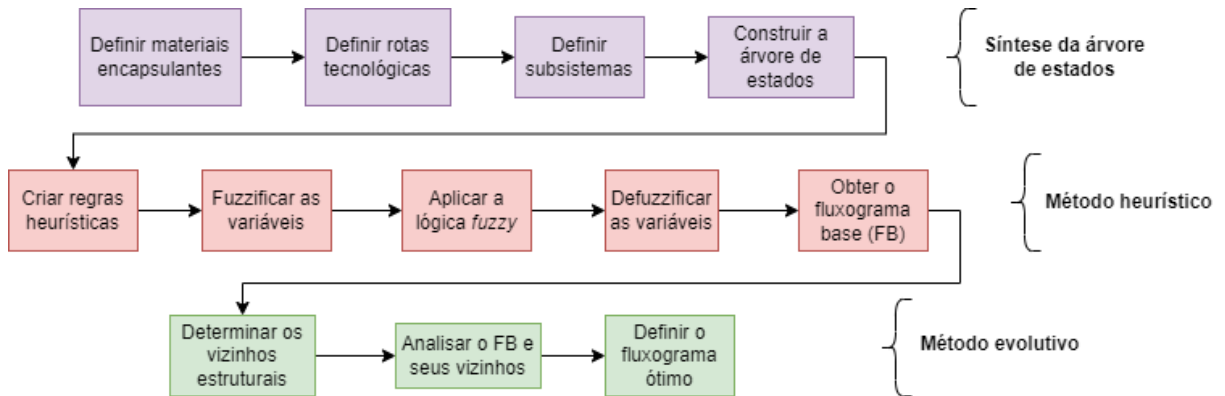


Figura 7 - Esquematização da metodologia do projeto.

Fonte: A autora.

3.1 SÍNTESE DA ÁRVORE DE ESTADOS

Os materiais encapsulantes foram selecionados, com base na revisão de literatura, e os principais utilizados em cosméticos foram: alginato, quitosana, ciclodextrina, gelatina, lipossomos e carragena. O preço médio dos encapsulantes e dos cosméticos que possuem cápsulas em sua formulação foram calculados com base em orçamentos de diferentes empresas (brasileiras, norte-americanas e chinesas). Os orçamentos se encontram nos Apêndices A e B.

Com base nos encapsulantes selecionados foi realizada uma busca bibliográfica para verificar as técnicas mais apropriadas, escolhendo artigos que utilizassem apenas o material como encapsulante e não uma mistura desses (Quadro 5).

Quadro 5 – Relação entre materiais encapsulantes e técnicas de encapsulação.

	Polimerização	Extrusão	Coacervação	Emulsificação	Secagem
Alginato		Nochos; Douroumis; Bouropoulos (2008)	Gombotz; Wee (1998)	Gombotz; Wee (1998)	Zhang <i>et al.</i> (2008)
Quitosana	Jarudilokkul; Tongthammachat; Boonamnuayvitaya (2011)	(Lucía; Marcela; Ainhoa (2017)	Song <i>et al.</i> (2020)	Dorđević <i>et al.</i> (2015)	Fang; Bhandari (2012)
Ciclodextrina	Chung <i>et al.</i> (2009)				Da Rosa <i>et al.</i> (2013)
Gelatina		Dorđević <i>et al.</i> (2015)	Ulubayram; Eroglu; Hasirci (2002)	Miyazawa <i>et al.</i> (2000)	Fang; Bhandari (2012)
Carragena	Chakraborty (2017)		Chakraborty (2017)		Dewi; Purnamayati; Kurniasih (2016)

Fonte: A autora.

A partir da análise dos dados compilados da literatura, foram definidas cinco possíveis rotas tecnológicas: polimerização (PO), extrusão (EX), coacervação (CO), emulsificação (EM) e secagem (SE - *spray-drying*, leito fluidizado, liofilizador e leito de jorro).

Com base nas técnicas definidas no Quadro 5 também foram definidos seis subsistemas – que são as etapas do processo: pré-tratamento do soro, homogeneização do material encapsulante, encapsulação, separação, lavagem e secagem das cápsulas (Figura 8), de acordo com as etapas realizadas para encapsulação.

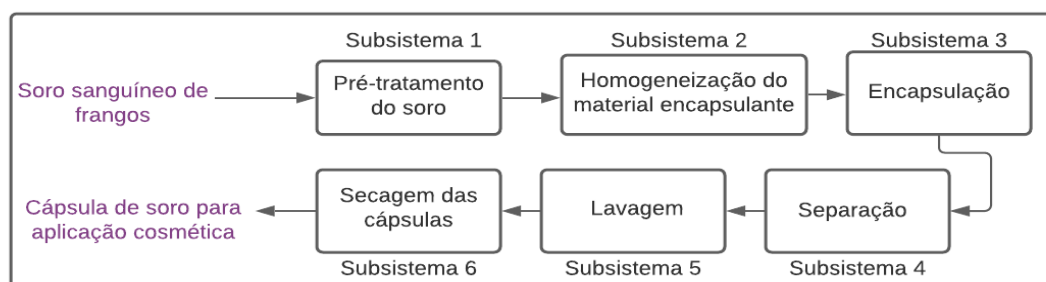


Figura 8 - Subsistemas envolvidos no processo de encapsulação.

Fonte: A autora.

Após obtidas as rotas e os subsistemas do problema, iniciou-se a síntese da árvore de estados, dividida em raiz (soro sanguíneo de frango) e ramos. Os ramos consistem das rotas tecnológicas, ou seja, os diferentes métodos para obtenção da cápsula de soro para aplicação

cosmética. Cada nível da árvore corresponde a um subsistema, que nada mais é que uma etapa do processo.

3.2 MÉTODO HEURÍSTICO

Com base em pesquisa bibliográfica, características das cápsulas, condições do processo, análises de custo de equipamentos (Apêndice C) e conhecimento empírico foram definidas regras heurísticas para cada subsistema. Essas são aplicadas em cada estado, a partir da raiz, utilizando a regra prática mais apropriada para cada situação. O Quadro 6 apresenta as fontes utilizadas de forma sintetizada. De forma geral, a função objetivo das regras foi o custo de implantação do processo.

Quadro 6 – Fontes utilizadas para definição de regras para cada subsistema.

	Referência(s)
Rota tecnológica	Quadro 3, Quadro 4, Burgain <i>et al.</i> (2011), Apêndice C, Abd El Kader; Abu Hashish (2020)
Subsistema	Referência(s)
Pré-tratamento do soro	Denizli (2011); Apêndice C
Homogeneização do material encapsulante	Conhecimentos da autora
Encapsulação	Apêndice C; Del Gaudio <i>et al.</i> (2005); Zuidam; Shimoni (2010), Estevinho <i>et al.</i> (2013)
Separação	Lucía; Marcela; Ainhoa (2017); Neufeld; Poncelet (2004); Paşcalou <i>et al.</i> (2016); Zhang <i>et al.</i> (2008); Zhu <i>et al.</i> (2008); Apêndice C
Lavagem	Khademhosseini <i>et al.</i> (2006); Leach; Schmidt (2005); Song <i>et al.</i> (2020), Conhecimentos da autora
Secagem das cápsulas	Quadro 4, Apêndice C, Chua; Mujumdar; Chou (2003); Vreeker <i>et al.</i> (2008); Ravichandran <i>et al.</i> (2014), Mujumdar (2006)

Fonte: A autora.

As regras foram criadas com a sintaxe IF / THEN utilizando conectivo AND, quando necessário e posteriormente, inseridas na ferramenta de Lógica *Fuzzy*. Dois cenários foram avaliados: o primeiro simula uma grande indústria visando nanocápsulas para um produto de alto valor, possuindo um alto investimento inicial e o segundo de uma pequena indústria que não possui grandes recursos e quer obter microcápsulas.

3.2.1 Lógica fuzzy

Para aplicação da lógica *fuzzy*, foram definidas as variáveis de entrada e saída do processo, tanto as discretas quanto difusas. O

Quadro 7 apresenta os conjuntos *fuzzy* definidos, para aplicação na *Toolbox* de Lógica *Fuzzy* do MATLAB.

Quadro 7 – Variáveis de entrada e saída, seus códigos, universo e conjuntos *fuzzy*.

	Variáveis	Código	Universo de discurso	Conjuntos <i>fuzzy</i>
	Tamanho de cápsulas desejado (μm)	A	[0,01 5000]	Nanocápsulas: < 1 Microcápsulas: 0,5 – 2000 Macrocápsulas: >1000
	Tempo de processo (h)	B	[0 12]	Menor: < 1,5 Médio: 1 - 8 Maior: 6 - 12
	Controle da morfologia das partículas	C	[0 1]	Sem controle: 0 Com controle: 1
Entrada	Condição do soro sanguíneo	D	[0 1]	In natura: 0 Com conservantes: 1
	Estado do material encapsulante	E	[0 1]	Sólido: 0 Líquido: 1
	Tipo de processo	F	[0 1]	Batelada: 0 Semibatelada: 0,5 Contínuo: 1
	Valor de investimento ($\text{R\$ L}^{-1}$)	G	[2 10000]	Baixo: 2 - 300 Médio: 200 - 6000 Alto: 5000 - 10000
	Estado do soro	H	[0 1]	Soro seco: 0 Soro líquido: 1
	Prioridade de processo	I	[0 1]	Menor tempo: 0 Menor consumo de energia: 1
	Etapa de secagem	J	[0 1]	Sem secagem: 0

valores numéricos de entrada foram decididos de acordo com a literatura e conhecimentos empíricos.

3.3 MÉTODO EVOLUTIVO

O método evolutivo foi aplicado após a determinação do fluxograma base pelo método heurístico. Sabe-se que os vizinhos estruturais são distintos do fluxograma base apenas por um equipamento, logo foi criado um programa em *Javascript* para facilitar a determinação desses (Apêndice E).

No primeiro cenário, o método evolutivo foi aplicado de forma qualitativa, determinando individualmente as vantagens e desvantagens de cada fluxograma vizinho, para validação do fluxograma base como ótimo.

Já no segundo cenário, a análise foi realizada de forma quantitativa, estimando uma margem bruta de lucro para cada fluxograma. Para isso, foi inserido o custo médio (R\$ L⁻¹) de cada equipamento e estimada a capacidade de produção (em L), para determinar o valor das despesas. Também se buscou na literatura, o valor estimado de faturamento para uma empresa de pequeno porte. Em seguida, se utilizou a equação 2 para determinar a margem bruta de lucro, também utilizando o programa do Apêndice E.

$$MB = RE - DE \quad \text{Equação 2}$$

$$DE = \text{Capacidade de produção} \times \sum \text{Custo dos equipamentos}$$

,onde MB é margem bruta de lucro, RE é receita (faturamento estimado) e DE despesas.

Essa análise ocorreu de forma iterativa até a obtenção de um fluxograma com a maior margem de lucro.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo serão expostos os resultados referentes a metodologia proposta: construção da árvore de estados e aplicação do método heurístico-evolutivo aliado a lógica *fuzzy* e discussão desses.

4.1 ÁRVORE DE ESTADOS

A síntese de um projeto consiste em selecionar equipamentos e possíveis fluxogramas desse. Diante do universo de possibilidades foi feita a construção de uma árvore de estados, representando as rotas tecnológicas, subsistemas e equipamentos da encapsulação de soro sanguíneo.

4.1.1 Materiais encapsulantes

Na Tabela 1 são apresentados os preços médios de cada material encapsulante escolhido, considerando possíveis reagentes adicionais necessários. Os orçamentos utilizados para essa seção se encontram no Apêndice A e B.

Tabela 1 – Análise de preços de materiais encapsulantes.

Material	Alginato	Quitosana	Ciclodextrina	Gelatina	Carragena	Lipossomos
Preço estimado (R\$ / g)	0,94	3,91	20,54	0,77	2,13	3915,03
Z-score	-0,41	-0,41	-0,40	-0,41	-0,41	2,04

Fonte: A autora.

Supondo que as cápsulas representam apenas parte do cosmético, foi estimado um preço médio de R\$2,15 para cosméticos. Nesse caso, a quitosana, ciclodextrina e lipossomos poderiam ser descartados como materiais plausíveis por serem mais caro que o preço de venda estimado. Para confirmar essa decisão, foi realizada uma análise estatística com base no Z-score para encontrar os *outliers*. Dessa forma, o único material que pode ser descartado foram os lipossomos.

Além disso, para minimizar o custo do uso desses foi estimado o preço dos reagentes para sua formação, o que ocasionaria em maior tempo de produção, encarecendo mais ainda o processo. Logo, os possíveis materiais encapsulantes são: alginato, quitosana, ciclodextrina, gelatina e carragena.

4.1.2 Rotas tecnológicas e subsistemas

Depois das rotas tecnológicas definidas (polimerização, extrusão, coacervação, emulsificação e secagem) foram estabelecidos seis subsistemas, dispostos a seguir. Os subsistemas consistem nas etapas do projeto, logo foram escolhidas essas pensando nas operações unitárias encontradas na Engenharia de Processos.

Pré-tratamento do soro (S1): dependendo da forma que o soro chega à indústria, pode necessitar da adição de conservantes para sua preservação. Essa é feita com um tanque de mistura (TM). Se não necessitar de pré-tratamento, pode ser abolida essa etapa (SPT).

Homogeneização do material encapsulante (S2): essa etapa pode ser feita em um tanque de mistura (TM2) ou pode ser abolida (SHME).

Encapsulação (S3): dependendo da rota tecnológica, os equipamentos variam. A polimerização é feita com reatores: reator em batelada (RB), reator-tanque agitado contínuo (CSTR), reator semibatelada (RSB), reator de fluxo em pistão (PFR) e reator de leito fluidizado (RLF). A secagem pode ser feita com *spray dryer* (SP), secador de leito fluidizado (SLF), secador de leito de jorro (SLJ) e liofilizador (LI). A extrusão é realizada com tanques de mistura com diferentes dispositivos de extrusão: múltiplos bocais (TMMB), com dispositivo de disco rotativo (TMDR) e quebra por jato vibratório (TMQJ). A coacervação é feita em um misturador-decantador (MD) e a emulsificação por misturadores emulsificadores, tanto em batelada (MEB) quanto contínuo (MEC). Ambas podem ser feitas por tanque de mistura também (TM3).

Separação (S4): pode ser necessário separar as cápsulas dos outros componentes utilizados, podendo ser realizada filtração (SF), centrifugação (SC), peneiramento (SPE) ou com abolição dessa etapa (SS).

Lavagem (S5): após separadas, as cápsulas precisam ser lavadas para eliminar traços de outros componentes, realizada em um tanque de mistura (TM4) ou sem essa etapa (SL).

Secagem das cápsulas (S6): quando necessária a secagem, essa pode ser realizada com secador de túnel (STU), secador de tambor (STA), secador de leito fluidizado (SLF2), secador de leito de jorro (SLJ2), *spray dryer* (SP2) e liofilizador (LI2). Essa etapa também pode ser abolida (SSC).

Para contagem do número de fluxogramas disponíveis, foi realizada a confecção de uma árvore de estados, identificando “(...)” para fluxogramas que repetem. Essa pode ser observada na Figura 9.

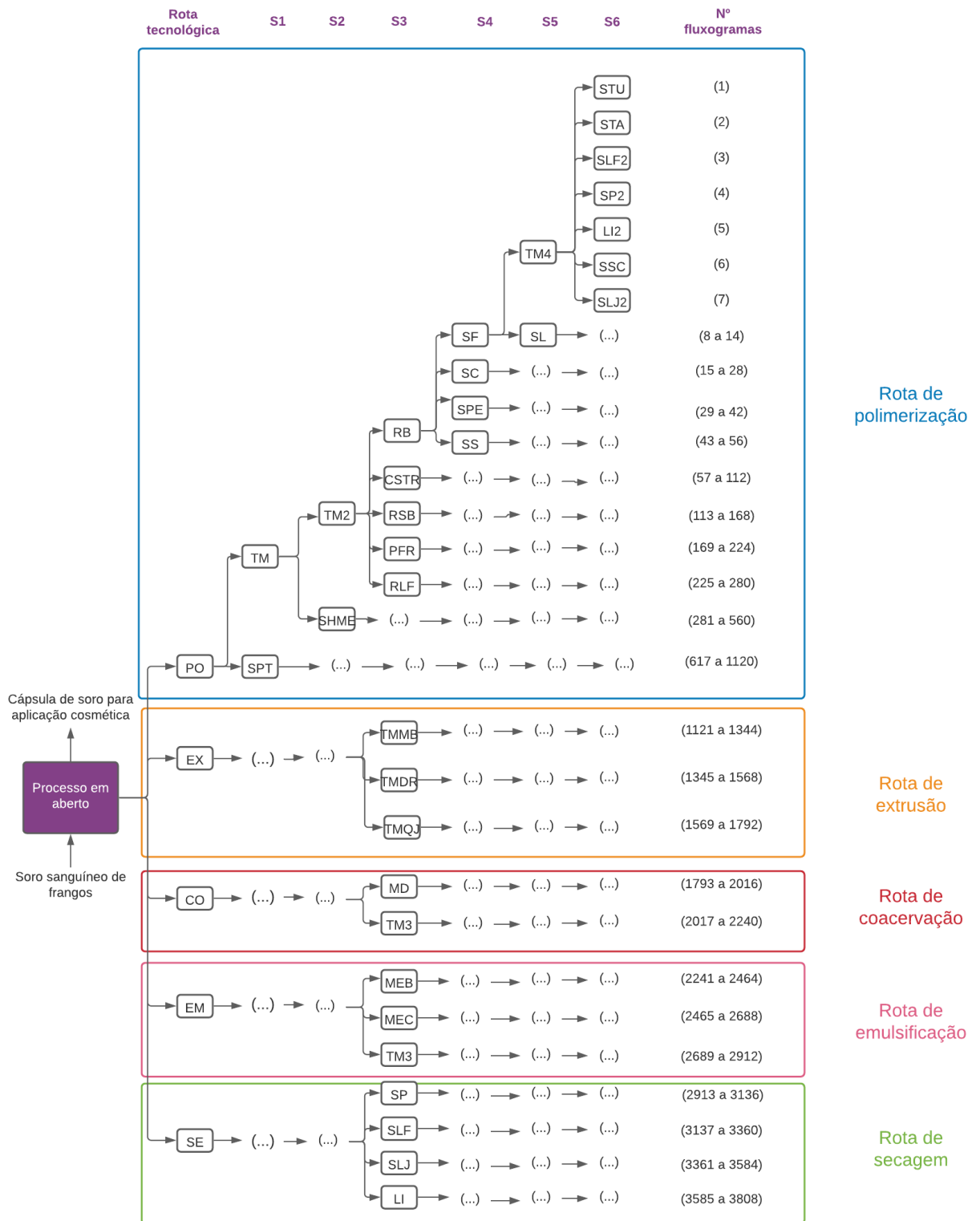


Figura 9 - Árvore de estados simplificada.
 Fonte: A autora.

A Figura 9 pode ser utilizada para contagem dos fluxogramas disponíveis. A rota de polimerização possui 1.120 fluxogramas. A rota de coacervação apresenta 448 fluxogramas. A rota de secagem contém 896 fluxogramas. Por fim, as rotas de extrusão e a de emulsificação

possuem 672 fluxogramas. No total, o processo apresenta 3.808 fluxogramas totais, com 5 rotas tecnológicas e 6 subsistemas.

4.2 REGRAS HEURÍSTICAS

Essa seção aborda as regras definidas para escolha da melhor rota tecnológica e subsistema, definidas as condições iniciais do processo, com base em revisão bibliográfica, custos de equipamentos e conhecimentos empíricos.

4.2.1 Rota tecnológica

Para definir a rota tecnológica que será utilizada foram definidas regras baseadas em tamanho de cápsulas esperado, controle de morfologia da partícula e tempo de operação. Essas podem ser visualizadas na Figura 10.

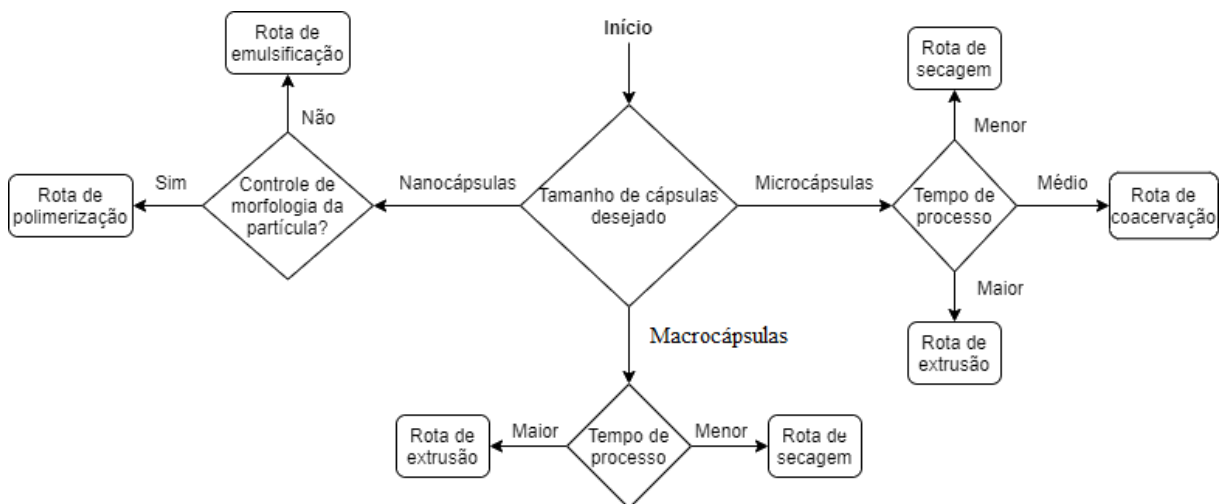


Figura 10 - Regras heurísticas para rota tecnológica.
Fonte: A autora.

4.2.2 Pré-tratamento do soro

O primeiro subsistema corresponde à necessidade, ou não, de algum tipo de tratamento ao material que será encapsulado, o soro sanguíneo que por ser um material biológico, pode sofrer degradação quando exposto a certas condições. Logo, foram criadas duas regras.

Regra 8: Se o soro sanguíneo chegar à indústria *in natura* devem ser adicionados conservantes em um tanque de mistura.

Regra 9: Se já possuir conservantes, essa etapa pode ser descartada.

4.2.3 Homogeneização do material encapsulante

O material encapsulante pode necessitar de homogeneização, culminando em duas regras heurísticas.

Regra 10: Se o material encapsulante for sólido deve ser homogeneizado em tanque de mistura.

Regra 11: Caso contrário, a etapa pode ser abolida.

4.2.4 Encapsulação

O subsistema de encapsulação depende da rota tecnológica utilizada para definição de seus equipamentos. A escolha desses considera o tipo de processo, valores de investimento do projeto, diferentes prioridades de processo (menor consumo de energia, menor tempo), tempo de processo e estado do soro.

A rota de polimerização tem seu algoritmo decisório baseado em tipos de processo e diferentes valores de investimentos para o projeto, visualizado na Figura 11.

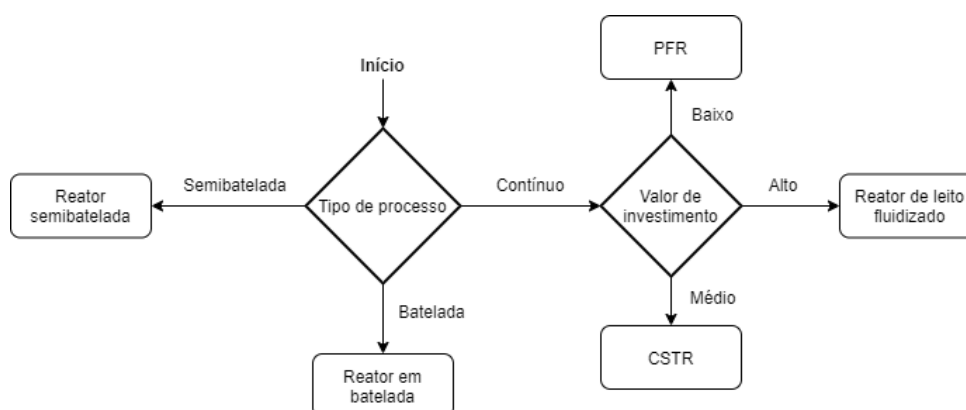


Figura 11 - Regras heurísticas para rota de polimerização.

Fonte: A autora.

A Figura 12 apresenta o algoritmo decisório para rota de secagem, com base em estado do soro, valores de investimento e diferentes prioridades de processo (consumo de energia ou tempo).

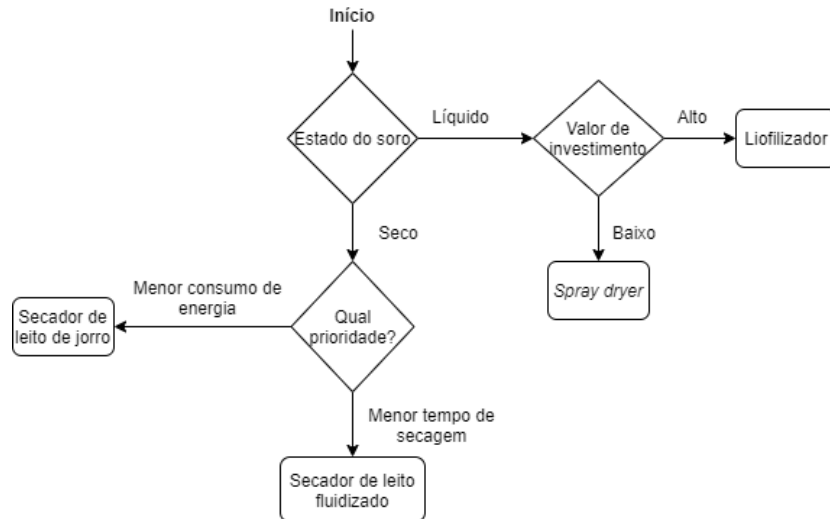


Figura 12 - Regras heurísticas para rota de secagem.
Fonte: A autora.

A rota de extrusão se constitui em um tanque de mistura com três dispositivos de extrusão diferentes, sendo as regras heurísticas estabelecidas com base no tempo do processo.

Regra 21: Se deseja um tempo de processo menor, utilizar o dispositivo de jato vibratório.

Regra 22: Se deseja um tempo de processo médio, utilizar o disco rotativo.

Regra 23: Se o tempo de processo não faz diferença (tempo maior), utilizar múltiplos bocais.

A rota de coacervação tem duas regras baseadas em custo de equipamentos.

Regra 24: Se o investimento do projeto é alto, usar misturador decantador.

Regra 25: Se o investimento do projeto é baixo, usar tanque de mistura.

Por fim, a rota de emulsificação apresenta suas regras no algoritmo decisório da Figura 13, utilizando tipo de processo e valor de investimento como base.

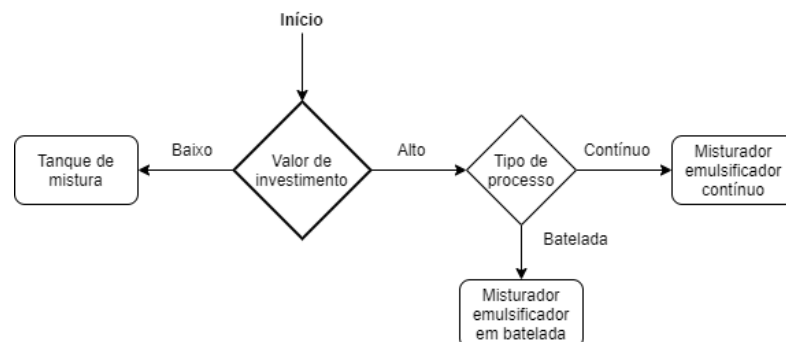


Figura 13 – Regras heurísticas para rota de emulsificação.
Fonte: A autora.

Para estimar o tamanho de cápsulas formado, foram definidas regras para determinação dos possíveis tamanhos de cápsulas de cada rota tecnológica, descritas a seguir.

Regra 29: Se a rota for de polimerização, as cápsulas formadas serão pequenas ou médias.

Regra 30: Se a rota for de secagem, as cápsulas formadas serão médias ou grandes.

Regra 31: Se a rota for de extrusão, as cápsulas formadas serão médias ou grandes.

Regra 32: Se a rota for de coacervação, as cápsulas formadas serão médias.

Regra 33: Se a rota for de emulsificação, as cápsulas formadas serão pequenas, médias ou grandes.

4.2.5 Separação

O subsistema de separação envolve a separação das cápsulas da mistura que se encontram - solventes, óleos, entre outros. Os processos que utilizam secadores na etapa de encapsulação não necessitam de separação, pois os equipamentos possuem ciclones que separam as cápsulas. O algoritmo decisório dessa etapa pode ser observado na Figura 14.

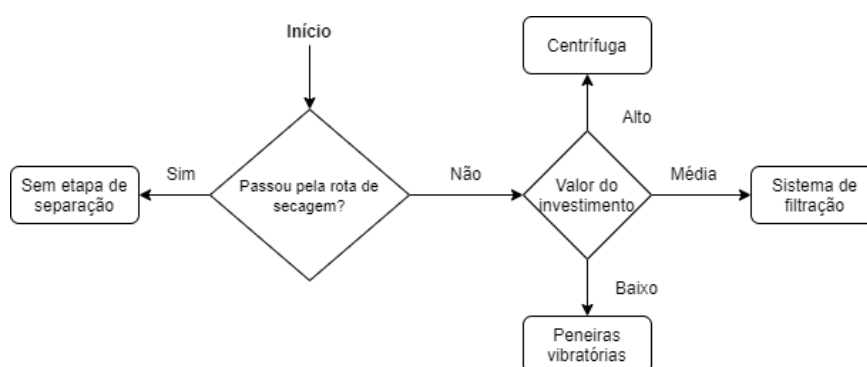


Figura 14 - Regras heurísticas para o subsistema de separação.

Fonte: A autora.

4.2.6 Lavagem

O subsistema de lavagem é consequente do subsistema de separação, logo, duas regras foram criadas.

Regra 33: Se o processo envolveu separação, é necessária a lavagem.

Regra 34: Se não, pode ser abolida.

4.2.7 Secagem das cápsulas

A rota de secagem não necessita dessa etapa, pois produz cápsulas secas no final do processo. As regras dessa e das outras rotas tem suas regras decididas pelo algoritmo decisório da Figura 15, utilizando tamanhos das cápsulas obtidas após encapsulação e valores dos equipamentos.

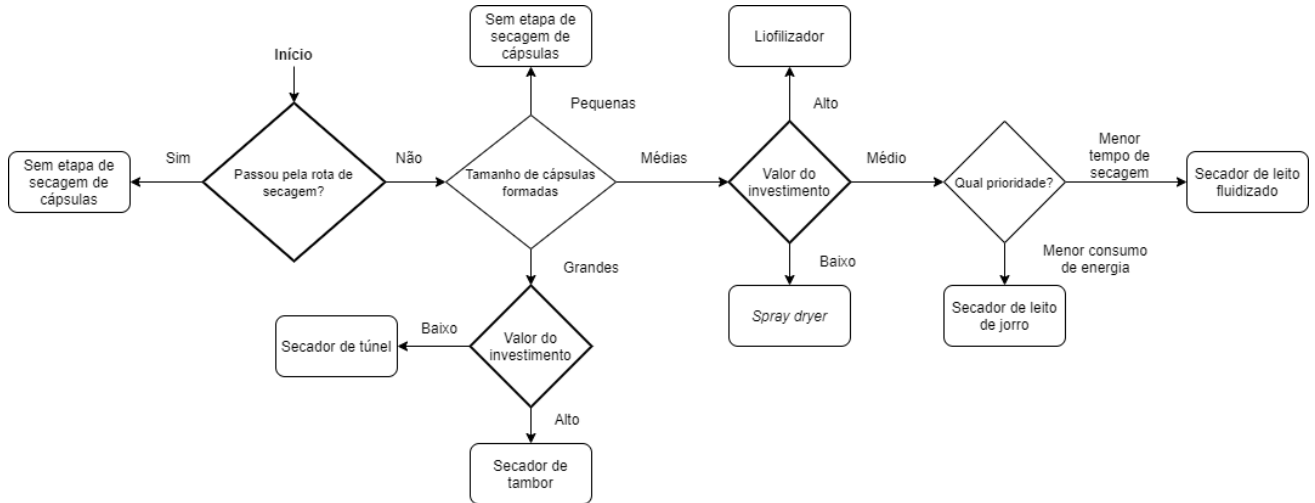


Figura 15 - Regras heurísticas para o subsistema de secagem das cápsulas.
Fonte: A autora.

4.3 MÉTODO HEURÍSTICO ALIADO A LÓGICA FUZZY

Foram criadas 42 regras heurísticas, que foram inseridas na ferramenta do MATLAB (Apêndice H). Essa seção descreve como foram definidos os valores numéricos de entrada de cada variável definida no Quadro 7 e obtém os valores numéricos de saída e os converte para seus equivalentes linguísticos. É possível encontrar as funções de pertinência modeladas de cada variável no Apêndice I (entrada) e Apêndice J (saída).

4.3.1 Primeiro cenário: nanocápsulas com valor de investimento alto

Primeiramente, definiu-se a rota tecnológica ideal para esse cenário. Essa etapa não necessita da aplicação do MATLAB, pois pode ser realizada de forma simples observando a Figura 10. Como o objetivo são nanocápsulas para um produto de alto valor, necessitando de controle na morfologia dessas, a rota tecnológica definida foi a de polimerização.

Com isso, podem ser definidos os valores de entrada para cada variável do processo (Tabela 2), de acordo com diferentes referências que serão discutidas a seguir.

Tabela 2 – Valores de entrada e seus equivalentes linguísticos (cenário 1).

Código da variável	Valor da entrada	Equivalente linguístico
A	0,115	Nanocápsulas
B	1	Médio
C	1	Com controle
D	1	Com conservantes
E	0	Sólido
F	0	Batelada
G	9000	Alto
H	1	Soro líquido
I	0	Menor tempo
J	0	Sem secagem
K	1	Com separação
L	0,25	Pequenas

Fonte: A autora.

Para confirmar se a rota definida estava correta, valores numéricos de entrada para *rota tecnológica* também serão inseridos. De acordo com Fytianos; Rahdar; Kyzas (2020) são encontrados nanocápsulas em cosméticos com 115 nm, ou seja 0,115 μm . Considerando que processos mais rápidos conseguem produzir mais produtos, definiu-se um tempo médio de 1 hora, priorizando um menor tempo de produção em relação a um menor consumo de energia. Como já mencionado, um produto de alto valor necessita de controle da morfologia das nanocápsulas.

Em relação à condição do soro (etapa de *pré-tratamento do soro*) pode-se supor que a indústria do cenário é somente de cosméticos, logo o soro será proveniente de outra empresa em sua forma líquida e com conservantes. Em relação a etapa de *homogeneização do material encapsulante*, que nessa rota pode ser quitosana, ciclodextrina ou carragena, de acordo com o Quadro 5 – tem forma sólida (pó).

Em relação ao tipo de processo (referente a etapa de *encapsulação*), embora existam trabalhos objetivando a encapsulação de forma contínua, a maior parte ainda é realizada em batelada (LUHEDE et al., 2021), especialmente quando possuem diferente etapas de reação (como na polimerização).

Ainda na etapa de *encapsulação*, conforme citado a indústria possui um valor alto de investimento, sendo estimado um valor de R\$ 9000,00 L^{-1} . Esse valor também servirá de

entrada para a etapa de *separação*. Devido ao fato da rota selecionada ser de polimerização, o processo conta com etapa de *separação* e *lavagem*. Para estimar o valor na etapa de *secagem*, a rota de polimerização costuma produzir cápsulas pequenas, mesmo sem essa etapa, podendo ser definido com um tamanho médio de 250 nm (PINTO REIS et al., 2006), equivalente a 0,25 μm .

Após a inserção de todos os valores da Tabela 2, foram obtidos os valores numéricos das saídas e após defuzzificação, se obteve o fluxograma otimizado para esse cenário: SPT – TM2 – RB – SC – TM4 – SP2. A síntese desses valores se encontra na Tabela 3. O Apêndice F apresenta a representação desses resultados na ferramenta do MATLAB.

Tabela 3 – Valores de saída e seus equivalentes linguísticos (cenário 1).

Código da variável	Valor da saída	Equivalente linguístico
1	0,322	Rota de polimerização (PO)
2	0	Sem pré-tratamento do soro (SPT)
3	1	Tanque de mistura (TM2)
4.1	0,406	Reator em batelada (RB)
5	3,57	Centrífuga (SC)
6	1	Tanque de mistura (TM4)
7	0	Sem secagem (SSC)

Fonte: A autora.

Logo, para o primeiro cenário o processo de encapsulação pode consistir em uma polimerização com as seguintes etapas: homogeneização do material encapsulante em tanque de mistura, encapsulação em reator em batelada, separação das cápsulas em centrífuga e lavagem em tanque de mistura.

Além disso, o valor da saída da variável 1, confirma a escolha da rota tecnológica da polimerização, utilizando a lógica *fuzzy*.

4.3.2 Segundo cenário: microcápsulas com valor de investimento baixo

Novamente, foi definida a rota tecnológica de acordo com a Figura 10. Devido ao tamanho estimado das cápsulas ser em escala micro, existem três rotas possíveis (secagem, coacervação e extrusão). Essas dependem do tempo desejado de processo, no geral, tempos maiores tendem a diminuir a produtividade industrial, logo, se definiu a rota de secagem que possibilita um tempo menor de processo.

Em seguida, foram definidos os valores numéricos para cada variável de entrada, sintetizados na Tabela 4, se baseando em diferentes autores, discutidos após a apresentação da tabela.

Tabela 4 – Valores de entrada e seus equivalentes linguísticos (cenário 2).

Código da variável	Valor da entrada	Equivalente linguístico
A	35	Microcápsulas
B	0,5	Menor
C	0	Sem controle
D	1	Com conservantes
E	0	Sólido
F	0	Batelada
G	200	Baixo
H	1	Líquido
I	1	Menor consumo de energia
J	1	Com secagem
K	0	Sem separação
L	400	Médias

Fonte: A autora.

Novamente, os valores de entrada para confirmação da *rota tecnológica* foram inseridos na ferramenta. O tamanho médio de microcápsulas utilizadas em cosméticos é de 35 μm (CASANOVA; SANTOS, 2016). Para o tempo de processo, se escolheu um tempo pequeno de 0,5 hora. O controle de morfologia das partículas não é considerado necessário, para se evitar aumentar o custo do projeto.

Assim como o primeiro cenário, para definir o valor para a etapa de *pré-tratamento do soro* foi suposto que a indústria trabalha apenas com cosméticos, logo o soro foi adquirido de outro local, chegando com conservantes e líquido.

Na rota de secagem, os materiais que podem ser utilizados são alginato, quitosana, ciclodextrina, carragena e gelatina. Todos costumam ser comercializados como sólidos (pó), sendo esse o valor utilizado na etapa de *homogeneização do material encapsulante*.

Para definir os valores na etapa de *encapsulação*, assim como no outro cenário, o processo de encapsulação também foi feito em batelada. Até porque, em menores escalas de produção (como em indústrias de menor porte), o processo em batelada permite um ponto único

de controle e facilita a operação de forma remota (SHANLEY, 2019). Por ser uma microindústria com baixo valor de investimento, foi estimado um valor de R\$ 200 L⁻¹. Quando o tempo de processo foi confrontado com um menor consumo de energia, foi definido priorizar o menor consumo de energia, principalmente devido ao tamanho da indústria, que não gera sua própria energia.

Como a rota de secagem foi a adequada, as três etapas finais (*separação, lavagem e secagem*) são descartadas do processo. O tamanho de cápsulas formados na secagem podem ser médios ou grandes, com diâmetro médio de 400 μm (FANG; BHANDARI, 2012).

Depois de inseridos os valores da Tabela 4, se obtiveram os valores numéricos das saídas e com defuzzificação o fluxograma otimizado para esse cenário foi: SPT – TM2 – SP – SS – SL – SSC. Esses valores se encontram na Tabela 5 e o Apêndice G possui a representação desses resultados na ferramenta do MATLAB.

Tabela 5 – Valores de saída e seus equivalentes linguísticos (cenário 2).

Código da variável	Valor da saída	Equivalente linguístico
1	3	Rota de secagem (SE)
2	0	Sem pré-tratamento do soro (SPT)
3	1	Tanque de mistura (TM2)
4.3	2,67	<i>Spray dryer</i> (SP)
5	0	Sem separação (SS)
6	0	Sem lavagem (SL)
7	0	Sem secagem (SSC)

Fonte: A autora.

Com isso, o segundo cenário pode ser realizado com apenas duas etapas: a homogeneização do material encapsulante em tanque de mistura e a encapsulação com *spray dryer*. Esse fluxograma é ideal para uma pequena indústria com um orçamento reduzido, pois são dois equipamentos, que necessitam de menor espaço físico e menor consumo de energia.

No mais, é observado que o valor da saída da variável 1 confirma a seleção da rota tecnológica de secagem, porém também indica que a rota de extrusão pode ser aplicada. Nesse caso, a rota de secagem continua sendo a mais indicada, pois, a extrusão é difícil de ser aplicada em larga escala (ĐORĐEVIĆ et al., 2015).

4.4 APLICAÇÃO DO MÉTODO EVOLUTIVO

4.4.1 Determinação dos vizinhos estruturais do primeiro cenário

Conforme definido, o fluxograma base desse cenário foi: SPT – TM2 – RB – SC – TM4 – SSC, seguindo a rota tecnológica de polimerização. Esse possui 16 vizinhos estruturais (Tabela 6), que serão discutidos de forma qualitativa a seguir.

Tabela 6 – Determinação dos vizinhos estruturais (cenário 1).

Fluxograma base
SPT – TM2 – RB – SC – TM4 – SSC
Vizinhos estruturais
TM – TM2 – RB – SC – TM4 – SSC
SPT – SHME – RB – SC – TM4 – SSC
SPT – TM2 – CSTR – SC – TM4 – SSC
SPT – TM2 – RSB – SC – TM4 – SSC
SPT – TM2 – PFR – SC – TM4 – SSC
SPT – TM2 – RLF – SC – TM4 – SSC
SPT – TM2 – RB – SF – TM4 – SSC
SPT – TM2 – RB – SPE – TM4 – SSC
SPT – TM2 – RB – SS – TM4 – SSC
SPT – TM2 – RB – SC – SL – SSC
SPT – TM2 – RB – SC – TM4 – STU
SPT – TM2 – RB – SC – TM4 – STA
SPT – TM2 – RB – SC – TM4 – SLF
SPT – TM2 – RB – SC – TM4 – SP
SPT – TM2 – RB – SC – TM4 – LI
SPT – TM2 – RB – SC – TM4 – SLJ

Fonte: A autora.

O primeiro vizinho é **TM** – TM2 – RB – SC – TM4 – SSC. Esse fluxograma presume que o soro recebido pela indústria veio *in natura* e necessita de um tratamento antes de ser utilizado. Ele seria viável apenas no caso da própria indústria de abate de aves realizar a produção de cápsulas, logo nesse caso não é coerente, pois considerou-se que as indústrias trabalhariam exclusivamente com cosméticos.

De forma similar, o segundo (SPT – **SHME** – RB – SC – TM4 – SSC) que descarta a etapa de homogeneização do material encapsulante, só ocorreria caso o material estivesse em sua forma líquida.

Os seguintes vizinhos: SPT – TM2 – **CSTR** – SC – TM4 – SSC, SPT – TM2 – **RSB** – SC – TM4 – SSC, SPT – TM2 – **PFR** – SC – TM4 – SSC e SPT – TM2 – **RLF** – SC – TM4 – SSC se referem a mudança no tipo de reator utilizado. Nesse caso, como foi definido que a operação da indústria ocorre em batelada, todos se tornam inviáveis pois funcionam para operações contínuas ou semibatelada.

Os vizinhos que têm mudança no tipo de equipamento utilizado para separação: SPT – TM2 – RB – **SF** – TM4 – SSC, SPT – TM2 – RB – **SPE** – TM4 – SSC e SPT – TM2 – RB – **SS** – TM4 – SSC são opções plausíveis visto que todos permitem a separação das cápsulas dos reagentes em excesso, exceto o último que descarta a etapa de separação. De forma preliminar, o fluxograma base que utiliza centrífugas ainda parece ser o mais adequado em escala industrial, pois é um equipamento com alta escalabilidade bastante utilizado nas indústrias de cosméticos.

O próximo vizinho, SPT – TM2 – RB – SC – **SL** – SSC, supõe a ausência da etapa de lavagem das cápsulas e não pode ser realizado pois as cápsulas possuem reagentes em excesso que precisam ser lavados com água após polimerização.

Por fim, os seis últimos fluxogramas vizinhos são: SPT – TM2 – RB – SC – TM4 – **STU**, SPT – TM2 – RB – SC – TM4 – **STA**, SPT – TM2 – RB – SC – TM4 – **SLF**, SPT – TM2 – RB – SC – TM4 – **SP**, SPT – TM2 – RB – SC – TM4 – **LI** e SPT – TM2 – RB – SC – TM4 – **SLJ**. Nesse caso, o fluxograma base assumia que cápsulas formadas pela rota de polimerização já estão na escala nanométrica, mesmo sem a secagem. Caso isso não fosse verdadeiro, seria necessário um equipamento adicional no processo. Nesse caso, os fluxogramas referentes a secador de tambor e túnel (STA e STU) não seriam sensíveis o suficiente para secar cápsulas tão pequenas (MUJUMDAR, 2006). Entre os restantes, os mais utilizados em indústrias de cosméticos são *spray dryer* (SP) e liofilizador (LI), dependendo do orçamento disponível da empresa, visto que o liofilizador tem um custo mais elevado que o *spray dryer*.

Em escala de laboratório, as cápsulas formadas por polimerização são nanocápsulas (NGUON et al., 2018), logo, se assumiu que a etapa de secagem pode ser descartada em nível industrial. Com isso, o fluxograma base se mostrou promissor para as condições definidas nesse primeiro cenário.

4.4.2 Determinação dos vizinhos estruturais e seus custos (segundo cenário)

Com base no cenário construído, de minimizar os custos de produção sempre que possível, a análise dos vizinhos estruturais do segundo cenário ocorreu de forma quantitativa, utilizando análise de margem bruta de lucro como parâmetro (Tabela 7).

Para estimar os valores de produção e faturamento da empresa, é sabido que a indústria de cosméticos no Brasil tem um faturamento anual de 30 bilhões de dólares, contando com, aproximadamente, 2794 indústrias, de diferentes portes (ABIHPEC, 2019), totalizando uma média de 10,73 milhões de dólares por empresa. Também é conhecido o fato que o setor de produtos para pele apresenta um aumento constante em sua demanda, sendo uma grande porção do mercado (ABIHPEC, 2019). Com essas informações, se estimou que um terço da produção da indústria seja de produtos para pele (3,57 milhões de dólares por empresa) e sabendo que empresas de pequeno porte apresentam receita bruta entre R\$ 360 mil e R\$ 4,8 milhões (BRASIL, 2006), se supôs que a empresa do cenário tem um faturamento de 10% do valor da média anual por empresa, ou seja, 357 mil dólares. Logo, a receita foi considerada R\$ 1.811.775,00.

O cálculo das despesas varia de acordo com o custo dos equipamentos de cada fluxograma, porém a estimativa da capacidade de produção é fixa. Sabendo que as cápsulas representam apenas uma fração do produto, foi presumida uma produção de 500 L por dia, supondo produção três vezes por semana, totalizando uma capacidade de produção anual de 72.000 L. Nesse cálculo foi considerado um ano útil de 48 semanas, prevendo uma margem de tempo que possa ser utilizada para manutenção e outras eventuais paradas operacionais.

Tabela 7 – Determinação dos vizinhos estruturais e seus custos (cenário 2).

Fluxograma base	Custo dos equipamentos (R\$/L)	Lucro (R\$)
SPT – TM2 – SP – SS – SL - SSC	6,35	1.354.575,00
Vizinhos estruturais		Lucro (R\$)
TM – TM2 – SP – SS – SL – SSC	7,23	1.291.215,00
SPT – SHME – SP – SS – SL – SSC	5,47	1.417.935,00
SPT – TM2 – SLF – SS – SL - SSC	1411,33	-99.803.985,00
SPT – TM2 – SLJ – SS – SL - SSC	50,14	-1.798.305,00
SPT – TM2 – LI – SS – SL – SSC	5507,09	-394.698.705,00
SPT – TM2 – SP – SF – SL – SSC	96,87	-5.162.865,00
SPT – TM2 – SP – SC – SL – SSC	412,83	-27.911.985,00
SPT – TM2 – SP – SPE – SL - SSC	13,28	855.615,00
SPT – TM2 – SP – SS – TM4 - SSC	7,23	1.291.215,00
SPT – TM2 – SP -SS – SL – STU	15,65	684.975,00
SPT – TM2 – SP – SS – SL - STA	842,89	-58.876.305,00
SPT – TM2 – SP – SS – SL – SLF	1416,80	-100.197.825,00
SPT – TM2 – SP – SS – SL - SP	11,82	960.735,00
SPT – TM2 – SP – SS – SL - LI	5512,56	-395.092.545,00
SPT – TM2 – SP – SS – SL – SLJ	55,61	-2.192.145,00

Fonte: A autora.

O método evolutivo possibilitou encontrar 15 vizinhos estruturais. Com base na Tabela 7, pode-se notar que vários vizinhos apresentam lucro bruto positivo, porém apenas um apresenta uma margem de lucro maior que a do fluxograma base. Esse fluxograma (SPT – **SHME** – SP – SS – SL – SSC) pressupõe a ausência da etapa de homogeneização do material encapsulante, algo inviável com os materiais possíveis de utilização (alginato, quitosana, gelatina, carragena e ciclodextrina). Logo, o fluxograma base se apresenta como o mais adequado para o segundo cenário.

É importante ressaltar que os valores de lucro se encontram razoavelmente altos, pois foram realizadas suposições que não consideram o custo total de produção do produto, apenas da etapa de produção de cápsulas. Além disso, não foram considerados custos de materiais e outros custos variáveis (energia, água, gás, etc), apenas uma média de orçamento dos equipamentos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS

Foi realizada uma revisão bibliográfica a respeito da encapsulação, obtendo informações a respeito dos materiais e técnicas. Além disso, foram revisados os principais equipamentos utilizados para cada técnica em escala industrial.

Com isso, foi possível realizar a representação do processo de encapsulação de soro sanguíneo visando cápsulas de soro para produtos cosméticos, por meio de árvore de estados. A árvore confeccionada apresentou 3.808 fluxogramas totais: 1.120 da rota de polimerização, 448 da coacervação, 672 da extrusão, 672 da emulsificação e 896 da secagem. Além disso, possuía 6 subsistemas em cada rota – pré-tratamento do soro, homogeneização do material encapsulante, encapsulação, separação, lavagem e secagem das cápsulas.

Baseando-se na revisão de literatura, em custos de equipamento e conhecimentos empíricos, foram criadas regras heurísticas para cada subsistema, além de regras para rota tecnológica, totalizando 42 regras. Também foram definidas 11 entradas e 7 saídas do processo.

As entradas e saídas foram fuzzificadas e inseridas em uma *Toolbox* de Lógica *Fuzzy* do MATLAB. Foram criados dois cenários para definição dos valores numéricos de entrada. O primeiro cenário consistia em uma empresa com um alto valor de investimento que desejava nanocápsulas e o segundo de uma microindústria com poucos recursos objetivando microcápsulas.

Após aplicada a lógica *fuzzy*, o primeiro cenário resultou em um fluxograma base da rota de polimerização com as seguintes etapas e equipamentos: homogeneização do material encapsulante em tanque de mistura, encapsulação em reator em batelada, separação das cápsulas em centrífuga e lavagem em tanque de mistura. Já o segundo cenário teve como resposta o fluxograma base da rota de secagem consistindo em apenas duas etapas: homogeneização do material encapsulante em tanque de mistura e encapsulação em *spray dryer*. Esse fluxograma se apresenta extremamente promissor para o segundo cenário, visto que possui apenas dois equipamentos, diminuindo custo e espaço de produção.

Em seguida, foi aplicado o método evolutivo em ambos os cenários para obter o fluxograma ótimo de cada um. No primeiro cenário a análise foi feita de forma qualitativa, avaliando cada um dos seus 16 vizinhos estruturais, de forma individual. Logo, se concluiu que o fluxograma base ainda se apresentava o mais promissor para essas condições, indicando que as regras heurísticas e os valores de entradas definidos pela autora, se apresentaram adequados para obtenção de um fluxograma ótimo.

Já no segundo cenário, a análise foi feita de forma quantitativa, visando o menor custo possível de produção, utilizando os custos preliminares dos equipamentos. Nesse caso, embora um dos 15 vizinhos estruturais apresentasse uma maior margem de lucro bruto (R\$ 1.417.935,00) do que o fluxograma base (R\$ 1.354.575,00), esse apresentou-se inviável devido aos materiais definidos como encapsulantes. Consequentemente, o fluxograma base foi considerado o mais indicado para as condições definidas nesse cenário.

De forma geral, o método heurístico aliado com a lógica *fuzzy* para determinação de um fluxograma ótimo para o processo se mostrou promissor. No mais, o uso da *Toolbox* do MATLAB agilizou o processo de obtenção desse. Para resultados mais confiáveis, o uso do método evolutivo pôde confirmar a plausibilidade do fluxograma base como otimizado. Além disso, o uso de um programa em *Javascript* facilitou a aplicação do método evolutivo.

A otimização do processo por meio dessas técnicas foi adequada para resolver o problema da produção de cápsulas de soro a partir de soro sanguíneo, permitindo analisar as diferentes possibilidades de processo, sem ter que realizá-los. Mais ainda, o uso de um resíduo agroindustrial como matéria-prima contribui para o desenvolvimento sustentável e agrega valor a um material que seria descartado, permitindo seu uso em uma indústria de alto valor como a de cosméticos.

Para trabalhos futuros, se sugere melhorias na árvore de estados (aliando técnicas de encapsulação visando dupla encapsulação ou adicionar a etapa de extração da albumina, por exemplo), criação de diferentes regras heurísticas (com diferentes funções objetivo), aperfeiçoamentos na análise econômica do segundo cenário (de forma mais complexa, incluindo custos variáveis, depreciação, entre outros) e alinhamento dos resultados obtidos com técnicas experimentais.

Além disso, podem ser realizadas pesquisas em partes específicas do trabalho. Por exemplo, analisar o soro sanguíneo e suas cápsulas de forma experimental (permeação, composição, etc.), aliar os métodos das Engenharia de Processos com métodos computacionais (redes neurais, *machine learning*, inteligência artificial) e criar uma aplicação web do programa aplicado no método evolutivo.

REFERÊNCIAS

ABD EL KADER, A. E.; ABU HASHISH, H. M. Encapsulation techniques of food bioproduct. **Egyptian Journal of Chemistry**, v. 63, n. 5, p. 1881–1909, 2020.

ABIHPEC. **Anuário ABIHPEC 2019**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://abihpec.org.br/anuario-2019/mobile/index.html#p=1>>. Acesso em: 13. mar. 2022.

ABUBAKR, N.; LIN, S. X.; CHEN, X. D. Effects of drying methods on the release kinetics of vitamin B12 in calcium alginate beads. **Drying Technology**, v. 27, n. 11, p. 1258–1265, 2009.

AMMALA, A. Biodegradable polymers as encapsulation materials for cosmetics and personal care markets. **International Journal of Cosmetic Science**, v. 35, n. 2, p. 113–124, abr. 2013.

ASHRAF, M. A. et al. Effectiveness of silica based sol-gel microencapsulation method for odorants and flavors leading to sustainable environment. **Frontiers in Chemistry**, v. 3, n. AUG, p. 1–15, 2015.

BAI, Y.; WANG, D. Fundamentals of Fuzzy Logic Control — Fuzzy Sets, Fuzzy Rules and Defuzzifications. In: **Advanced Fuzzy Logic Technologies in Industrial Applications**. London: Springer London, 2006. p. 17–36.

BENNET, J.; HELENE CURTIS INDUSTRIES. Albumin Wrinkle Smoothers. **Cosmetics and Skin**, p. 1–7, 2017.

BRASIL. LEI COMPLEMENTAR Nº 123, DE 14 DE DEZEMBRO DE 2006. 2006.

BURGAIN, J. et al. Encapsulation of probiotic living cells: From laboratory scale to industrial applications. **Journal of Food Engineering**, v. 104, n. 4, p. 467–483, 2011.

CAMPANI, V. et al. Skin permeation and thermodynamic features of curcumin-loaded liposomes. **Journal of Materials Science: Materials in Medicine**, v. 31, n. 2, 2020.

CASANOVA, F.; SANTOS, L. Encapsulation of cosmetic active ingredients for topical application – a review. **Journal of Microencapsulation**, v. 33, n. 1, p. 1–17, 2 jan. 2016.

CHAKRABORTY, S. Carrageenan for encapsulation and immobilization of flavor, fragrance, probiotics, and enzymes: A review. **Journal of Carbohydrate Chemistry**, v. 36, n. 1, p. 1–19, 2017.

CHENG, S. Y. et al. Cosmetic textiles with biological benefits: Gelatin microcapsules containing Vitamin C. **International Journal of Molecular Medicine**, v. 24, n. 04, p. 521–527, 24 ago. 2009.

CHING, S. H.; BANSAL, N.; BHANDARI, B. Alginate gel particles—A review of production techniques and physical properties. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 57, n. 6, p. 1133–1152, 13 abr. 2017.

CHUA, K. J.; MUJUMDAR, A. S.; CHOU, S. K. Intermittent drying of bioproducts — an overview. **Bioresource Technology**, v. 90, n. May, p. 285–295, 2003.

CHUNG, J. W. et al. Encapsulation of β -cyclodextrin by in situ polymerization with vinyl chloride leading to suppressing the migration of endocrine disrupting phthalate plasticizer. **European Polymer Journal**, v. 45, n. 8, p. 2164–2171, 2009.

COHEN, K. A.; ROSS, D.; SUSS, H. **Skin revitalizing makeup composition**. EP0796077B1. Concessão: 05 jun.2002.

CUNHA, R. L.; MAIALLE, K. G.; MENEGALLI, F. C. Evaluation of the drying process in spouted bed and spout fluidized bed of xanthan gum: Focus on product quality. **Powder Technology**, v. 107, n. 3, p. 234–242, 2000.

DA ROSA, C. G. et al. Microencapsulation of gallic acid in chitosan, β -cyclodextrin and xanthan. **Industrial Crops and Products**, v. 46, p. 138–146, 2013.

DAL-BÓ, V.; LIRA, T. S.; ARRIECHE, L. S. Síntese da estrutura de processamento da casca do café para a geração de energia. XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química. **Anais...Fortaleza**: 2016

DAYANANDAN, U.; KALIMUTHU, V. Software Architectural Quality Assessment Model for Security Analysis Using Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP) Method. **3D Research**, v. 9, n. 3, 2018.

DE WIT, J. N. Nutritional and Functional Characteristics of Whey Proteins in Food Products. **Journal of Dairy Science**, v. 81, n. 3, p. 597–608, 1998.

DEL GAUDIO, P. et al. Mechanisms of formation and disintegration of alginate beads obtained by prilling. **International Journal of Pharmaceutics**, v. 302, n. 1–2, p. 1–9, 2005.

DENIZLI, A. Plasma fractionation: conventional and chromatographic methods for albumin purification. **J. Biol. & Chem. Hacettepe J. Biol. & Chem**, v. 39, n. 394, p. 315–341, 2011.

DEWI, E. N.; PURNAMAYATI, L.; KURNIASIH, R. A. Antioxidant activities of maltodextrin and carrageenan as coating materials. **Jurnal Teknologi**, v. 2, p. 45–50, 2016.

DORĐEVIĆ, V. et al. Trends in Encapsulation Technologies for Delivery of Food Bioactive Compounds. **Food Engineering Reviews**, v. 7, n. 4, p. 452–490, 25 dez. 2015.

DOUGLAS, J. **Conceptual Design of Chemical Processes**. [s.l.] McGraw-Hill Book Company, 1988.

DUCONSEILLE, A. et al. Gelatin structure and composition linked to hard capsule dissolution: A review. **Food Hydrocolloids**, v. 43, p. 360–376, 2015.

EKPA EFFIONG, D. et al. Nanotechnology in Cosmetics: Basics, Current Trends and Safety Concerns-A Review. **Advances in Nanoparticles**, v. 9, n. 1, p. 1–22, 2020.

EMBRAPA. **Estatísticas | Frangos de corte**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/suinos-e-aves/cias/estatisticas/frangos/brasil>>. Acesso em: 16 ago. 2020.

ESTADÃO CONTEÚDO. **Brasil passa a ser 3º maior exportador agrícola, mas clima ameaça futuro**. Disponível em: <<https://revistagloborural.globo.com/Noticias/Agricultura/noticia/2018/09/globo-rural-brasil-passa-a-ser-3o-maior-exportador-agricola-mas-clima-ameaca-futuro.html>>. Acesso em: 14 out. 2020.

ESTEVINHO, B. N. et al. Microencapsulation with chitosan by spray drying for industry applications - A review. **Trends in Food Science and Technology**, v. 31, n. 2, p. 138–155, 2013.

FANG, Z.; BHANDARI, B. Spray drying, freeze drying and related processes for food ingredient and nutraceutical encapsulation. In: **Encapsulation Technologies and Delivery Systems for Food Ingredients and Nutraceuticals**. [s.l.] Elsevier Masson SAS., 2012. p. 73–109.

FIB. A microencapsulação a serviço da indústria alimentícia. **Revista Food Ingredients Brasil**, n. 25, p. 30–36, 2013.

FRIEDLANDER, H. **Method and composition for skin care comprising cord blood serum or plasma or components thereof**. US20120315259A1. Concessão: 16 ago.2012.

FYTIANOS, G.; RAHDAR, A.; KYZAS, G. Z. Nanomaterials in cosmetics: Recent updates. **Nanomaterials**, v. 10, n. 5, p. 1–16, 2020.

GHATLIA, N. D.; SONA, P.; ANG, E. S. A. **Topical composition comprising coloring antioxidants**. Estados Unidos, 2007.

GOMBOTZ, W. R.; WEE, S. F. Protein release from alginate matrices. **Advanced Drug Delivery Reviews**, v. 31, n. 3, p. 267–285, 1998.

GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ, M. L.; RABASCO, A. M. Charged liposomes as carriers to enhance the permeation through the skin. **Expert Opinion on Drug Delivery**, v. 8, n. 7, p. 857–871, 2011.

GROSSER, S. T. **Serum Albumin Compositions for Use in Cleansing or Dermatological Products for Skin or Hair**. US7829072B2 . Concessão: 09 set.2010.

GUIGNON, B.; DUQUENOY, A.; DUMOULIN, E. D. Fluid bed encapsulation of particles: Principles and practice. **Drying Technology**, v. 20, n. 2, p. 419–447, 2002.

GUO, J. et al. Microencapsulation of curcumin by spray drying and freeze drying. **LWT - Food Science and Technology**, v. 132, 2020.

HAYASHI, C. Certificação e implementação do sistema de gestão ambiental nas empresas sob a égide das normas iso 14001 e iso 14004. **FACEP Pesquisa**, v. 23, n. 17–26, 2020.

IPEA; EMBRAPA; UDOP. **Agroindústria no Brasil: história e novos rumos**. Disponível em: <<https://summitagro.estadao.com.br/agroindustria-no-brasil-historia-e-novos-rumos/>>. Acesso em: 22 set. 2020.

JARUDILOKKUL, S.; TONGTHAMMACHAT, A.; BOONAMNUAYVITTAYA, V. Preparation of chitosan nanoparticles for encapsulation and release of protein. **Korean Journal of Chemical Engineering**, v. 28, n. 5, p. 1247–1251, 2011.

JITTANIT, W.; SRZEDNICKI, G.; DRISCOLL, R. H. Comparison Between Fluidized Bed and Spouted Bed Drying for Seeds. **Drying Technology**, v. 31, n. 1, p. 52–56, 2013.

KHADEMHOSEINI, A. et al. Micromolding of photocrosslinkable hyaluronic acid for cell encapsulation and entrapment. **Journal of Biomedical Materials Research Part A**, v. 79A, n. 3, p. 522–532, 1 dez. 2006.

LEACH, J. B.; SCHMIDT, C. E. Characterization of protein release from photocrosslinkable hyaluronic acid-polyethylene glycol hydrogel tissue engineering scaffolds. **Biomaterials**, v. 26, n. 2, p. 125–135, 2005.

LEE, C. S. J. et al. **Cosmetic material containing triple-encapsulated retinol**. US6908625B2. Concessão: 21 jun.2005.

LI, J. K.; WANG, N.; WU, X. S. Gelatin nanoencapsulation of protein/peptide drugs using an emulsifier-free emulsion method. **Journal of Microencapsulation**, v. 15, n. 2, p. 163–172, 1998.

LIU, Y.; ECKERT, C. M.; EARL, C. A review of fuzzy AHP methods for decision-making with subjective judgements. **Expert Systems with Applications**, v. 161, p. 113738, 2020.

LUCÍA, C.; MARCELA, F.; AINHOA, L. Encapsulation of Almond Essential Oil by Co-Extrusion/Gelling Using Chitosan as Wall Material. **Journal of Encapsulation and Adsorption Sciences**, v. 07, n. 01, p. 67–74, 2017.

LUHEDE, L. et al. Continuous Multistep Encapsulation Process for the Generation of Multiple Emulsions. **Chemical Engineering and Technology**, v. 44, n. 1, p. 15–22, 2021.

MAIONE-SILVA, L. et al. Ascorbic acid encapsulated into negatively charged liposomes exhibits increased skin permeation, retention and enhances collagen synthesis by fibroblasts. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 1–14, 2019.

MATHWORKS. **Fuzzy Logic Toolbox: for use with MATLAB**. Natick: The MathWorks, 1999.

MAYO, J.; DE DIETRICH. **Mixer-Settlers: A Top Choice for Liquid/Liquid Extraction Processes**. Disponível em: <<https://www.ddpsinc.com/blog/mixer-settlers-a-top-choice-for-liquid-liquid-extraction-processes>>. Acesso em: 22 jun. 2021.

- MIRZATAHERIA, M.; MAHTABANIB, A. H.; LOTFALIEIC, M. Emulsion Polymerization and Encapsulation of Micro and Nanoparticles within Polymer Droplets. **Jordan Journal of Chemistry**, v. 9, n. 4, p. 229–266, 2014.
- MITURA, S.; SIONKOWSKA, A.; JAISWAL, A. Biopolymers for hydrogels in cosmetics: review. **Journal of Materials Science: Materials in Medicine**, v. 31, n. 6, 2020.
- MIYAZAWA, K. et al. Preparation of a new soft capsule for cosmetics. **Journal of Cosmetic Science**, v. 51, n. 4, p. 239–252, 2000.
- MUJUMDAR, A. S. (ED.). **Handbook of Industrial Drying**. [s.l.] Taylor & Francis, 2006.
- NASCIMENTO, R. F.; ARRIECHE, L. DA S. Síntese Da Estrutura De Processamento De Um Produto À Base De Cacau: Maximização De Componentes Antioxidantes. Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica. **Anais...**Campinas: 2015
- NEDOVIC, V. et al. An overview of encapsulation technologies for food applications. **Procedia Food Science**, v. 1, p. 1806–1815, 2011.
- NEUFELD, R. J.; PONCELET, D. Industrial Scale Encapsulation of Cells Using Emulsification/Dispersion Technologies. In: **Fundamentals of Cell Immobilisation Biotechnology**. [s.l.] Kluwer Academic Publishers, 2004. p. 311–325.
- NGUON, O. et al. Microencapsulation by in situ Polymerization of Amino Resins. **Polymer Reviews**, v. 58, n. 2, p. 326–375, 2018.
- NGUYEN, P. T.; LE HOANG THUY TO NGUYEN, Q. Critical factors affecting construction price index: An integrated fuzzy logic and analytical hierarchy process. **Journal of Asian Finance, Economics and Business**, v. 7, n. 8, p. 197–204, 2020.
- NISHIDA, N.; STEPHANOPOULOS, G.; WESTERBERG, A. W. A review of process synthesis. **AIChE Journal**, v. 27, n. 3, p. 321–351, 1981.
- NOCHOS, A.; DOUROUMIS, D.; BOUROPOULOS, N. In vitro release of bovine serum albumin from alginate/HPMC hydrogel beads. **Carbohydrate Polymers**, v. 74, n. 3, p. 451–457, 2008.
- NURILMALA, M. et al. Evaluation of the properties of tuna skin gelatin as a hard capsule material. **Fisheries Science**, v. 86, n. 5, p. 917–924, 2020.
- OLIVEIRA, A. C. et al. Microencapsulation of *B. lactis* (BI 01) and *L. acidophilus* (LAC 4) by complex coacervation followed by spouted-bed drying. **Drying Technology**, v. 25, n. 10, p. 1687–1693, 2007.
- PADILHA, A.; LEAVY, S.; JERÔNIMO, F. Gestão ambiental de resíduos da produção na Perdigão Agroindustrial S / A – unidade industrial de Serafina Corrêa. In: CONGRESSO DA SOBER, 43., 2005, Ribeirão Preto. **Anais....** Ribeirão Preto: Sober, 2005. p. 1-15.

PAŞCALŌU, V. et al. Curcumin delivered through bovine serum albumin/polysaccharides multilayered microcapsules. **Journal of Biomaterials Applications**, v. 30, n. 6, p. 857–872, 2016.

PEANPARKDEE, M.; IWAMOTO, S.; YAMAUCHI, R. Microencapsulation: a review of applications in the food and pharmaceutical industries. **Reviews in Agricultural Science**, v. 4, p. 56–65, 2016.

PERLINGEIRO, C. A. G. **Engenharia de Processos: Análise, simulação, otimização e síntese de processos químicos**. 2. ed ed. São Paulo: Blucher, 2018.

PINTO, L. A. DE M. et al. Aspectos ambientais do abate de aves: uma revisão. **Revista UNINGÁ**, v. 22, n. 3, p. 44–50, 2015.

PINTO REIS, C. et al. Nanoencapsulation I. Methods for preparation of drug-loaded polymeric nanoparticles. **Nanomedicine: Nanotechnology, Biology, and Medicine**, v. 2, n. 1, p. 8–21, 2006.

PIOVESANA, A.; NOREÑA, C. P. Z. Microencapsulation of Bioactive Compounds from Hibiscus Calyces Using Different Encapsulating Materials. **International Journal of Food Engineering**, v. 14, n. 1, p. 1–9, 2018.

POLETTI, F. S. et al. Polymeric Nanocapsules: Concepts and Applications. In: **Nanocosmetics and Nanomedicines**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. p. 49–68.

RAVICHANDRAN, K. et al. Effects of different encapsulation agents and drying process on stability of betalains extract. **Journal of Food Science and Technology**, v. 51, n. September, p. 2216–2221, 2014.

RODRIGUES, L. A. **Reatores químicos industriais**. São Paulo, 2018. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4070613/mod_folder/content/0/palestra.pdf?forcedownload=1>. Acesso em: 22 jun. 2021.

ROSS, T. J. **Fuzzy Logic with Engineering Applications**. 2. ed. ed. West Sussex: John Wiley & Sons, 2004.

RUDD, D. F.; POWERS, G. J.; SIIROLA, J. J. **Process Synthesis**. [s.l.] Prentice-Hall, 1973. SAIFULLAH, M. et al. Micro and nano encapsulation, retention and controlled release of flavor and aroma compounds: A critical review. **Trends in Food Science and Technology**, v. 86, n. February, p. 230–251, 2019.

SAINTYCO. **Drying Systems for Softgels: The Ultimate Guide**. Disponível em: <<https://www.saintytec.com/drying-systems-for-softgels-the-ultimate-guide/>>. Acesso em: 22 jun. 2021.

SANTOS, L. Utilização de resíduos agroindustriais para produção de amiloglucosidase por *Aspergillus awamori*. **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**, v. 6, n. 1, p. 655–664, 2012.

SEIDER, W. D. et al. **Product and Process Design Principles: Synthesis, Analysis and Evaluation**. New Jersey: Wiley, 2017.

SHAHGHOLIAN, N.; RAJABZADEH, G. Preparation of BSA nanoparticles and its binary compounds via ultrasonic piezoelectric oscillator for curcumin encapsulation. **Journal of Drug Delivery Science and Technology**, v. 54, p. 101323, 2019.

SHANLEY, A. Industry Experiences in Continuous Manufacturing for Encapsulation and Tableting. **Pharmaceutical Technology**, v. 43, n. 9, p. 32, 2019.

SHARMA, K.; PORAT, Z.; GEDANKEN, A. Designing natural polymer-based capsules and spheres for biomedical applications—A review. **Polymers**, v. 13, n. 24, p. 1–41, 2021.

SHERRY, M. et al. Essential oils encapsulated in liposomes: A review. **Journal of Liposome Research**, v. 23, n. 4, p. 268–275, 2013.

SIVANANDAM, S. N.; SUMATHI, S.; DEEPA, S. N. **Introduction to fuzzy logic using MATLAB**. Nova Iorque: Springer, 2007.

SOLUÇÕES INDUSTRIAIS. **Misturador emulsificador**. Disponível em: <<https://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/maquinas-e-equipamentos/reatinox/produtos/instalacoes-e-equipamentos-industriais/misturador-emulsificador>>. Acesso em: 22 jun. 2021.

SONG, W. et al. Chitosan capsules with hydrogel core for encapsulation and controlled-release of small molecule materials. **Materials Letters**, v. 278, p. 128348, 2020.

SORAPUKDEE, S.; NARUNATSOPANON, S. Comparative Study on Compositions and Functional Properties of Porcine, Chicken and Duck Blood. **Korean Journal for Food Science of Animal Resources**, v. 37, n. 2, p. 228–241, 30 abr. 2017.

SPA. **VBP - 2022 - Regional por UF**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/valor-bruto-da-producao-agropecuaria-vbp>>. Acesso em: 10 mar. 2022.

SUBRAMANI, T.; GANAPATHYSWAMY, H. An overview of liposomal nano-encapsulation techniques and its applications in food and nutraceutical. **Journal of Food Science and Technology**, v. 57, n. 10, p. 3545–3555, 2020.

THOTTAN, M. K.; CHUANYI, J. **Cosmetic Composition Comprising Human Serum Albumin Obtained from Non-human Animals**. AU2001270540B2. Concessão: 13 abr.2006.

TOPUZ, E.; VAN GESTEL, C. A. M. An approach for environmental risk assessment of engineered nanomaterials using Analytical Hierarchy Process (AHP) and fuzzy inference rules. **Environment International**, v. 92–93, p. 334–347, 2016.

TOWLER, G.; SINNOTT, R. **Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design**. Oxford: Elsevier Ltd, 2013.

TRIFKOVIC, K.; TADIĆ, G.; BUGARSKI, B. Short overview of encapsulation technologies for delivery of bioactives to food. **Journal of engineering & processing management**, v. 8, n. 1, p. 103–111, 23 fev. 2017.

TROJANOWSKA, A. et al. Technological solutions for encapsulation. **Physical Sciences Reviews**, v. 2, n. 9, p. 1–20, 2017.

ULUBAYRAM, K.; EROGLU, I.; HASIRCI, N. Gelatin microspheres and sponges for delivery of macromolecules. **Journal of Biomaterials Applications**, v. 16, n. 3, p. 227–241, 2002.

VELÁZQUEZ-CONTRERAS, C.; OSORIO-REVILLA, G.; GALLARDO-VELÁZQUEZ, T. Encapsulation of Orange Essential Oil in a Spout-Fluid Bed Dryer with a Draft Tube on a Bed of Inert Solids. **Drying Technology**, v. 32, n. 14, p. 1718–1726, 2014.

VEMMER, M.; PATEL, A. V. Review of encapsulation methods suitable for microbial biological control agents. **Biological Control**, v. 67, n. 3, p. 380–389, dez. 2013.

VREEKER, R. et al. Drying and rehydration of calcium alginate gels. **Food Biophysics**, v. 3, n. 4, p. 361–369, 2008.

ZADEH, L. A. Fuzzy logic. **Computer**, v. 21, n. 4, p. 88–93, 1988.

ZARZYCKI, P. K.; FENERT, B. ENA; GŁÓD, B. K. Cyclodextrins-based nanocomplexes for encapsulation of bioactive compounds in food, cosmetics, and pharmaceutical products: principles of supramolecular complexes formation, their influence on the antioxidative properties of target chemicals, and recent a. In: **Encapsulations**. [s.l.] Elsevier Inc., 2016. p. 717–767.

ZHANG, J. et al. Encapsulation efficiency and release behaviors of bovine serum albumin loaded in alginate microspheres prepared by spraying. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 110, n. 4, p. 2488–2497, 15 nov. 2008.

ZHANG, Z. et al. Protein encapsulation in alginate hydrogel beads: Effect of pH on microgel stability, protein retention and protein release. **Food Hydrocolloids**, v. 58, p. 308–315, 2016.

ZHU, Y. et al. Fabrication of bovine serum albumin microcapsules by desolvation and destroyable cross-linking. **Journal of Materials Chemistry**, v. 18, n. 10, p. 1153–1158, 2008.

ZUIDAM, N. J.; SHIMONI, E. Overview of Microencapsulates for Use in Food Products or Processes and Methods to Make Them. In: **Encapsulation Technologies for Active Food Ingredients and Food Processing**. [s.l.] Springer, 2010. p. 3–29.

APÊNDICES

APÊNDICE A – PLANILHA DE ORÇAMENTOS DOS MATERIAIS ENCAPSULANTES

<p style="text-align: center;">Alginato Preço médio: R\$ 0,94 / g</p>						
Produtos necessários	Fornecedor	Data acessada	Qnt (g)	Preço (R\$)	Preço por g (R\$)	Preço total (R\$)
Alginato de sódio	GastronomyLab	24/04/2021	100	68,99	0,69	Preço 1 = 0,85
Cloreto de cálcio	GastronomyLab	24/04/2021	100	15,85	0,16	
Alginato de sódio	Sigma-Aldrich	24/04/2021	1000	685,00	0,69	Preço 2 = 1,09
Cloreto de cálcio	Sigma-Aldrich	24/04/2021	500	204,00	0,41	
Alginato de sódio	Dinamica	24/04/2021	250	210,00	0,84	Preço 3 = 0,87
Cloreto de cálcio	Dinamica	24/04/2021	1000	34,00	0,03	
<p style="text-align: center;">Quitosana Preço médio: R\$ 3,91 / g</p>						
Produtos necessários	Fornecedor	Data acessada	Qnt (g)	Preço (R\$)	Preço por g (R\$)	Preço total (R\$)
Quitosana	Oficial Farma	24/04/2021	15	19,80	1,32	Preço 1 = 1,38
Ácido acético	Bianquimica	24/04/2021	1000	59,90	0,06	
Quitosana	Sigma-Aldrich	24/04/2021	50	501,00	10,02	Preço 2 = 10,21
Ácido acético	Sigma-Aldrich	24/04/2021	500	95,00	0,19	
Quitosana	Mercado Natural	24/04/2021	500	40,00	0,08	Preço 3 = 0,13
Ácido acético	Metaquimica	24/04/2021	1000	49,98	0,05	
<p style="text-align: center;">Ciclodextrina Preço médio: R\$ 20,54 / g</p>						

Produtos necessários	Fornecedor	Data acessada	Qnt (g)	Preço (R\$)	Preço por g (R\$)	Preço total (R\$)
β -ciclodextrina	TCI Chemicals	04/05/2021	25	435,00	17,40	Preço 1 = 17,40
β -ciclodextrina	Sigma-Aldrich	04/05/2021	25	320,00	12,80	Preço 2 = 12,80
β -ciclodextrina	Veritas Biotecnologia	04/05/2021	50	1571,00	31,42	Preço 3 = 31,42
Gelatina Preço médio: R\$ 0,77 / g						
Produtos necessários	Fornecedor	Data acessada	Qnt (g)	Preço (R\$)	Preço por g (R\$)	Preço total (R\$)
Gelatina	RBR Brasil	04/05/2021	1000	67,80	0,07	Preço 1 = 0,07
Gelatina	Sigma-Aldrich	04/05/2021	100	209,00	2,09	Preço 2 = 2,09
Gelatina	Dinamica	04/05/2021	500	80,00	0,16	Preço 3 = 0,16
Carragena Preço médio: R\$ 2,13 / g						
Produtos necessários	Fornecedor	Data acessada	Qnt (g)	Preço (R\$)	Preço por g (R\$)	Preço total (R\$)
κ - carragena	Palazzo do Diet Light	05/05/2021	50	29,99	0,60	Preço 1 = 0.60
κ - carragena	Sigma-Aldrich	05/05/2021	25	137,00	5,48	Preço 2 = 5,48

κ- carragena	Emporium Canela	05/05/2021	50	15,90	0,32	Preço 3 = 0,32
Lipossomos Preço médio: R\$ 3915,03 / g						
Produtos necessários	Fornecedor	Data accessada	Qnt (g)	Preço (R\$)	Preço por g (R\$)	Preço total (R\$)
Kit de preparo de lipossomos	Sigma- Aldrich	05/05/2021	5	927,00	185,40	Preço 1 = 185,40
Lipídios	Sigma- Aldrich	05/05/2021	0,1	371,00	3710,00	Preço 2 = 3710,08
Clorofórmio	Sigma- Aldrich	05/05/2021	1000	81,00	0,08	
Colesterol	Sigma- Aldrich	05/05/2021	25	490,00	19,60	Preço 3 = 784,60
Distearoilfosfatidilcolina	Sigma- Aldrich	05/05/2021	0,1	783,00	7830,00	

APÊNDICE B – PLANILHA DE ORÇAMENTOS DE PRODUTOS COSMÉTICOS COM CÁPSULAS

Preço médio: R\$ 101,34				
Preço médio por grama: R\$ 2,15				
Produto	Data acessada	Qnt (g)	Preço total	Preço por g
Gel creme com nanocápsulas de vitamina C	26/04/2021	50	149,95	3,00
Antioxidante hidratante	26/04/2021	35	89,90	2,57
Serum Fresh Vitamina C Estável	26/04/2021	32	60,95	1,90
Retinol-X Anti aging gel cleanser com retinol e vitamina E encapsulada	26/04/2021	141	66,00	0,47
Intensive Serum com nanocápsulas	26/04/2021	50	139,90	2,80

APÊNDICE C – PLANILHA DE ORÇAMENTOS DOS EQUIPAMENTOS

Spray dryer Preço médio: 5,47						
Fornecedor	Data acessada	Capacidade (L)	Preço (R\$)	Preço por capacidade	Q_{inf}	Q_{sup}
PM Industries And Process Equipments Pvt. Ltd	28/06/21	5	99605,85	19921.17*	0	1
Excellent En-Fab Incorporation	28/06/21	10000	49758,51	4,98		
Excellent En-Fab Incorporation	28/06/21	10000	59669,01	5,97		
Liofilizador Preço médio: 5506,21						
Fornecedor	Data acessada	Capacidade (L)	Preço (R\$)	Preço por capacidade	Q_{inf}	Q_{sup}
Thermo Star	28/06/21	5	22553,66	4510,73	0,053	0,947
Thermo Star	28/06/21	10	65016,92	6501,69		
Rotech Bioengineering	28/06/21	10	418820,50	41882,05*		
Tanque de mistura Preço médio: 0,88						
Fornecedor	Data acessada	Capacidade (L)	Preço (R\$)	Preço por capacidade	Q_{inf}	Q_{sup}
Karadani Engineering Pvt Ltd	28/06/21	10000	11629,43	1,16	0,025	0,975
Delbert Industries Private Limited	28/06/21	500	11629,43	23,26*		
V AND P INDUSTRIES	28/06/21	10000	5985,03	0,60		
Reator em batelada Preço médio: 4,62						
Fornecedor	Data acessada	Capacidade (L)	Preço (R\$)	Preço por capacidade	Q_{inf}	Q_{sup}
DPL Valves & Systems Private Limited	28/06/21	2000	6652,19	3,33	0,265	0,735
Karadani Engineering Pvt Ltd	28/06/21	50000	57518,93	1,15		
Weihai Borui Chemical Machinery	28/06/21	10000	93689,00	9,37		
CSTR Preço médio: 22,40						
Fornecedor	Data acessada	Capacidade (L)	Preço (R\$)	Preço por capacidade	Q_{inf}	Q_{sup}
Shakti Engineering	01/07/21	1000	23675,28	23,68	0,551	0,449
Shrusti Enterprise	01/07/21	4000	12581,84	3,15		

Weihai Borui Chemical Machinery	01/07/21	1000	40386,40	40,39		
Reator semibatelada Preço médio: 8,16						
Fornecedor	Data acessada	Capacidade (L)	Preço (R\$)	Preço por capacidade	Q_{inf}	Q_{sup}
Weihai Zhengwei Machinery Co	01/07/21	50	30176,40	603,53*	0,023	0,977
Laizhou New Hongda Chemical	01/07/21	10000	151452,00	15,15		
Foshan Jct Machinery Co	01/07/21	300000	353388,00	1,18		
PFR Preço médio: 6,75						
Fornecedor	Data acessada	Capacidade (L)	Preço (R\$)	Preço por capacidade	Q_{inf}	Q_{sup}
Trident Labortek	01/07/21	1000	6746,25	6,75	1	0
Tor de Vac Engg	01/07/21	1000	6746,50	6,75		
Weihai Borui Chemical Machinery	01/07/21	70000	150906,00	2,16*		
Reator de leito fluidizado Preço médio: 162,98						
Fornecedor	Data acessada	Capacidade (L)	Preço (R\$)	Preço por capacidade	Q_{inf}	Q_{sup}
Chem Tech Pro	01/07/21	1000	33748,43	33,75	0,070	0,930
Weihai Borui Chemical Machinery	01/07/21	70000	151080,00	2,16		
Shanghai Yuanhuai	01/07/21	100	45303,26	453,03		
Misturador decantador Preço médio: 41,48						
Fornecedor	Data acessada	Capacidade (L)	Preço (R\$)	Preço por capacidade	Q_{inf}	Q_{sup}
MF Rural	30/06/21	200	5000,00	25,00	0,086	0,914
Wenzhou Ace Machinery Co	30/06/21	500	39770,40	79,54		
Wenzhou Ace Machinery Co	30/06/21	500	9942,60	19,89		
Misturador emulsificador contínuo Preço médio: 232,68						
Fornecedor	Data acessada	Capacidade (L)	Preço (R\$)	Preço por capacidade	Q_{inf}	Q_{sup}
Guangzhou Jutao	30/06/21	100	64632,10	646,32	0,074	0,926
Wenzhou Qiangzhong	30/06/21	100	4971,70	49,72		
Wenzhou Ace Machinery Co	30/06/21	5000	9940,20	1,99		

Misturador emulsificador em batelada						
Preço médio: 232,68						
Fornecedor	Data acessada	Capacidade (L)	Preço (R\$)	Preço por capacidade	Q_{inf}	Q_{sup}
Guangzhou Jutao	30/06/21	100	64632,10	646,32	0,074	0,926
Wenzhou Qiangzhong	30/06/21	100	4971,70	49,72		
Wenzhou Ace Machinery Co	30/06/21	5000	9940,20	1,99		
Sistema de filtração						
Preço médio: 90,52						
Fornecedor	Data acessada	Capacidade (L)	Preço (R\$)	Preço por capacidade	Q_{inf}	Q_{sup}
A One	29/06/21	20	3324,05	166,20	0,623	0,377
Micro Tech Engineering	29/06/21	2000	2519,00	1,26		
Miss Lucy	29/06/21	18	1873,70	104,09		
Centrifuga						
Preço médio: 406,48						
Fornecedor	Data acessada	Capacidade (L)	Preço (R\$)	Preço por capacidade	Q_{inf}	Q_{sup}
Shanghai Fengxun	29/06/21	250	24685,50	98,74	0,833	0,167
Yixing Huading Machinery	29/06/21	300	155518,70	518,40		
Shanghai Hisen Instrument	29/06/21	98.42	59278,66	602,30		
Peneira vibratória						
Preço médio: 6,93						
Fornecedor	Data acessada	Capacidade (L)	Preço (R\$)	Preço por capacidade	Q_{inf}	Q_{sup}
EMAC	28/06/21	50000	30000,00	0,60	0,109	0,891
Xinxiang Xianfeng	28/06/21	10000	24649,00	2,46		
Xinxiang Xianfeng	28/06/21	500	8866,98	17,73		
Secador de túnel						
Preço médio: 9,30						
Fornecedor	Data acessada	Capacidade (L)	Preço (R\$)	Preço por capacidade	Q_{inf}	Q_{sup}
Diamond Engineering Enterprises	28/06/21	300	4997,1	16,66	0,185	0,815
New Avm Systech Private	28/06/21	12000	54016,9	4,50		
VD Engineers	28/06/21	8500	57392,96	6,75		
Secador de tambor						
Preço médio: 836,54						
Fornecedor	Data acessada	Capacidade (L)	Preço (R\$)	Preço por capacidade	Q_{inf}	Q_{sup}
ZONEDING	28/06/21	100	49258,6	492,59	0	1
VD Engineers	28/06/21	5	2462000	492400,00*		
PM Projects	28/06/21	40	47219,45	1180,49		
Secador de leito fluidizado						
Preço médio: 1410,45						

Fornecedor	Data acessada	Capacidade (L)	Preço (R\$)	Preço por capacidade	Q _{inf}	Q _{sup}
MF RURAL	28/06/21	200	520000	2600,00	0,617	0,383
PAT Group	28/06/21	900	1450000	1611,11		
Pratham Engineering	28/06/21	500	10120,67	20,24		
Secador de leito de jorro Preço médio: 49,26						
Fornecedor	Data acessada	Capacidade (L)	Preço (R\$)	Preço por capacidade	Q _{inf}	Q _{sup}
Changzhou Hengcheng	16/07/2021	4500	250688,9	55,71	0,691	0,309
Changzhou Hengcheng	16/07/2021	1000	40934,4	40,93		
Changzhou Hengcheng	16/07/2021	9000	460278	51,14		

*Os valores com asterisco foram descartados como *outliers* utilizando teste Q no intervalo de 90% de confiança (Q_{inf} e Q_{sup} > 0,941).

APÊNDICE D – PONTOS UTILIZADOS NAS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA

	Variáveis	Código	Pontos da função de pertinência
Entrada	Tamanho de cápsulas desejado (μm)	A	Nanocápsulas: -1 0 1 Microcápsulas: 0,5 1 1000 2000 Macroscápsulas: 1000 5000 9000
	Tempo de processo (h)	B	Menor: -1,5 0 1,5 Médio: 1 1,5 6 8 Maior: 6 8 12 14
	Controle da morfologia das partículas	C	Sem controle: 0 0 0 Com controle: 1 1 1
	Condição do soro sanguíneo	D	In natura: 0 0 0 Com conservantes: 1 1 1
	Estado do material encapsulante	E	Sólido: 0 0 0 Líquido: 1 1 1
	Tipo de processo	F	Batelada: 0 0 0 Semibatelada: 0,5 0,5 0,5 Contínuo: 1 1 1
	Valor de investimento ($\text{R}\$ \text{L}^{-1}$)	G	Baixo: 2 2 200 300 Médio: 200 300 5000 6000 Alto: 5000 6000 10000 10000
	Estado do soro	H	Soro seco: 0 0 0 Soro líquido: 1 1 1
	Prioridade de processo	I	Menor tempo: 0 0 0 Menor consumo de energia: 1 1 1
	Etapa de secagem	J	Sem secagem: 0 0 0 Com secagem: 1 1 1
	Etapa de separação	K	Sem separação: 0 0 0 Com separação: 1 1 1
	Tamanho de cápsulas formado (μm)	L	Pequenas: 0,2 0,2 2 4 Médias: 2 4 900 1000 Grandes: 900 1000 5000 5000

	Variáveis	Código	Pontos da função de pertinência
Saida	Rota tecnológica	1	PO: 0 0 1 EM 0.9 1.5 2.1 SE 1.9 2.5 3.1 EX 2.9 3.5 4.1 CO: 4 5 5
	Pré-tratamento do soro	2	SPT: 0 0 0 TM: 1 1 1

Homogeneização do material encapsulante	3	SHME: 0 0 0 TM2: 1 1 1
Encapsulação	4.1	RB: -1,25 0 1,25 RSB: 0 1,25 2,5 PFR: 1,25 2,5 3,75 CSTR: 2,5 3,75 5 RLF: 3,75 5 6,25
	4.2	TM3: -1,25 0 1,25 MEB: 0,25 1,5 2,75 MEC: 1,75 3 4,25
	4.3	SLJ: -1,3 0 1,3 SLF: 0 1,3 2,7 SP: 1,3 2,7 4 LI: 2,7 4 5,3
	4.4	TMQJ: -1,25 0 1,25 TMDR: 0,25 1,5 2,75 TMME: 1,75 3 4,25
	4.5	TM3: -2 0 2 MD: 0 2 4
Separação	5	SS: 0 0 0 SPE: 0 1,3 2,7 SF: 1,3 2,7 4 SC: 2,7 4 5,3
Lavagem	6	SL: 0 0 0 TM4: 1 1 1
Secagem das cápsulas	7	SSC: 0 0 0 SP2: 0 1,2 2,3 LI2: 1,2 2,3 3,5 SLJ2: 2,3 3,5 4,7 SLF2: 3,5 4,7 5,8 STU: 4,7 5,8 7 STA: 5,8 7 8,2

APÊNDICE E – CÓDIGO PARA DETERMINAÇÃO DOS VIZINHOS E SEUS CUSTOS

```

//Calculadora de vizinhos estruturais e seus custos

//inserir rota tecnológica aqui (PO, EX, CO, EM, SE)
let rota = "SE";

let S1 = ["TM", "SPT"];
let custoS1 = [0.88, 0];

let S2 = ["TM", "SHME"];
let custoS2 = [0.88, 0];

let S3 = [];
let custoS3 = [];

if (rota == "PO") {
  S3 = ["RB", "CSTR", "RSB", "PFR", "RLF"];
  custoS3 = [4.62, 22.40, 8.16, 6.75, 162.98];
} else if (rota == "EX") {
  S3 = ["TMMB", "TMDR", "TMQJ"];
  custoS3 = [0.88, 0.88, 0.88];
} else if (rota == "CO") {
  S3 = ["MD", "TM"];
  custoS3 = [41.48, 0.88];
} else if (rota == "EM") {
  S3 = ["MEB", "MEC", "TM"];
  custoS3 = [232.68, 232.68, 0.88];
} else if (rota == "SE") {
  S3 = ["SP", "SLF", "SLJ", "LI"];
  custoS3 = [5.47, 1410.45, 49.26, 5506.21];
}

let S4 = ["SF", "SC", "SPE", "SS"];
let custoS4 = [90.52, 406.48, 6.93, 0];

let S5 = ["TM", "SL"];
let custoS5 = [0.88, 0];

let S6 = ["STU", "STA", "SLF", "SP", "LI", "SSC", "SLJ"];
let custoS6 = [9.3, 836.54, 1410.45, 5.47, 5506.21, 0, 49.26];

//inserir fluxograma base aqui
let FB = ["SPT", "TM", "SP", "SS", "SL", "SSC"];
let custo = 0;
let MB = 0;

//cálculo de despesas
//inserir valor de produção em L (anual)

```

```
let capacidadeProducao = 72000;

//cálculo de receita
let faturamento = 1811775;

function calcularCusto(array) {

  for (let a = 0; a < S1.length; a++) {
    if (array[0] == S1[a]) {
      custo += custoS1[a];
    }
  }

  for (let b = 0; b < S2.length; b++) {
    if (array[1] == S2[b]) {
      custo += custoS2[b];
    }
  }

  for (let c = 0; c < S3.length; c++) {
    if (array[2] == S3[c]) {
      custo += custoS3[c];
    }
  }

  for (let d = 0; d < S4.length; d++) {
    if (array[3] == S4[d]) {
      custo += custoS4[d];
    }
  }

  for (let e = 0; e < S5.length; e++) {
    if (array[4] == S5[e]) {
      custo += custoS5[e];
    }
  }

  for (let f = 0; f < S6.length; f++) {
    if (array[5] == S6[f]) {
      custo += custoS6[f];
    }
  }

  custo;
  MB = (faturamento) - (custo * capacidadeProducao);
  return MB.toFixed(2);
}

console.log("Fluxograma base e seu custo: " + FB + " " + calcularCusto(FB));
```

```
//determinando os vizinhos estruturais
let v1 = [...FB];
v1[0] = S1[0];
let v2 = [...FB];
v2[0] = S1[1];

let v3 = [...FB];
v3[1] = S2[0];
let v4 = [...FB];
v4[1] = S2[1];

let v5 = [];
let v6 = [];
let v7 = [];
let v8 = [];
let ve9 = [];

if (rota == "PO") {
  v5 = [...FB];
  v5[2] = S3[0];
  v6 = [...FB];
  v6[2] = S3[1];
  v7 = [...FB];
  v7[2] = S3[2];
  v8 = [...FB];
  v8[2] = S3[3];
  v9 = [...FB];
  v9[2] = S3[4];
}
else if (rota == "EX") {
  v5 = [...FB];
  v5[2] = S3[0];
  v6 = [...FB];
  v6[2] = S3[1];
  v7 = [...FB];
  v7[2] = S3[2];
  v8 = 0;
  v9 = 0;
} else if (rota == "CO") {
  v5 = [...FB];
  v5[2] = S3[0];
  v6 = [...FB];
  v6[2] = S3[1];
  v7 = 0;
  v8 = 0;
  v9 = 0;
} else if (rota == "EM") {
  v5 = [...FB];
  v5[2] = S3[0];
```

```
v6 = [...FB];
v6[2] = S3[1];
v7 = [...FB];
v7[2] = S3[2];
v8 = 0;
v9 = 0;
} else if (rota == "SE") {
  v5 = [...FB];
  v5[2] = S3[0];
  v6 = [...FB];
  v6[2] = S3[1];
  v7 = [...FB];
  v7[2] = S3[2];
  v8 = [...FB];
  v8[2] = S3[3];
  v9 = 0;
}

let v10 = [...FB];
v10[3] = S4[0];
let v11 = [...FB];
v11[3] = S4[1];
let v12 = [...FB];
v12[3] = S4[2];
let v13 = [...FB];
v13[3] = S4[3];

let v14 = [...FB];
v14[4] = S5[0];
let v15 = [...FB];
v15[4] = S5[1];

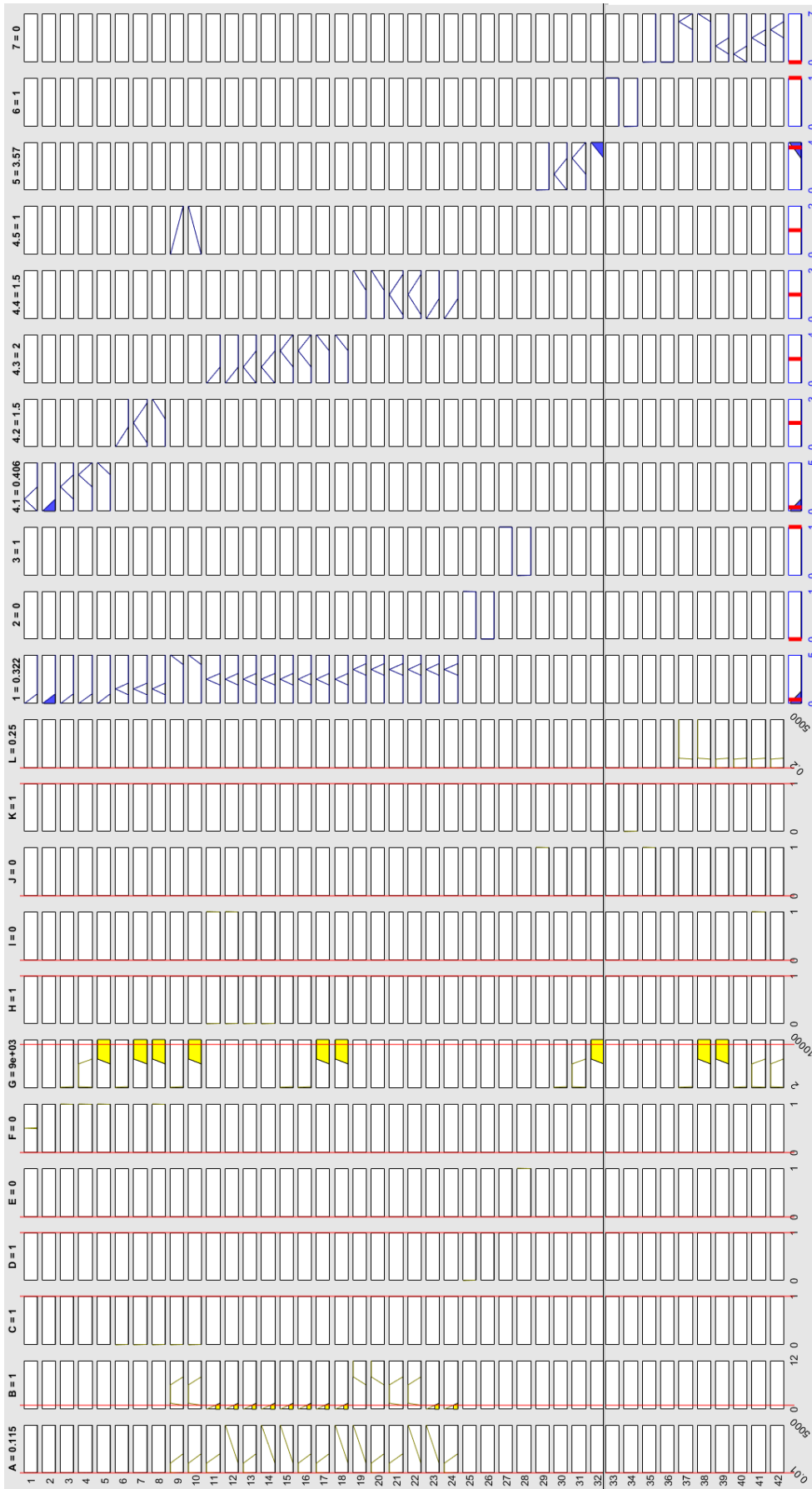
let v16 = [...FB];
v16[5] = S6[0];
let v17 = [...FB];
v17[5] = S6[1];
let v18 = [...FB];
v18[5] = S6[2];
let v19 = [...FB];
v19[5] = S6[3];
let v20 = [...FB];
v20[5] = S6[4];
let v21 = [...FB];
v21[5] = S6[5];
let v22 = [...FB];
v22[5] = S6[6];

let vizinhos = [v1, v2, v3, v4, v5, v6, v7, v8, v9, v10, v11, v12, v13, v14,
v15, v16, v17, v18, v19, v20, v21, v22];
```

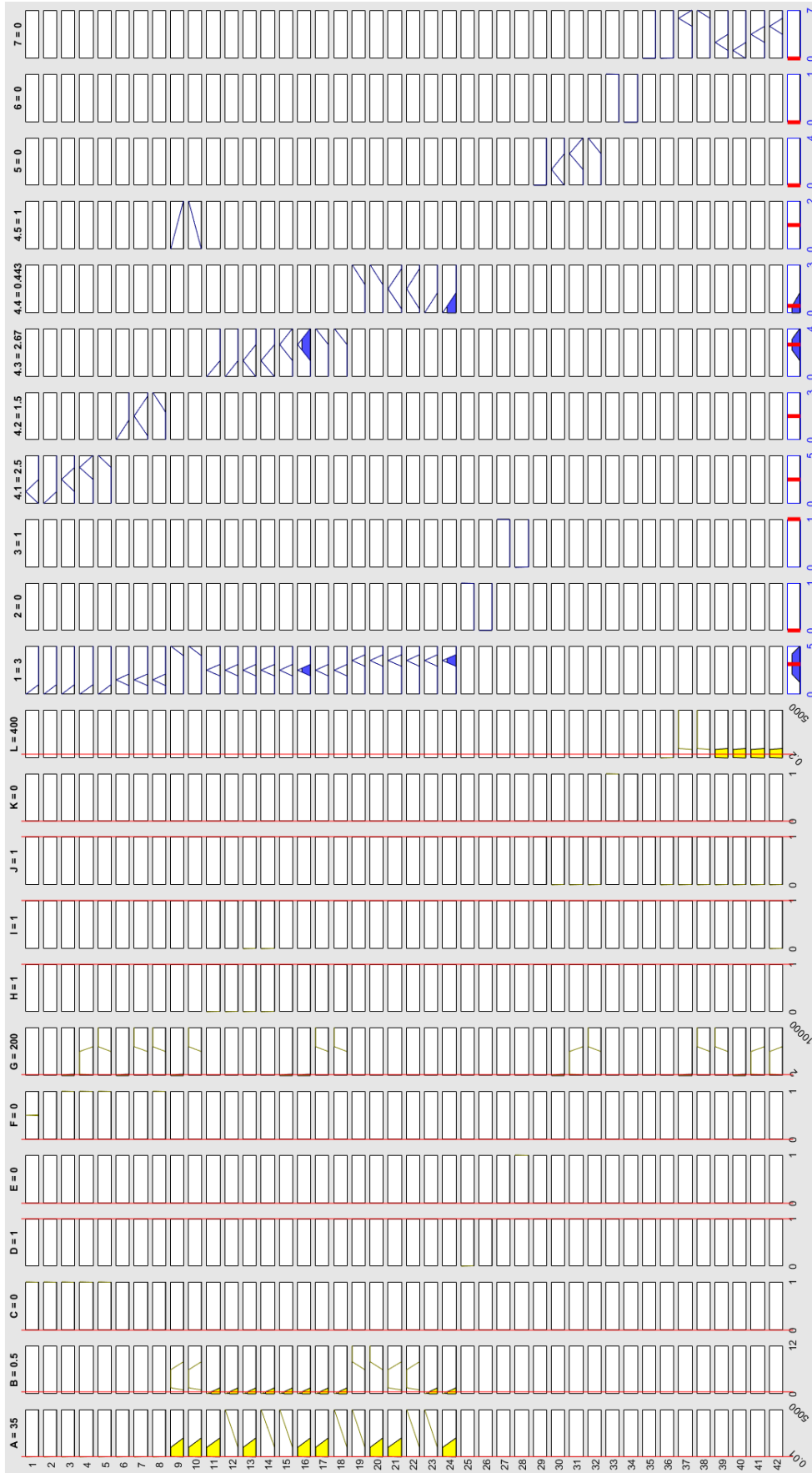
```
console.log("Vizinhos estruturais e seus custos: ")

for (let i = 0; i < vizinhos.length; i++) {
  if (JSON.stringify(vizinhos[i]) !== JSON.stringify(FB) && vizinhos[i] !==
  0) {
    console.log(vizinhos[i]);
    custo = 0;
    console.log(calcularCusto(vizinhos[i]));
  }
}
```

APÊNDICE F – RESULTADOS DA MODELAGEM DO CENÁRIO 1



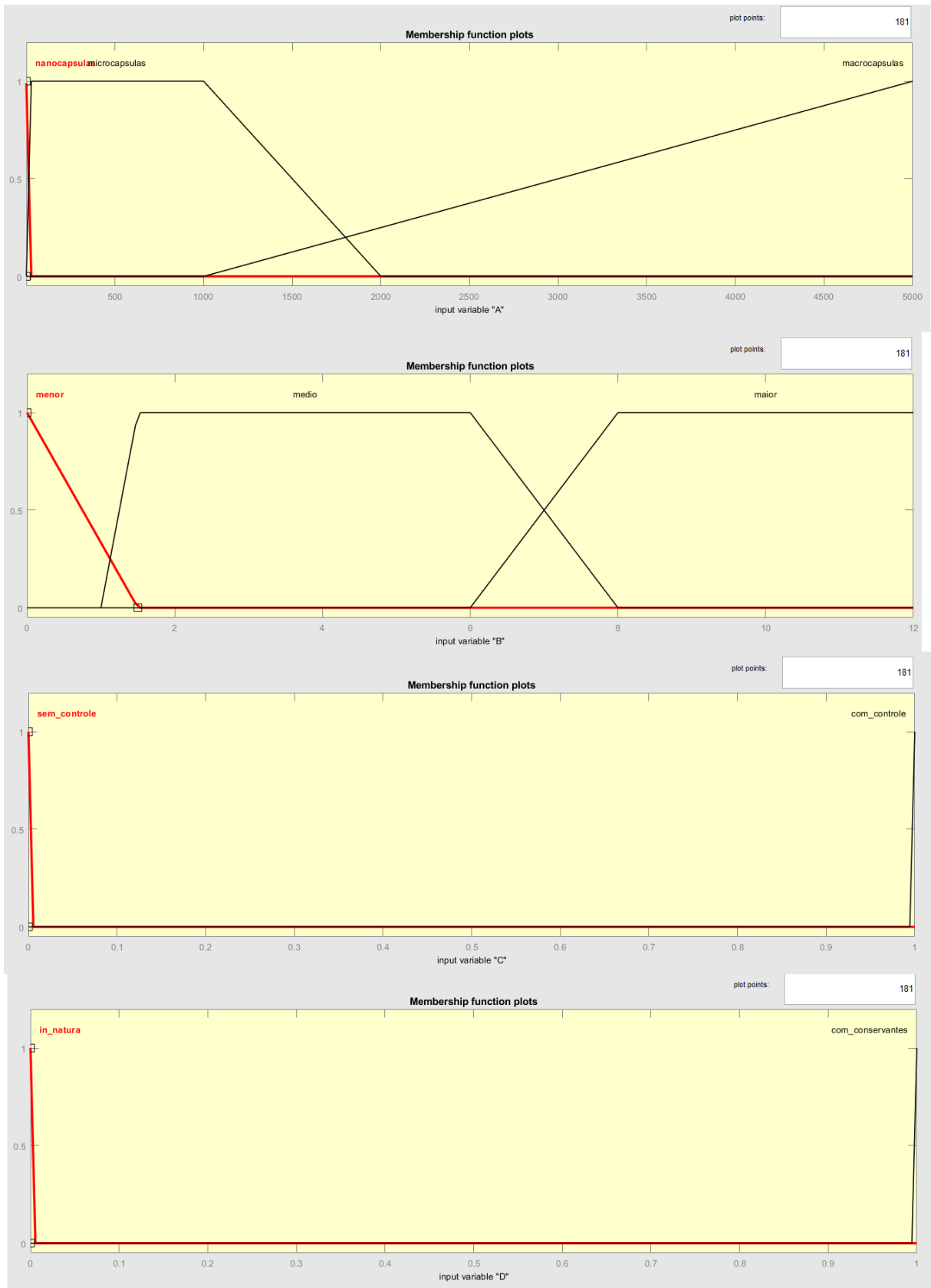
APÊNDICE G – RESULTADOS DA MODELAGEM DO CENÁRIO 2

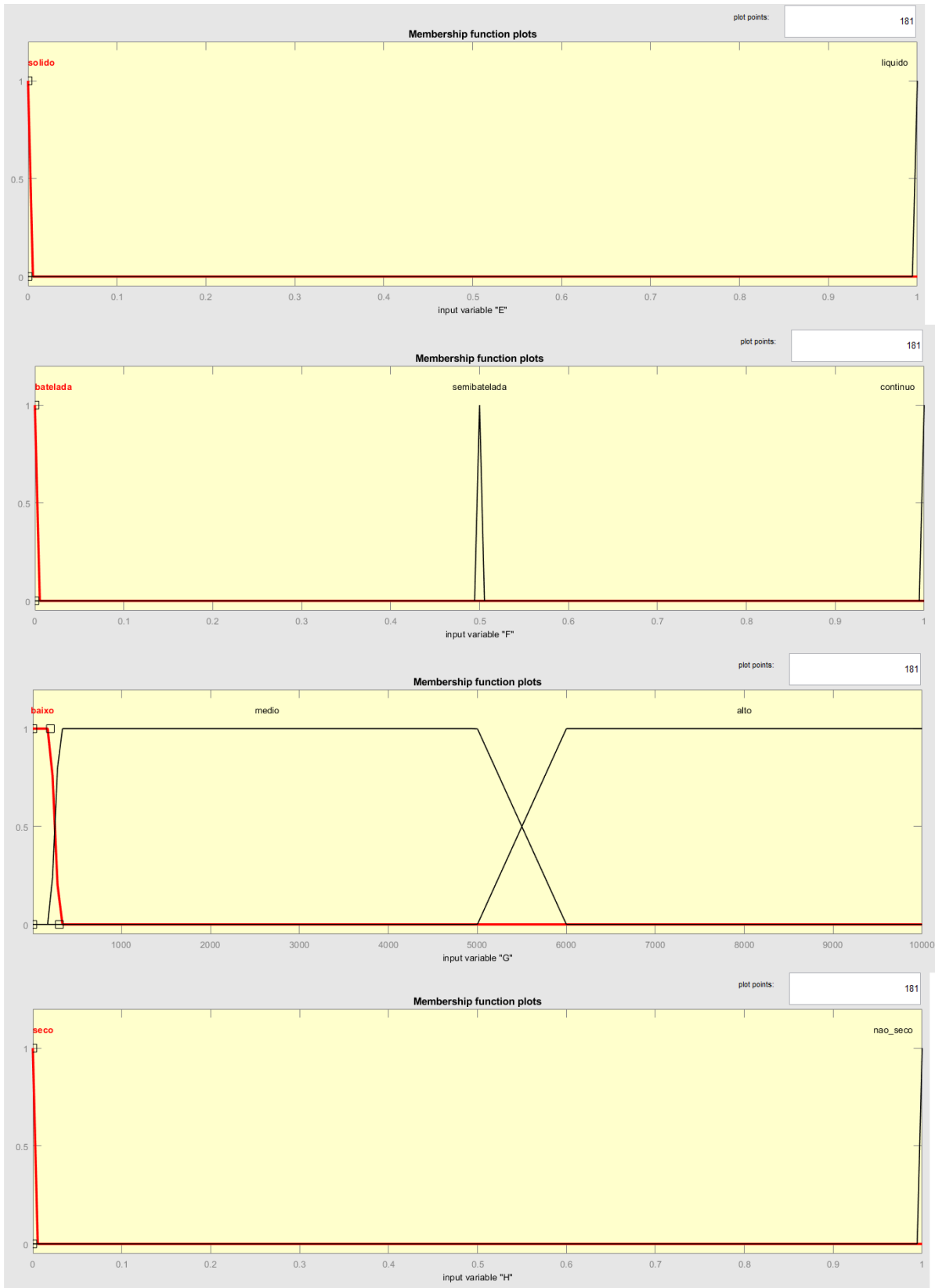


APÊNDICE H – REGRAS HEURÍSTICAS APLICADAS NA TOOLBOX

1. If (A is nanocapsulas) and (C is com_controle) and (F is semibatelada) then (1 is PO)(4.1 is RSB) (1)
2. If (A is nanocapsulas) and (C is com_controle) and (F is batelada) then (1 is PO)(4.1 is RB) (1)
3. If (A is nanocapsulas) and (C is com_controle) and (F is continuo) and (G is baixo) then (1 is PO)(4.1 is PFR) (1)
4. If (A is nanocapsulas) and (C is com_controle) and (F is continuo) and (G is medio) then (1 is PO)(4.1 is CSTR) (1)
5. If (A is nanocapsulas) and (C is com_controle) and (F is continuo) and (G is alto) then (1 is PO)(4.1 is RLF) (1)
6. If (A is nanocapsulas) and (C is sem_controle) and (G is baixo) then (1 is EM)(4.2 is TM3) (1)
7. If (A is nanocapsulas) and (C is sem_controle) and (F is batelada) and (G is alto) then (1 is EM)(4.2 is MEB) (1)
8. If (A is nanocapsulas) and (C is sem_controle) and (F is continuo) and (G is alto) then (1 is EM)(4.2 is MEC) (1)
9. If (A is microcapsulas) and (B is medio) and (C is sem_controle) and (G is baixo) then (1 is CO)(4.5 is TM3) (1)
10. If (A is microcapsulas) and (B is medio) and (C is sem_controle) and (G is alto) then (1 is CO)(4.5 is MD) (1)
11. If (A is microcapsulas) and (B is menor) and (H is seco) and (I is menor_energia) then (1 is SE)(4.3 is SLJ) (1)
12. If (A is macrocapsulas) and (B is menor) and (H is seco) and (I is menor_energia) then (1 is SE)(4.3 is SLJ) (1)
13. If (A is microcapsulas) and (B is menor) and (H is seco) and (I is menor_tempo) then (1 is SE)(4.3 is SLF) (1)
14. If (A is macrocapsulas) and (B is menor) and (H is seco) and (I is menor_tempo) then (1 is SE)(4.3 is SLF) (1)
15. If (A is macrocapsulas) and (B is menor) and (G is baixo) and (H is nao_seco) then (1 is SE)(4.3 is SP) (1)
16. If (A is microcapsulas) and (B is menor) and (G is baixo) and (H is nao_seco) then (1 is SE)(4.3 is SP) (1)
17. If (A is microcapsulas) and (B is menor) and (G is alto) and (H is nao_seco) then (1 is SE)(4.3 is LI) (1)
18. If (A is macrocapsulas) and (B is menor) and (G is alto) and (H is nao_seco) then (1 is SE)(4.3 is LI) (1)
19. If (A is macrocapsulas) and (B is maior) then (1 is EX)(4.4 is TMME) (1)
20. If (A is microcapsulas) and (B is maior) then (1 is EX)(4.4 is TMME) (1)
21. If (A is microcapsulas) and (B is medio) then (1 is EX)(4.4 is TMDR) (1)
22. If (A is macrocapsulas) and (B is medio) then (1 is EX)(4.4 is TMDR) (1)
23. If (A is macrocapsulas) and (B is menor) then (1 is EX)(4.4 is TMQJ) (1)
24. If (A is microcapsulas) and (B is menor) then (1 is EX)(4.4 is TMQJ) (1)
25. If (D is in_natura) then (2 is TM) (1)
26. If (D is com_conservantes) then (2 is SPT) (1)
27. If (E is solido) then (3 is TM2) (1)
28. If (E is liquido) then (3 is SHME) (1)
29. If (J is com_secagem) then (5 is SS) (1)
30. If (G is baixo) and (J is sem_secagem) then (5 is SPE) (1)
31. If (G is medio) and (J is sem_secagem) then (5 is SF) (1)
32. If (G is alto) and (J is sem_secagem) then (5 is SC) (1)
33. If (K is com_separacao) then (6 is TM4) (1)
34. If (K is sem_separacao) then (6 is SL) (1)
35. If (J is com_secagem) then (7 is SSC) (1)
36. If (J is sem_secagem) and (L is pequenas) then (7 is SSC) (1)
37. If (G is baixo) and (J is sem_secagem) and (L is grandes) then (7 is STU) (1)
38. If (G is alto) and (J is sem_secagem) and (L is grandes) then (7 is STA) (1)
39. If (G is alto) and (J is sem_secagem) and (L is medias) then (7 is LI2) (1)
40. If (G is baixo) and (J is sem_secagem) and (L is medias) then (7 is SP2) (1)
41. If (G is medio) and (I is menor_energia) and (J is sem_secagem) and (L is medias) then (7 is SLJ2) (1)
42. If (G is medio) and (I is menor_tempo) and (J is sem_secagem) and (L is medias) then (7 is SLF2) (1)

APÊNDICE I – FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA DAS VÁRIÁVEIS DE ENTRADA







APÊNDICE J – FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE SAÍDA

