

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO**

**ANÁLISE DE CENÁRIOS EM INDÚSTRIAS DE
PROCESSO USANDO SIMULAÇÃO DISCRETA: UMA
APLICAÇÃO EM UMA INDÚSTRIA DE NUTRIÇÃO
ANIMAL**

Gabriel Campos Maurício

São Carlos
2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO

ANÁLISE DE CENÁRIOS EM INDÚSTRIAS DE
PROCESSO USANDO SIMULAÇÃO DISCRETA: UMA
APLICAÇÃO EM UMA INDÚSTRIA DE NUTRIÇÃO
ANIMAL

Gabriel Campos Maurício

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia de Produção da Universidade de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia da Produção.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Roberto Fernandes Tavares Neto

São Carlos
2015

Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da Biblioteca Comunitária UFSCar
Processamento Técnico
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M455ac Mauricio, Gabriel Campos
Análise de cenários em indústrias de processo
usando simulação discreta : uma aplicação em uma
indústria de nutrição animal / Gabriel Campos
Mauricio. -- São Carlos : UFSCar, 2016.
101 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de
São Carlos, 2015.

1. Gestão da Produção. 2. Simulação discreta. 3.
Indústria de processo. 4. Processo produtivo híbrido.
5. Taxa de ensaio. I. Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Gabriel Campos Maurício, realizada em 14/12/2015:

Prof. Dr. Roberto Fernandes Tavares Neto
UFSCar

Prof. Dr. Fábio Molina da Silva
UFSCar

Prof. Dr. Walther Azzolini Júnior
USP

“Nunca diga às pessoas como fazer as coisas. Diga-lhes o que fazer, e elas irão
surpreendê-lo com sua engenhosidade.”

General George S. Patton Jr.

AGRADECIMENTOS

Quando nos deparamos com a oportunidade de aprender e evoluir, como profissionais e como seres humanos, temos a certeza de que existe um Deus a zelar pelos nossos passos.

Aos meus pais, Laura Freire Campos Maurício e Nelson Maurício (in memoriam), pelo exemplo de que todo esforço vale a pena quando se trata da obtenção do conhecimento.

À minha esposa Eng. Dr^a. Edmara Marques Rodrigues da Silva, por seu apoio incondicional e incentivo insistente.

Aos amigos Artur Valadares de Freitas Santos e Carlos Alberto Siqueira Lima pelas valiosas ajudas com as referências bibliográficas.

Ao Prof. Dr. Roberto Fernandes Tavares Neto pelo profissionalismo, paciência e disposição ao orientar este trabalho.

Ao Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos, em especial ao funcionário Leandro Canali Ramos, pela ajuda com o software Arena[®].

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desse trabalho.

RESUMO

A busca pelo aumento de produtividade tornou-se um mantra repetido à exaustão em muitas empresas imersas em um mercado globalizado. Neste contexto, muitas técnicas computacionais vêm ganhando espaço, conquistando adeptos, auxiliando e refinando o processo de tomada de decisão. Dentre as várias técnicas disponíveis, a simulação discreta se destaca, pois permite estudar o comportamento de sistemas, reais ou não, sob diversas condições, possibilitando que hipóteses sejam testadas sem que recursos físicos e financeiros sejam utilizados. No caso da indústria de nutrição animal, essa técnica se torna uma ferramenta muito relevante, principalmente no planejamento de curto prazo que envolve a gestão das operações do chão de fábrica. A indústria de nutrição animal está inserida na cadeia do agronegócio, e como tal, tem seus insumos cotados internacionalmente, *commodities*, assim uma gestão eficaz de sua capacidade instalada representa uma vantagem estratégica de diferenciação perante as necessidades do mercado em relação a custo, prazo e qualidade. Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi desenvolver um modelo de simulação discreta para auxiliar o processo de tomada de decisão sobre o aumento da taxa de ensaque de uma indústria de nutrição animal, localizada no interior do estado de São Paulo. Para a realização deste estudo foi utilizado o *software* Arena[®], da *Rockwell Softwares*, e como método de pesquisa a modelagem e simulação, sendo que as etapas de desenvolvimento do modelo de simulação seguiram a metodologia proposta por Law e Kelton (2000) e Banks (2010). Os dados foram coletados sempre com os mesmos operadores no mesmo horário. Como resultado da simulação do modelo proposto foi possível analisar diferentes cenários, avaliando a dinâmica do sistema e tendo como indicadores de desempenho a taxa de utilização dos equipamentos, a quantidade de produtos produzidos e o consumo de energia elétrica e gás natural por tonelada de produto produzido. Sendo que a utilização da simulação discreta na indústria de nutrição animal, pertencente à indústria de processo e com processo produtivo híbrido, foi possível devido à abordagem utilizada, proposta por Spieckmann e Stobbe (2012).

Palavras-chaves: Simulação discreta, indústria de nutrição animal, indústria de processo, processo produtivo híbrido, taxa de ensaque, taxa de utilização de equipamentos, *software* Arena[®].

ABSTRACT

The quest for increased productivity has become a mantra repeated *ad nauseam* in many companies immersed in a globalized market. In this context, many computational techniques have becoming more popular, gaining followers, aiding and refining the process of decision-making. Among the various techniques available, the discrete event simulation stands out, as it allows studying the behavior of systems, real or not, in various conditions, allowing hypotheses to be tested without physical and financial resources are used. In the case of the animal feed industry, this technique becomes a very important tool, especially in the short term planning which involves the management of the floor operations. The animal feed industry is part of the agribusiness chain, and as such, has its inputs internationally listed, commodities, thus effectively managing its installed capacity is a strategic advantage for differentiation before the market needs in terms of cost, time and quality. In this sense, the objective of this study was to develop a discrete simulation model to assist the decision-making process on increasing the rate of bagging an animal feed industry, located in the state of São Paulo. For this study it has been used the Arena® software, Rockwell Software, and as a method of research modeling and simulation, and the simulation model development stages followed the methodology proposed by Law and Kelton (2000) and Banks (2010). Data were always collected with the same operator at the same time. As a result of simulation of the proposed model was possible to analyze different scenarios, assessing the dynamics of the system and with the performance indicators the equipment utilization rate, the amount of products produced and the consumption of electricity and natural gas per ton of product produced. Whereas the use of discrete simulation in animal feed industry belonging to the process industry and with hybrid production process, could be used due to the approach proposed by Spieckmann and Stobbe (2012).

Key-words: Discrete simulation, animal feed industry, process industry, hybrid production process, bagging rate, equipment utilization rate, Arena® software.

Sumário

1 – Introdução.....	01
1.1 – Objetivo e Justificativa.....	03
1.2 – Metodologia.....	04
2 – Revisão Bibliográfica.....	09
2.1 – A Indústria de Processo.....	09
2.1.1 – Aspectos Gerais.....	09
2.1.2 – O Planejamento e Controle da Produção na Indústria de Processo.....	19
2.2 – Simulação.....	38
2.2.1 – Simulação de Sistemas.....	38
2.2.2 – Projetos de Simulação.....	47
2.2.3 – A simulação Discreta na Indústria de Processo.....	54
3 – O Processo de produção de ração.....	59
4 – O ambiente a ser estudado e o problema.....	68
5 – O Modelo de Simulação.....	71
5.1 – Elaboração do modelo.....	71
5.2 – Verificação do modelo.....	81
5.3 – Validação do modelo.....	81
5.4 – Projeto de experimentos.....	82
6 – Análise dos Resultados.....	86
7 – Conclusão.....	92
8 – Anexo.....	94
9 – Bibliografia.....	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – <i>Layout</i> do processo de fabricação de ração.....	02
Figura 1.2 – Etapas em um estudo de simulação. Fonte: Banks <i>et al.</i> (2010).....	06
Figura 2.1 – Categorias de <i>Flow Shop</i> . Fonte: Taylor (1979).....	17
Figura 2.2 – Matriz de produto/processo. Fonte: Taylor <i>et al.</i> (1981).....	18
Figura 2.3 – Diferença conceitual entre produtos da indústria de processo e a manufatura discreta. Fonte: Fransoo e Rutten (1994).....	20
Figura 2.4 – Tipologia para a indústria de processo. Fonte: Fransoo e Rutten (1994).....	21
Figura 2.5 – Hierarquia de abordagem de solução. Fonte: Schnelle e Bassett (2006).....	24
Figura 2.6 – Estrutura do sistema PFS da indústria de processo. Fonte: Bolander e Taylor (1993).....	31
Figura 2.7 – Etapas da simulação de sistemas. Fonte: Maria (1997).....	39
Figura 2.8 – Classificação dos sistemas para fins de modelagem. Fonte: Freitas Filho (2008).....	51
Figura 3.1 – Desenho esquemático de um moinho de martelos. Fonte: Giuliani do Brasil (2009).....	60
Figura 3.2 – Desenho esquemático do funcionamento de um moinho de martelos. Fonte: Fabrícia e Streit (2000).....	61
Figura 3.3 – Desenho esquemático de um misturador vertical. Fonte: Rone (2009).....	62
Figura 3.4 – Desenho esquemático de um misturador horizontal. Fonte: Ferraz Máquinas (2009).....	63
Figura 3.5 – Desenho esquemático de um misturador de pás. Fonte: Ferraz Máquinas (2009).....	64
Figura 3.6 – Desenho de uma extrusora. Fonte: www.greenpeças.com.br	66
Figura 3.7 – Fluxograma de fabricação de ração da empresa estudada.....	67
Figura 5.1 – Modelo de simulação do processo de mistura.....	73
Figura 5.2 - Modelo de simulação do processo de moagem fina.....	74
Figura 5.3 - Modelo de simulação do processo da peletizadora 1.....	76
Figura 5.4 - Modelo de simulação do processo de ensaque 1.....	78
Figura 5.5 - Modelo de simulação do processo de ensaque 3.....	80
Figura 5.6 – Caixa de dialogo Run Setup para determinar o período de Warm-up.....	83
Figura 6.1 – Resultado das quantidades produzidas.....	87
Figura 6.2 – Resultados das quantidades produzidas com taxa de processamento do misturador em 18 ton/h.....	88
Figura 8.1 – Modelo de simulação completo da empresa estudada.....	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Distribuição dos tempos de processamento em minutos no <i>Input Analyser</i>	72
Tabela 5.2 – Disponibilidade de horário do misturador e moagem fina.....	73
Tabela 5.3 – Disponibilidade de horário das peletizadoras 1 e 2.....	75
Tabela 5.4 – Disponibilidade de horário dos ensaques 1, 2 e 3.....	77
Tabela 5.5 – Comparação dos resultados da simulação com um dia de produção.....	82
Tabela 5.6 – Utilização da peletizadora 1 em 20 replicações.....	85
Tabela 6.1 – Resultados da utilização dos recursos.....	86
Tabela 6.2 – Resultados da utilização de recursos com taxa de processamento do misturador em 18 ton/h.....	88
Tabela 6.3 – Aumento na taxa de utilização dos recursos.....	89
Tabela 6.4 – Aumento da quantidade produzida.....	89
Tabela 6.5 – Redução dos custos de produção em termos de energia elétrica e gás natural.....	90
Tabela 6.6 – Resultados da utilização de recursos com taxa de processamento do misturador em 19 ton/h.....	90
Tabela 6.7 – Resultados das quantidades produzidas com taxa de processamento do misturador em 19 ton/h.....	91

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Comparação entre ambientes de manufatura. Fonte: Taylor <i>et al.</i> (1981).....	10
Quadro 2.2 – Exemplos de indústrias segundo a classificação de subsistemas. Fonte: Dennis e Meredith (2000a).....	14
Quadro 2.3 – Comparação entre produto e mercado. Fonte: Taylor <i>et al.</i> (1981).....	19
Quadro 2.4 – Características do processo contínuo vs processo em batelada. Fonte: Fransoo e Rutten (1994).....	21
Quadro 2.5 – Categorias de classificação das áreas de aplicação da simulação na manufatura. Fonte: Negahban e Smith (2014).....	46

1 – Introdução

No Brasil, a perspectiva de crescimento da indústria de nutrição animal em 2014, segundo o Sindicato Nacional das Indústrias de Alimentação Animal - SINDIRAÇÕES, é de 4,1%, atingindo a marca de 67,3 milhões de toneladas (SINDIRAÇÕES, 2014). Embora apresente um crescimento, este não se compara a estimativa de seis anos atrás, 2008, que era de dois dígitos, 10,2% (SINDIRAÇÕES, 2008).

Esta previsão é segmentada, contemplando: 37 milhões de toneladas para a avicultura, 15,4 milhões de toneladas para a suinocultura, 2,67 milhões de toneladas para a pecuária de corte e 5,3 milhões de toneladas para a pecuária de leite, 2,49 milhões de toneladas para *pet* (cães e gatos), 0,61 milhão de toneladas para equinos, 0,723 milhão de toneladas para peixes, 0,083 milhão de toneladas para camarões, 2,2 milhões de toneladas de sal mineral e outros segmentos somando 0,825 milhão de toneladas (SINDIRAÇÕES, 2014).

O ano de 2012 refletiu uma expectativa de crescimento menor que a atual, de apenas 2,8% em relação ao ano anterior, somando 66,2 milhões de toneladas. Enquanto que 2011 apresentou crescimento quase duas vezes maior que 2012. A diminuição das exportações de carne suína devido a restrições à entrada do produto brasileiro nos principais mercados consumidores e a valorização do real, assim como o aumento dos custos de produção nas fábricas de ração com a valorização de mais de 30% nos preços do milho e da soja no mercado internacional contribuíram para a redução no crescimento do setor, ainda segundo o SINDIRAÇÕES (2012).

Para o SINDIRAÇÕES (2009), as empresas precisam se readaptar ao novo modelo contemporâneo da cadeia de suprimentos. “Enfrentamos problemas como a queda nos estoques globais de grãos, crescimento econômico e populacional em todo o mundo, escassez de terra e água, competição dos grãos com o etanol e o forte impacto das alterações climáticas. Isso sem contar a especulação financeira, que tem afetado fortemente o setor”, afirma o diretor executivo do SINDIRAÇÕES, Ariovaldo Zanni.

O presente trabalho se foca na otimização do uso da capacidade produtiva. Através do uso de uma ferramenta de simulação computacional, foi possível analisar diferentes cenários do processo produtivo de uma indústria de nutrição animal localizada no interior de São Paulo, pertencente a um grupo multinacional que controla 10 unidades fabris no Brasil.

A unidade fabril estudada é composta por três fábricas dentro desta unidade, uma fábrica para a produção de premixes (mistura altamente concentrada), núcleos e sais minerais, uma fábrica para a produção de produtos extrusados para “pet food” e aquicultura e outra fábrica para a produção de rações para bovinos, equinos, caprinos, ovinos, suínos e aves.

Somente o processo da última fábrica citada foi alvo de estudo, pois corresponde a 80 % do volume produzido e também corresponde à maior parcela no faturamento da empresa. O processo consiste em dosagem, medição (balança), moagem, homogeneização, transporte, estocagem em silos e ensaque. Esta fábrica tem como produtos finais ração farelada, ração peletizada e farelo para a extrusora, conforme *layout* do processo apresentado na figura 1.1.

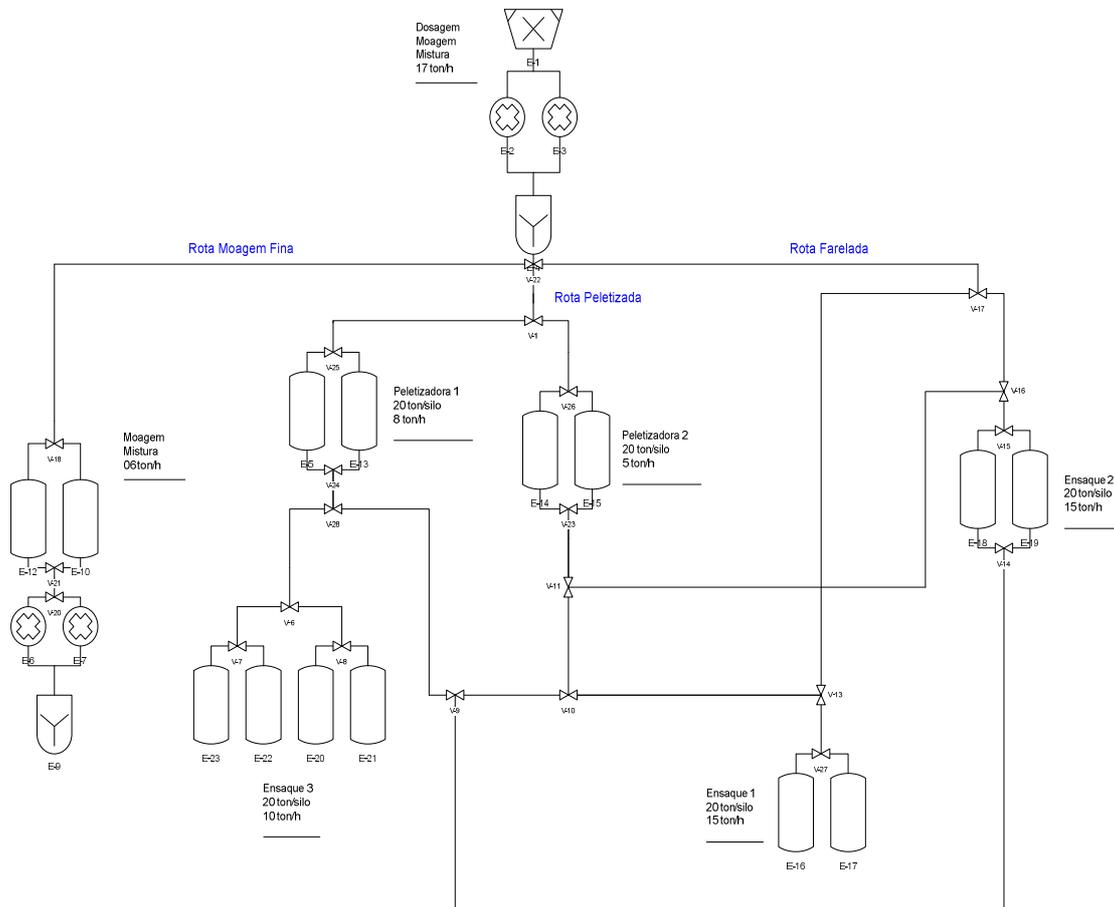


Figura 1.1 – *Layout* do processo de fabricação de ração

O fluxo dos produtos finais se dá por três rotas distintas, produtos farelados seguem a rota farelada que se origina no misturador e segue diretamente para os ensaques, produtos peletizados seguem a rota peletizada que se origina no misturador,

são processados pelas peletizadoras e seguem para os ensaques, e os produtos extrusados que seguem a rota moagem fina que se origina no misturador, passam por outro processo de moagem mais rigoroso e mistura para então seguir para a extrusora.

A programação das ordens de fabricação de rações, assim como em qualquer ambiente fabril, está diretamente relacionada a capacidade produtiva disponível. No caso da empresa estudada, o cálculo da capacidade produtiva nominal é fortemente influenciado por fatores como, por exemplo, a taxa de ensaque. A variação da taxa de ensaque pode propiciar o surgimento de gargalos (filas) em alguns pontos do processo e ociosidade em outros. A indústria de nutrição animal é influenciada por fatores externos, conforme mencionado anteriormente, e o desempenho das empresas dependerá do melhor aproveitamento da capacidade produtiva, sendo assim, o surgimento de gargalos (filas) e ociosidades, como resultado da variação da taxa de ensaque, tornam-se indesejáveis, pois dificultam a racionalização dos custos operacionais através da queda de produtividade e consequente aumento de custo do produto final.

A empresa estudada, ao perceber esse cenário, reconhece a necessidade de aproveitar ao máximo sua capacidade produtiva, reduzir custos diretos e indiretos e evitar a ociosidade das máquinas ou a formação de gargalos (filas) frente a um cenário muito diferente de seis anos atrás. Como a demanda excede a capacidade produtiva da empresa, a lucratividade está fortemente ligada à sua produção total mensal. Para tal, essa pesquisa tem como objetivo a aplicação de técnicas de Planejamento e Controle da Produção (PCP) e simulação computacional para embasar o processo de tomada de decisão.

1.1 – Objetivo e Justificativa

O papel do PCP é dar suporte a várias decisões com o objetivo de definir o que, quanto e quando produzir e comprar, além dos recursos a serem utilizados (FERNANDES E GODINHO FILHO, 2010). Para o melhor aproveitamento da capacidade produtiva, o PCP, efetua, entre outras atividades, o planejamento agregado, o planejamento da capacidade e a programação mestre de produção. Na empresa estudada, dentro do planejamento da capacidade produtiva, o PCP tem como foco otimizar a utilização da capacidade instalada como estratégia para o aumento da produtividade. A pesquisa operacional, por sua vez, apresenta um conjunto de

ferramentas analíticas que permitem a descrição formal e análise do sistema produtivo estudado.

A empresa estudada pertence ao segmento das indústrias alimentícias, e por consequência, pode ser classificada como uma indústria de processo. Isso significa que esta empresa apresenta característica de capital intensivo, com equipamentos com motores muito potentes e com elevado consumo de energia elétrica. A demanda mensal média de energia elétrica da empresa é de aproximadamente 450.000 Kwh, e também apresenta um consumo médio de 4.500 m³/dia de gás natural como fonte de energia para a geração de vapor d'água.

Considerando o supracitado, este trabalho realizou um estudo de simulação para avaliar o impacto da variação na taxa (ton/h) de ensaque no sistema como um todo, considerando a taxa de utilização dos equipamentos, a quantidade de produtos produzidos, sua distribuição entre as três rotas produtivas (farelada, peletizada e moagem fina) e a racionalização dos custos operacionais em termos de Kwh por tonelada e m³ de gás por tonelada, através de cenários obtidos em simulação computacional visando o melhor aproveitamento da capacidade produtiva e consequente racionalização dos custos operacionais relativos a energia elétrica e gás natural.

1.2 – Metodologia

O ponto de convergência entre ciência e o senso comum é a busca pela ordem, tanto pelo pesquisador quanto pelo simples cidadão (ALVES, 1995). Em se tratando de ciência, a ordem se dá por meio de métodos, procurando isolar o pesquisador da subjetividade. A ideia de que a ciência parte da necessidade de solucionar um determinado problema apresenta como produto final uma teoria ou hipótese. Através do método científico, a concepção da solução passa pela construção de um modelo hipotético e ou provisório, que deve ser pesquisado e experimentado (ALVES, 1995).

De acordo com Alves (1995), o estabelecimento da ordem se dá quando o pesquisador analisa uma questão a partir de um modelo. Nessa linha de raciocínio, o modelo representa um conjunto de conceitos que permite simular a realidade sob certas condições. O autor conclui que as mudanças de modelo são necessárias para a compreensão do problema e, ressalta que o progresso da ciência depende da ocorrência de anomalias, as quais desafiam o trabalho científico na busca de solução.

Lakatos e Marconi (1995) descrevem a pesquisa científica como um procedimento formal com método de pensamento reflexivo, exigindo tratamento adequado e rigoroso por parte do pesquisador para descobrir ou conhecer a solução de um problema claro, conciso e objetivo, podendo ser prático ou teórico. Essa abordagem exige quatro características essenciais para o pesquisador: disciplina, metodologia, organização e rigor. Todas elas são identificadas tanto nos passos que compõe o desenvolvimento da pesquisa como nas etapas que compõe o planejamento da pesquisa. As autoras enfatizam a importância do projeto como balizador da pesquisa, contendo: o tema, o objetivo, a metodologia escolhida, a coleta de dados, tratamento, tabulação e interpretação dos dados para o relatório final.

Na visão de Martins (2010) a concepção metodológica do pesquisador e as características da pesquisa auxiliam na escolha da abordagem de pesquisa utilizada para apresentar solução ao problema proposto. Essa abordagem pode ser quantitativa, qualitativa ou a utilização de ambas em uma mesma pesquisa. A abordagem quantitativa apresenta como característica mais marcante o ato de mensurar variáveis, através da captura das evidências da pesquisa. Ainda segundo o autor, na engenharia de produção, os métodos mais apropriados para realizar uma pesquisa quantitativa são: pesquisa de avaliação (*survey*), modelagem/simulação, experimento e quase experimento.

Para Morabito e Pureza (2010), a metodologia da pesquisa baseada em modelagem quantitativa em gestão da produção e operações consiste na elaboração de modelos matemáticos e de simulação, onde as descrições matemáticas e simbólicas das relações causais entre variáveis de controle e variáveis de desempenho são desenvolvidas, analisadas e testadas.

Ainda segundo os autores, existem quatro tipos de pesquisa quantitativa em gestão da produção e operações: (i) axiomática normativa, (ii) axiomática descritiva, (iii) empírica normativa, e (iv) empírica descritiva. No caso deste trabalho, a pesquisa pode ser classificada como empírica, pois busca obter aderência do modelo á realidade observada (problema), e descritiva, pois utiliza modelo que busca estabelecer as relações causais.

Este trabalho segue a metodologia de processo de simulação conforme proposto pela literatura (por exemplo, ver Law e McComas (1991), Maria (1997), Shannon (1998), Law e Kelton (2000), Pidd (2001), Freitas Filho (2008), Law (2009), Banks *et al.* (2010) e Sturrock (2014)). Esse processo é composto pelas seguintes etapas: (i) identificar o problema, (ii) formular o problema, (iii) definição dos objetivos e

planejamento do projeto, (iv) concepção do modelo, (v) coleta de dados, (vi) tradução do modelo, (vii) verificação do modelo, (viii) validação do modelo, (ix) projeto do experimento, (x) análise e execução do modelo, (xi) documentação e implementação, como podemos verificar no fluxograma da figura 1.2.

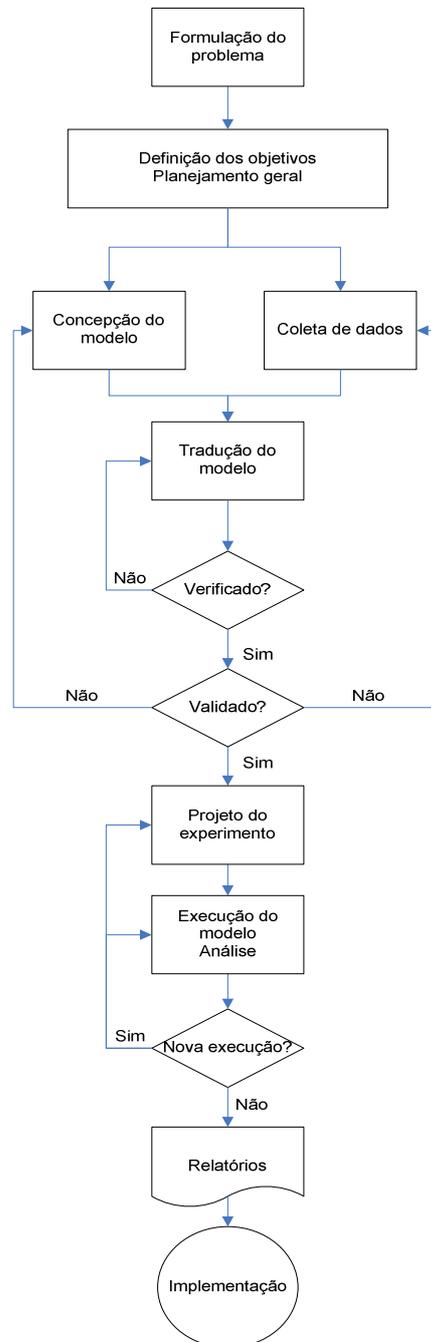


Figura 1.2 – Etapas em um estudo de simulação. Fonte: Banks *et al.* (2010).

Por identificação do problema entende-se a enumeração dos problemas existentes no sistema ou a elaboração dos requisitos de um novo sistema. A etapa de formulação ou definição do problema consiste em estabelecer os limites do sistema e do problema a serem estudados, e isso precisa estar muito claro durante a construção do modelo de simulação. Nesta etapa, também é necessário identificar quem será o usuário final do modelo ou quem serão as pessoas (diretores, gerentes, supervisores e analistas) que analisarão os resultados da simulação.

A etapa de definição dos objetivos e planejamento do projeto consiste em estabelecer os objetivos que se espera alcançar através das perguntas feitas ao modelo de simulação, como por exemplo, no caso da manufatura: é possível aumentar o *mix* de produção, é possível reduzir a ociosidade de uma máquina específica, ou é possível melhorar o fluxo de materiais? E o planejamento do projeto considera todos os recursos necessários (material, humano e financeiro) dentro de um cronograma definindo o tempo esperado para a conclusão de cada etapa do estudo.

A etapa de concepção do modelo é a tentativa de reproduzir a essência do sistema real através de um modelo que pode ser de forma gráfica, como um fluxograma, ou algorítmica, sem a necessidade de uma correspondência bi-unívoca. Banks *et al.* (2010) considera esta etapa mais uma arte do que uma ciência. A etapa de coleta de dados é crucial para que o resultado da simulação atenda o propósito do estudo realizado. É recomendável que esta etapa inicie o mais breve possível devido ao grande consumo de tempo necessário para coleta de dados. A definição dos objetivos da simulação e a complexidade do modelo indicarão que tipo de dados serão necessários.

A etapa de tradução do modelo consiste na elaboração de um programa quando da utilização de uma linguagem de simulação, ou de uma abordagem do modelo por pacotes de *software* específicos de simulação. A verificação e a validação constituem cada uma, uma etapa importante no estudo, pois são elas que garantirão que todos os dados gerados pelo modelo atendam o objetivo do estudo e representem os resultados do sistema real.

Identificar os cenários ou as alternativas que deverão ser simuladas é considerado na etapa do projeto do experimento, com a expectativa de gerar a maior quantidade de informações possíveis com o menor número de experimentações. Na etapa de análise e execução do modelo, as informações necessárias para a elaboração das medidas de desempenho são obtidas e o tratamento estatístico dos dados poderá indicar a necessidade de novas execuções. Em seguida, todos os dados e informações

gerados durante o estudo realizado deverão ser documentados de forma que todos os procedimentos e passos realizados durante a simulação possam ser revistos caso haja necessidade.

A última etapa consiste na implementação do(s) resultado(s) da simulação, e dependerá basicamente de como as outras etapas foram conduzidas. Porém, caso o modelo e seus pressupostos não tenham sido compreendidos e comunicados devidamente, a implementação será prejudicada, independente da validação do modelo de simulação.

2 – Revisão Bibliográfica

2.1 – A indústria de processo

2.1.1 – Aspectos gerais

O termo “indústria de processo” pode ser definido, segundo Taylor (1979), através de dois métodos de classificação: grupos de indústrias e características de fluxo de material. Do ponto de vista do primeiro método, a indústria de processo pertence ao grupo das indústrias manufatureiras, assim como as indústrias de manufatura discreta. Pertencem ao grupo das indústrias de processo as indústrias Químicas, Plásticos e Borrachas, Petroquímicas, Vidros e Cerâmicas, Siderúrgicas, Alimentícias, Têxtil, Farmacêuticas, Papel e Celulose e Cimento. O segundo método classifica a indústria de processo quanto ao fluxo de material, onde as características de três sistemas de fluxo de materiais são apresentadas:

- *Project shop* – máquinas, materiais e mão-de-obra são levados até o local de montagem;
- *Flow shop* – máquinas e mão-de-obra são agrupados em estações de trabalho. O fluxo dos materiais segue uma rota fixa através das estações de trabalho;
- *Job shop* - máquinas e mão-de-obra são agrupados em estações de trabalho. O fluxo dos materiais é determinado pela operação ou tarefa a ser realizada através das estações de trabalho.

Ainda segundo Taylor (1979), o termo “*flow shop*” é utilizado como sinônimo do termo “indústria de processo”.

A indústria de processo abrange um leque muito amplo de empresas, que vão do processo contínuo de uma indústria petroquímica, passando pela fabricação de grandes lotes como na indústria siderúrgica até a fabricação de pequenos lotes como nas indústrias farmacêutica e alimentícia. Segundo a definição da APICS – *American Production and Inventory Control Society*, a indústria de processo agrega valor aos materiais através de mistura, separação, conformação ou reações químicas, seja através de processo contínuo ou batelada (*batch*) exigindo alto investimento de capital e rígido controle do processo.

Taylor (1979) apresenta algumas características típicas da indústria de processo que contrasta diferentemente da indústria de manufatura discreta:

- baixa variedade de matéria-prima;
- menor quantidade de material em processo;
- mais depósitos para produtos acabados;
- mais operações em fluxo contínuo;
- maior ocupação de recurso produtivo;
- restrições mais severas de capacidade;
- maior probabilidade de impedir a saída de produtos interrompendo a planta inteira ou apenas uma parte.

Quanto ao ambiente de manufatura, as instalações de produção podem ser classificadas ao longo de uma faixa de gradação, onde *job shop* (o fluxo dos materiais no chão de fábrica depende de cada tarefa a ser executada) fica em uma ponta e *flow shop* (o fluxo de materiais no chão de fábrica é fixo) fica em outra. A maioria das instalações fica entre o *job shop* puro e o *flow shop* puro (TAYLOR *et al.*, 1981). A indústria de processo se posiciona mais próxima do ambiente *flow shop* do que a indústria de manufatura discreta (TAYLOR *et al.*, 1981). O quadro 2.1 apresenta a comparação entre os dois ambientes de manufatura.

<i>Job Shop</i>	<i>Flow Shop</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Fluxo variável • <i>Layout</i> por processo • Equipamentos flexíveis • Baixo volume • Menor <i>lead time</i> para aumentar a capacidade • Capacidade difícil de definir • Trabalho intensivo • Operários que fabricam os produtos 	<ul style="list-style-type: none"> • Fluxo fixo • <i>Layout</i> por produto • Equipamentos dedicados • Alto volume • Maior <i>lead time</i> para aumentar a capacidade • Capacidade bem definida • Capital intensivo • Operadores altamente especializados e treinados que monitoram e controlam os equipamentos do processo
<ul style="list-style-type: none"> • Estoque significativo de material em processo • Postos de trabalho não se sobrepõem entre centros de trabalho • Falha de equipamento desliga a máquina • Atraso na recepção de matéria-prima atrasa um pedido de cliente 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixo estoque de material em processo • Postos de trabalho sobrepostos • Falha de equipamento para a fábrica • Falta de matéria-prima básica para a fábrica

Quadro 2.1 – Comparação entre ambientes de manufatura. Fonte: Taylor *et al.* (1981).

Enquanto Taylor *et al.* (1981) caracterizam a indústria de processo como um ambiente *flow shop*, Dennis e Meredith (2000a) ampliam e procuram definir uma taxonomia para a indústria de processo, onde sete subtipos de sistemas de transformação são obtidos através da análise de *cluster* realizado em um grupo de 19 empresas diferentes.

Embora os processos sejam diferenciados em relação à diversidade e movimentação de materiais, tipo de equipamento utilizado e tempo de execução da produção (*production run time*), Dennis e Meredith (2000a) sentiram necessidade de desagregar essas 16 características, classificadas em quatro dimensões (diversidade de material, movimentação do material, equipamentos utilizados e tempo de execução).

Como características relacionadas à diversidade de material, temos:

- roteamento – o número de rotas diferentes em um sistema de transformação;
- flexibilidade de equipamento – grau de flexibilidade (capacidade de processar diferentes tipos de matéria-prima, e conseqüentemente, produzir produtos diferentes);
- fluxo – grau de continuidade do fluxo (quantidade de interrupções no fluxo através da planta);
- matéria-prima – número total de matérias-primas (insumos) utilizada pelo sistema de transformação;
- ingredientes – número médio de ingredientes (matérias-primas e intermediários) utilizado na composição dos produtos;
- produto acabado – número de produtos acabados diferentes produzidos pelo sistema de transformação.

Como características relacionadas à movimentação de material, temos:

- pontos de estoque – número médio de pontos de estoque (armazenamento de matéria-prima ou intermediários) para as rotas;
- perfil de estoque – um perfil do volume de WIP e estoque no chão (identifica o volume de material em espera e porque), que varia de materiais em processo no chão de fábrica a materiais planejados, como intermediários, e acúmulos não planejados de materiais entre processos;

- centros de trabalho – número médio de centros de trabalho (locais diferentes em que o produto é processado) separados para as rotas em um sistema de transformação;
- complexidade de formulação – grau de complexidade de estrutura e formulação do produto, variando de misturas sem reações químicas entre os materiais e reações químicas complexas que necessitam de controle de múltiplos parâmetros, como temperatura e pH.

Como características relacionadas aos equipamentos utilizados, temos:

- equipamento de uso geral – porcentagem de equipamento de uso geral dedicado e não-dedicado (a combinação da saída desses equipamentos determina a variedade final dos produtos);
- equipamentos especiais - porcentagem de equipamentos especiais dedicados e não-dedicados (a combinação da saída desses equipamentos determina a variedade final dos produtos);
- variedade de produto – grau de variedade de produto.

Como características relacionadas ao tempo de execução, temos:

- tempo de execução – tempo de execução da produção, incluindo os tempos de movimentação de materiais e excluindo os tempos de espera em filas.

Através da análise dessas 16 características contidas nas quatro dimensões padrão de processo usando uma análise de *cluster*, Dennis e Meredith (2000a) obtém a definição de sete subtipos de sistemas de transformação da indústria de processo: (i) processo *job shop* (*job shop process*), (ii) mistura customizada (*custom blending*), (iii) lote rápido (*fast batch*), (iv) híbrido customizado (*custom hybrid*), (v) estoque híbrido (*stock hybrid*), (vi) contínuo multiestágio (*multistage continuous*), (vii) contínuo rígido (*rigid continuous*).

Os subsistemas processo *job shop*, lote rápido e mistura customizada, conforme descritos por Dennis e Meredith (2000a), são caracterizados como sistemas de transformação intermitentes devido à predominância de organização funcional, equipamento de uso geral e alto grau de flexibilidade. O subsistema processo *job shop* apresenta como característica longos tempos de execução, grande flexibilidade, alta variedade de produtos e alta complexidade de produtos. A movimentação dos materiais não-discretos é executada através de contêineres e isso implica em um *layout* planejado

das áreas funcionais. A produção é realizada em bateladas limitadas pelo tamanho do equipamento ou por atributos químicos.

A decisão sobre o *layout* adequado para a necessidade de uma empresa pode resultar na redução de custos, através da diminuição das distancias de deslocamento, movimentação de materiais e perdas (OJAGHI *et al.*, 2015).

O subsistema lote rápido, conforme descrito por Dennis e Meredith (2000a), apresenta menos flexibilidade que o processo *job shop*, com sua produção igualmente executada em bateladas (*batches*) múltiplas ou vários lotes, sendo estes considerados *lotes intermitentes*. O ciclo para a realização dos lotes é descrito por Dennis e Meredith (2000a) como aproximadamente de meio dia a dois dias, fator que determina o nome do subsistema de “lote rápido”. Apesar de compartilhar características como organização funcional, equipamento de uso geral e flexibilidade, o subsistema mistura customizada, conforme descrito por Dennis e Meredith (2000a), apresenta dois importantes aspectos de diferenciação, que são: (i) operações de mistura única (operação simples de adição e homogeneização, onde ocorre pouca ou quase nenhuma reação química) e (ii) grande customização devido ao grande número de matéria-prima utilizada, originando o subsistema “mistura customizada”.

Os subsistemas *estoque híbrido* e *híbrido customizado*, conforme descritos por Dennis e Meredith (2000a), apresentam características híbridas de padrão de processos intermitentes e contínuos respectivamente, devido a organização do sistema ser ora funcional e ora por produto onde ambos apresentam certo grau de flexibilidade. O subsistema estoque híbrido recebe esse nome devido a sua baixa variedade de produtos. E o subsistema híbrido customizado recebe esse nome devido ao grau de customização de seus produtos, necessitando assim, de uma grande quantidade de matérias-primas diferentes, apesar de apresentar formulação (composição) simples para os seus produtos.

Os subsistemas contínuo multiestágio e contínuo rígido, conforme descritos por Dennis e Meredith (2000a), são caracterizados como sistemas de transformação contínuos devido à disposição organizada e sequenciada dos equipamentos de acordo com as várias etapas de produção. Isso resulta em poucas rotas de produção e baixa flexibilidade de equipamento (capacidade de processar diferentes tipos de matéria-prima, e conseqüentemente, produzir produtos diferentes). O subsistema contínuo rígido apresenta o menor grau de flexibilidade de equipamento de todos os outros subsistemas. O subsistema contínuo multiestágio apresenta flexibilidade limitada, diferentemente do subsistema contínuo rígido, devido ao maior número de centros de trabalho onde as

matérias-primas são processadas gerando tempos de execução de produto maiores (37 dias). Ele recebe esse nome devido à quantidade de centros de trabalho existentes.

Assim, conforme descrito por Dennis e Meredith (2000a), os subsistemas lote rápido, processo *job shop* e mistura customizada apresentam uma extrema variedade de equipamentos e produtos, caracterizando um sistema de transformação intermitente, que é funcionalmente organizado. Apesar do subsistema contínuo rígido apresentar alguma ou mínima variação de equipamento e produto, sua característica principal é a pouca movimentação de material, pois se trata de um processo contínuo. O subsistema contínuo multiestágio apresenta pouca movimentação de material, pois também é um processo contínuo, mas quase sem variedade de produto e equipamento. Os subsistemas estoque híbrido e híbrido customizado não apresentam características marcantes, pois são híbridos.

O quadro 2.2 apresenta alguns exemplos de indústrias que se encaixam na classificação de subsistemas de transformação da indústria de processo.

Subsistema de transformação	Indústrias
<ul style="list-style-type: none"> • Processo <i>job shop</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Orgânicos especiais, tintas, pigmentos e vernizes;
<ul style="list-style-type: none"> • Mistura customizada 	<ul style="list-style-type: none"> • Produtos químicos especiais de limpeza e manutenção industrial, revestimentos de contêineres, aditivos para alimentação animal, álcool combustível.
<ul style="list-style-type: none"> • Lote rápido 	<ul style="list-style-type: none"> • Tintas, vernizes, seladores, esmaltes, orgânicos especiais, pigmentos, sorvetes, produtos de carne e panificação.
<ul style="list-style-type: none"> • Híbrido customizado 	<ul style="list-style-type: none"> • Embalagens flexíveis.
<ul style="list-style-type: none"> • Estoque híbrido 	<ul style="list-style-type: none"> • Produtos farmacêuticas sólidos (comprimidos), resinas, plásticos e embalagens flexíveis.
<ul style="list-style-type: none"> • Multiestágio contínuo 	<ul style="list-style-type: none"> • Cervejaria e outros processos de fermentação.
<ul style="list-style-type: none"> • Contínuo rígido 	<ul style="list-style-type: none"> • Produtos farmacêuticas líquidos (enxaguante bucal e pomadas), bebidas, leveduras, enzimas, e resinas plásticas

Quadro 2.2 – Exemplos de indústrias segundo a classificação de subsistemas. Fonte: Dennis e Meredith (2000a).

Uma peculiaridade que ocorre no ambiente de manufatura da indústria de processo é a alteração na lista de materiais (*bill of materials* – BOM) devido à variação da qualidade das matérias-primas, preço de matérias-primas alternativas e rendimento do produto (TAYLOR *et al.*, 1981). Na indústria de processo, conforme descrito por Dennis e Meredith (2000a), diferentemente do que ocorre na indústria de manufatura discreta, a abrangência da lista de materiais não é um parâmetro válido para avaliar a complexidade do produto. Essa complexidade é verificada através do controle de múltiplos parâmetros, tais como temperatura e pH, durante as reações químicas.

A maioria das matérias-primas utilizada na indústria de processo vem da mineração e da agricultura, e apresentam uma variação natural de suas características. Taylor *et al.* (1981) cita o exemplo do petróleo de diferentes reservatórios, que podem conter diferentes concentrações de enxofre, naftas, destilados e óleos combustíveis. Essa variabilidade das matérias-primas leva com frequência a um replanejamento da lista de materiais, provocando a necessidade de realizar ajustes no padrão de consumo dos insumos (TAYLOR *et al.*, 1981).

O preço das matérias-primas alternativas também causa variação na lista de materiais. A indústria de ração animal está acostumada a lidar com isso no seu dia-a-dia, pois os seus produtos apresentam especificações mínimas nas quantidades de proteínas, vitaminas, minerais, fibras, gorduras e carboidratos. Essas especificações interferem na proporção utilizada na lista de material devido à disponibilidade e preço das matérias-primas.

Taylor *et al.* (1981) ainda cita a variação no rendimento do produto (*product yield*) como outro fator que contribui para a alteração da lista de materiais. Na indústria de processo, o controle dos processos é um aspecto importante neste ambiente de manufatura, e muitas das vezes, difícil de ser realizado. Taylor *et al.* (1981) cita o exemplo da indústria de resinas de plástico e borrachas sintéticas, que ao programarem a produção de um produto com um determinado grau de qualidade, podem obter no lugar outros produtos com grau de qualidade inferior, apresentando um rendimento de produto inesperado, sendo necessária à repetição da operação.

Outra característica de alguns ambientes de manufatura da indústria de processo é a demanda por produtos intermediários e a produção de co-produtos que podem complicar a gestão dos estoques. Taylor *et al.* (1981), cita o exemplo da indústria siderúrgica que ilustra o caso dos produtos intermediários, pois ela pode produzir chapas, folhas, barras e arames, assim, a demanda determinará se os lingotes serão

transformados em produtos finais ou serão vendidos em sua forma bruta. No caso da gestão de estoque de co-produtos, os autores citam o exemplo da indústria química, onde os co-produtos são produzidos em proporções determinadas por características químicas ou naturais. Esse é o caso da produção da soda caustica e cloro através de processo eletrolítico, em que as proporções são fixadas por uma relação química (estequiométrica) e que não podem ser alteradas através das condições de operação. Assim, para atender uma determinada demanda de soda caustica, obrigatoriamente é produzida uma quantidade de cloro, ou seja, desequilíbrio na demanda por co-produtos pode limitar a produção de um produto ou gerar grandes estoques de outros (TAYLOR *et al.*, 1981).

Fernandes *et al.* (2015) citam o caso de uma indústria de manufatura de alumínio que apresenta um sistema híbrido *make-to-order* (MTO) e *finish-to-order* (FTO), onde alguns produtos de formato comum e básico são produzidos sem ordem de produção para serem armazenados como produtos semiacabados.

Os ramos farmacêutico e alimentício, citados como outro exemplo característico da gestão de estoque na indústria de processo por Taylor *et al.* (1981), produzem produtos finais e utilizam matéria-prima com prazos de validade, que devem ser comercializados e processados antes que seus prazos de validade expirem.

As indústrias de processo empregam processo de fabricação (que, por definição pode ser contínuo ou discreto), mas nem todas utilizam a abordagem de produção de fluxo de processo (*process flow production*), como por exemplo, o *lean manufacturing* (DENNIS e MEREDITH, 2000a). Para uma melhor compreensão, a APICS – *American Production and Inventory Control Society* define processo de fabricação como aquele que agrega valor através de mistura, separação, dando forma e/ou reações químicas por qualquer modo contínuo ou em lote (*batch*). Já a *produção de fluxo de processo* (*process flow production*) é definida como uma abordagem de produção com o mínimo de interrupções no processamento real em qualquer ciclo de produção ou entre ciclos de produção de produtos similares.

De forma similar às indústrias de manufatura discreta, que classificam processos de produção como estacionário, linha de montagem em movimento e produção em massa, os processos de produção da indústria de processo são classificados como batelada (*batch*) ou fluxo contínuo. Essa comparação permite estabelecer uma correspondência conceitual entre fabricação e montagem estacionária com processo por batelada de uma indústria de processos químicos, produção em massa e linha de

montagem em movimento com processo contínuo (TAYLOR, 1979), como apresenta a figura 2.1.

Uma característica do fluxo de material utilizada na classificação adicional da indústria de processo é a diferença entre equipamento dedicado e operação “bloqueada” (operação com *setup* definido e mantido) (*blocked operation*), segundo Taylor (1979). Um equipamento dedicado processará sempre os mesmos materiais transformando-os sempre nos mesmos produtos. Por outro lado, um equipamento que executa operações “bloqueadas”, permite que mudanças sejam feitas nos procedimento de produção ou nos parâmetros de processo para receber diferentes matérias-primas ou produzir produtos diferentes.

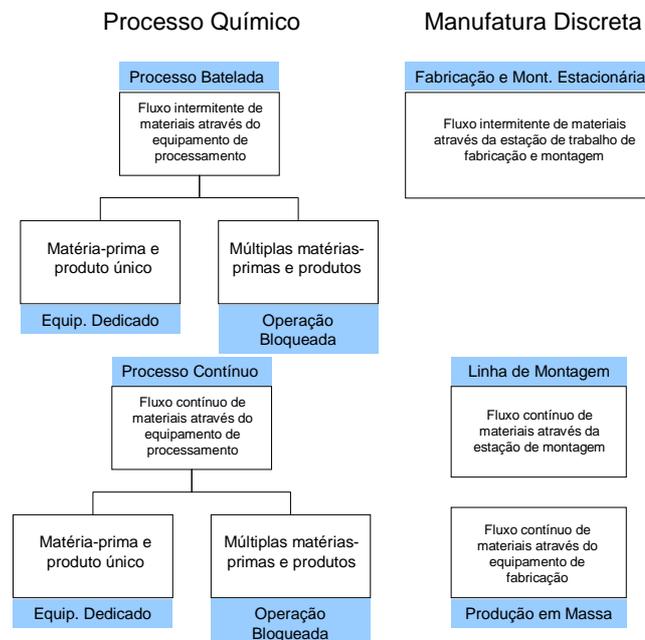


Figura 2.1 – Categorias de *Flow Shop*. Fonte: Taylor (1979).

A diferenciação no mercado pode ocorrer através dos tipos de produtos produzidos. Essa diferenciação pode ser representada através de uma escala que tem em uma extremidade produtos customizados e na outra commodities. De maneira geral, a indústria de processo tem menos diferenciação de produtos quando comparada com a indústria de manufatura discreta, se posicionando mais próxima da extremidade das commodities, tendo como exceção medicamentos e produtos químicos especiais que se aproximam mais da extremidade dos produtos customizados, conforme a figura 2.2.

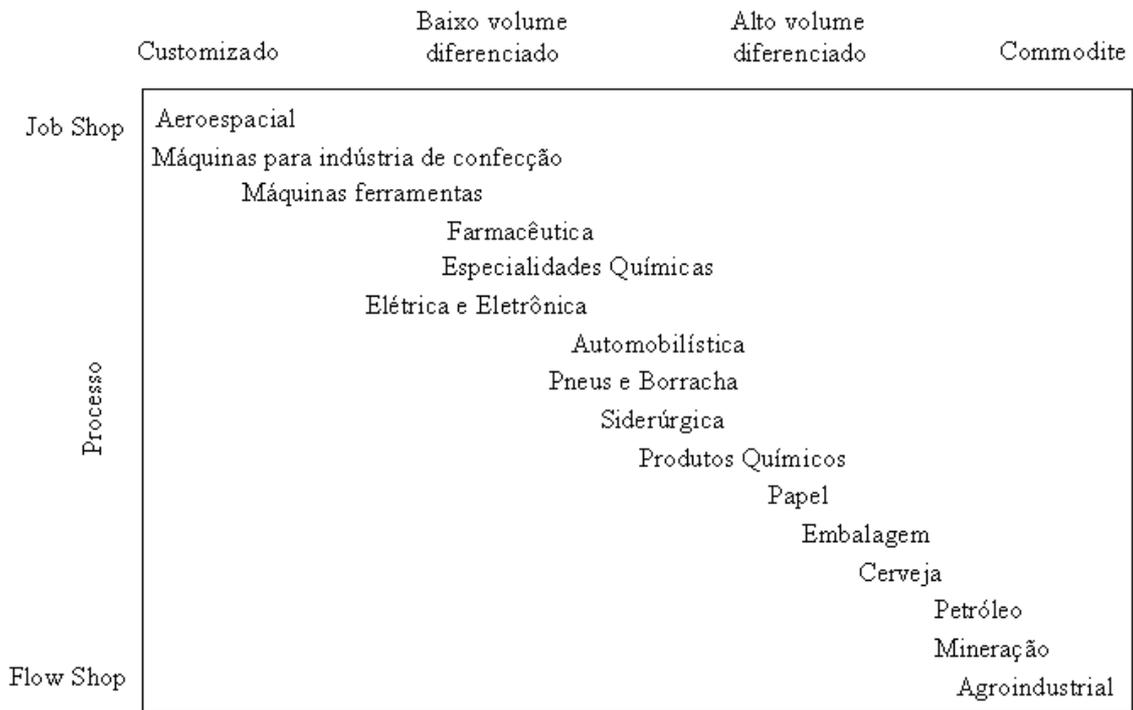


Figura 2.2 – Matriz de produto/processo. Fonte: Taylor *et al.*(1981).

As características do tipo de produto condizem com as características do mercado alvo. O quadro 2.3 apresenta as principais diferenças entre os produtos e mercados customizados e commodities. A ênfase da comercialização de commodities se dá na disponibilidade de produto e preço enquanto a comercialização de produtos customizados se dá nas características dos produtos. Enquanto os produtos customizados são produzidos em um sistema *make-to-order*, as commodities são produzidas em um sistema *make-to-stock*. Produtos customizados são produzidos e vendidos em unidades discretas, onde número de lote ou serial é atribuído a cada pedido de um cliente. Em contra partida, *commodities* são produzidas em escala contínua, sendo que os dados de produção, vendas e estoque são em litros, toneladas, galões, barris ou outra unidade de medida adequada (TAYLOR *et al.*, 1981).

Produtos Customizados	Commodities
<ul style="list-style-type: none"> • Comercialização com ênfase nas características do produto • Muitos produtos • Muitas alterações no design do produto • Demanda do consumidor • Baixo volume de venda • Alto volume unitário • Custo de transporte relativamente baixo • Unidades discretas 	<ul style="list-style-type: none"> • Comercialização com ênfase na disponibilidade e preço do produto • Poucos produtos • Poucas alterações no design do produto • Demanda derivada • Alto volume de venda • Baixo valor unitário • Custo de transporte relativamente • Unidades não-discretas

Quadro 2.3 – Comparação entre produto e mercado. Fonte: Taylor *et al.* (1981).

2.1.2 – O planejamento e controle da produção na indústria de processo

O planejamento e controle da produção exerce papel importante na administração da produção e na gestão das operações. Muitas pesquisas realizadas nesta área são focadas na indústria de manufatura discreta, resultando no desenvolvimento de sistemas de gestão de produção e estoque, taxionomia e estratégias de implementação fortemente focadas nesse segmento (TAYLOR *et al.*, 1981; DENNIS e MEREDITH, 2000b e ASHAYERI *et al.*, 2006).

A indústria de processo, de maneira geral, despertou o interesse da academia no final do século XX (FRANSOO e RUTTEN, 1994; GUNTHER e van BEEK, 2003; TAYLOR, 1979). Apesar do desenvolvimento de muitas técnicas e *softwares* de planejamento e controle da produção oferecer soluções especialmente para a manufatura discreta, aplicações para a indústria de processo surgem tendo que lidar com algumas restrições, e isso se deve, basicamente, por dois motivos: (a) a natureza do processo varia e depende fortemente do tipo de produto produzido; (b) o desenvolvimento de técnicas de sequenciamento (*scheduling*) ou ferramentas como *advanced planning and scheduling* (APS) refletem principalmente o ambiente de manufatura discreta (ASHAYERI *et al.*, 2006).

Segundo a APICS (*American Production and Inventory Control Society*), a indústria de processo agrega valor aos materiais através de mistura e separação, dando forma ou reações químicas, seja através de processo contínuo ou batelada (lotes) exigindo alto investimento de capital e rígido controle do processo. Essa definição apresenta algumas características importantes da manufatura de processo: misturar,

separar, moldar e reagir quimicamente são operações que resultam e lidam com produtos e matérias-primas fisicamente contínuas.

Como citado anteriormente, Taylor *et al.* (1981) apresentam três variáveis que influenciam as atividades do planejamento e controle da produção: variação da qualidade das matérias-primas, preço de matérias-primas alternativas e o rendimento do produto. Segundo Fransoo e Rutten (1994), a estrutura dos produtos produzidos pela indústria de processo também influencia na caracterização de seu planejamento e controle da produção. Geralmente na indústria de processo, utiliza-se poucos tipos de matérias-primas para obter muitos produtos, se compararmos a lista de materiais (*bill of material* – BOM) da indústria de processo com a lista da manufatura discreta. A figura 2.3 apresenta a diferença entre as estruturas de produtos na indústria de processo e a manufatura discreta.

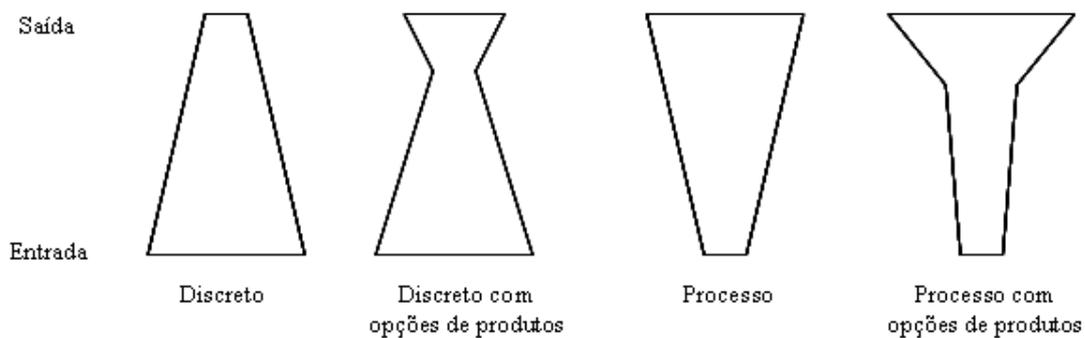


Figura 2.3 – Diferença conceitual entre produtos da indústria de processo e a manufatura discreta. Fonte: Fransoo e Rutten (1994).

Sobre a natureza do processo, diferentemente da tipologia apresentada por Taylor *et al.* (1981) que caracteriza as indústrias através do grau de diferenciação dos produtos e da complexidade do fluxo de material, Fransoo e Rutten (1994) sugerem utilizar, para a indústria de processos, apenas uma dimensão com dois extremos: *job shop*/específico personalizado e *flow shop/commodities*, apresentada na figura 2.4. A caracterização do processo produtivo da indústria, conforme mostrado na figura 2.4, influencia diretamente no sistema de planejamento e controle da produção utilizado.

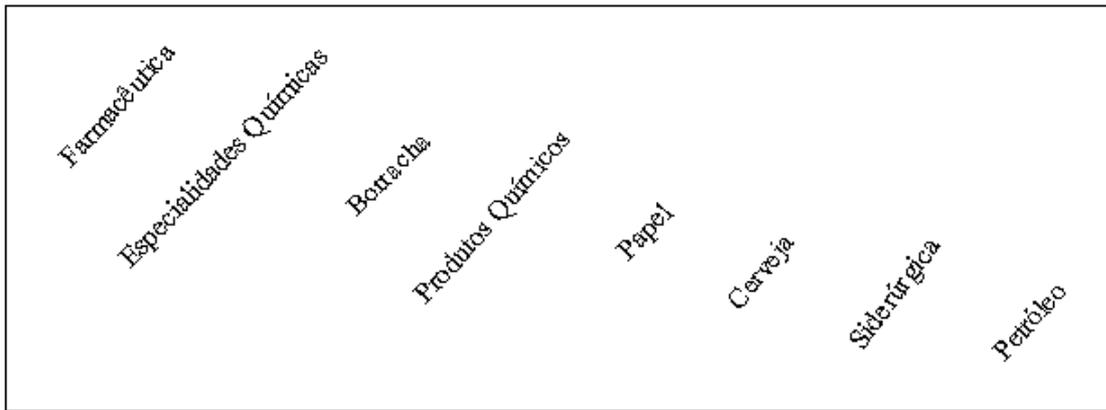


Figura 2.4 – Tipologia para a indústria de processo. Fonte: Fransoo e Rutten (1994).

Pela definição da APICS – *American Production and Inventory Control Society*, batelada/mistura é definido como o processo que sequencia produtos de ciclos curtos de produção. Processo/fluxo é definido como o processo com a mínima interrupção em um ou entre ciclos de produção dos produtos que apresentam características do processo, tais como líquidos, fibras, pós, gases. As características de cada tipo de processo estão discriminadas no quadro 2.4.

Processo contínuo	Processo por batelada
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alta velocidade de produção, pequeno lead time de produção. ▪ Capacidade determinada, baixa flexibilidade, uma rota para todos os produtos. ▪ Baixa complexidade do produto ▪ Baixo valor agregado ▪ Tempos de parada causam grande impacto ▪ Pequeno número de etapas de produção ▪ Numero limitado de produtos 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Grande lead time, muito trabalho humano no processo ▪ Capacidade não facilmente determinada, diferentes configurações, Rotas complexas. ▪ Produtos mais complexos ▪ Alto valor agregado ▪ Tempos de parada causam menor impacto ▪ Grande número de etapas de produção ▪ Grande número de produtos

Quadro 2.4 – Características do processo contínuo vs processo em batelada. Fonte: Fransoo e Rutten (1994).

Devido à característica de capital intensivo, o planejamento de longo prazo na indústria de processo - mais especificamente o planejamento de recursos - recebe uma

atenção especial, pois impacta diretamente no resultado financeiro da empresa, especialmente as decisões sobre instalações (máquinas e equipamentos).

Para Taylor *et al.* (1981), duas decisões de longo prazo são importantes: capacidade instalada e localização. Na indústria de processo, especialmente de processo contínuo, essas duas variáveis ganham outra dimensão, conforme o *trade-off* de volume/variedade pende mais para o volume, e sendo assim, os equipamentos são projetados para uma capacidade específica.

O planejamento de médio prazo diz respeito ao desenvolvimento de planos para a utilização dos recursos. Taylor *et al.* (1981) descreve os itens abordados no planejamento da produção na indústria de processo como:

- decisões de fornecimento – são as decisões sobre a localização de depósitos e fornecedores que influenciam no custo logístico dos produtos.
- sequenciamento dos produtos através das instalações – na indústria de processo a sequência é estabelecida por produto ou tecnologia de processo, onde os produtos são produzidos em um ciclo regular. Assim, determinar a sequência de produção e o tamanho do ciclo é muito importante.
- otimizar misturas de produtos – garantir que os produtos atendam as especificações com o mínimo custo de mistura.
- determinar o estoque de segurança – a necessidade de se proteger contra variações na demanda dos produtos faz com que a indústria de processo aumente os seus estoques e isso consome grande quantidade de capital.
- coordenar os planos de produção e manutenção – Devido a necessidade de diluir os custos de operação, o capital investido, e as exigências de processo, as indústrias de processo tendem a operar em três turnos sete dias da semana, dificultando qualquer parada para manutenção preventiva ou preditiva.
- fechamento temporário da planta - Duas opções quando a demanda é menor que a capacidade: (a) adequar o ritmo da produção a demanda, ou (b) produzir para estoque e “desligar” a planta periodicamente para reduzir estoque.
- acordos de intercambio ou troca – São muito comuns entre concorrentes, em empresas de petróleo, commodities químicas e metais, objetivando a redução dos custos logísticos, por exemplo.
- determinar a necessidade de material – Para algumas matérias-primas importantes, o planejamento de material é feito diretamente do planejamento da produção. Uma vez definido qual a taxa de produção necessária para atender a

demanda, é calculada a quantidade de matéria-prima consumida durante a produção.

- desenvolver o planejamento agregado da produção – Na indústria de processo, a capacidade do gargalo define a capacidade da linha, que atende mais a volume que variedade. Assim é menos complicado considerar a demanda agregada e a capacidade agregada para efetuar o planejamento agregado da produção, se compararmos com um ambiente *job shop* da manufatura discreta.

O planejamento de curto prazo contempla a programação da produção (*scheduling*). Taylor *et al.* (1981) ressaltam a comparação dos métodos utilizados no programa mestre de produção (*master production scheduling* - MPS) na indústria de processo e a manufatura discreta. A abordagem utilizada na manufatura discreta é chamada de programa mestre de produção orientado para material, onde os materiais são programados primeiro e em seguida a capacidade é verificada. Esta é a abordagem utilizada no sistema MRP de *loop* fechado. Enquanto na indústria de processo, a abordagem utilizada é chamada de programa mestre de produção orientado para capacidade, pois tende a programar primeiro a capacidade e em seguida os materiais e isso se justifica, pois na indústria de processo a utilização de equipamento é importante.

O programa mestre de produção se destaca na indústria de processo pela sua característica em avaliar a capacidade quando confrontada com uma variação na demanda, onde ocorre a integração com outras ferramentas, que muitas vezes são desenvolvidas para uma necessidade exclusiva (desenvolvimento “*in house*”), permitindo a revisão do *mix* de produção (NOVITSKY, 1984).

Na indústria de processo, o programa mestre de produção tende a ser mais influenciado pelos planos de produção, previsão de demanda de curto prazo, e planos de necessidade de distribuição, do que por pedidos dos clientes, que interferem muito pouco, pois frequentemente é protegido por estoques de produtos acabados (TAYLOR *et al.*, 1981). O tamanho de lote pode ser determinado pelo tamanho dos equipamentos ou pelas práticas de manufatura para garantir a qualidade do produto, e é uma ferramenta importante para o desenvolvimento do planejamento e programação da produção. De maneira geral, as características da indústria de processo, como poucos produtos, capacidade definida, e rotas fixas, facilitam a programação da produção (TAYLOR *et al.*, 1981).

Na indústria de processo alguns elementos do planejamento e programação apresentam as seguintes características abaixo, que estruturalmente resultam em problemas de alocação e sequenciamento (KALLRATH, 2002):

- equipamentos multiuso;
- custo de limpeza e tempo de *setup* dependentes do sequenciamento;
- fluxo cíclico de materiais convergente e divergente;
- multiestágio, lotes e produção utilizando os mesmos intermediários;
- fluxo de multicomponentes e mistura não linear;
- armazenamento intermediário finito em tanques dedicados.

Segundo Schnelle e Bassett (2006), o nível de complexidade dos problemas envolvendo o planejamento e a programação resulta em uma vasta variedade de abordagens, que podem incluir: (i) solução manual, (ii) gráfico de Gantt interativo, (iii) simulação, (iv) otimização heurística e (v) otimização rigorosa. A figura 2.5 apresenta a hierarquia proposta pelos autores para essas abordagens.

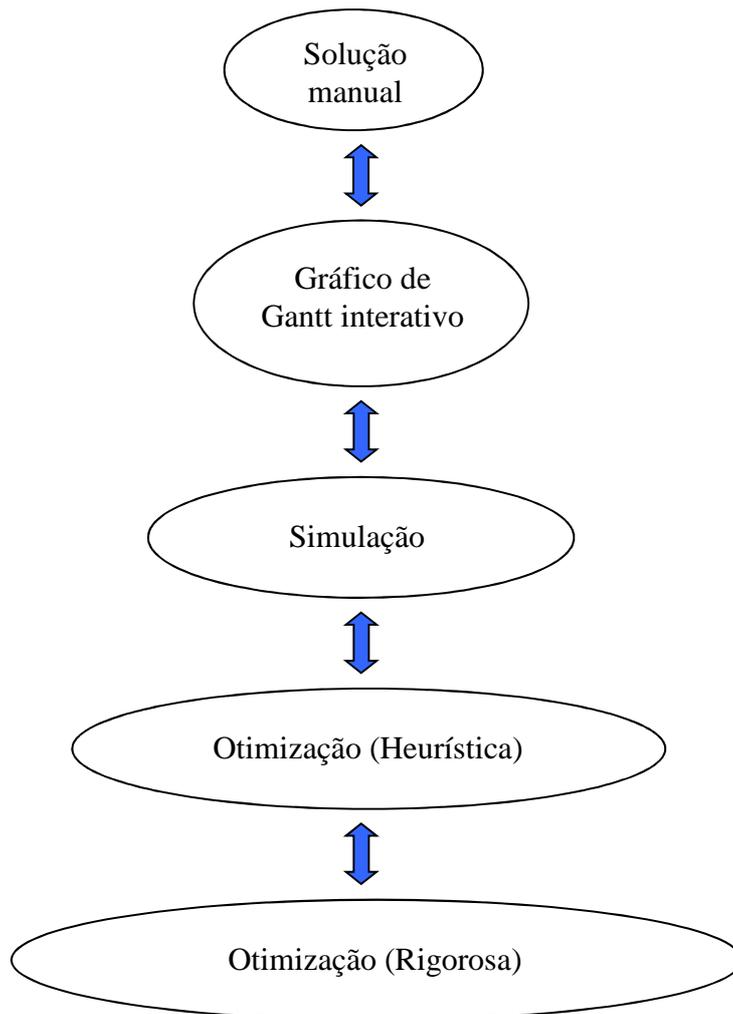


Figura 2.5 – Hierarquia de abordagem de solução. Fonte: Schnelle e Bassett (2006).

Nesse contexto, conforme Schnelle e Bassett (2006), a simulação e a otimização podem ser utilizadas nas áreas de planejamento e programação. A simulação de processos batelada (*batch*) ou descontínuos geralmente é baseada em técnicas de simulação de eventos discretos. No caso de simulação de eventos discretos, conforme descrito por Schnelle e Bassett (2006), primeiro são representados todos os equipamentos e máquinas (recursos transformadores do sistema), assim como todas as tarefas de processamento (entidades). Em seguida, o fluxo das bateladas (*batches*) é simulado através da planta fabril. Dessa maneira, a métrica de performance a ser observada é o número de bateladas (*batches*) por horizonte de tempo ou o tempo para completar uma campanha de múltiplas bateladas (*batches*) de múltiplos produtos. A necessidade de determinar qual tarefa será executada por qual equipamento, assim como a ordem e o número de bateladas (*batches*) e se mais de um produto está sendo produzido, é uma desvantagem, pois o processo de programação passa a ser exclusivamente por análise de cenários. Porém, parâmetros que contêm incertezas, como tempo de processamento, assim como disponibilidade de capacidade e recursos, podem ser considerados durante a construção do modelo. O mesmo acontece para condições de operação dinâmica (uma porcentagem da produção é rejeitada devido a problemas de qualidade).

Técnicas de otimização, por outro lado, são utilizadas para encontrar a melhor programação viável. Conforme descrito por Schnelle e Bassett (2006), em se tratando de uma abordagem de otimização, o primeiro passo é definir um conjunto de variáveis de decisão, as restrições do problema e variáveis de entrada (parâmetros). O segundo passo é elaborar uma função objetivo que represente as necessidades do tomador de decisão do processo fabril.

Segundo Schnelle e Bassett (2006), quando o grau de incerteza do processo é alto, a simulação computacional é uma técnica recomendada para avaliar o sistema produtivo, principalmente se essa análise pode ser realizada depois de um algoritmo de otimização estabelecer a programação inicial. Existem vários tipos básicos de modelos de otimização, entre eles: técnicas heurísticas e modelos de programação matemática.

A programação matemática, conforme descrito por Schnelle e Bassett (2006), tem sido muito utilizada no campo da pesquisa operacional nas áreas de planejamento e programação da produção, tanto na indústria de processo quanto na manufatura discreta. A programação não-linear inteira mista (MINLP - *mixed integer nonlinear*

programming) é utilizada para solucionar a maioria dos problemas de programação de processos contínuos ou batelada (*batch*). Apesar disso, para muitos problemas de programação de bateladas (*batch*), a função objetivo e as restrições podem ser reformuladas e a solução encontrada através da programação linear inteira mista (MIP - *mixed integer programming*), apresentando como vantagem a robustez dos programas (*solvers*) disponíveis e o menor tempo de solução dos problemas.

Algumas ferramentas permitem a definição de equações de programação matemática usando linguagens de alto nível, como por exemplo: GAMS (GAMS Development Corp.), OPL Studio (ILOG, Inc.) e Xpress-Mose (Dash Optimization). Vários *solvers* também são disponíveis no mercado como: CPLEX (ILOG, Inc.) e Xpress-MP (Dash Optimization), para solução de MILP, enquanto MINOS (Stanford Business Software, Inc.) e CONOPT (ARKI Consulting & Development A/S) podem ser utilizados em NLP (non-linear programming) (SCHNELLE e BASSETT, 2006).

Podemos citar alguns autores que apresentam problemas de planejamento e programação encontrados na lista de Kallrath (2002) em diversos segmentos que compõe a indústria de processo:

- Neumann *et al.* (2002) abordam o problema da programação da produção dentro do APS (*Advanced Planning System*) em um sistema produtivo por batelada na indústria de processo (indústria química e ou farmacêutica). O problema de programação da produção é decomposto em um problema de lotes, e formulado como MINLP (*mixed integer nonlinear programming*) e em seguida transformado em *linear mixed-binary programming*, possibilitando uma programação da produção viável com mínimo *makespan*.
- Toso e Morabito (2005) abordam o problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes dentro da programação da produção em um sistema de produção por batelada em uma indústria de ração animal com o objetivo de atender a demanda sem atrasos e otimizando a utilização dos recursos disponíveis. O problema é modelado em MILP (*mixed integer linear programming*) e resolvido através da linguagem de modelagem GAMS/CPLEX.
- Belaid *et al.* (2012) abordam o problema de programação de lotes para serem armazenados com o objetivo de minimizar o tempo total de *setup* e reduzir o atraso em um sistema de produção *flowshop* em uma indústria de cosméticos (shampoo). O problema é modelado e comparado entre três heurísticas: *greedy*,

híbrida entre otimização por colônia de formiga e *simulated annealing* e uma heurística dedicada.

- Parthanadee e Buddhakulsomsiri (2010) abordam o problema de programação da produção na indústria alimentícia (frutas enlatadas) em um ambiente com setup dependente, com o objetivo de propor a utilização de um método de programação em tempo real baseado em regras de despacho.
- Nakhla (1995) aborda o problema da necessidade de flexibilidade na programação da produção com a utilização de regras de despacho em um ambiente com máquinas compartilhadas, número crescente de produtos acabados e um intenso fluxo de material na indústria alimentícia (produtos lácteos).
- Munhoz e Morabito (2014) abordam o problema do planejamento agregado da produção de uma empresa de suco de laranja concentrado, com múltiplos produtos, estágios e períodos. O objetivo do estudo é obter o planejamento tático otimizado da produção, e conseqüentemente, apoio ao processo de tomada de decisão, através de um modelo de programação linear e técnicas de otimização robusta considerando o planejamento da colheita e o processo de mistura de diferentes tipos de sucos para atender as especificações dos produtos finais.
- Baldo *et al.* (2014) abordam o problema de dimensionamento e sequenciamento de lote na indústria cervejeira, onde o objetivo é sincronizar o processo de fabricação com longo lead time (fermentação) com o processo de envase para que os produtos permaneçam o mínimo tempo possível nos tanques de armazenamento. Um modelo é formulado em MIP (*mixed integer programming*) e resultados foram obtidos através do desenvolvimento de uma heurística baseada em MIP.
- Sel e Bilgen (2014) abordam o problema de planejamento da produção e distribuição em uma indústria de refrigerante, envolvendo a alocação da produção entre diferentes linhas e unidades fabris e a entrega de produtos para centros de distribuição. Um modelo do problema é desenvolvido em MILP (*mixed integer linear programming*), e uma abordagem híbrida (simulação e MIP (*mixed integer programming*)) é utilizada como método de solução. Casos com capacidade de produção limitada e alta demanda por produtos fracionados

demonstram a aplicabilidade da abordagem híbrida em solucionar casos reais dentro de um período de tempo razoável.

- Kopanos *et al.* (2010) abordam o problema de dimensionamento e sequenciamento de lote em linhas de envase multiprodutos em paralelo em uma fábrica de iogurte, onde o cenário apresenta restrição de tempo (pasteurização, homogeneização e fermentação) e de capacidade e *setup* dependente. O objetivo é suportar o processo de tomada de decisão no planejamento de curto prazo através de um modelo MILP (*mixed integer linear programming*) que utiliza uma representação de tempo mixta contínua/discreta.
- Chen *et al.* (2010) abordam o problema da integração do tamanho de lote com a programação da produção (regras de despacho) no processo de tomada de decisão no planejamento operacional e controle do chão de fábrica (SFC – *shop floor control*) em uma fábrica de biscoitos wafer, com o objetivo de minimizar a variabilidade dos produtos acabados. A proposta de modelo de tamanho de lote é chamado de planejamento dinâmico de liberação de lote (DynaLRP – *dynamic lot release planning*) e o modelo de regra de despacho proposto é chamado de primeiro a maior quota remanescente (LRQ – *Largest Remaining Quota First*).
- Soman *et al.* (2007) – abordam o problema de programação de lotes dentro de um sistema de planejamento e controle da produção de uma empresa de processamento de alimentos, com 230 produtos em uma única linha com capacidade limitada, que utiliza um sistema de produção mixto MTO (*make-to-order*) e MTS (*make-to-stock*). O objetivo é propor uma heurística para o problema de curto prazo de programação de lotes MTO-MTS e testar o *framework* de planejamento hierárquico sugerido por Soman *et al.* (2004).
- Heuts *et al.* (1992) – comparam a performance de duas heurísticas de dimensionamento e sequenciamento de lote em uma indústria de processos químicos caracterizada por uma única máquina gargalo, tamanho fixo das bateladas, tempo de seqüência de *setup* dependente e restrições de produção e armazenagem. A performance é avaliada através do custo total do plano de produção em um horizonte de planejamento parcialmente congelado.
- Dessouky *et al.* (1993) – abordam o problema de processamento de lotes nas indústrias de processo contínuo, através da proposta de um algoritmo de programação flexível (BPSA – *Batch Process scheduling Algorithm*), baseado

na construção orientada a objeto para programar processos em lote, integrado com um modelo de simulação estático da planta fabril.

Taylor e Bolander (1991) desenvolveram uma abordagem para tomada de decisões focada na indústria de processo, e que também pode ser aplicada na indústrias de manufatura repetitiva, no que diz respeito a programação da produção, denominada de *process flow scheduling* (FPS) baseada em três princípios:

1. os cálculos da programação são baseados na estrutura do processo.
2. estágios únicos (etapas do processo) são programados utilizando a abordagem de programação dominada por processador (PDS – *Processor Dominated Scheduling*) ou programação dominada por material (MDS – *Material Dominated Scheduling*).
3. linhas de processo são programadas utilizando programação de fluxo reverso, programação de fluxo direto ou programação de fluxo misto.

O primeiro princípio, segundo Taylor e Bolander (1991), é o conceito dominante em todos os sistemas PFS, pois determina a terminologia utilizada que define estrutura de processo. Esta estrutura é basicamente composta por unidades de processamento, estágios de processamento e linhas de processo. As unidades de processamento são responsáveis por executar atividades básicas de manufatura, tais como reações químicas, misturas ou envase. Quando combinadas em estágios e separadas por estoques possibilitam que sejam administradas independentemente, quando não são separadas por estoques possibilitam que sejam agrupadas, permitindo que o estágio seja administrado como uma máquina simples. Os estágios são organizados em linhas de processo, que são uma série sequencial fixa de estágios de processo no qual uma família de produtos é produzida. Nenhum material é transferido de uma linha para outra, apesar de utilizarem a mesma matéria prima e produzirem os mesmo produtos.

O segundo princípio, segundo Taylor e Bolander (1991), apresenta alternativas para a programação de estágio único. Quando uma unidade de processamento é programada antes dos materiais temos uma programação de capacidade finita denominada de programação dominada por processador (PDS – *Processor Dominated Scheduling*), e somente depois os estoques de materiais são avaliados. Quando ocorre o contrário, ou seja, a programação dos materiais ocorre primeiro que a programação da capacidade temos a programação denominada de programação dominada por material (MDS – *Material Dominated Scheduling*).

A escolha da abordagem a ser utilizada vai depender exclusivamente do ambiente de programação encontrado na empresa. Mas em geral, o PDS pode ser utilizado quando o custo de instalação é elevado, o estágio se comporta como um recurso gargalo ou os custos de *setup* são onerosos. De maneira inversa, o MDS pode ser utilizado quando as matérias primas são caras, há excesso de capacidade ou os custos de *setup* são irrisórios (TAYLOR e BOLANDER, 1991). A aplicação da abordagem da programação PDS pode ser visualizada em Taylor e Bolander (1990) e Bolander e Taylor (1990), enquanto a utilização da programação MDS também pode ser visualizada em Bolander e Taylor (1990).

O terceiro princípio, segundo Taylor e Bolander (1991), trata das alternativas de programação das linhas de processo, que podem ser programação de fluxo reverso, programação de fluxo direto e programação de fluxo misto. A programação de fluxo reverso consiste em elaborar uma programação de trás para frente em relação à estrutura do processo e em contra fluxo ao fluxo natural dos materiais partindo do produto acabado em direção da matéria prima, adicionando um estágio de cada vez, e permite a utilização de ambas as abordagens PDS e DMS, ou uma combinação das duas. Para maiores detalhes sobre a programação de fluxo reverso ver Taylor e Bolander (1991) e sua aplicação em Taylor e Bolander (1990). A programação de fluxo direto consiste em elaborar uma programação que segue o fluxo natural dos materiais através da estrutura do processo, adicionando um estágio de cada vez, permitindo, também, a utilização da abordagem PDS e MDS, ou uma combinação das duas. Para maiores detalhes sobre a programação de fluxo direto ver Taylor e Bolander (1991) e sua aplicação em Taylor e Bolander (1990). A programação de fluxo misto consiste em uma combinação das duas técnicas anteriores. Maiores detalhes podem ser observados em Taylor e Bolander (1991) e sua aplicação em Bolander e Taylor (1990).

Os benefícios de utilizar o sistema de programação PFS, além dos benefícios comuns a qualquer outro sistema de programação, incluem o desenvolvimento eficiente de uma programação mais efetiva e o ganho de eficiência em desenvolver e distribuir a programação mais rápido, medido através de várias combinações de aumento da taxa de produção, menores custos de operação, estoques menores e melhor atendimento dos clientes (TAYLOR e BOLANDER, 1997).

A lógica da programação PFS difere muito da lógica utilizada no sistema MRP (Material Requirements Planning) que utiliza a estrutura do produto para efetivar os

cálculos da programação, enquanto a lógica PFS utiliza a estrutura do processo (TAYLOR e BOLANDER, 1993).

Uma vez que o sistema MRP II (*Manufacturing Resource Planning*) é mais indicado para ambientes *job shop*, e não atende por completo, sem customização, as necessidades de empresas onde o ambiente de manufatura é *flow shop*, o sistema PFS apresenta uma estrutura mais adequada para atender a indústria de processo, principalmente nos módulos de planejamento e programação (BOLANDER e TAYLOR, 1993), pois sua estrutura consiste em divisões, plantas, linhas de processo, estágios de processo e unidades de processo, como mostrado na figura 2.6.

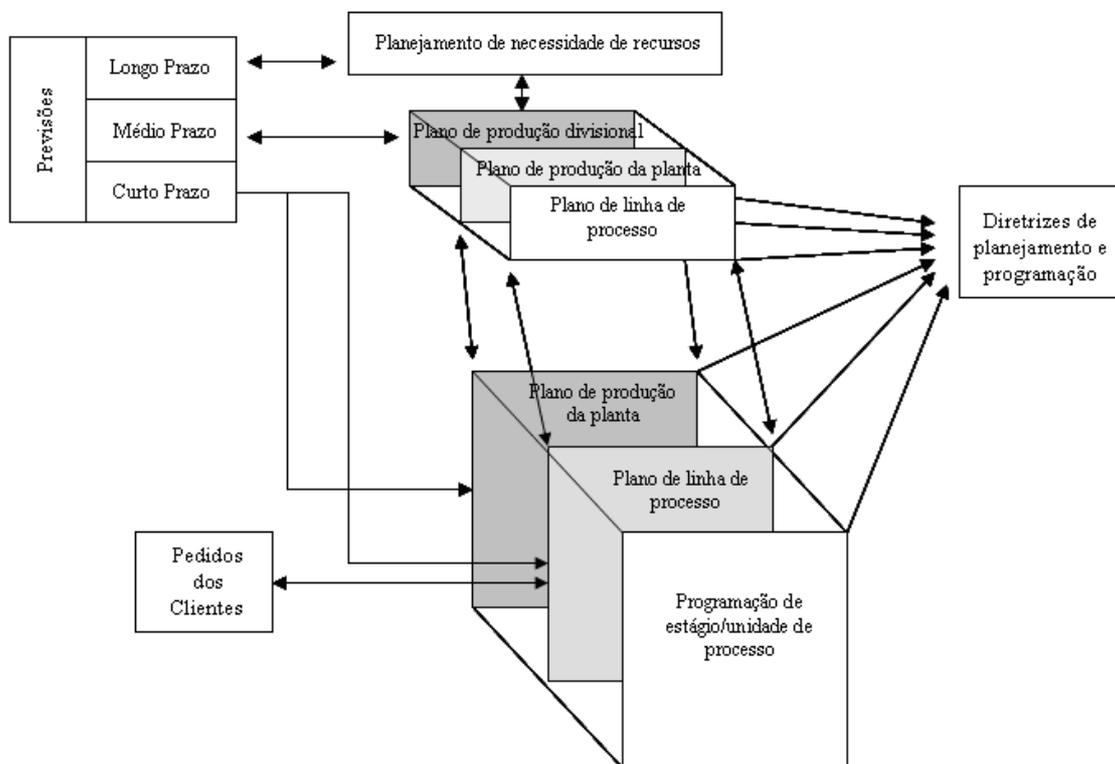


Figura 2.6 – Estrutura do sistema PFS da indústria de processo. Fonte: Bolander e Taylor (1993).

Algumas diferenças destacam a estrutura do PFS em relação a estrutura do MRP II. A primeira aponta para o processo de desagregação, que no PFS ocorre por estrutura de processo (divisões, plantas, linhas de processo, estágios de processo e unidades de processo), enquanto que no MRP II ocorre por estrutura de produto (famílias de produtos, montagem final, sub-montagens e partes). A segunda diferença aponta para o planejamento de produção divisional, que no PFS apresenta uma dimensão diferente em

relação ao MRP II, pois muitas indústrias de processo operam em ambientes de multi-plantas fabris e multi-depósitos, necessitando que alocações sejam feitas entre as instalações, e isso exige alto nível de análise de custo, capacidade de qualidade, taxas de produtividade, e capacidade de cada instalação. Assim, quando se trata especificamente de material e capacidade, a estrutura do PFS aborda com mais alto nível e mais detalhes em relação a estrutura do MRP II. Esse nível de detalhamento se torna possível devido a necessidade e a existência de poucos produtos finais (BOLANDER e TAYLOR, 1993 e TAYLOR e BOLANDER, 1995).

No nível de fábrica, o planejamento e a programação apresentam características diferentes quando se utiliza a estrutura de processo do sistema PFS como ponto de partida para realizar os cálculos, ao invés da estrutura de produto utilizada no sistema MRP II. Assim, planejamento de linhas, estágios e unidades de processo substituem programação mestre, planejamento de material, planejamento da capacidade, controle de material e controle da capacidade (BOLANDER e TAYLOR, 1993). A capacidade de empregar tanto a abordagem de programação PDS, quanto DMS, confere maior flexibilidade quando comparado ao sistema MRP II (TAYLOR e BOLANDER, 1995).

Bolander e Taylor (1993) apresentam os aspectos que diferenciam a programação em um ambiente PFS:

- processadores (capacidade) podem ser programados antes dos materiais, materiais antes dos processadores, ou ambos podem ser programados simultaneamente.
- capacidade e material são geralmente reconciliados em cada estágio antes que o próximo estágio seja programado.
- a programação pode iniciar em qualquer ponto na estrutura do processo.
- pouco tempo de folga na programação.
- *lead time* é baseado no tempo de processo e não abrange tempo de fila.
- ordens de serviços não são necessárias. A programação é a autoridade para a produção.
- pedidos dos clientes são frequentemente programados em um processo específico.

Em contra partida, autores como Nelson (1983), Covey (1984), Wijngaard e Zijlstra (1992) e Schuster e Allen (1997) defendem a implantação e aplicação do sistema MRP na indústria de processo, apesar de ter sido desenvolvido originalmente para a manufatura discreta e ambiente *job shop*. As diferenças encontradas nas

exigências funcionais da indústria de processo e a existência de sistemas informais podem contribuir para que o processo de implementação do sistema MRP não obtenha sucesso (COVEY, 1984).

Existem alguns pontos em que o sistema MRP não atende as necessidades da indústria de processo, Covey (1984) apresenta os quatro principais para que haja sucesso na implementação:

- controle de lote – o sistema MRP deve ser capaz de lidar com status individual de cada lote e localização individual no estoque. Em muitos casos os lotes apresentam prazo de validade, necessidade de quarentena e possibilidade de rejeição, e isso deve ser considerado na lógica do sistema.
- precisão decimal – a indústria de processo utiliza várias unidades de medidas em diferentes pontos de sua cadeia produtiva (compras, produção e vendas) para um mesmo item, e isso pode dificultar o controle de estoque, tanto de matéria prima quanto de produto acabado.
- controle por bateladas – em ambientes de processo é normal o planejamento e a programação da produção lidar com bateladas e quantidades por *batch*, ao invés de quantidades por unidade como ocorre no sistema MRP.
- capacidade dos equipamentos – na indústria de processo é muito comum encontrarmos tanques, silos ou reatores de processo ou de armazenamento, que se não forem considerados corretamente podem distorcer o planejamento da capacidade (*rough cut capacity planning*) e a programação, pois todos os cálculos de tempo de operação ocorrerão em função da capacidade dos tanques, silos ou reatores (toneladas ou kilos por horas ou minutos), considerados como estações de trabalho.

Embora alguns aspectos funcionais do sistema MRP devam ser customizados para atender as necessidades da indústria de processo, Covey (1984) faz duas considerações sobre o sistema que podem contribuir para o planejamento e controle da produção na indústria de processo. A primeira é sobre o ciclo de planejamento que nas indústrias de processo geralmente é estático, e uma vez feito o planejamento, o fluxo de informação (*feedback*) para realimentar o sistema é mínimo resultando em um horizonte de programação de 3 a 4 meses, onde recai sobre a administração do chão de fábrica a solução de problemas envolvendo programação e materiais. O sistema MRP pode contribuir eliminando essa falta de flexibilidade no programa mestre de produção (*master production schedule*) (COVEY, 1984). A segunda é sobre em que nível da lista

de matérias (*bill of materials* – BOM) o programa mestre de produção deve ser realizado, no nível de produto acabado ou ao nível granel. Na maioria da indústria de processo o componente de programação crítico costuma ser material a granel, e neste caso o programa mestre de produção deve ser feito neste nível e o sistema MRP deverá tratar a empresa como se fosse um ambiente *assembly-to-stock* (COVEY, 1984).

Embora Taylor (TAYLOR, 1979 e TAYLOR *et al.*, 1981) tenha contribuído para uma melhor compreensão da indústria de processo, o tema ainda necessita ser explorado. O trabalho de Fransso e Rutten (1994) busca distinguir dois tipos diferentes de indústria de processo através de uma lista de características básicas entre o processo contínuo e processo por batelada, posicionando os vários tipos de indústria de processo entre estes dois extremos, e conseqüentemente, como isso influencia o processo de planejamento e controle da produção. Esse trabalho é complementado com a contribuição de Dennis e Meredith (2000a, 2000b), que estabelece uma taxonomia dos processos de manufatura dentro da indústria de processo, e as diferenças encontradas nos sistemas de gestão de produção e estoque (*Production and Inventory Management – P&IM*), através de uma lista com as características de cada tipo encontrado.

Assim podemos entender que primeiro foi necessário identificar as características da indústria de processo em comparação com a indústria de manufatura discreta. Em seguida fazer uma distinção dentro da própria indústria de processo e estabelecer uma taxonomia, para depois ser possível identificar as características dos diferentes tipos de sistemas de gestão da produção e estoque.

Neste último trabalho, Dennis e Meredith (2000b) realizam uma análise de *cluster* em um grupo de 19 empresas diferentes, onde são identificadas quatro dimensões críticas representadas por sete variáveis que contribuem para a observação e identificação de, pelo menos, quatro sistemas de gestão da produção e estoque.

As características que diferenciam sistemas de gestão e estoque necessitam ser identificadas para que uma comparação possa ser realizada entre esses sistemas. Assim muitos sistemas de gestão da produção e estoque podem ser diferenciados através da abordagem que fazem sobre material e capacidade, ou seja, os sistemas podem ser classificados em função dos recursos a serem administrados: materiais, capacidade ou uma combinação de ambos (HAX e CANDEA, 1984 e FERNANDES e GODINHO FILHO, 2010).

Sendo assim, Dennis e Meredith (2000b) apresentam as quatro dimensões consideradas para caracterizar os sistemas de gestão da produção e estoque, que são: (i)

planejamento da necessidade de recurso (*planning resource requirement*), tanto de material quanto de capacidade, (ii) rastreamento de consumo de recurso, (iii) controle de material em processo (WIP) e (iv) grau de informatização. Essas quatro dimensões são representadas através de sete variáveis que auxiliam a realizar o contraste e a análise das indústrias de processo:

- *MAT-REQUIREMENTS* – o nível de detalhe e frequência utilizado para gerar a necessidade de material;
- *CAP-REQUIREMENTS* – o nível de detalhe e frequência utilizado para gerar a necessidade de capacidade;
- *MAT-CUNSUMPTION* – o nível de detalhe e frequência utilizado para rastrear o consumo de material;
- *CAP-CONSUMPTION* – o nível de detalhe e frequência utilizado para rastrear o consumo da capacidade;
- *WIP-CONTROL* – o controle de material em processo;
- *MAT-COMPUTERIZATION* – o percentual de informatização utilizado para planejar e controlar os materiais;
- *CAP-COMPUTERIZATION* – o percentual de informatização utilizado para planejar e controlar a capacidade.

Através da análise dessas sete variáveis que representam as quatro dimensões consideradas para caracterizar os sistemas de gestão da produção e estoque, através de uma análise de *cluster*, Dennis e Meredith (2000b) obtém a definição de quatro tipos de sistemas de gestão da produção e estoque das indústrias de processos observadas, que são: (i) simples, (ii) comum, (iii) material em processo controlado e (iv) informatizado.

O sistema de gestão da produção e estoque observado no *cluster* 1, conforme descrito por Dennis e Meredith (2000b), é denominado comum. Nele as variáveis referentes ao planejamento e controle (*MAT-REQUIREMENTS*, *CAP-REQUIREMENTS*, *MAT-CUNSUMPTION* e *CAP-CONSUMPTION*) revelam que este é o segundo *cluster* em relação ao nível de detalhe de planejamento da necessidade de material e capacidade e acompanhamento do consumo de material e capacidade. As principais características observadas em relação a essas quatro variáveis são: (a) um método de reposicionamento de pedido com intervalo fixo (*fixed interval reorder point methods*) é utilizado para gerar o planejamento da necessidade de matéria-prima com atualização diária, (b) o acompanhamento do consumo de material é feito através do histórico de consumo padrão com ajustes periódicos, (c) o planejamento da necessidade

de capacidade é gerado através da técnica de planejamento da capacidade denominada de CPOF (*Capacity Planning using Overall Factors*) e (d) as horas trabalhadas e ou de máquinas são rastreadas para cada produto. A variável *WIP-CONTROL* sugere que o material em processo é rastreado por observação física e complementado com anotações dos turnos. E as variáveis *MAT-COMPUTERIZATION* e *CAP-COMPUTERIZATION* indicam que menos da metade do controle de material e capacidade é informatizado. As empresas classificadas no *cluster 1* são: pigmentos e vernizes, revestimentos (*coatings*), química fina (compostos orgânicos), leveduras e enzimas, embutidos e tintas.

O sistema de gestão da produção e estoque observado no *cluster 2*, conforme descrito por Dennis e Meredith (2000b), é denominado material em processo controlado. Nele as variáveis referentes ao planejamento e controle indicam as seguintes características: (a) o planejamento da necessidade de matéria-prima é gerado pelo uso de um sistema de reposicionamento de pedido com intervalo fixo, com limites de nível de estoque máximo e mínimo, com atualização entre semanal e diária (menos frequente que o *cluster 1*), (b) o consumo de matéria-prima é rastreado através de inventários físicos e histórico de consumo, no início de produção de cada lote (*batch*), (c) o planejamento da necessidade de capacidade é gerado entre o carregamento infinito informal e a utilização do CPOF, e (d) o rastreamento do consumo da capacidade fica entre zero (sem acompanhamento) e o acompanhamento de algumas horas padrão de trabalho. A variável *WIP-CONTROL* apresenta a média mais alta entre os quatro *clusters*, indicando que o início de cada lote (*batch*) é rastreado através dos equipamentos de processo. E as variáveis *MAT-COMPUTERIZATION* e *CAP-COMPUTERIZATION* indicam que o controle de material é um pouco mais da metade informatizado e que o controle de capacidade é um pouco menos da metade informatizado. As empresas classificadas no *cluster 2* são: embalagens flexíveis (extrusadas e prensadas), cervejeiras e produtos químicos para limpeza e manutenção industrial.

O sistema de gestão da produção e estoque observado no *cluster 3*, conforme descrito por Dennis e Meredith (2000b), é denominado informatizado. Nele as variáveis referentes ao planejamento e controle indicam que este *cluster* utiliza uma grande quantidade de detalhes para gerar o planejamento de necessidade de material e capacidade, assim como o rastreamento do consumo de material e capacidade, e isso justifica o alto grau de informatização. As características encontradas são: (a) o planejamento da necessidade de matéria-prima é obtido através de uma combinação de

métodos incluindo algum uso de explosão de necessidade bruta, análise multicritério ABC, e métodos de reposicionamento de pedido fixo (*fixed reorder point methods*), com atualização frequente (quase em tempo real), (b) o consumo de matéria-prima é rastreado na conclusão do lote (*batch*), (c) o planejamento da necessidade de capacidade é gerado através de carregamento finito com valores aproximados, e (d) o consumo de capacidade é rastreado pelo histórico de horas trabalhadas e de máquinas para cada produto. A variável *WIP-CONTROL* indica que o material em processo é rastreado de maneira muito simples, através de inspeções físicas, reuniões e anotações de turno. E as variáveis *MAT-COMPUTERIZATION* e *CAP-COMPUTERIZATION* atingiram as maiores notas, proporcionando a classificação do *cluster* de informatizado. As empresas classificadas no *cluster* 3 são: plásticos, sorvetes, produtos farmacêuticos sólidos (comprimidos) e produtos farmacêuticos líquidos (enxaguante bucal e pomadas).

O sistema de gestão da produção e estoque observado no *cluster* 4, conforme descrito por Dennis e Meredith (2000b), é denominado simples. Nele as variáveis referentes ao planejamento e controle indicam as seguintes características: (a) o método para gerar o planejamento de necessidade de material fica entre conhecer o fluxo estável de consumo e o uso ocasional de reposicionamento de pedido com intervalo fixo (*fixed reorder interval point*) com atualização semi-semanal, (b) o consumo de matéria-prima é rastreado pela combinação de inventários físicos semanais e o histórico de consumo padrão, apenas para as matérias-primas chaves na conclusão do lote (*batch*), (c) o planejamento da necessidade de capacidade ou é conhecido e fixo ou gerado através do CPOF, e (d) os métodos utilizados para rastrear o consumo da capacidade ou são a combinação de acompanhamento informal (reuniões e notas de turno) mais o rastreamento das horas padrão de trabalho ou não é rastreado formalmente com um todo. A variável *WIP-CONTROL* indica que o material em processo é rastreado presencialmente no chão de fábrica, através de ligações telefônicas, ou por discussões informais em reuniões de produção. Isso explica porque esse *cluster* recebeu as menores notas para as variáveis de informatização. As empresas classificadas no *cluster* 4 são: resinas plásticas, bebidas, levedura e enzimas, seladores, tintas, vernizes e esmaltes.

A contribuição de Dennis e Meredith (2000b), em termos de gestão, faz sentido para a indústria de processo, embora não possa ser estendida para outras empresas que não sejam as 19 analisadas. A necessidade da intensificação do controle de material e capacidade por parte das empresas, sejam elas de processo ou manufatura discreta, passa hoje por uma questão crucial: competitividade. Assim, a contribuição de Dennis e

Meredith (2000b) pode ser vista como ponto de partida e abre campo para a realização de mais estudos sobre os sistemas de gestão da produção e inventário entre as indústrias de processo.

2.2 – Simulação

2.2.1 – Simulação de sistemas

A simulação é uma das técnicas utilizadas pela Pesquisa Operacional. Vários autores, ao longo do tempo, têm elaborado várias definições sobre simulação de sistemas. Banks *et al.* (2010) define simulação como a imitação da operação do processo do mundo real ou sistema ao longo do tempo, que envolve a geração de uma história artificial de um sistema e a observação dessa história artificial para tirar conclusões relativas às características operacionais do sistema real. Shannon (1998) define simulação como o processo de criação de um modelo de um sistema real e a condução de experimentos com este modelo com a finalidade de compreender o comportamento do sistema, possibilitando avaliar várias estratégias para a operação desse sistema. Para Pidd (2001) simulação consiste em imitar o comportamento de um sistema, através de um modelo que represente o sistema, com a utilização de um computador, quando sujeita a uma variedade de políticas operacionais. Analogamente, para Ingalls (2002), a simulação é o processo de criação de um modelo dinâmico de um sistema dinâmico atual com a finalidade de compreender o comportamento do sistema ou avaliar várias estratégias, dentro dos limites impostos por um conjunto de critérios, para a operação de um sistema.

Assim, podemos caracterizar, de maneira geral, simulação como um estudo que consiste na reprodução ou previsão do comportamento de um sistema através da utilização de um modelo que o represente, considerando o modelo como a caracterização da relação funcional das variáveis do sistema. Shannon (1998) apresenta a simulação como uma ferramenta capaz de reproduzir o comportamento de sistemas que já existem, assim como aqueles que ainda não existem. A figura 2.7 apresenta as etapas que compõem a simulação de um sistema. Neste caso a participação do ser humano no processo de tomada de decisão se faz necessária em quase todas as etapas do processo de simulação, ou seja, no desenvolvimento do modelo, projeto de experimento, análise de saída (*output analysis*), formulação da conclusão, e a tomada de decisão para alterar o sistema estudado. A única etapa em que a participação humana não é

necessária é na execução da simulação em si, tarefa realizada por um pacote de simulação (*software*) (MARIA, 1997).

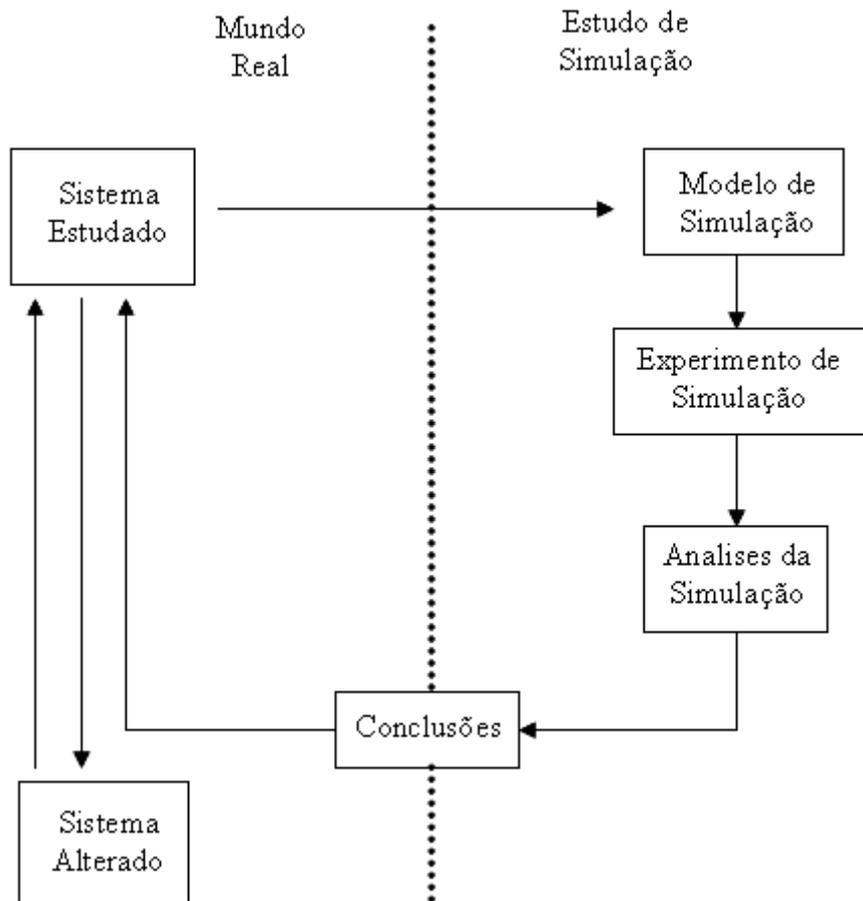


Figura 2.7 – Etapas da simulação de sistemas. Fonte: Maria (1997).

Para Mello (2001), o termo simulação é bastante genérico, podendo ser utilizados vários mecanismos e diferentes formas de representação do sistema. Antes do advento do computador, a simulação limitava-se a utilizar apenas modelos analógicos e físicos para o estudo e análise do comportamento de sistemas. A partir da década de 1960, com a evolução dos computadores, menores, mais baratos, mais poderosos e mais fácil de manusear por não especialistas, aumentou sua utilização na ciência do gerenciamento e permitiu que uma gama de opções viáveis fosse explorada no que diz respeito ao processo de tomada de decisão (PIDD, 2001). Assim, segundo descreve Freitas Filho (2008), a simulação computacional vem permitindo que várias perguntas e hipóteses possam ser respondidas e testadas sem que haja intervenção no sistema que é objeto de estudo. Maria (1997) ainda complementa, descrevendo a simulação como uma ferramenta de auxílio à escolha, quando há a necessidade de modelar e analisar a

aleatoriedade em um sistema. Pidd (2001) descreve o propósito da simulação computacional como apresentar possibilidades de melhoria ao sistema que é estudado. Shannon (1998) complementa, a simulação fornece a ferramenta de custo mais eficaz e barata para a tomada de decisão para gestores, permitindo minimizar os riscos ao tomar as decisões certas antes das erradas.

De acordo com Shannon (1998), existem três opções para se realizar um estudo de simulação computacional, que são: (i) a utilização de linguagens de programação de uso geral, (ii) a utilização de linguagens de simulação de uso geral, e (iii) a utilização de pacotes de simulação de uso específico.

As linguagens de programação de uso geral não possuem recursos gráficos e necessitam de conhecimento em programação e estruturas de dados para que um modelo seja criado, executado e analisado. Outro ponto a ser considerado é o tempo dedicado à programação, que dependerá da complexidade do sistema a ser estudado e do modelo que o representará. Podemos citar como exemplos de linguagem de programação de uso geral FORTRAN, C++, Visual Basic e Python.

A linguagem de simulação é, segundo Law e McComas (1997), um pacote de *software* de natureza geral, em termos de aplicações que podem abordar, e onde o modelo é desenvolvido através de programação. Recentemente, ainda segundo os autores, as linguagens de simulação migraram para uma abordagem gráfica na construção do modelo (*graphical model building approach*), como por exemplo: Arena[®], AweSlim[®], Extend[™], GPSS/H[™], Simscript II.5[®]. Esses exemplos são capazes de solucionar quase todos os problemas de simulação discreta. O objetivo de qualquer pacote de simulação é preencher a lacuna entre a conceituação do usuário do modelo e sua forma executável (SHANNON, 1998).

Pacotes de simulação de uso específico são pacotes de simulação criados para solucionar problemas de determinados setores. Podemos citar como exemplo de setores que possuem pacotes de simulação específicos, a manufatura, reengenharia de processo, saúde e comunicação. Para este trabalho vamos apenas abordar os pacotes relacionados aos problemas da manufatura, denominados de simulador orientado a manufatura (*manufacturing oriented simulator*), onde os modelos são desenvolvidos através de recursos gráficos, arrastando e soltando ícones selecionados de menus e preenchendo caixas de diálogo. Simuladores como: Plant Simulation, SimFactory[®], ProModel[®], AutoMod[®], Taylor II[®] e Witness[®] são exemplos de pacotes destinados à manufatura. A grande vantagem de utilizar um simulador orientado a manufatura é a redução de tempo

na etapa de construção do modelo e a desvantagem é a redução de flexibilidade quando comparado às linguagens de simulação (LAW e McCOMAS, 1997).

Para Shannon (1998) a utilização de pacotes de simulação, tanto de uso geral como específico, apresenta vantagens distintas em termos de facilidade, eficiência e efetividade de uso, além de:

- redução nas tarefas de programação;
- oferecimento de orientação conceitual;
- maior flexibilidade ao alterar o modelo;
- menos erros de programação;
- coleta automatizada de estatísticas.

Com o passar do tempo, as diferenças entre simuladores e linguagens de simulação ficam menos perceptíveis, pois as linguagens tendem a adotar uma abordagem mais gráfica (interface gráfica) visando reduzir a necessidade de habilidade em programação, e os simuladores tendem a apresentar uma maior capacidade de programação para aumentar a flexibilidade de modelagem (LAW e McCOMAS, 1997).

Como os requisitos da simulação de sistemas podem variar amplamente, vários softwares, ou pacotes de simulação, estão à disposição no mercado dependendo da aplicação desejada.

Com a expansão da utilização dos microcomputadores e o avanço nas metodologias de simulação, as ferramentas de simulação ganharam papel importante na solução de problemas na produção de bens e serviços. Para Mello (2001), Freitas Filho (2008) e Maria (1997), a simulação deve ser utilizada principalmente em três casos: (i) quando a solução analítica de um problema usando outras técnicas como, por exemplo, a programação linear se torna inviável pelo custo computacional - como por exemplo sequenciamento de tarefas em ambientes *job shop*, (ii) quando a realização de experimentos em sistemas reais é impossível ou extremamente custosa e (iii) quando o tratamento analítico do problema é desencorajado devido à complexidade do mesmo, como por exemplo, sistemas complexos como o mercado de ações ou modelos de filas de larga escala. Sobre o caso (i), deve-se reforçar que o objetivo da simulação é analisar um cenário, enquanto a programação linear busca a otimização de um critério de desempenho.

Miyagi (2004) apresenta outras finalidades para a utilização da simulação de sistemas:

- estudar as interações internas de um sistema complexo, ou de um subsistema dentro de um sistema complexo;
- realizar alterações nas informações, na organização e no ambiente do sistema para observar seus efeitos;
- identificar as variáveis mais importantes de um sistema e como elas interagem através do estudo dos sinais de entrada e das saídas resultantes;
- verificar soluções analíticas, sendo neste caso a simulação é utilizada como instrumento de validação;
- adquirir maior conhecimento sobre o modelo de simulação e sobre o processo de desenvolvimento do modelo para melhorias do sistema.

Shannon (1998), Maria (1997) e Banks *et al.* (2010) apresentam algumas vantagens do uso da simulação, que são:

- apresenta conceito básico fácil de compreender, e portanto mais fácil para justificar para gerentes ou clientes do que modelos analíticos;
- um modelo de simulação apresenta mais credibilidade pois seu comportamento pode ser comparado ao do sistema real, porque normalmente exige menos hipóteses simplificadoras, capturando mais características verdadeiras do sistema estudado;
- novos projetos e layouts podem ser testados sem que seja necessária a sua implementação;
- novas políticas de pessoal, procedimentos de operação, regras de decisão, estruturas organizacionais e fluxos de informações também podem ser testados sem a necessidade de implementação;
- é uma técnica que permite ao analista facilmente identificar gargalos (fluxos de informação, materiais e produtos finais), e analisar cenários para alteração das taxas de fluxo do processo;
- testar hipóteses sobre como e por que certos fenômenos ocorrem no sistema, e quais seus efeitos;
- permite executar experimentos em poucos minutos refletindo o comportamento do sistema ao longo de horas, dias, semanas e meses, possibilitando observar o sistema ao longo do horizonte de tempo ou até mesmo retardá-lo para estudar um fenômeno específico;

- permite observar como um sistema realmente funciona e compreender quais variáveis são mais importantes para a performance;
- no desenvolvimento ou projeto de novos sistemas, a simulação permite responder a pergunta “e se” (*What if*).

Embora a simulação apresente algumas vantagens na análise de sistemas em relação a modelos analíticos e matemáticos, Shannon (1998) e Banks *et al.* (2010) relacionam como desvantagens da simulação:

- a construção de modelos de simulação é uma habilidade adquirida ao longo do tempo e através de treinamento;
- reunir dados confiáveis pode consumir muito tempo e mesmo assim o resultado da simulação pode ser questionável;
- a simulação reproduz o comportamento de um sistema e não o soluciona. Ela não é uma ferramenta que produz uma solução ótima, apenas serve para analisar o comportamento do sistema em questão;
- a maioria dos resultados de simulação são essencialmente variáveis aleatórias, portanto pode ser difícil distinguir se uma observação é resultado de inter-relações do sistema ou de aleatoriedade;
- modelagem e análise de simulação podem consumir tempo e ser dispendiosas. A economia de recursos pode comprometer os resultados da simulação;
- a simulação é utilizada em alguns casos quando a solução analítica é possível.

Prado (2003), Freitas Filho (2008), e Banks *et al.* (2010) descrevem alguns cenários onde a simulação é aplicável:

1 – Sistemas de Manufatura – É, segundo os autores, a área que apresenta a maior quantidade de aplicações relatadas: manufatura e montagem, movimentação de materiais, alocação de mão-de-obra, áreas de armazenamento, *layout* etc.

2 – Sistemas de transporte e estocagem – É outra área que se observa o crescente uso da simulação: redes de distribuição e logística; armazéns e entrepostos; operações portuárias; transportes rodoviários e ferroviários; operações em aeroportos etc.

3 – Sistemas computacionais – Destaca-se a modelagem de filas com a finalidade de medir a produtividade e o tempo de resposta dos sistemas: redes de

computadores; redes de comunicação; web sites; servidores de redes; arquitetura de computadores; sistemas operacionais; gerenciadores de base de dados etc.

4 – Sistemas de prestação de serviços diretos ao público – Através de simulação pode-se determinar o número de recursos necessários para reduzir o tempo de espera em fila: hospitais; bancos; centrais de atendimento (*call centers*); restaurantes industriais e tipo *fast food*; serviços de emergência (polícia, bombeiros e etc.); serviços de assistência jurídica etc.

Law e Kelton (2000), Law e McComas (1997) e Hosseinpour e Hajihosseini (2009) descrevem algumas situações onde a simulação é utilizada na manufatura:

- determinar a quantidade e o tipo de máquinas necessárias para um objetivo particular;
- determinar a quantidade, tipo e o arranjo físico de transportes, esteiras e outros equipamentos de suporte;
- determinar a localização e o tamanho dos buffers de estoque;
- avaliar a mudança no volume de produto ou mix;
- avaliar o impacto de um novo equipamento no sistema de manufatura;
- avaliação de investimento de capital;
- auxiliar no planejamento da necessidade de mão de obra;
- análise de saída (*throughput analysis*);
- análise de gargalos;
- auxiliar na programação da produção;
- desenvolver e testar novas políticas de estoque;
- análise de confiabilidade (por exemplo o efeito da manutenção preventiva);
- desenvolver e testar novas políticas de qualidade;
- avaliar o tempo de espera em filas;
- avaliação do tamanho das filas;
- avaliação da pontualidade das entregas;
- avaliação da utilização de equipamentos e pessoal;
- avaliar a quantidade de material em processo (WIP).

Hosseinpour e Hajihosseini (2009) apontam a simulação como uma ferramenta eficiente no treinamento de operadores na indústria de processo. E isso se justifica pelo simples fato da simulação ser capaz de checar o sistema de automação e oferecer ao

operador uma melhor compreensão do processo, evitando que erros sejam cometidos, não só em relação a custo, mas também em relação desperdícios, falhas de equipamentos, catástrofes ambientais e segurança dos trabalhadores.

Segundo Ingalls (2002), a vantagem e a diferenciação da simulação de eventos discretos quando comparada com modelos de otimização, é a capacidade de representar a dinâmica de sistemas reais, e com isso possibilitar a análise de resultados através da observação de cenários. Para Negahban e Smith (2014), a simulação de eventos discretos é uma ferramenta altamente flexível que permite avaliar diferentes alternativas de configuração de sistemas e estratégias de operação para suportar o processo de tomada de decisão no contexto da manufatura.

A utilização da simulação como ferramenta para lidar com os desafios da manufatura em um mundo cada vez mais integrado e competitivo não é mais novidade (WILLIAMS, 2014), sua aplicação também se estende a definição de metas nas organizações e no processo de tomada de decisão (HUPMAN e ABBAS, 2014). Um ganho adjacente que a simulação pode proporcionar às empresas de maneira geral é a melhor compreensão organizacional adquirida durante a execução de um projeto de simulação aplicado à manufatura. Todas as pessoas envolvidas no estudo de simulação obterão mais conhecimento dos termos de produção, como por exemplo, procedimentos, medidas de desempenho, fluxo, capacidade, estratégia de produção e estoque e outros. E essas informações combinadas com o desenho do processo resultante, obtido através da simulação, contribuem para o aprendizado organizacional (STANSFIELD *et al.*, 2014).

Esse aprendizado que ocorre durante o exercício de simulação na manufatura também abrange discussões sobre os termos eficiência, utilização, desvios estatísticos, interferências, tempos de parada, balanceamento de linha, tempo *tact*, tempo de resposta, atrasos, curvas de aprendizado e outros fatores que afetam o desempenho da produção. Um aprendizado organizacional adicional pode ser alcançado se a discussão envolver termos como fluxo, capital, despesa, qualidade e compartilhamento de serviços de suporte (STANSFIELD *et al.*, 2014).

A simulação se destaca na avaliação do desempenho operacional e de projeto através da sua aplicação e sua efetividade em abordar muitos problemas reais no âmbito da manufatura, sendo a simulação de eventos discretos a técnica mais comumente utilizada para análise e compreensão da dinâmica dos sistemas de manufatura (NEGAHBAN e SMITH, 2014).

Os resultados positivos obtidos na adoção da simulação em inúmeros trabalhos relacionados à operação e projeto de sistemas de manufatura levou, conseqüentemente, ao aumento do interesse nesta área de pesquisa, conforme Negahban e Smith (2014). Assim, os autores buscaram na literatura, entre os anos 2002 a 2013, classificar as áreas de aplicação de pesquisa que envolvem a simulação no âmbito da manufatura, e classificaram em três categorias as áreas de aplicação da simulação na manufatura e onze subcategorias conseqüentes, como mostra o quadro 2.5.

Categorias	Subcategorias
Projeto de sistema de manufatura	<ul style="list-style-type: none"> •Projeto de sistema geral e <i>layou</i> de fábrica; •Projeto de sistema de movimentação de material; •Projeto de sistema de manufatura celular; •Projeto de sistema de manufatura flexível.
Operação de sistema de manufatura	<ul style="list-style-type: none"> •Planejamento e programação de operação de manufatura; •Planejamento e programação de operação de manutenção; •Controle em tempo real; •Políticas de operação.
Linguagem de simulação e desenvolvimento de pacotes	<ul style="list-style-type: none"> •Modelos de simulação genéricos; •Métodos de simulação/modelagem e estruturas; •Métodos de simulação metamodelagem/otimização.

Quadro 2.5 – Categorias de classificação das áreas de aplicação da simulação na manufatura. Fonte: Negahban e Smith (2014).

Negahban e Smith (2014) verificaram que 56% dos estudos publicados correspondem à aplicação da simulação na operação de sistemas de manufatura, 24% em linguagem de simulação e desenvolvimento de pacotes e 20% em projeto de sistemas de manufatura. Os autores ressaltam a predominância de estudos publicados sobre a aplicação da simulação na operação de sistemas de manufatura, sendo que a área de aplicação com o maior número de publicações utilizando simulação de eventos discretos é a subcategoria planejamento e programação das operações de manufatura, que obteve mais trabalhos publicados que o número total da categoria projeto de sistemas de manufatura. A subcategoria controle em tempo real segue como a segunda

área com mais publicações com aplicação da simulação de eventos discretos na manufatura.

Do ponto de vista da pesquisa científica, a modelagem e simulação, e sua importância, necessitam do alinhamento adequado da técnica, dos problemas propostos, dos acionistas e dos usuários. A literatura acadêmica existente sobre esse tema é extensiva e cheia de rigor, o que é importante para a aplicação e a precisão, porém, a divulgação dos resultados das pesquisas, principalmente para os acionistas, necessita de uma linguagem acessível, o que também beneficia usuários e pesquisadores. Assim, a importância da publicação das pesquisas sobre modelagem e simulação reside na demonstração da confiabilidade, eficácia e integridade de resultados. Entretanto, usuários e tomadores de decisão necessitam frequentemente de melhores práticas, orientação prescritiva e soluções genéricas customizáveis que abordem de maneira efetiva problemas bem definidos (YILMAZ *et al.*, 2014).

Devido ao crescimento da complexidade dos problemas, o desenvolvimento da simulação como ciência e ferramenta de engenharia torna-se primordial para compreender, explorar, prever e influenciar o comportamento de sistemas naturais, artificiais e físicos (YILMAZ *et al.*, 2014). Em uma ciência complexa, dinâmica e em constante evolução, baseada na inovação e no conhecimento, a importância e o vigor da disciplina de modelagem e simulação, segundo Yilmaz et al. (2014), dependerá de três pilares críticos: (i) credibilidade, (ii) relevância e (iii) acessibilidade de pesquisa.

2.2.2. Projetos de simulação

A obtenção de sucesso na condução e implementação de estudos ou projetos de simulação de sistemas depende da dedicação e comprometimento na execução das etapas citadas acima, assim como a experiência das pessoas que farão parte da equipe de simulação. Shannon (1998) descreve alguns cuidados que devem ser tomados durante a execução das etapas que compõem um estudo de simulação.

- ter objetivos claramente definidos e viáveis;
- certifique-se de que os recursos para completar o projeto dentro do previsto são adequados e estão disponíveis;
- ter o apoio da alta administração durante a execução do projeto com a finalidade de auxiliar a obtenção de informações e dados de todas as áreas de apoio;

- certifique-se de possuir todas as habilidades necessárias disponíveis para a duração do projeto;
- certifique-se de que existem os canais de comunicação adequados com os patrocinadores (*sponsors*) e os usuários do projeto;
- certifique-se de que os patrocinadores (*sponsors*) e os usuários possuem a clara compreensão do escopo e dos objetivos do projeto, assim como do cronograma;
- tenha uma boa documentação de todos os esforços de planejamento e modelagem.

Embora Shannon (1998) descreva os cuidados acima para a obtenção de sucesso em projetos de simulação, o autor compartilha com Maria (1997) e Law e Kelton (2000) a devida atenção com algumas armadilhas que poderão ocorrer ao longo da execução de um projeto de simulação, comprometendo o seu sucesso:

- planejamento inadequado e recursos necessários subestimados;
- participação inadequada de usuários;
- iniciar a construção do modelo antes de compreender o sistema;
- modelo de simulação muito complexo ou muito simples;
- habilidade da equipe de simulação insuficiente;
- falta de confiança, crédito e apoio da alta administração;
- pressupostos errôneos;
- pressupostos não documentados;
- utilizar uma distribuição de probabilidade errada nos dados de entrada;
- substituir a distribuição (estocástica) por sua média (determinística);
- utilizar uma medida de desempenho errada;
- defeitos (bugs) no programa de simulação;
- utilizar formulas estatísticas padrão que assumem independência na análise dos resultados da simulação;
- falha na comunicação entre as pessoas envolvidas no projeto de simulação;
- executar a simulação apenas uma vez para a configuração do modelo;
- utilizar a simulação quando uma solução analítica é viável.

Para a simulação de sistemas, a compreensão do que podemos caracterizar como *sistema* é de extrema importância, assim como a compreensão das fronteiras do sistema e do ambiente em que o mesmo se encontra inserido. Segundo Miyagi (2004) podemos definir sistema como sendo um grupo de objetos que estão agregados de acordo com

uma relação de interdependência para atingir certos objetivos. Shannon (1998) define sistema como um grupo ou coleção de elementos inter-relacionados que colaboram para realizar algum objetivo declarado. Mello (2001) define sistema como um conjunto estruturado de itens entre os quais se possa encontrar ou definir alguma relação de funcionalidade. Banks *et al.* (2010) descrevem sistema como um grupo de objetos que se unem através de uma interação regular ou interdependência para a realização de um propósito. Por fim, Freitas Filho (2008) define sistema como um grupo de componentes que recebem estímulos ou entradas (*inputs*) e produzem respostas ou saídas (*outputs*).

Na visão de Law e Kelton (2000) o que se entende por sistema depende diretamente dos objetivos estabelecidos em um estudo, e o conjunto de objetos que compõem o sistema para um estudo pode ser apenas um subconjunto do sistema como um todo para outro. Ainda segundo os autores, um sistema pode ser categorizado como discreto ou contínuo. Em um sistema discreto, os estados das variáveis se modificam de forma não linear, muitas vezes seguindo valores bem determinados em momentos distintos de tempo, enquanto em um sistema contínuo os estados das variáveis se modificam de forma linear em relação ao tempo. Embora haja estas duas categorias de sistema, os autores relatam que poucos sistemas são completamente discretos ou contínuos, na prática o que ocorre é que a característica de mudança mais predominante no sistema é que vai determinar a sua categoria.

Mudanças no ambiente externo ao sistema simulado podem, por muitas vezes, alterar o estado do mesmo. Levando isso em consideração, dependendo da finalidade do estudo torna-se necessário definir o escopo do modelo de simulação. Esse escopo é definido pelos seguintes elementos:

- Entidade – Para Freitas Filho (2008) uma entidade representa um objeto que necessita de uma clara e explícita definição, ou de maneira geral, é um objeto de interesse em um sistema. Pode ser dinâmica, como no caso de uma peça que atravessa a produção, ou estática, que atuam sobre outras entidades e no caso pode ser a máquina que processa a peça.
- Atributos – São as propriedades que definem as entidades. Utilizando o exemplo acima da peça, podemos dizer que se uma peça é processada por uma mandrilhadora, estabelece que a peça foi mandrilhada e este é um dos seus atributos.
- Atividade – Freitas Filho (2008) define atividade como sendo um período de tempo predeterminado, onde após o seu início, seu final pode

ser prorrogado. De maneira geral podemos dizer que representa uma ação que ocorre dentro do sistema e sua duração pode, ou não, ser constante.

- Estado – É a representação da situação do sistema, através dos valores adotados pelas variáveis de estado do mesmo em um determinado instante. Sendo assim, são as variáveis de estado que definem o estado do sistema. Para Freitas Filho (2008) elas constituem o conjunto de informações necessárias à compreensão do que está ocorrendo no sistema num determinado instante no tempo, com relação aos objetos de estudo. Mello (2001) estabelece que as variáveis de estado descrevem o estado de um sistema ou de um de seus componentes, quer no início de um determinado período de tempo, quer no seu término, ou ainda durante o decorrer de um certo período. No caso do exemplo anterior, a variável de estado da máquina pode ser caracterizada por ocupada ou livre.
- Evento – Segundo Freitas Filho (2008) toda ocorrência, programada ou não, que altere pelo menos uma variável de estado do sistema recebe o nome de evento. Tomando como exemplo uma operação de trabalho, onde temos uma máquina (entidade estática) aguardando a chegada de uma peça (entidade dinâmica), podemos dizer que a chegada, o processamento e a saída da peça são os eventos que modificam os atributos tanto da máquina como da peça, considerando a operação como o sistema.

Banks *et al.* (2010) descreve “modelo” como a representação de um sistema com a finalidade de estudá-lo, considerando apenas os aspectos do sistema que afetam o problema sob investigação. Podemos classificá-lo como matemático ou físico, segundo, Banks *et al.* (2010), Law e Kelton (2000), Freitas Filho (2008) e Miyagi (2004). Para os modelos matemáticos, que são utilizados na simulação, são utilizadas notação simbólica e relações matemáticas para representar um sistema. No caso da simulação computacional são utilizados modelos computacionais. Na visão de Freitas Filho (2008), a caracterização de um modelo é dada em função da maneira com que ocorrem as mudanças nas variáveis de estado do sistema, ou como descreve Shannon (1998), um modelo representa a lógica de um sistema, como entidades com atributos que chegam,

se juntam em filas para aguardar os recursos necessários, são processadas pelos recursos, liberadas e saem do sistema.

Durante a construção do modelo de simulação algumas simplificações e alguns pressupostos são adotados em relação ao comportamento do sistema estudado, e isso interfere no processo de tomada de decisão com base nos resultados gerados pelo modelo de simulação analisado. Assim, antes de analisar qualquer resultado oriundo de um estudo de simulação de sistemas deve-se primeiramente avaliar a qualidade do modelo de simulação elaborado (FREITAS FILHO, 2008; SARGENT, 2003 e 2014; STURROCK, 2014 e WILLIAMS, 2014).

Os sistemas representados por modelos de simulação podem, segundo Banks *et al.* (2010), Law e Kelton (2000), Freitas Filho (2008) e Pidd (2001), ser classificados como: estáticos ou dinâmicos, contínuos ou discretos e determinísticos ou aleatórios. Essa classificação também será seguida pelo modelo de simulação, como representada na figura 2.8.

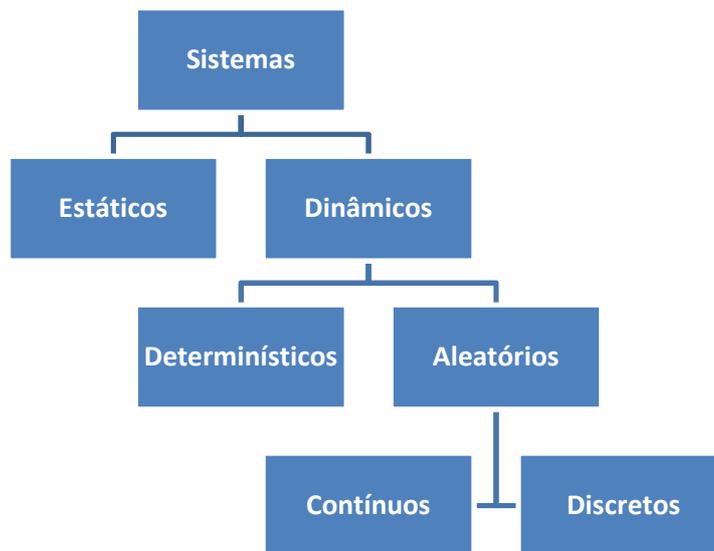


Figura 2.8 – Classificação dos sistemas para fins de modelagem. Fonte: Freitas Filho (2008).

Modelos dinâmicos são aqueles em que as variáveis de estado (variáveis dependentes) do sistema representado, modificam-se em relação ao tempo (ocorrência de uma ordem temporal entre eventos), que é sua principal variável independente. Já os modelos estáticos representam um sistema em um determinado ponto na escala de tempo, e conseqüentemente, assumindo os valores das variáveis de estado como fixos. Não consideram a variável de tempo, e como exemplo de modelo de simulação estático

podemos citar o modelo de Monte Carlo (BANKS *et al.*, 2010 e LAW e KELTON, 2000).

Modelos determinísticos são aqueles em que as variáveis de estado não são randômicas, ou seja, não contem nenhuma probabilidade. Para Banks *et al.*(2010) estes modelos possuem um conjunto conhecido de entradas que resultarão em um único conjunto e saída. E modelos aleatórios são aqueles em que o conjunto de entradas pode ser representado por uma função de probabilidade. Ou, como para Freitas Filho (2008), quando os possíveis estados das variáveis podem ser descritos, mas não predeterminados. Banks *et al.* (2010) e Law e Kelton (2000) descrevem que entradas (*inputs*) aleatórias levam a saídas (*outputs*) aleatórias, e que elas podem ser consideradas apenas como uma estimativa das verdadeiras características de um modelo.

A classificação dos modelos como contínuos ou discretos está associada à forma de mudança das variáveis de estado do sistema, discreta ou contínua, ao longo do tempo. Sendo assim, quando as variáveis de estado sofrem modificação em determinado instante no tempo, o chamado tempo de ocorrência de evento, o modelo é classificado como modelo de mudança discreta ou modelo discreto. Em contra partida, quando as variáveis de estado sofrem modificação continuamente ao longo do tempo, temos os modelos de mudança contínua ou modelos contínuos.

Na visão de Mello (2001), Law e Kelton (2000), Banks *et al.* (2010) e Freitas Filho (2008), os termos discreto e contínuo descrevem o modelo e não o sistema, uma vez que um sistema pode ser representado por um modelo discreto tanto como por um modelo contínuo, considerando as variáveis necessárias para o acompanhamento do estado do sistema. A escolha de qual tipo de modelo utilizar vai depender do objetivo do estudo.

Freitas Filho (2008) considera que a maneira como os sistemas são encarados e abordados é relevante e determinará qual o método de modelagem a ser adotado. Mello (2001) é mais detalhista quando discorre sobre o assunto: para o autor o conceito de evento e processo determina naturalmente o modelo a ser adotado. Considerando que um evento ocorre em um ponto isolado de tempo, onde decisões são tomadas para o início ou fim de uma atividade e um processo é definido como uma sequência ordenada de eventos que pode englobar várias atividades, três possibilidades de modelos para simulação discreta são apresentados:

- modelagem orientada a evento ou por eventos;

- modelagem orientada ao exame da atividade ou por atividades;
- modelagem orientada a processo ou por processos.

Um sistema que é modelado segundo seus eventos ou unicamente por eventos é identificado pelas mudanças que ocorrem no momento do evento, ou seja, é identificado por eventos específicos que dependem unicamente do tempo de simulação, são os chamados eventos incondicionais (que dependem unicamente do tempo da simulação). Para Pegden (2010), na modelagem por evento o sistema é visto como uma série de eventos instantâneos que alteram o estado do sistema ao longo do tempo. As mudanças de estado do sistema são reproduzidas no modelo, que executa uma sequência de eventos, de uma estrutura que Freitas Filho (2008) denomina de pilha de eventos, ordenados em uma sequência temporal, ou seja, cada evento tem o seu instante predefinido para início. Pegden (2010) reconhece que esta abordagem é muito flexível e eficiente, mas também relativamente abstrata ao representar um sistema.

A modelagem por atividade também considera a execução de um evento em um determinado instante de tempo, ou seja, as mudanças de estado também ocorrem dentro de uma sequência do tempo de simulação. Porém apresenta mais um fator determinante para a execução de um evento, que é a satisfação de uma condição estabelecida no modelo. Neste caso os eventos são condicionais, pois dependem de outros elementos além do tempo. Essa condição que precisa ser satisfeita para que um evento seja iniciado pode ser a disponibilidade de um recurso (livre ou ocupado), que em determinados modelos orientam o início do próximo evento independentemente do tempo de simulação, como por exemplo, no caso de uma estação de trabalho onde a máquina (recurso) está livre e a lógica do modelo solicita que uma peça seja enviada para esta máquina processá-la.

O terceiro e último método de modelagem citado, a modelagem por processo aborda os sistemas sob o ponto de vista das entidades, que segundo Freitas Filho (2008) as entidades dinâmicas de um sistema competem pela posse dos recursos, podendo também haver cooperação entre elas para cumprir uma determinada tarefa.

O foco desse tipo de método é o fluxo das entidades dinâmicas através dos recursos, e segundo a visão de Freitas Filho (2008) este é o modelo mais intuitivo do ponto de vista do usuário, pois procura imitar o fluxo das entidades no sistema. O modelo acompanha individualmente cada entidade, desde a sua criação, seu movimento através das atividades executadas até o final do processo. Freitas Filho (2008) descreve esta abordagem como mais complexa devido à necessidade de um maior controle sobre

as entidades, eventos e atividades, pois o estado desse conjunto reflete o estado do próprio sistema.

Conforme descreve Pedgen (2010), nos anos 80 a modelagem por processo tornou-se a abordagem dominante para simulação de eventos discretos. Ainda segundo o autor, o surgimento da modelagem gráfica e animação como características chaves de ferramentas de modelagem de simulação simplificou o processo de modelagem por processo, assim como melhorou a visualização e validação dos resultados de simulação. Na visão do processo, o autor descreve o movimento de entidades passivas através do sistema como um fluxo de processo. E o fluxo de processo é descrito como uma série de passos de processo (capturar, retardar e liberar) que modelam as mudanças de estado que ocorrem no sistema. Os modelos de processo são definidos em formato de fluxograma, onde entidades entram no processo em primeiro passo e saem do processo em último passo.

Apesar da orientação por processo tenha provado ser muito efetiva na prática, uma orientação por objeto oferece um paradigma alternativo de modelagem que é mais natural, e em muitos casos mais fácil de utilizar. Na orientação por objeto, o modelo do sistema descreve os objetos que o compõem, ou seja, o comportamento do sistema surge da interação desses objetos (PEDGEN, 2010).

O crescimento do número de produtos (*softwares*) que utilizam a abordagem de modelagem por objeto se deve ao fato de que esta abordagem é mais simples e mais poderosa que a abordagem por processo, apesar desta última ainda ser muito utilizada na prática (PEDGEN, 2010).

A simulação que este trabalho se propõe a realizar utilizará o método de modelagem por processo, pois é o método que mais atende o objetivo deste estudo. É através desse método que será estudado o surgimento de gargalos (filas) e o tempo de espera de um recurso, ou entidade estática, até a chegada de uma entidade dinâmica para ser processada. Nesse estudo, somente será simulado através de um modelo que observe o fluxo das entidades através dos recursos.

2.2.3 A simulação discreta na indústria de processo

É na manufatura que se concentram grande parte das aplicações da simulação. Sua primeira utilização foi no início da década de 60 (LAW e McCOMAS, 1997). Essa concentração se dá devido ao amplo campo de estudo que a manufatura oferece e pela

capacidade da simulação oferecer análises adequadas para os problemas estudados (LAW e KELTON, 2000; BANKS *et al.*, 2010 e PIDD, 1997).

Em nossa revisão de literatura, percebemos que os estudos que se utilizam de simulação de sistemas tem como objeto de estudo sistemas de manufatura discreta. Sistemas de manufatura encontrados na indústria de processo, contínuo e batelada (*batch*), são normalmente estudados sob o ponto de vista técnico de processo, com foco no controle de processo.

Na indústria de processo alguns processos produtivos podem ser considerados híbridos, com produção contínua e produtos discretos, como por exemplo, na indústria alimentícia, evidenciado no trabalho de Huda e Chung (2002). Chen e Pidd (2005) denominam tais processos de produção como processos quase-contínuos. Nessa categoria de processo produtivo, normalmente consistem em uma sequência de equipamentos ou máquinas ligados por sistemas de transporte. De maneira geral, recebem como *input* uma matéria-prima considerada contínua (por exemplo, líquidos, grãos, etc) e resultam como *output* produtos discretos em alta velocidade (cf: Huda e Chung, 2002).

A simulação de eventos discretos pode apresentar alguma limitação ao lidar com características de processos específicos da indústria de processo em diferentes níveis operacionais, da cadeia de suprimentos ao chão de fábrica, e em diferentes fases do processo de planejamento. E dependendo do nível operacional, existem mais ou menos características específicas da indústria de processo que devem ser consideradas na etapa da elaboração do modelo de simulação discreta (SPIECKERMANN e STOBBE, 2012).

Muitos pacotes de simulação encontrados no mercado são direcionados a casos de uso encontrados em sistemas de produção discretos e podem não ser apropriados para a utilização em sistemas de produção quase-contínuos ou híbridos. Assim sendo, a modelagem do problema pode requerer adaptações nesses casos. Pidd, (1987) e Kumar e Phrommthed (2006) citam como exemplo de adaptações: desenvolver um modelo muito simplificado do sistema como um todo, não levando em conta o fluxo de material entre as diferentes partes do sistema e desenvolver um modelo apenas de uma parte do sistema, não levando em consideração a interação com as outras partes.

Em relação ao planejamento da produção, algumas características da indústria de processo devem ser consideradas, independentemente se o objeto de estudo de simulação é uma planta fabril inteira ou apenas uma parte, como por exemplo: restrição do tamanho de lote ou batelada, compartilhamento de produtos intermediários, variação

do tempo de processo, variação do rendimento de produto, armazenamento específico de produtos, capacidade de armazenamento limitada de produtos intermediários, fluxo cíclico de material, utilização de recursos de uso geral, mistura e processo de mistura e sequência e utilização dependente de operações de limpeza (GUNTHER e van BEEK, 2003). Além disso, em muitos exemplos na indústria de processo podemos observar que a natureza do processo se apresenta tanto contínua como por batelada (*batch*), e essa característica híbrida, discreta e contínua, deverá ser levada em conta na abordagem do problema em relação ao modelo de simulação (SPIECKERMANN e STOBBE, 2012).

De acordo com a observação de Spieckermann e Stobbe (2012), um ambiente de produção com essas características proporciona um desafio considerável quando se trata de planejamento da produção, assim como elaborar o modelo de simulação no nível da planta fabril e do chão de fábrica. Ainda segundo os autores, do ponto de vista da simulação discreta, esse desafio é muito mais acentuado pelo simples fato de que partes significantes do processo de produção da indústria de processo não são discretos por natureza.

Assim a utilização da simulação de eventos discretos na indústria de processo, principalmente na indústria química, não é tão difundida quanto na indústria de manufatura discreta, pois para que isso ocorra se faz necessário que todos os “aspectos contínuos” sejam suficientemente abordados (SPIECKERMANN e STOBBE, 2012), e que os produtos sejam necessariamente discretos (MEHRA *et al.*, 2006; HUDA e CHUNG, 2002).

Huda e Chung (2002) propõem que para sistemas de produção híbridos é mais conveniente à adoção de abordagens mais complexas, como a simulação de eventos contínuos ou até mesmo uma abordagem combinada de simulação de eventos discretos e contínuos, com o objetivo de desenvolver modelos mais representativos. Para os autores, a indústria alimentícia é um típico caso de setor da manufatura no qual o modelo de simulação primeiro deve considerar a abordagem de eventos contínuos para depois, então, considerar a abordagem de eventos discretos. No entanto, ainda segundo os autores, há pouca literatura disponível sobre a abordagem combinada de eventos discretos e contínuos.

Em Mušič e Matko (1998) é possível observar a integração da simulação de eventos discretos na simulação contínua através do modelo baseado na abordagem da utilização da rede petri (*petri-net*) na ferramenta de simulação contínua Matlab-Simulink. Já em Sharda e Bury (2010) é possível observar a análise de gargalo em um

processo onde as etapas de processo em batelada (*batch*) e as etapas de processo contínuo ocorrem simultaneamente, através da utilização do *software* de simulação ExtendSim, que também é utilizado em simulação combinada de eventos discretos e contínuos.

Na visão de Spieckermann e Stobbe (2012), as metodologias e abordagens da simulação de eventos discretos e a simulação de eventos contínuos são distintas: enquanto a primeira programa eventos e considera elementos discretos com um número fixo de estados, a segunda aborda o modelo de processo através de equações diferenciais.

Entretanto, Spieckermann e Stobbe (2012) propõem duas abordagens para viabilizar a utilização da simulação de eventos discretos em processos híbridos na indústria química. A primeira abordagem consiste em modelar cada batelada como uma entidade movendo-se através do modelo de simulação, ou seja, considerar o processo em batelada a partir do nível da batelada. Ainda segundo os autores, essa abordagem se apresenta adequada para os processos em batelada onde as etapas de processo seguem uma estrutura aproximadamente linear. Porém, pode se apresentar limitada quando várias das características da indústria de processo citadas acima ocorrem no sistema.

A segunda abordagem consiste em transformar o fluxo contínuo em discreto quebrando-o em quantidades discretas adequadas (por exemplo, com base em volume ou peso dos materiais). Segundo Spieckermann e Stobbe (2012), se as unidades discretas forem muito grandes em peso ou volume, o modelo pode não apresentar a acuracidade necessária. Em contrapartida, se for decidido por uma maior granularidade na representação dos elementos do sistema, pode-se sofrer com um aumento considerável do número de eventos na simulação discreta, causando assim um aumento proibitivo do custo computacional para a execução do modelo.

Porém, observando essa mesma característica híbrida encontrada na indústria de processo - sistemas com interações complexas de fluxos de matérias-primas e produtos finais, fluxos contínuos e discretos e variabilidade associada a diferentes etapas de processo - a simulação de eventos discretos oferece uma abordagem capaz de considerar essa complexidade e todo o processo dinâmico do sistema observado (SHARDA e BURY, 2010). Essa capacidade de representar a dinâmica do sistema e possibilitar a análise de cenários ratifica a utilização da simulação de eventos discretos na indústria de processo, indo muito além da utilização tradicional, como a análise de confiabilidade e aperfeiçoamento da manutenção (SHARDA e BURY, 2008), e estendendo-se até a

avaliação do aumento da capacidade produtiva de plantas fabris (ALEXANDER, 2006), opções de investimento de capital, redução do tempo de ciclo e aumento da segurança na presença de componentes propensos a falha (SHARDA e BURY, 2011) projeto de expansão e validação da capacidade produtiva (SHARDA e BURY, 2014), análise de tamanho de lote (lot sizing) (MEHRA *et al.*, 2006 e HUANG *et al.*, 2014), avaliação de performance e eficiência de novos projetos e de fábricas existentes (PIDD, 1987; KUMAR e PHROMMTHED, 2006).

3 – O processo de produção de ração

O processo de produção de ração na empresa estudada divide-se em dois processos principais: (i) o processo para a produção de rações úmidas, que são comercializadas em latas ou saches, são basicamente direcionadas para o mercado de *petfood* e (ii) o processo de produção de rações secas podendo ser farelada, peletizada e extrusada, que são comercializadas em embalagens de polipropileno, rafia ou papel em diferentes tamanhos dependendo da quantidade.

O processo que será tratado neste trabalho é o processo de produção de rações secas, contemplando as rações fareladas, peletizadas e extrusadas. Neste processo, tudo se inicia no recebimento das matérias primas de duas formas: a granel (geralmente grãos) ou farelos que são armazenados em silos, ensacadas, que podem variar de um produto de origem animal como uma farinha de sangue, vísceras, carne ou peixe, a vitaminas e minerais, que são armazenadas em armazéns ou líquidas que são óleos, melação ou flavorizantes, armazenados em tanques.

As rações partem de uma fórmula onde todas as matérias-primas são relacionadas de acordo com seus valores nutricionais e quantidades a serem adicionadas. O processo de dosagem, que segue rigorosamente a fórmula, pode ser automatizado ou manual.

A pesagem dos ingredientes segue a ordem designada pelo programa de automação ou pela fórmula e são conduzidos dos silos até a balança através de roscas dosadoras. É na balança e no misturador que se determina o tamanho do batch, pois está diretamente ligado a capacidade destes equipamentos.

Logo após a pesagem dos ingredientes temos a pré-mistura. Esse processo tem como objetivo melhorar o rendimento dos moinhos, onde neste caso temos um processo de moagem conjunta. A moagem conjunta caracteriza-se pela moagem de todos os ingredientes após a pesagem. Ao contrário da moagem separada ou pré-moagem, onde os ingredientes são moídos separados e armazenados antes da etapa de dosagem e pesagem. A figura 3.1 mostra o desenho esquemático de um moinho de martelos.

Esses dois tipos de processos de moagens apresentam suas vantagens:

A – Moagem separada ou pré-moagem sobre a moagem conjunta

- menor custo de instalação;
- menor desgaste dos martelos do moinho;

- possibilidade de moagem de cada ingrediente conforme a granulometria desejada (diferentes telas para diferentes produtos);
- maior simplicidade na operação da fábrica;
- menor número de pontos de retenção entre a dosagem e a mistura.

B – Moagem conjunta sobre a moagem separada ou pré-moagem

- controle de granulometria (tamanho da partícula) da mistura;
- menor espaço ocupado (área).

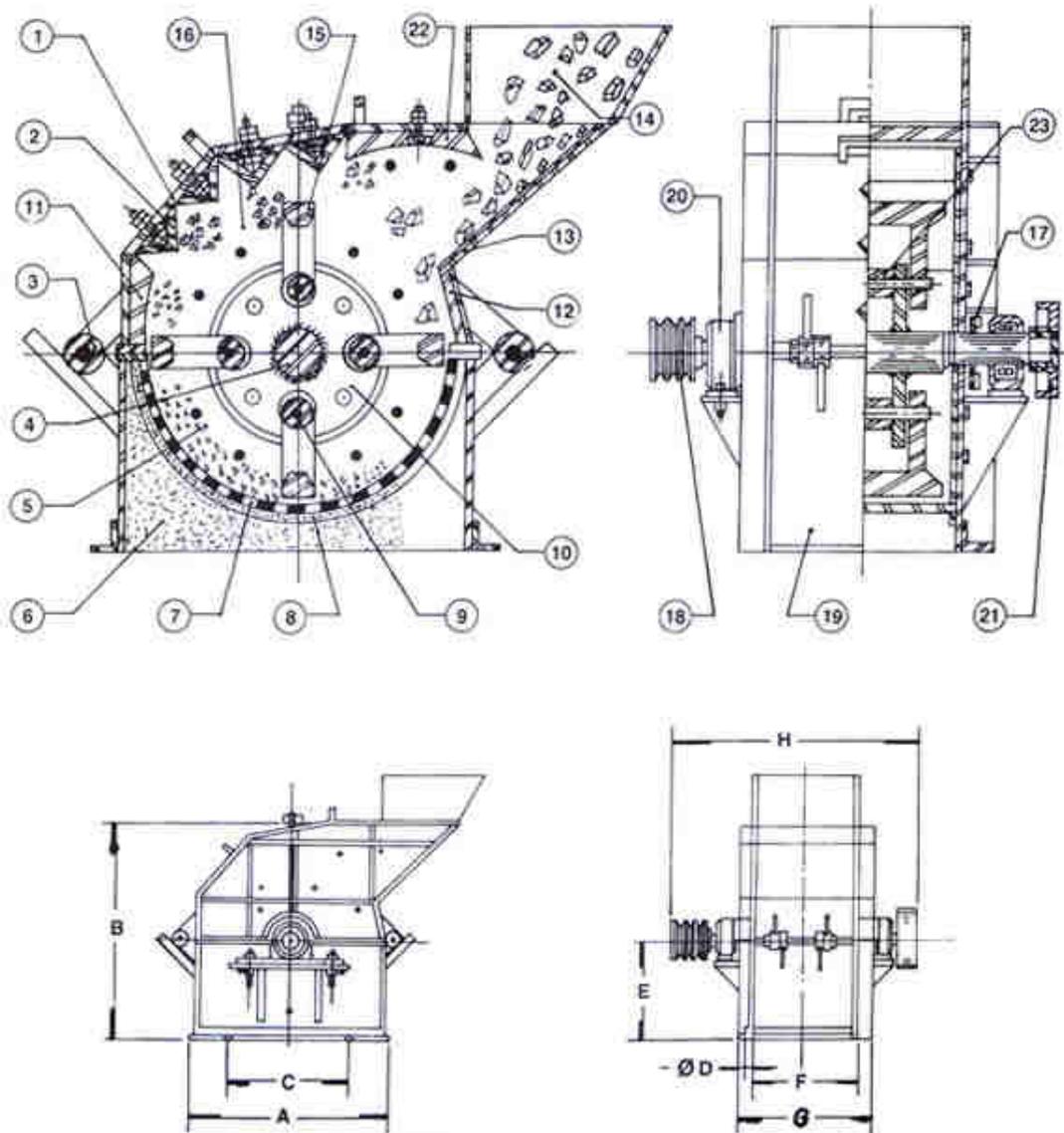


Figura 3.1 – Desenho esquemático de um moinho de martelos. Fonte: Giuliani do Brasil (2009).

No caso estudado, todos os moinhos são de martelos, como ilustrado na figura 3.2, mas existem outros tipos de moinhos, como por exemplo, moinhos de rolos, serras, bolas e barras.

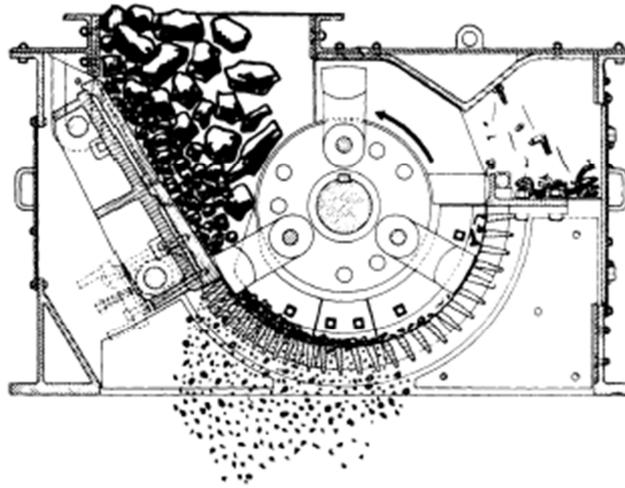


Figura 3.2 – Desenho esquemático do funcionamento de um moinho de martelos. Fonte: Fabrícia e Streit (2000).

Neste caso também podemos denominar o processo de moagem como moagem assistida ou com aspiração, este pode ser considerado como um processo de remoagem, pois é composto por uma caixa de expansão, exaustor, ciclone e filtros manga, que retêm as partículas mais finas evitando que se percam na atmosfera e permitindo que as mesmas retornem ao processo.

O processo de moagem assistida apresenta as seguintes vantagens:

- maior produtividade;
- menor aumento de temperatura no produto que sai do moinho;
- possibilidade de utilização de peneiras com furos menores, propiciando um menor tamanho de partícula com menor custo, pois não necessita de motores muito robustos.

Nesse tipo de processo o aumento da temperatura se torna indesejável, pois:

- aumenta a degradação das vitaminas;
- diminui a vida útil das correias de transporte dos elevadores;
- aumenta a condensação dos vapores nas paredes internas dos silos e dos corpos dos elevadores propiciando ambiente adequado para o aparecimento de fungos e bactérias, além do acúmulo de sujeira.

Em seguida, temos a etapa de homogeneização, que ocorre no misturador que é um equipamento chave de uma fábrica de ração, pois ele é responsável pela qualidade

da mistura e conseqüentemente pelo desempenho nutricional. É da capacidade do misturador e da densidade da ração que o tamanho do *batch* é definido.

Estão disponíveis quatro tipos de misturadores no mercado: verticais e horizontais.

A – Misturador Vertical

Embora não seja muito comum, este equipamento ainda continua a ser fabricado, principalmente em pequenas unidades. Normalmente é construído com duas roscas ao invés de um, reduzindo o tempo de mistura de 12 a 15 minutos para 6 a 8 minutos. A figura 3.3 mostra um misturador vertical.

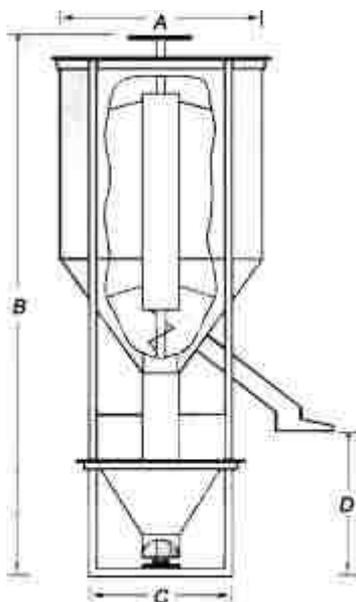


Figura 3.3 – Desenho esquemático de um misturador vertical. Fonte: Rone (2009).

Principais Vantagens:

- baixo custo de aquisição;
- baixo custo de instalação;
- não necessita de equipamentos adicionais para carga e descarga;
- ocupa menos espaço quando comparado ao misturador horizontal.

Principais Desvantagens:

- maior tempo de mistura;
- maior tempo de descarga;
- maior possibilidade de contaminação;
- pouco adequado a inclusão de líquidos;

- pior qualidade da mistura.

B – Misturador Horizontal de Duplo Helicóide

Hoje, os misturadores horizontais são os equipamentos mais utilizados na produção de alimentos balanceados. E o mais difundido é o de duplo helicóide.

Sua disseminação está baseada na sua alta produtividade e qualidade de mistura além de seu funcionamento simples. Constitui-se basicamente, de um rotor com duplo helicóide (uma espécie de rosca) que gira a uma velocidade constante, garantindo uma boa mistura a cada 3,5 – 4,0 minutos, dependendo de suas características dimensionais.

Sua alta produtividade resulta de um sistema de descarga com comportas pneumáticas instaladas em conjunto com um pulmão (silo de espera) que possibilita a alimentação rápida do misturador garantindo um fluxo alto de produção de até 10 – 12 ciclos por hora. A figura 3.4 mostra um misturador horizontal.

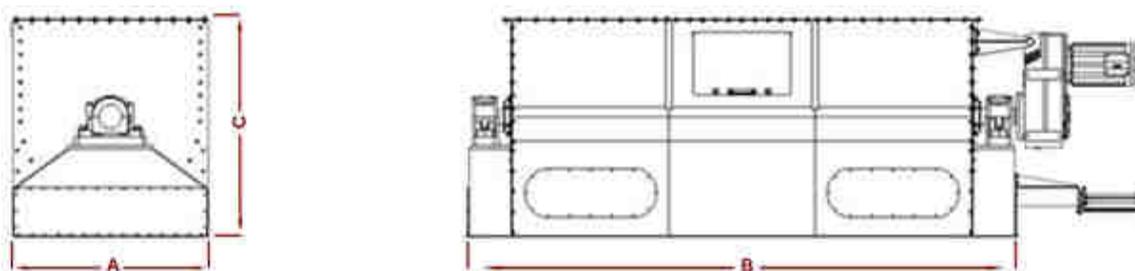


Figura 3.4 – Desenho esquemático de um misturador horizontal. Fonte: Ferraz Máquinas (2009).

C – Misturador de Pás

É um tipo de misturador horizontal cujo uso está crescendo. Sua grande vantagem é a possibilidade de utilização de cargas pequenas, 20 a 30% de sua capacidade máxima (A capacidade pode variar de 01 a 10 toneladas, sendo mais comum encontrarmos misturadores com capacidade de 02 a 05 toneladas, dependendo da densidade das matérias primas).

Todos os misturadores horizontais, sejam de duplo helicóide ou de pás, possuem uma zona morta localizada acima do eixo do rotor, onde a homogeneização não é garantida, principalmente para rações com baixa densidade ou quando a capacidade máxima é excedida. A figura 3.5 mostra um misturador de pás.

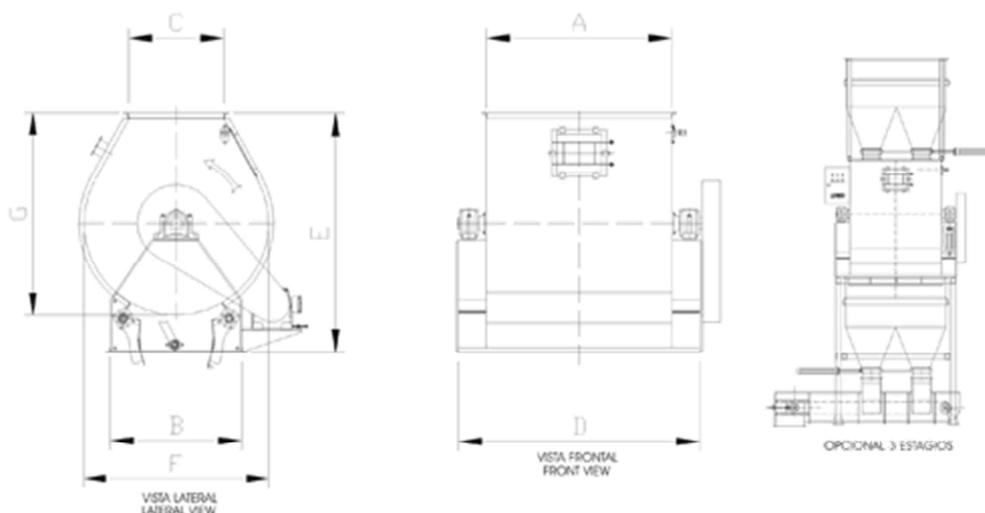


Figura 3.5 – Desenho esquemático de um misturador de pás. Fonte: Ferraz Máquinas (2009).

D – Misturador híbrido

O desenvolvimento de novas tecnologias possibilitou o aparecimento de um modelo de misturador horizontal híbrido com duplo helicóide e pás no mesmo rotor, unindo as vantagens de ambos. Motores com mais potencia são utilizados para reduzir o tempo de mistura para 90 segundos, oferecendo maior produtividade.

Após a mistura pronta, se a ração for farelada basta direcioná-la para os silos de ensaque. Se a ração for peletizada, a mistura é enviada para uma peletizadora. A peletização é um processo muito utilizado na produção de ração, principalmente se tratando de aves e suínos.

O processo de peletização consiste na adição de vapor d'água, com temperatura e pressão controlados, no condicionador e através da câmara de expansão, a massa passa por rolos que a comprimem contra a matriz, uma anel com vários orifícios com diâmetro definido para determinados tipos de rações. Em seguida os *pellets* são cortados no comprimento desejado e resfriados em um resfriador.

Algumas vantagens da peletização:

- aumenta o consumo de ração, mesmo em épocas de calor;
- menor esforço físico para consumir a ração;
- redução da contagem microbológica devido à temperatura e pressão empregadas no processo;
- evita se degradação da ração durante o transporte;
- evita que o frango selecione as partículas da dieta;

- proporciona melhor fluidez em silos e transportadores;
- aumenta a digestibilidade devido à gelatinização do amido;
- apresenta melhor ganho de peso e eficiência alimentar.

São desvantagens da peletização:

- investimento na aquisição do equipamento;
- custos adicionais (vapor, eletricidade, peças de desgaste e etc);
- maior consumo de água por parte dos animais;
- exigência de mão-de-obra mais qualificada;

Quando a ração contém matéria prima de origem animal trata-se de farelo para ser extrusado, que no fluxograma de processo da figura 3.7 é representado pela rota moagem fina.

Para o farelo ser extrusado, é necessário passar por outro processo de moagem mais rigoroso que o anterior e também outro processo de homogeneização, mistura, para depois ser extrusado.

A extrusão é um processo empregado na fabricação de produtos para cães, gatos, peixes e eqüinos. Ela apresenta a vantagem da geletinização do amido, através da adição de vapor e do aumento da temperatura devido ao atrito no interior do equipamento ao longo do processo. A gelatinização consiste na hidratação dos grânulos de amido, com a quebra da estrutura cristalina, através do aumento de temperatura e pressão. A figura 3.6 apresenta o desenho de uma extrusora.

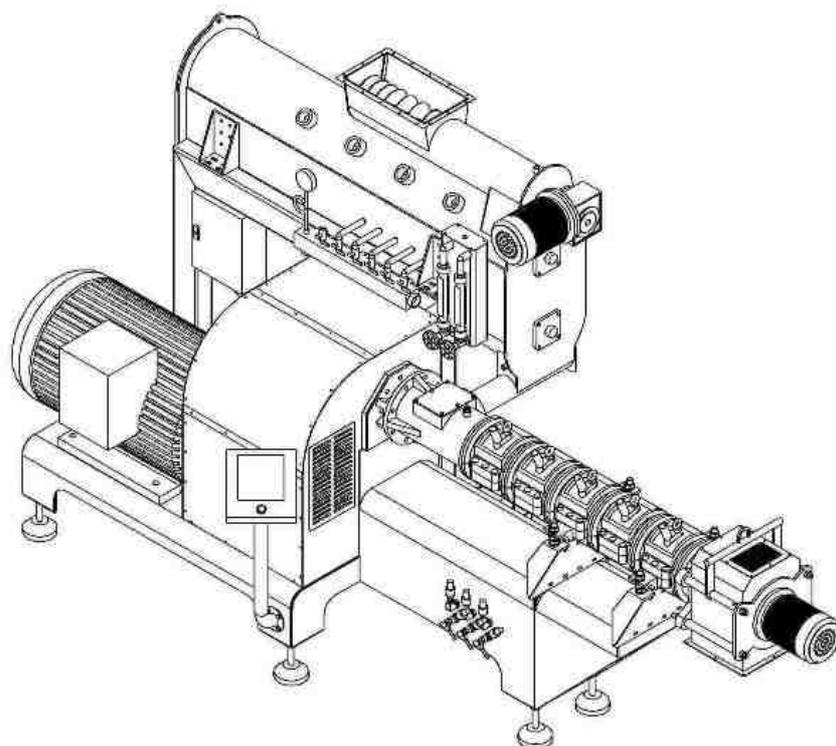


Figura 3.6 – Desenho de uma extrusora. Fonte: www.greenpeças.com.br

As desvantagens são: o custo do equipamento e de seus acessórios, o custo da produção (vapor, eletricidade, desgaste do equipamento e etc) e o custo da mão-de-obra.

Durante todo o processo de produção de ração, como mostra a figura 3.7, temos a adição manual de matéria prima extra silo que são basicamente ingredientes armazenados em sacos, tais como aminoácidos, vitaminas, minerais e corantes. As matérias primas de origem animal também são adicionadas manualmente.

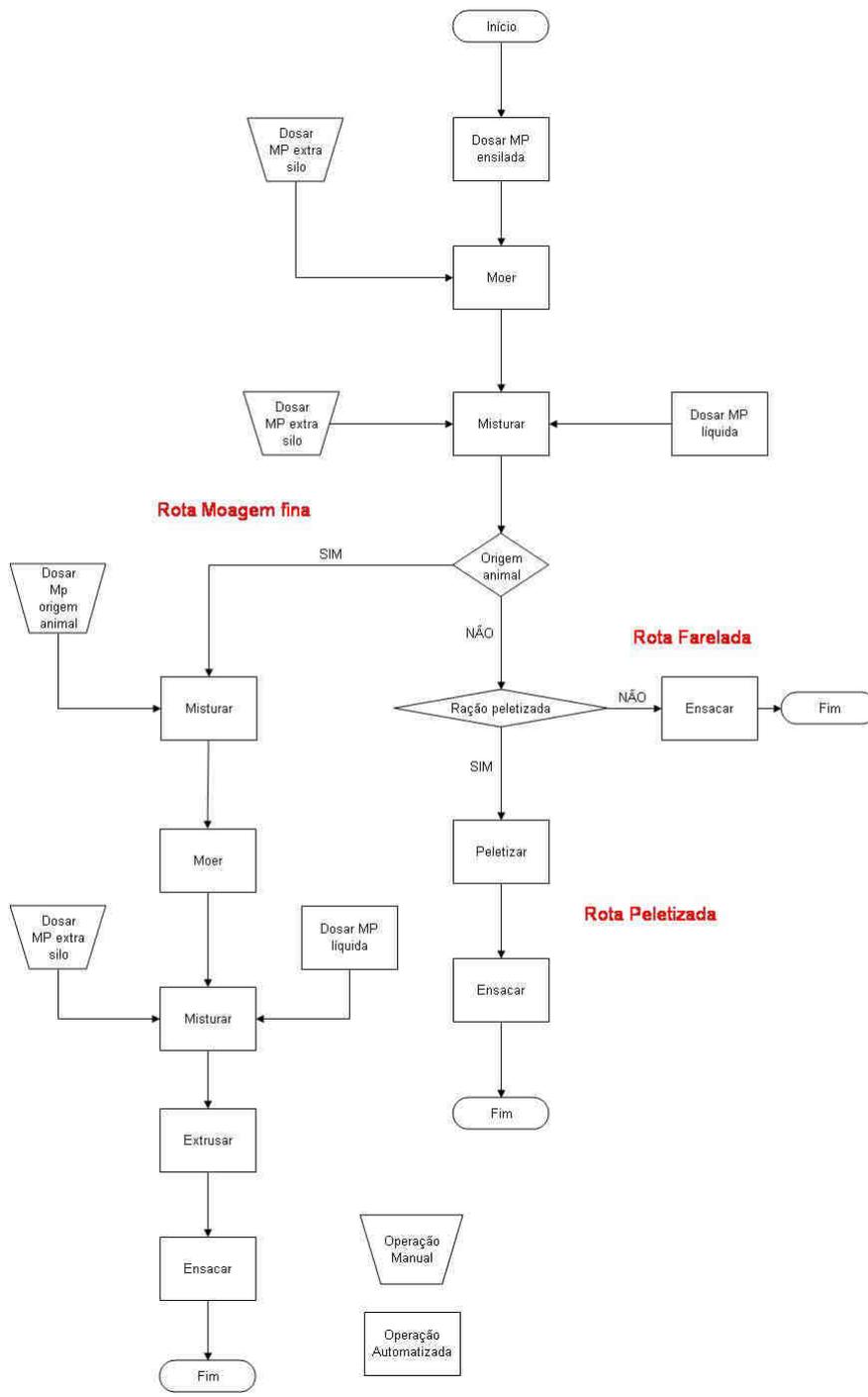


Figura 3.7 – Fluxograma de fabricação de ração da empresa estudada.

4 – O ambiente a ser estudado e o problema

A característica do fluxo de material é um dos fatores que permite definir o termo indústria de processo (TAYLOR, 1979). Como consequência, a essa característica corresponde um ambiente de manufatura com um *layout* específico, como por exemplo, *job shop*, *flow shop* e *project shop*. Segundo Taylor *et al.* (1981), a indústria de processo se posiciona mais próxima do ambiente *flow shop*, podendo ser puro ou híbrido.

A caracterização da indústria de processo como um ambiente *flow shop* puro ou híbrido, segundo Taylor *et al.* (1981), é confirmada através da análise de cluster realizada por Dennis e Meredith (2000a). Essa característica híbrida pode ser observada através do padrão de processos intermitentes e contínuos respectivamente, devido a organização do sistema ser ora funcional e ora por produto, apresentando certo grau de flexibilidade.

Chen e Pidd (2005) denominam esses ambientes de manufatura híbridos, encontrados na indústria de processo, como processos quase-contínuos, que apesar dos sistemas de produção, aparentemente, serem compostos por uma única máquina (um único processo), eles consistem em uma sequência de equipamentos ou máquinas ligados por sistemas de transporte, recebendo como *input* um fluxo de material e resultando como *output* produtos discretos em alta velocidade.

A indústria de nutrição animal, como parte da indústria de alimentos, e conseqüentemente, da indústria de processo por definição, e principalmente a empresa estudada, se encaixa perfeitamente na descrição de processo quase-contínuo elaborado por Chen e Pidd (2005). A caracterização como ambiente de manufatura *flow shop*, apresenta características de processo contínuo, como por exemplo, fluxo previsível, processo inflexível e alto custo de instalação, podendo assim, ser definida como tal segundo Gaither e Frazier (2005).

Na empresa estudada, o *layout* da instalação é por produto em um ambiente de manufatura *flow shop*. Isso pode ser verificado na figura 1.1, que apresenta três rotas diferentes para três tipos de produtos diferentes:

- (i) rota moagem fina para produtos extrusados;
- (ii) rota peletizada para produtos peletizados;
- (iii) rota farelada para produtos farelados.

O objetivo da estruturação do processo produtivo desta maneira é tornar o fluxo

dos produtos mais simples, previsível e fácil de controlar, conforme mencionado por Slack *et al.* (1997).

A definição de processo contínuo, *Production and Inventory Control Handbook da American Production and Inventory Control Society* (APICS, 1997) que nos pareceu mais indicado à indústria alimentícia, elenca algumas características principais:

- (i) disposição linear das máquinas;
- (ii) variação do fluxo de material de acordo com uma taxa de produção específica de cada produto;
- (iii) apresenta rotas específicas para produtos diferentes;
- (iv) a produção é expressa em unidades por período de tempo (exemplo: toneladas por hora);
- (v) o estoque contém apenas matéria prima e produto acabado.

Neste ambiente de manufatura *flow shop* temos alguns processadores em paralelo, e com isso verificamos que o problema a ser estudado torna-se um problema de fluxo de material através desses processadores. A estratégia de produção adotada consiste no máximo aproveitamento da capacidade instalada, pois possui um portfólio acima de 300 SKU resultando, na maioria das vezes, em uma programação acima da capacidade gerando a necessidade da utilização de horas extras acarretando aumento nos custos de produção.

O início do processo consiste em um sistema de silos dosadores, uma balança com capacidade de 2.000 kg, dois moinhos em paralelo com telas de 2,7 mm e um misturador, que geram bateladas de 2.000 kg e que alimentam as três rotas disponíveis. Em cada rota existem outros silos, todos com capacidade para armazenar 20.000 kg de material, seja para processamento ou para ensaque. Este conjunto apresenta uma produtividade média de 17.000 kg por hora, dependendo da quantidade de produtos a serem pesados. Nesta etapa do processo é que o operador, através do sistema de automação, determina o que será produzido, quanto será produzido e para qual silo será enviado. Este mesmo operador, através do sistema de automação, é que opera o misturador e o misturador da moagem fina.

A única rota que não apresenta processadores em paralelo é a rota moagem fina, que possui um conjunto de dois misturadores, dois silos de armazenamento e dois moinhos de alta rotação (3.000 rpm) com telas de 1,2 mm, todos dispostos em um layout linear e com produtividade média de 6.000 kg por hora, dependendo da quantidade de matéria prima de origem animal que será processada.

As outras duas rotas, peletizada e farelada, apresentam dois processadores em paralelo cada uma, e cada processador contém dois silos de armazenamento. A rota peletizada apresenta a peletizadora 1 com produtividade média de 8.000 kg por hora e a peletizadora 2 com produtividade média de 5.000 kg por hora, dependendo da composição do farelo a ser processado. As duas peletizadoras são operadas pelo mesmo operador que determina para qual silo dos ensaques é que os produtos serão enviados.

A rota farelada apresenta dois ensaques, ensaque 1 e ensaque 2, com produtividade variada dependendo da precisão do sistema de pesagem, ou seja, quanto mais rápido é o ensaque maior será a variação na pesagem. Os ensaques também recebem material peletizado, podendo conter em um silo ração farelada e no outro ração peletizada, sendo assim, são disputados pelas duas rotas, farelada e peletizada.

O ensaque 3, com produtividade de 10.000 kg por hora, é dedicado, única e exclusivamente, para a peletizadora 1, sendo assim, os ensaques 1, 2 e 3 trabalham em paralelo quando disputam o fluxo da peletizadora 1.

A proposta deste trabalho é analisar diferentes cenários nesse processo produtivo através da utilização da simulação de eventos discretos. Os cenários serão criados variando as taxas de ensaque. As análises serão baseadas na taxa de utilização de cada processador, para que: (i) o fluxo de produtos seja distribuído entre as rotas de maneira equilibrada; (ii) nenhum processador fique ocioso, (iii) máxima quantidade de produtos produzidos no processo e (iv) racionalização dos custos operacionais em termos de Kwh por tonelada e m^3 de gás por tonelada, quando são sugeridas seis taxas de produtividade idênticas para os ensaques 1 e 2: 20.000 kg/h, 22.000 kg/h, 24.000 kg/h, 26.000 kg/h, 28.000 kg/h e 30.000 kg/h.

Para isso, será utilizado o *software* de simulação Arena[®] versão 11, devido a sua grande popularidade no meio acadêmico e por possibilitar a utilização da metodologia de modelagem por processo.

5 – O Modelo de Simulação

5.1 – Elaboração do modelo

Para a elaboração do modelo de simulação foi utilizada a metodologia de modelagem por processo e adotada a abordagem proposta por Spieckmann e Stobbe (2012) que consistem em modelar cada batelada como uma entidade movendo-se através do modelo de simulação, como forma de viabilizar o uso da simulação de eventos discretos na indústria de processo.

O uso da metodologia de modelagem por processo permitiu o tratamento de cada processo separadamente facilitando, assim, a compreensão e a elaboração do fluxograma do modelo, que se apresenta dividido em sete processos distintos:

- Processo de mistura;
- Processo de moagem fina;
- Processo da peletizadora 1;
- Processo da peletizadora 2;
- Processo de ensaque 1;
- Processo de ensaque 2;
- Processo de ensaque 3.

O modelo completo está representado na figura 8.1, no anexo.

O modelo desenvolvido neste estudo procura reproduzir o sistema de produção da empresa de nutrição animal estudada durante um período de 24 horas (01 dia) a cada execução do modelo de simulação, sendo que todos os tempos utilizados foram em minutos, unidade padrão, devido aos tempos de operação não serem pequenos.

O processo de coleta de dados foi realizado durante os meses de junho e julho de 2015, sempre durante o mesmo turno de trabalho, sempre com os mesmos operadores a fim de minimizar a interferência humana nos tempos de processamento. Foram realizadas 30 coletas de tempo com o auxílio de um cronometro para cada processo descrito a cima. Com os tempos de processamento coletados, constatou-se que não seria possível utiliza-los no modelo sem um tratamento estatístico prévio, pois o sistema de produção analisado é estocástico. O tratamento estatístico dos dados coletados foi realizado no *Input Analyser* do Arena[®] e apresentado na tabela 5.1.

Processos	Distribuição do <i>Input Analyser</i>
Processo de mistura	Normal (7,06, 0,637)
Processo de moagem fina	Normal (18,35, 2,428)
Processo da peletizadora 1	Triangular (11,72; 14,39; 22,74)
Processo da peletizadora 2	Triangular (14,69; 23,48; 38,54)
Processo de ensaque 1	Normal (8,26; 1,249)
Processo de ensaque 2	Normal (7,56; 1,638)
Processo de ensaque 3	Normal (11,83, 1,729)

Tabela 5.1 – Distribuição dos tempos de processamento em minutos no *Input Analyser*.

Durante a construção do modelo de simulação três premissas foram adotadas: (i) toda matéria-prima será convertida em 100% de produto final, (ii) a taxa de escoamento de material particulado e em pó será considerada a mesma e (iii) não serão adotados os critérios de classificação de produtos em contaminantes, contamináveis e neutros, que influenciam o sequenciamento dos produtos.

O *software* de simulação utilizado neste trabalho é o Arena[®] (Arena é marca registrada da *Rockwell Software*) versão 11. O Arena[®] foi escolhido devido a sua grande popularidade no meio acadêmico e por possibilitar a utilização da metodologia de modelagem por processo.

O modelo do processo de mistura

O início do processo de produção de ração é composto por: silos dosadores, balança, moinhos e misturador, já mencionados no capítulo 4. Embora o processo de produção trabalhe em regime de três turnos de revezamento de pessoal, nem todos os processos apresentam a mesma disponibilidade de horas. O processo de mistura trabalha em regime de três turnos de revezamento de pessoal, assim como o processo de moagem fina, como mostra a tabela 5.2.

Disponibilidade do misturador e Moagem Fina			
Início	Fim	Duração (min.)	Obsevação
6:00	7:00	60	normal
7:00	7:15	15	inativo
7:15	18:00	645	normal
18:00	18:15	15	inativo
18:15	0:00	345	normal
0:00	1:00	60	inativo
1:00	6:00	300	normal

Tabela 5.2 – Disponibilidade de horário do misturador e moagem fina.

Essa disponibilidade foi considerada durante a construção do modelo. Para isso, escolheu-se utilizar quatro módulos *Create* para representar a disponibilidade do recurso durante os turnos, como verificado na figura 5.1.

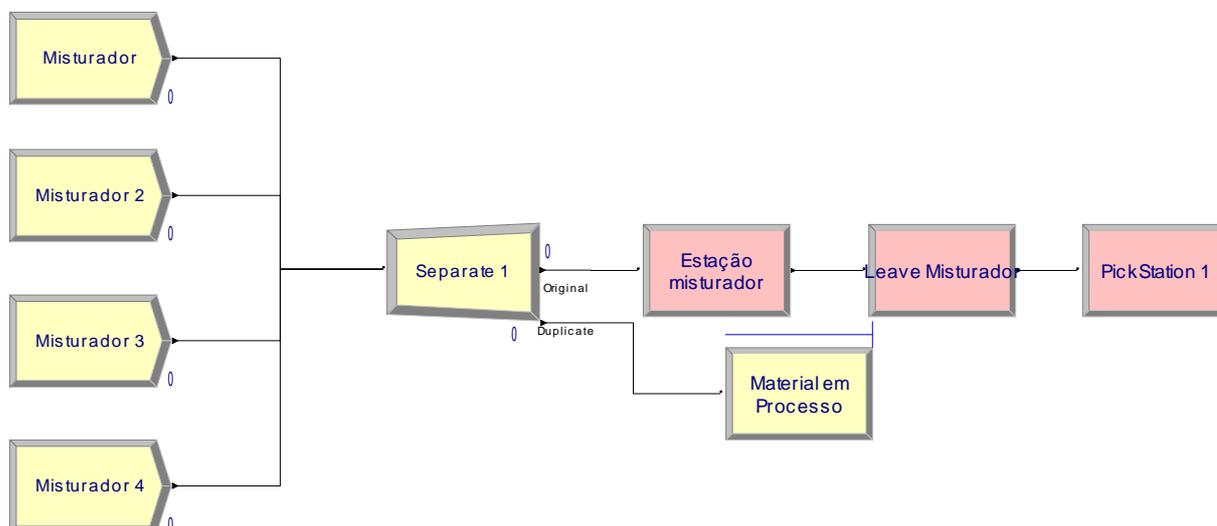


Figura 5.1 – Modelo de simulação do processo de mistura.

Esse modelo simula a opção do operador de escolher o recurso disponível para enviar farelo para ser processado, através do módulo *Pick Station*. Ele também utiliza os módulos *Separate* e *Hold* para garantir que uma sequência de entidades seja enviada para um único recurso, respeitando a sua capacidade. O modelo é composto por: 04 módulos *Create*, 01 módulo *Separate*, 01 módulo *Station*, 01 módulo *Leave* e 01 módulo *Pick Station*.

O modelo do processo de moagem fina

O processo de moagem fina segue a mesma disponibilidade de horas do processo de mistura, como já foi citado e é apresentado na tabela 5.2. A figura 5.2

apresenta o fluxograma do modelo de simulação do processo de moagem fina. Neste modelo utilizamos os módulos *Search* e *Remove* para solicitar ao modelo do misturador as entidades que estão em uma fila chamada material em processo e garantir que seja enviada uma sequência de entidades respeitando a capacidade de armazenamento da rota moagem fina. O modelo é composto por: 01 módulo *Enter*, 01 módulo *Search*, 01 módulo *Remove*, 01 módulo *Dispose*, 01 módulo *Decide*, 02 módulos *Process*, 01 módulo *Assign*, 01 módulo *Leave* e 01 módulo *Dispose*.

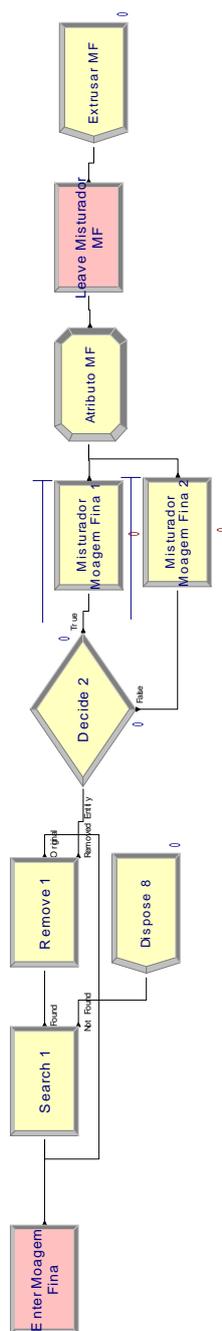


Figura 5.2 - Modelo de simulação do processo de moagem fina.

O modelo do processo da peletizadora 1

O processo da peletizadora 1 segue uma disponibilidade de horário específico, muito diferente da disponibilidade do misturados, como pode ser verificado na tabela 5.3.

Disponibilidade das peletizadoras 1 e 2			
Início	Fim	Duração (min.)	Obsevação
6:00	6:30	30	inativo
6:30	18:00	750	normal
18:00	21:00	180	inativo
21:00	0:00	180	normal
0:00	1:00	60	inativo
1:00	6:00	300	normal

Tabela 5.3 – Disponibilidade de horário das peletizadoras 1 e 2.

O modelo de simulação do processo da peletizadora 1 apresenta os módulos *Search* e *Remove*, que desempenham a mesma função no modelo do processo de moagem fina. Além disso, apresenta os módulos *Separate* e *Hold* que apresentam a mesma função no modelo do processo de mistura. O módulo *Pick Station* simula a opção que o operador tem em escolher o ensaque que estiver disponível, como podemos ver na figura 5.3. O modelo é composto por: 01 módulo *Enter*, 01 módulo *Search*, 01 módulo *Remove*, 01 módulo *Dispose*, 01 módulo *Decide*, 02 módulos *Process*, 01 módulo *Assign*, 01 módulo *Separate*, 01 módulo *Hold*, 01 módulo *Leave* e 01 módulo *Pick Station*.

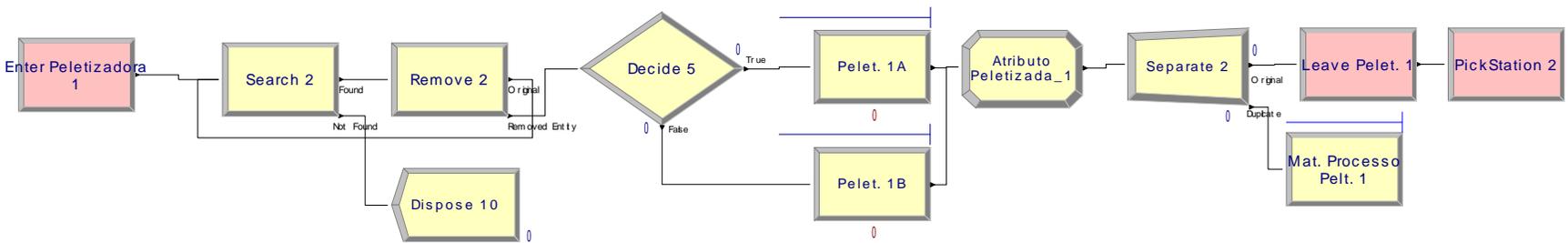


Figura 5.3 - Modelo de simulação do processo da pelletizadora 1.

O modelo do processo da peletizadora 2

O modelo de simulação do processo da peletizadora 2 é idêntico ao modelo do processo da peletizadora 1 representado na figura 5.3, e apresenta a mesma disponibilidade de horário da peletizadora 1 representada na tabela 5.3.

O modelo do processo de ensaque 1

O processo de ensaque 1 segue a disponibilidade de horário representada na tabela 5.4.

Disponibilidade dos ensaques 1, 2 e 3			
Início	Fim	Duração (min.)	Obsevação
7:20	11:20	240	normal
11:20	13:10	90	inativo
13:10	17:20	250	normal
17:20	21:00	220	inativo
21:00	0:00	180	normal
0:00	1:00	60	inativo
1:00	6:00	300	normal

Tabela 5.4 – Disponibilidade de horário dos ensaques 1, 2 e 3.

O modelo de simulação do processo de ensaque 1 apresenta três conjuntos com os módulos *Search* e *Remove*, onde cada um tem a função de procurar as entidades nas filas de processo do misturado e, peletizadora 1 e 2, como representado na figura 5.4. O modelo é composto por: 03 módulos *Enter*, 03 módulos *Search*, 03 módulos *Remove*, 03 módulos *Dispose*, 02 módulos *Decide*, 02 módulos *Process*, 01 módulo *Assign*, 01 módulo *Leave* e 01 módulo *Dispose*.

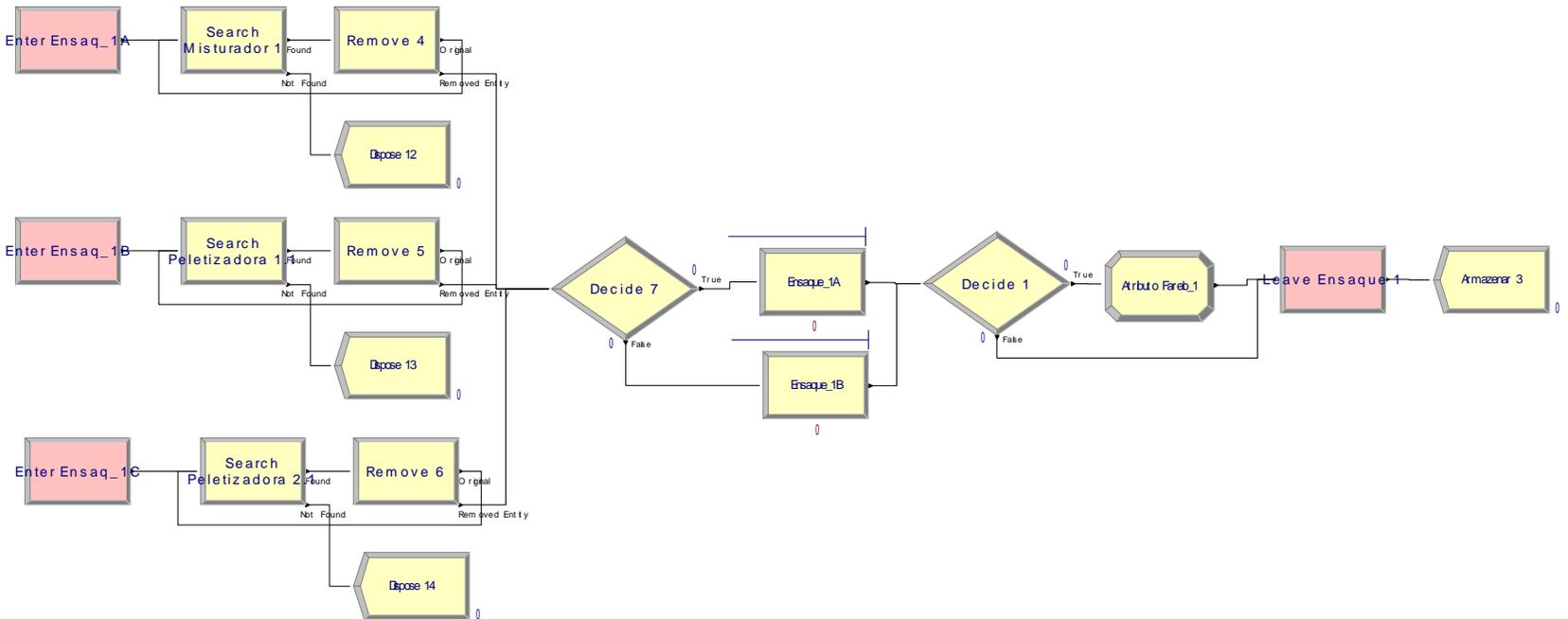


Figura 5.4 - Modelo de simulação do processo de ensaque 1.

O modelo do processo de ensaque 2

O modelo de simulação do processo de ensaque 2 é idêntico ao modelo do processo de ensaque 1 representado na figura 5.4, e apresenta a mesma disponibilidade de horário do ensaque 1 representada na tabela 5.4.

O modelo do processo de ensaque 3

O processo de ensaque 3 segue a disponibilidade de horário representada na tabela 5.4, a mesma dos ensaques 1 e 2.

Ele apresenta uma característica que o diferencia dos outros dois ensaques, ele é exclusivo da peletizadora 1, e sendo assim, o modelo de simulação do processo de ensaque 3 apresenta os módulos *Search* e *Remove*, que solicitam as entidades apenas na fila de processo da peletizadora 1, como representado na figura 5.5. O modelo é composto por: 01 módulo *Enter*, 01 módulo *Search*, 01 módulo *Remove*, 01 módulo *Dispose*, 03 módulos *Decide*, 04 módulos *Process*, 01 módulo *Assign*, 01 módulo *Leave* e 01 módulo *Dispose*.

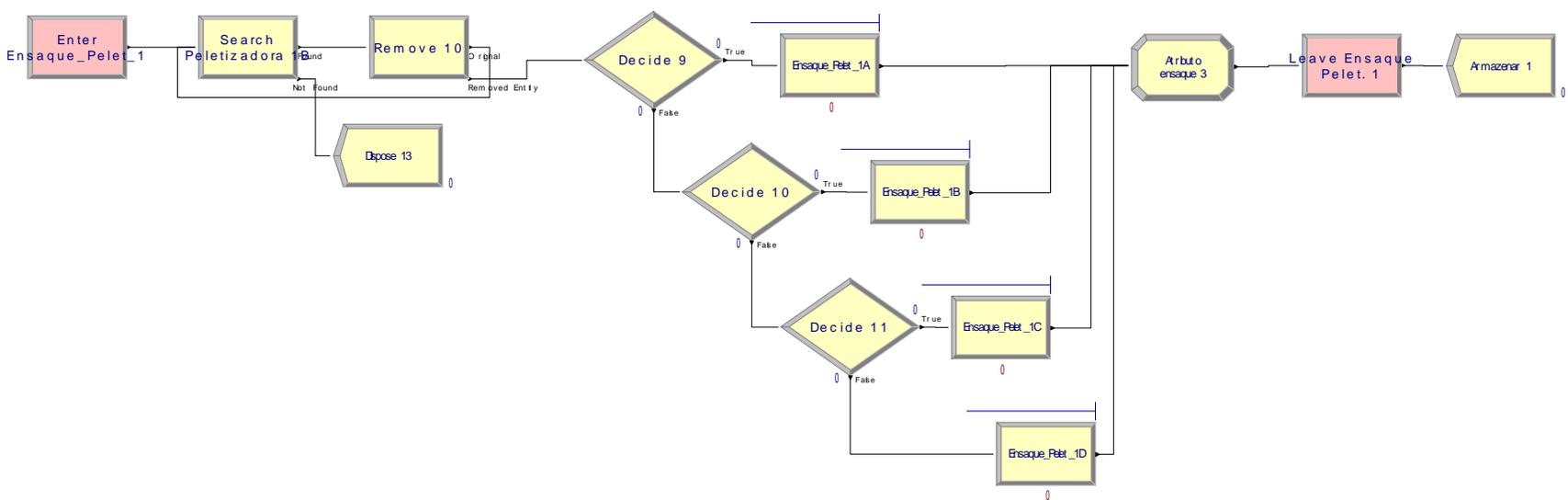


Figura 5.5 - Modelo de simulação do processo de ensaque 3.

5.2 – Verificação do modelo

O primeiro passo na análise do modelo de simulação é a verificação do mesmo, que consiste em verificar o impacto das simplificações e pressupostos no que diz respeito à lógica empregada no modelo. Assim o processo de verificação busca encontrar possíveis erros, “*bugs*”, e assegurar que o modelo irá se comportar como previsto. Para Sturrock (2014), a verificação do modelo deve ocorrer concomitantemente à elaboração do mesmo, sendo um processo iterativo, ao passo que o modelo é elaborado, ele também é verificado. Essa abordagem foi adotada nessa pesquisa.

Para assegurar que o modelo foi verificado e que seu comportamento corresponde ao do sistema estudado, observou-se a movimentação das entidades através da interação dos sete processos e optou-se, também, por verificar cada um dos sete processos, separadamente, que compõem o modelo. Para isso foi adicionado um módulo *Create* no início de cada processo para que possibilitasse a observação da movimentação das entidades, e verificar se todas as restrições de capacidade são respeitadas. Portanto o modelo foi verificado e atende a ao escopo deste trabalho.

5.3 – Validação do modelo

O segundo passo da avaliação do modelo é a validação, que consiste em avaliar o impacto das simplificações e pressupostos nos resultados obtidos durante a execução da simulação, e para que o modelo possa representar a realidade na medida do necessário para atender os objetivos da simulação (STURROCK, 2014). Para Sargent (2003 e 2014), a validação do modelo consiste em determinar que as teorias e hipóteses consideradas na construção do modelo são corretas e a representação do modelo, a estrutura do modelo, lógica e as relações causais são razoáveis para a finalidade do modelo.

Existem muitas técnicas de validação de modelos de simulação disponíveis na literatura. Neste estudo utilizamos como técnica de validação a comparação com dados históricos (SARGENT, 2003 e 2014), devido a disponibilidade dos mesmos. A tabela 5.5 apresenta a comparação dos resultados da simulação com os resultados de produção de um dia do mês de agosto de 2015.

Produto	Simulação (ton)	Real (ton)	Diferença (%)
Farelo	162	154	4,6
Moagem fina	70	68	2,8
Multicomponente	142	139	3,2
Pelete 1	258	249	3,4
Pelete 2	157	151	3,8

Tabela 5.5 – Comparação dos resultados da simulação com um dia de produção.

A tabela 5.5 mostra que a maior diferença em porcentagem em relação a comparação dos resultados da simulação e os resultados de um dia de produção é menor que 5%, portanto podemos considerar o modelo como válido. Os produtos listados na tabela 5.5 são: farelo produzido diretamente do misturador corresponde à ração farelada; moagem fina é o farelo produzido para ser extrusado; multicomponente são todos os produtos obtidos através do ensaie 3 e pelete 1 e pelete 2 são os produtos referentes as peletizadoras 1 e 2 respectivamente.

O objetivo das etapas de verificação e validação é dar credibilidade ao modelo de simulação, pois somente um modelo confiável pode guiar o processo de tomada de decisão gerencial (WILLAMS, 2014).

5.4 – Projeto de experimentos

O projeto de experimentos visa garantir que os dados obtidos através do estudo de simulação são confiáveis estatisticamente (variabilidade), proporcionando mais informações sobre o sistema estudado. Um ponto crítico nesta etapa é a identificação das variáveis de resposta que medem o desempenho do sistema (FREITAS FILHO, 2008). No sistema estudado neste trabalho, a variável de resposta é a utilização dos equipamentos.

Porém, antes de analisar a variabilidade dos dados obtidos no estudo de simulação, é necessário que a execução do modelo atinja a estabilidade, e para isso, é necessário descartar o período transiente no início da execução do modelo. O *software* Arena® permite descartar esse período transiente no início da execução do modelo através da identificação do período de *Warm-up* na caixa de dialogo *Run Setup*, conforme a figura 5.6.

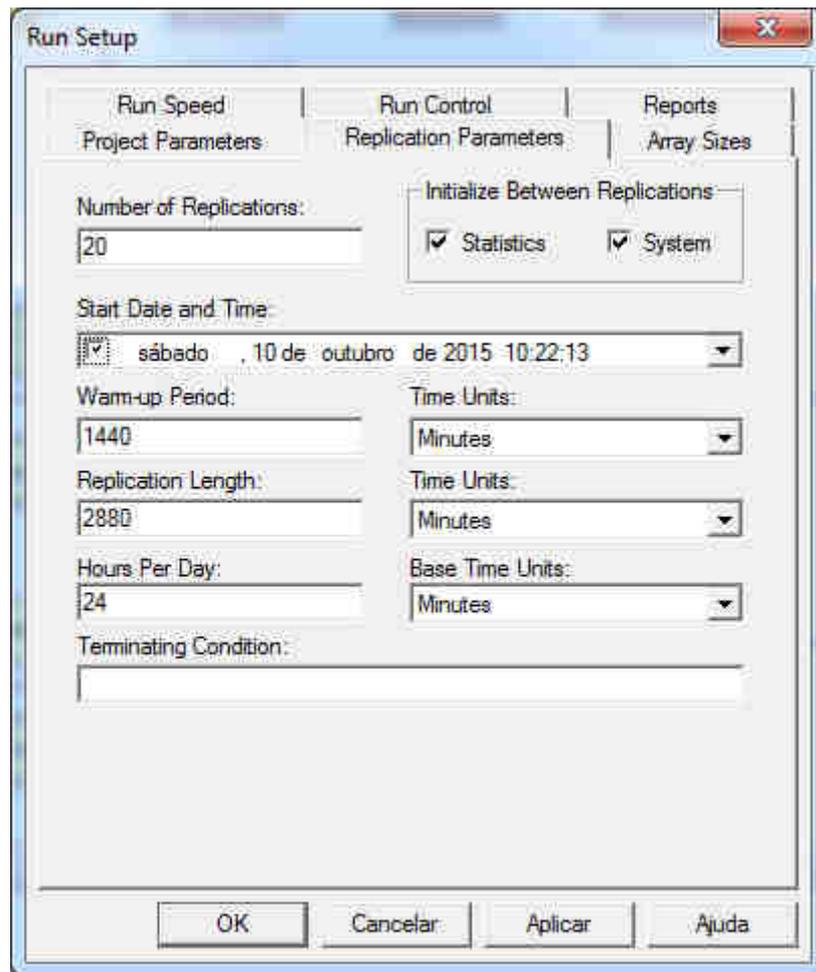


Figura 5.6 – Caixa de dialogo *Run Setup* para determinar o período de *Warm-up*.

O período de *Warm-up* é o período de tempo simulado no qual o modelo necessita para atingir as condições típicas do sistema, em oposição à condição do modelo no tempo zero, vazio e ocioso (WILLIAMS, 2014). Como o modelo estudado reproduz o sistema de produção de uma fábrica de ração em um período de 24 horas (1440 minutos), foi estabelecido como tempo de *Warm-up* um período de 24 horas para que o modelo atinja a estabilidade e que os dados sejam coletados apenas após este período.

O próximo passo é determinar a confiança estatística para a média da variável de resposta, que neste caso será a utilização da peletizadora 1. Esta escolha se justifica, pois, a peletizadora 1 disputa o fluxo de material com mais 3 recursos e tem seus produtos disputados por mais 3 recursos.

Para Freitas Filho (2008) a determinação de intervalos de confiança para as variáveis de resposta é de fundamental importância no processo de análise de

resultados. Um intervalo de confiança possui a probabilidade igual $100(1-\alpha)\%$ de conter o valor da variável de resposta, onde o valor de $100(1-\alpha)\%$ recebe o nome de nível de confiança do intervalo, onde α corresponde ao erro sobre a presença do verdadeiro valor da variável de resposta no intervalo calculado.

Para calcular os intervalos é necessário calcular o semi-intervalo de confiança h , que determina os limites inferior e superior do intervalo de confiança, que no caso da média pode ser descrito com: (média - h , média + h). O cálculo do semi-intervalo de confiança para $n \leq 30$ é dado pela equação 1 (FREITAS FILHO, 2008), onde n é o número de replicações do modelo, S é o desvio padrão da amostra e $t_{n-1,1-\alpha/2}$ é encontrado em uma tabela de distribuição t disponível em qualquer literatura de estatística básica.

$$h = t_{n-1,1-\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}} \text{ (equação 1)}$$

Para se obter a média e o desvio padrão foram realizadas 20 replicações do modelo e os dados sobre a utilização da peletizadora 1 foram coletados do relatório do Arena[®] denominado *Resources*, conforme a tabela 5.6.

Peletizadora 1	
Replicações	utilização
1	0,4652
2	0,4350
3	0,4266
4	0,4724
5	0,4806
6	0,4312
7	0,4558
8	0,4610
9	0,4583
10	0,4138
11	0,4526
12	0,4665
13	0,4784
14	0,4393
15	0,4303
16	0,4766
17	0,4177
18	0,4325
19	0,4720
20	0,4276

Tabela 5.6 – Utilização da peletizadora 1 em 20 replicações

Os dados acima forneceram média igual a 0,4497 e desvio padrão igual a 0,0217. Alimentando a equação 1 com esses dados, temos o valor de h igual a 0,0101621. Desejando-se 95% de confiança estatística para a média, o valor máximo de h deveria ser igual a 0,0224835, que corresponde a 5% do valor da média, portanto, com 20 replicações podemos afirmar que os resultados obtidos durante a simulação e suas variabilidades são confiáveis.

6 – Análise dos Resultados

Com o modelo devidamente verificado, válido e estatisticamente confiável, foram executadas 20 replicações para cada proposta de taxa de ensaue: 20 ton/h, 22 ton/h, 24 ton/h, 26 ton/h, 28 ton/h e 30 ton/h. Também foram executadas 20 replicações com a taxa de ensaue atual, que é de 15 ton/h para comparação dos resultados obtidos.

Os resultados foram coletados através dos relatórios de execução da simulação fornecidos pelo software Arena[®], mais especificamente nos relatórios *category overview* e *resources*. Os dados que mais interessam este trabalho são: utilização (*scheduled utilization*) que representa o percentual de ocupação do tempo disponível e quantidade produzida por cada recurso (*number out*). Esses dados são apresentados na tabela 6.1 e na figura 6.1.

	Utilização de recurso (%)						
	15 ton/h	20 ton/h	22 ton/h	24 ton/h	26 ton/h	28 ton/h	30 ton/h
Peletizadora 1	44,97	38,87	39,18	40,40	38,56	59,43	53,08
Peletizadora 2	60,43	37,29	34,90	36,39	37,23	63,23	64,25
Misturador MF	51,51	49,79	45,51	45,85	43,09	66,87	73,40
Ensaue 1	69,47	58,38	46,35	47,49	54,78	52,12	50,73
Ensaue 2	63,23	48,32	37,98	35,46	42,19	42,72	40,80
Ensaue 3	85,80	81,12	62,24	67,61	72,40	70,13	70,04

Tabela 6.1 – Resultados da utilização dos recursos.

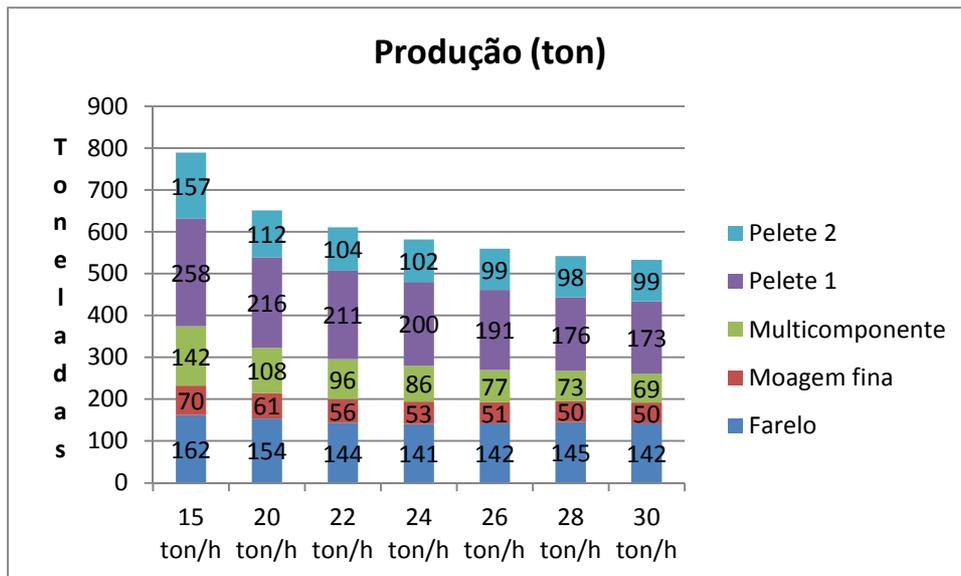


Figura 6.1 – Resultado das quantidades produzidas.

Verificou-se que o aumento da taxa de ensaques não refletiu em aumento da quantidade produzida em nenhum dos casos. Percebe-se que a taxa de utilização de equipamento manteve o mesmo comportamento de queda até a taxa de ensaques de 22 ton/h. A partir da taxa de ensaques de 24 ton/h até 30 ton/h as taxas de utilização dos equipamentos variaram muito, ora subindo e ora descendo, sem que nenhuma hipótese pudesse ser formulada a respeito desse comportamento uma vez que as quantidades produzidas apresentaram diminuição sem haver compensação de fluxo de um equipamento para outro.

Mesmo com o aumento da taxa de ensaques, observou-se que as quantidades produzidas diminuíram. Isso foi possível, pois foram aumentadas apenas as taxas de saída do modelo, ou seja, os ensaques 1 e 2, que competem pelo fluxo de produtos com o misturador MF e as peletizadoras 1 e 2. Por isso decidiu-se incorporar no processo de análise a variação conjunta da taxa de entrada de matéria-prima na tentativa de encontrar a melhor situação de compensação de perda de produção.

O processo de aumento da taxa de entrada de matéria-prima adotado foi iterativo, começando pelo incremento de 1 ton/h na taxa de processamento do misturador, que representa um aumento de 5,9%, passando de 17 ton/h para 18 ton/h. Com isso, novas rodadas de simulação foram executadas, todas com 20 replicações, e os resultados são apresentados na tabela 6.2 e na figura 6.2.

	Utilização de recurso (%)						
	15 ton/h	20 ton/h	22 ton/h	24 ton/h	26 ton/h	28 ton/h	30 ton/h
Peletizadora 1	44,97	50,92	38,73	39,96	39,38	36,54	45,01
Peletizadora 2	60,43	68,27	40,24	34,62	34,33	35,39	42,62
Misturador MF	51,51	52,82	45,88	47,40	44,12	45,74	52,45
Ensaque 1	69,47	78,44	58,96	47,49	40,24	41,91	43,70
Ensaque 2	63,23	72,66	47,09	36,54	34,23	35,17	35,42
Ensaque 3	85,80	93,00	81,88	69,54	62,18	63,60	70,55

Tabela 6.2 – Resultados da utilização de recursos com taxa de processamento do misturador em 18 ton/h.

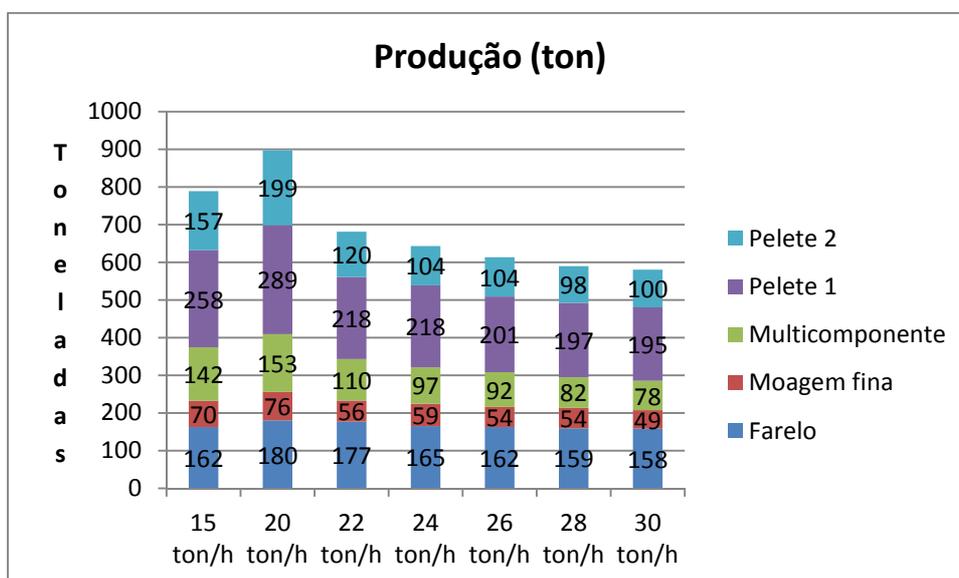


Figura 6.2 – Resultados das quantidades produzidas com taxa de processamento do misturador em 18 ton/h.

Nota-se que com um incremento de 1 ton/h na taxa de processamento do misturador, passando de 17 ton/h para 18 ton/h, possibilita um aumento de 33,33% na taxa de ensaque, passando de 15 ton/h para 20 ton/h, com aumento na taxa de utilização de todos os recursos de no mínimo em 2,5% conforme a tabela 6.3.

	Utilização (%)		
	15 ton/h	20 ton/h	Diferença
Peletizadora 1	44,97	50,92	13,23
Peletizadora 2	60,43	68,27	12,97
Misturador MF	51,51	52,82	02,54
Ensaque 1	69,47	78,44	12,91
Ensaque 2	63,23	72,66	14,91
Ensaque 3	85,80	93,00	08,39

Tabela 6.3 – Aumento na taxa de utilização dos recursos.

Percebe-se que também houve aumento na quantidade de produtos produzidos com o acréscimo de 1 ton/h na taxa de processamento do misturador, quando a taxa de ensaque passa para 20 ton/h, conforme a tabela 6.4. É possível notar, também, que ao aumentar a quantidade de todos os produtos não houve um desequilíbrio significativo na distribuição das três rotas: farelada, peletizada e moagem fina, fato observado, também, com o aumento da utilização dos equipamentos.

	Quantidade produzida (ton)		
	15 ton/h	20 ton/h	Diferença %
Farelo	162	180	11,11
Moagem fina	70	76	08,57
Multicomponente	142	153	07,75
Pelete 1	258	289	12,01
Pelete 2	157	199	26,75
Total	789	897	13,69

Tabela 6.4 – Aumento da quantidade produzida.

Esse aumento na quantidade de produtos produzidos apresenta um reflexo positivo nos custos de produção, energia elétrica e gás natural, conforme mostra a tabela 6.5. Sendo que o consumo mensal de energia é de 450.000 KWh e considerando que um mês tem 20 dias úteis, temos o consumo diário de energia de 22.500 KWh. O consumo diário de gás natural é de 4.500 m³.

Custo de produção			
	15 ton/h	20 ton/h	Diferença %
Qtd. Total produzida	789	897	13,69
Energia (KWh/ton)	28,52	25,08	12,06
Gás natural (M ³ /ton)	5,70	5,02	11,93

Tabela 6.5 – Redução dos custos de produção em termos de energia elétrica e gás natural.

Para avaliar se as demais taxas de ensaques resultam em aumento de utilização e quantidade de produtos produzidos foi necessário aumentar em 2 ton/h na taxa de processamento do misturador, passando de 17 ton/h para 19 ton/h, representando um acréscimo de 11,74 % na capacidade processamento. Os dados obtidos nas 20 replicações do modelo de simulação são apresentados nas tabelas 6.6 e 6.7.

Utilização (%)			
	15 ton/h	20 ton/h	22 ton/h
Peletizadora 1	44,97	56,74	39,65
Peletizadora 2	60,43	73,13	41,39
Misturador MF	51,51	54,36	44,90
Ensaque 1	69,47	81,04	60,97
Ensaque 2	63,23	74,86	51,24
Ensaque 3	85,80	100,88	86,69

Tabela 6.6 – Resultados da utilização de recursos com taxa de processamento do misturador em 19 ton/h.

Percebe-se que com o incremento de 2 ton/h na taxa de processamento do misturador houve um aumento na utilização dos recursos para a taxa de ensaques de 20 ton/h, também houve aumento nas quantidades produzidas, conforme apresenta a tabela 6.7. Porém um dos recursos, o ensaques 3, apresentou uma utilização maior que 100%, o que não é viável. Para a taxa de ensaques de 22 ton/h, observa-se que houve decréscimo na taxa de utilização dos recursos quando comparada com a taxa de ensaques de 15 ton/h, esse decréscimo também ocorre nas quantidades produzidas, exceto para a produção de ração farelada que apresentou um aumento, conforme apresenta a tabela 6.7. As outras taxas de ensaques apresentaram diminuição nas taxas de utilização e quantidades produzidas, comportamento semelhante a taxa de ensaques de 22 ton/h.

	Quantidade produzida (ton)		
	15 ton/h	20 ton/h	22 ton/h
Farelo	162	192	199
Moagem fina	70	80	55
Multicomponente	142	169	119
Pelete 1	258	317	228
Pelete 2	157	215	119

Tabela 6.7 – Resultados das quantidades produzidas com taxa de processamento do misturador em 19 ton/h.

Portanto, com o incremento de 5,9 %, na taxa de processamento do misturador, passando de 17 ton/h para 18 ton/h, é possível obter um acréscimo de 33,33 % na taxa de ensaque, passando de 15 ton/h para 20 ton/h, com aumento da taxa de utilização dos recursos e nas quantidades de produtos produzidos e com redução no consumo de energia elétrica e gás natural por tonelada produzida. Para se obter aumentos maiores que 33,33 % na taxa de ensaque é necessário que a taxa de processamento do misturador sofra um aumento muito significativo, o que resultaria em um esforço financeiro muito expressivo.

7 – Conclusão

A simulação de sistemas permite analisar o comportamento de um sistema real ou não, através de um modelo de simulação que o represente, possibilitando, assim, testar hipóteses, avaliar novos *layouts*, propor melhorias de desempenho etc. Com o desenvolvimento de pacotes específicos de simulação de sistemas, mais especificamente, da simulação discreta, esta ferramenta vem desempenhando um papel muito importante no processo de tomada de decisão.

No caso da indústria de processo, se faz necessário adequar a abordagem do uso da simulação discreta, pois partes significantes do processo produtivo da indústria de processo não são discretos por natureza, assim, todas as características desse sistema produtivo, que pode ser contínuo, batelada (*batch*) ou híbrido, devem ser considerados durante a construção do modelo de simulação. Tal modelo foi usado para representar as características relevantes do processo produtivo estudado, podendo inclusive ser utilizado em futuros trabalhos que envolvam técnicas de otimização.

No caso deste estudo, a escolha de utilizar a simulação discreta justifica-se, pois a mesma permite representar a dinâmica do sistema estudado, possibilitando a análise de resultados através da observação de cenários quando comparada com modelos de otimização.

A empresa estudada apresenta um processo produtivo híbrido, com fluxo de material a granel e a produção de produtos discretos. Esse tipo de empresa apresenta como característica, também, capital intensivo, fluxo previsível e processo inflexível. Essas e outras características foram consideradas na etapa de construção do modelo de simulação e na adequação da abordagem da simulação discreta.

Esse trabalho demonstrou que, mesmo em processos híbridos, o uso da simulação discreta para avaliar a viabilidade de aumento da utilização dos equipamentos e o aumento das quantidades de produtos produzidas, através do aumento da taxa de ensaie foi possível, pois a simulação discreta permite a representação da dinâmica dos sistemas estudados, e com isso possibilita a análise de resultados através da observação de cenários.

Entre todos os cenários observados, o que mais se mostrou favorável para atender todos os objetivos propostos deste estudo de simulação foi o que apresentou um incremento de 5,9 % na taxa de processamento do misturador, passando de 17 ton/h

para 18 ton/h, possibilitando um aumento de 33,33 % na taxa de ensaque, passando de 15 ton/h para 20 ton/h, resultando em um aumento de 13,69 % no total da produção. Este mesmo cenário também se mostrou viável no que diz respeito a redução do consumo de energia, apresentando uma redução de 12,06 % no consumo de energia elétrica por tonelada e de 11,93 % no consumo de gás natural por tonelada.

Como sugestão para trabalhos futuros, um algoritmo de otimização poderá ser desenvolvido, considerando a classificação dos produtos que afeta o sequenciamento na programação da produção, para analisar os possíveis resultados gerados no cenário obtido neste trabalho.

8 – Anexo

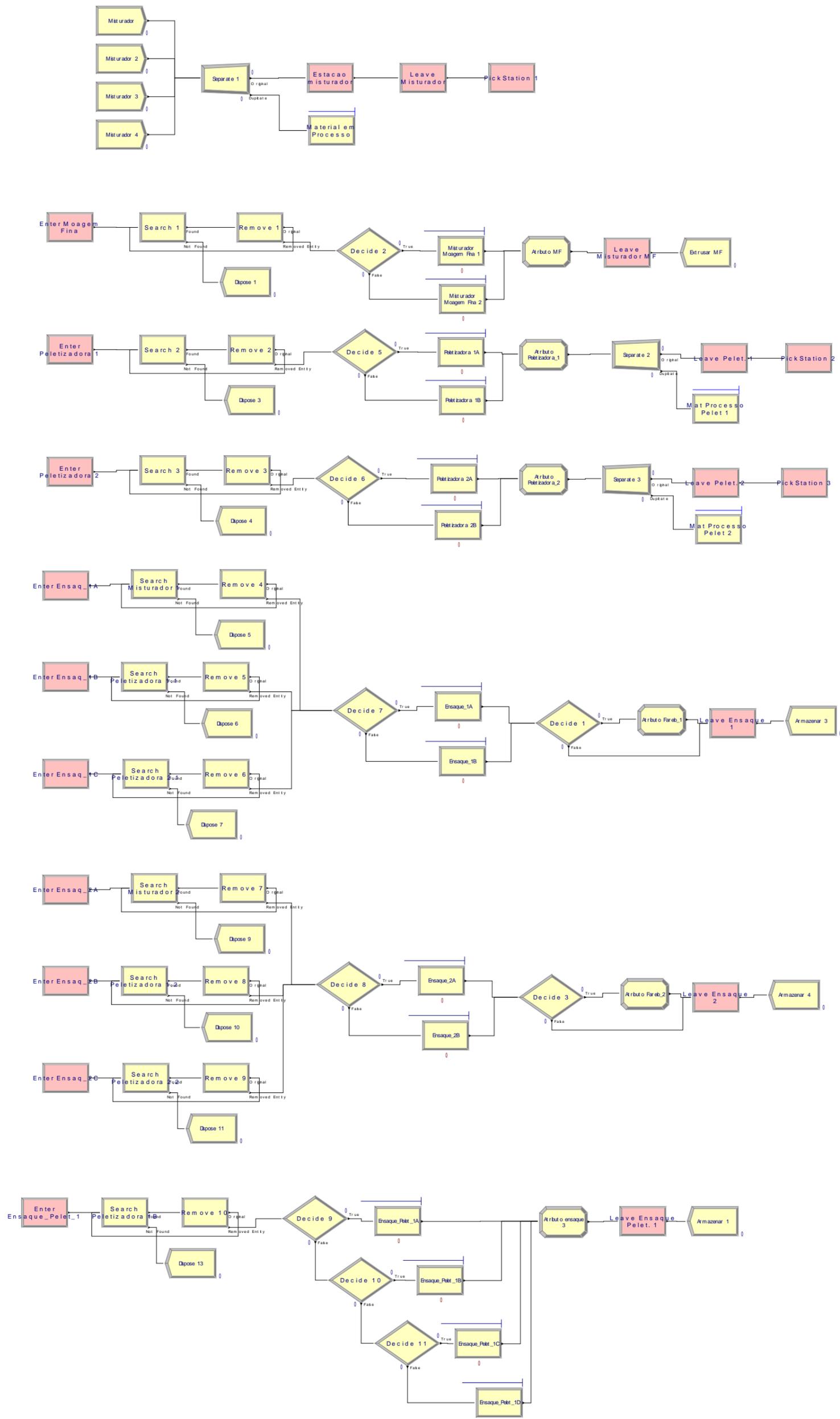


Figura 8.1 – Modelo de simulação completo da empresa estudada.

9 – Bibliografia

American Production and Inventory Control Society (APICS); **Production and inventory control handbook**; Third Edition, New York: McGraw Hill; 1997.

ALEXANDER, C. W. Discrete Event Simulation for Batch Processing. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2006, Monterey, California, USA. **Proceedings...** Monterey, California, USA, 2006. p. 1929-1934.

ALVES, Rubem Azevedo., **Filosofia da ciência - introdução ao jogo e suas regras**. 21.ed. São Paulo: Brasiliense, 1995.

ASHAYERI, J.; HEUTS, R. J. M.; LANSDAAL, H. G. L.; STRIJBOSCH, L. W. G. Cyclic production-inventory planning and control in the pre-Deco industry: A case study. **International Journal of Production Economics**, v. 103, p. 715-725, 2006.

BALDO, T. A.; SANTOS, M. O.; ALMADA-LOBO, B.; MORABITO, R. Na optimization approach for the lot sizing and scheduling problem in the brewery industry. **Computers & Industrial Engineering**, v. 72, p. 58-71, 2014.

BANKS, J.; CARSON II, J.S.; NELSON, B.L.; NICO, D.M., **Discrete-event system simulation**. 5 ed. Upper Saddle River: Person Prentice Hall, 2010.

BELAÏD, R.; T'KINDT, V.; ESSWEIN, C. Scheduling batches in flowshop with limited buffers in the shampoo industry. **European Journal of Operational Research**, v. 223, p. 560-572, 2012.

BOLANDER, S. F.; TAYLOR, S. G. Process flow scheduling: mixed-flow cases. **Production and Inventory Management**, v. 31, n. 4, p. 1-6, 1990.

BOLANDER, S. F.; TAYLOR, S. G. System framework for process flow industries. **Production and Inventory Management**, v. 34, n. 4, p. 12-17, 1993.

CHEN, L.; PIDD, M. High Performance Simulation in Quasi-Continuous Manufacturing Plants. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2005, Orlando, Florida, USA. **Proceedings...** Orlando, Florida, USA, 2005. p. 1367-1372.

CHEN, M.; SARIN, S. C.; PEAKE, A. Integrated lot sizing and dispatching in wafer fabrication. **Production Planning & Control**, v. 21, n. 5, p. 485-495, 2010.

COVEY, R. E. MRP for process manufacturers. **Production and Inventory Management Review and APICS News**, v. 4, n. 3, p. 44-48, 1984.

DENNIS, D. R.; MEREDITH, J. R. An analysis of process industry production and inventory management systems. **Journal of Operations Management**, v. 18, p. 683-699, 2000b.

DENNIS, D. R.; MEREDITH, J. R. An Empirical Analysis of Process Industry Transformation Systems. **Management Science**, v. 46, n. 8, p. 1085-1099, 2000a.

DESSOUKY, Y.; BEAUMARIAGE, T.; ROBERTS, C.; OGLE, M. An intelligent system for batch scheduling for the process industry. **Computers in Industry**, v. 22, p. 233-247, 1993.

FABRÍCIA, A.; STREIT, F.; **Redução de Tamanho: Moagem**; 2000; disponível em http://www.ufrgs.br/alimentus/feira/optransf/opt_moagem.htm. Acesso em 09/06/2009.

FERNANDES, F. C. F.; GODINHO FILHO, M.; **Planejamento e Controle da Produção – Dos Fundamentos ao Essencial**; São Paulo: Editora Atlas, 2010.

FERNANDES, N. O.; SILVA, C.; CARMO-SILVA, S. Order release in hybrid MTO-FTO production. **International Journal of Production Economics** (2015), <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.03.025>.

FERRAZ MÁQUINAS, disponível em <http://www.ferrazmaquinas.com.br/>. Acesso em 09/06/2009.

FRANSOO, J. C.; RUTTEN, G. M. M. A Typology of Production Control Situations in Process Industries. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 14, n. 12, p. 47-57, 1994.

FREITAS FILHO, P. J.; **Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas**, 2ª Edição; Florianópolis; Visual Books; 2008.

GAITHER, N.; FRAZIER, G.; **Administração da Produção e Operações**; 8ª Edição; São Paulo; Ed. Pioneira Thomson Learning, 2005.

GIULIANI DO BRASIL, disponível em <http://www.giulianidobrasil.com.br/>. Acesso em 09/06/2009.

GÜNTHER, H. O.; van BEEK, P. Advanced planning and scheduling in process industry. In: _____; _____. **Advanced Planning and Scheduling Solutions in Process Industry**. Berlin: Springer-Verlog, 2003. p. 1-9.

HAX, A.; CANDEA, D.; **Production and Inventory Management**; Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1984.

HEUTS, R. M. J.; SEIDEL, H. P.; SELEN, W. J. A comparison of two lot sizing-sequencing heuristics for the process industry. **European Journal of Operational Research**, v. 59, p. 413-424, 1992.

HOSSEINPOUR, F.; HAJIHOSSEINI, H.; Importance of simulation in manufacturing. **World Academy of Science, Engineering and Tecnology 51 – International Science Index**, v.3 n.3, p. 285-288, 2009.

HUANG, W. Y.; KE, L.; SHEN, T. Simulation for dedicated line small lot size manufacturing. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2014, Savannah, Georgia, USA. **Procceddings...** Savannah, Georgia, USA, 2014, p. 2640-2648.

HUDA, A. M.; CHUNG, C. A. Simulation modeling and analysis issues for high-speed combined continuous and discrete food industry manufacturing processes. **Computers & Industrial Engineering**, v.42, p. 473-483, 2002.

HUPMAN, A. C.; ABBAS, A. E. Optimizing fixed targets in organizations through simulation. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2014, Savannah, Georgia, USA. **Procceddings...** Savannah, Georgia, USA, 2014, p. 986-995.

INGALLS, R. G. Introduction to Simulation. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2002, San Diego, California, USA. **Proceedings...** San Diego, California, USA, 2002. p. 7-16.

KALLRATH, J. Planning and Scheduling in the Process Industry. **OR Spectrum**, v. 24, p. 219-250, 2002.

KOPANOS, G.M.; PUIGJANES L.; GEORDIADIS, M. C. Optimal Production Scheduling and Lot-Sizing in Dairy Plants: The Yogurt Production Line. **Ind. Eng. Chem. Res.**, v. 49, n. 2, p. 701-718, 2010.

KUMAR, S.; PHROMMATHED, P.; Improving a manufacturing process by mapping and simulation of critical operations. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 17, n. 1, p. 104-132, 2006.

LAKATOS, Eva M., MARCONI, Marina de Andrade. **Fundamentos de metodologia científica**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 1991.

LAW, A. M. How to Build Valid and Credible Simulation Models. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2009, Austin, Texas, USA. **Proceedings...** Austin, Texas, USA, 2009. p. 24-33.

LAW, A. M.; KELTON, W. D.. **Simulation modeling and analysis**. 3 ed. New York: McGraw-Hill, 2000.

LAW, A. M.; McCOMAS, M. G. Secrets of Successful Simulation Studies. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1991, Phoenix, Arizona, USA. **Proceedings...** Phoenix, Arizona, USA, 1991. p. 21-27.

LAW, A. M.; McCOMAS, M. G. Simulation of Manufacturing Systems. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1997, Atlanta, Georgia, USA. **Proceedings...** Atlanta, Georgia, USA, 1997. p. 86-89.

MARIA, A. Introduction to Modeling and Simulation. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1997, Atlanta, Georgia, USA. **Proceedings...** Atlanta, Georgia, USA, 1997. p. 7-13.

MARTINS, Roberto A., **Abordagens quantitativa e qualitativa**. In: MIGUEL, Paulo A.M (org.). Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010, pp.45-61.

MEHRA, S.; INMAN, R. A.; TUIITE, G. A simulation-based comparison of batch sizes in a continuous processing industry. **Production Planning & Control**, v. 17, n. 01, p. 54-66, 2006.

MELLO, B. A.; **Modelagem e Simulação de Sistemas**; Santo Ângelo: Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – Depto. de Engenharias e Ciência da Computação; 2001; apostila de curso.

MIYAGI, P. E.; **Introdução a Simulação Discreta**; São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Depto. de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos; 2004; apostila de curso.

MORABITO, Reinaldo; PUREZA, Vitória, **Modelagem e simulação**. In: MIGUEL, Paulo A.M (org.). Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010, pp.165-194.

MUNHOZ, J. R.; MORABITO, R., Optimization approaches to support decision making in the production planning of a citrus company: A Brazilian case study. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.107, p. 45-57, 2014.

MUŠIČ, G.; MATKO, D. Simulation support for recipe driven process operation. **Computers Chem. Engng**, v. 22, suppl., p. S887-S890, 1998.

NAKHLA, M. Production control in the food processing industry – The need for flexibility in operations scheduling. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 15, n. 8, p. 73-88, 1995.

NEGAHBAN, A.; SMITH, J. S. Simulation for manufacturing system design and operation: Literature review and analysis. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 33, p. 241-261, 2014.

NELSON, N. S. MRP and inventory and production control in process industries. **Production and Inventory Management**, v. 24, n. 4, p. 23–32, 1983.

NEUMANN, K.; SCHWINDT, C.; TRAUTMANN, N. Advanced production scheduling for batch plants in process industries. **OR Spectrum**, v. 24, n. 3, p. 251-279, 2002.

NOVITSKY, M. P. Master production scheduling in process industries. **Production and Inventory Management**, v. 25, n. 1, p. 48–54, 1984.

OJAGHI, Y.; KHADEMI, A.; YUSOF, N. M.; RENANI, N. G.; bin SYED HASSAN, S. A. H. Production layout optimization for small and medium scale food industry. **Procedia CIRP**, v. 26, p. 247-251, 2015.

PARTHANADEE, P.; BUDDHAKULSOMSIRI, J. Simulation modeling and analysis for production scheduling using real-time dispatching rules: A case study in canned fruit industry. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 70, p. 245-255, 2010.

PEGDEN, C. D. Advanced Tutorial: Overview of Simulation World Views. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2010, Baltimor, Maryland, USA. **Proceedings...** Baltimor, Maryland, USA, 2010. p. 210-215.

PEGDEN, C. D. Simio: A New Simulation System Based on Intelligent Objects. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2007, Washington, D.C., USA. **Proceedings...** Washington, D.C., USA, 2007. p. 2293-2300.

PIDD, M. **Computer simulation in management science**. 4 ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2001.

PIDD, M.; Simulating automated food plants; **Journal of the Operational Research Society**, v. 38, n. 8, p. 683-692, 1987.

PRADO, D. S.; **Usando o Arena em simulação**; 3ª Edição; Belo Horizonte; INDG Tecnologia e Serviços Ltda.; 2008; Série Pesquisa Operacional – Volume 3.

RONE Indústria de Máquinas e Comercio Ltda., disponível em <http://www.rone.com.br/>. Acesso em 09/06/2009.

SARGENT, R. G. Verifying and validating simulation models. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2014, Savannah, Georgia, USA. **Procceddings...** Savannah, Georgia, USA, 2014, p. 118-131.

SARGENT, R. G. Verification and validation of simulation models. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2003, New Orleans, Luisiana, USA. **Procceddings...** New Orleans, Luisiana, USA, 2003, p. 37-48.

SEL, Ç.; BILGEN, B. Hybrid simulation and MIP based heuristic algorithm for the production and distribution planning in the soft drink industry. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 33, p. 385-399, 2014.

SCHNELLE, K. D.; BASSETT, M. H. Batch Process Management: Planning and Scheduling. In: KOROVESSEI, E.; LINNINGER, A. A. **Batch Processes**. Boca Raton: CRC Press, 2006. p. 390-416.

SCHUSTER, E. W.; ALLEN, S. J. Capacittated MRP in the Process Industries: Practice and Theory in Consumer Goods Manufacturing. In: APICS International Conference, n. 40, 1997, Washington, DC, USA. **Proceedings...** Washington, DC, USA: APICS, 1997, p. 407-412.

SHANNON, R. E. Introduction to the Art and Science of Simulation. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1998, Washington, DC, USA. **Proceedings...** Washington, DC, USA, 1998. p. 7-14.

SHARDA, B.; BURY, S. J. Evaluating the impact of batch degradation and maintenance policies on the production capacity of a batch production process. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2014, Savannah, Georgia, USA. **Procceddings...** Savannah, Georgia, USA, 2014, p. 2261-2268.

SHARDA, B.; BURY, S. J. Best Practices for Effective Application of Discrete Event Simulation in the Process Industries. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2011, Phoenix, Arizona, USA. **Proceedings...** Phoenix, Arizona, USA, 2011. p. 2315-2324.

SHARDA, B.; BURY, S. J. Bottleneck Analysis of a Chemical Plant Using Discrete Event Simulation. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2010, Baltimor, Maryland, USA. **Proceedings...** Baltimor, Maryland, USA, 2010. p. 1547-1555.

SINDIRAÇÕES (Sindicato das Indústrias de Rações). **“Boletim Informativo do Setor – Dezembro/2014.”** Disponível em: http://sindiracoes.org.br/wp-content/uploads/2014/12/boletim-informativo-do-setor_dezembro_2014_vs_portugues_final-site_baixa-10122014.pdf. Acesso em 13/12/2014.

SINDIRAÇÕES (Sindicato das Indústrias de Rações). “**Indústria de ração está pessimista com o cenário econômico.**” Disponível em: <http://sindiracoes.org.br/industria-de-racao-esta-pessimista-com-o-cenario-economico/>. Acesso em 13/12/2014.

SINDIRAÇÕES (Sindicato das Indústrias de Rações). “**Indústria de ração pisa no freio.**” Disponível em: <http://sindiracoes.org.br/industria-de-racao-pisa-no-freio/>. Acesso em 13/12/2014.

SINDIRAÇÕES (Sindicato das Indústrias de Rações). “**Produção de ração deve crescer 10% em 2008.**” Disponível em: www.sindiracoes.org.br/index.php?option=com_content&task=view&id=242&Itemid=70 . Acesso em 14/09/2008.

SINDIRAÇÕES (Sindicato das Indústrias de Rações). “**Sindirações prevê período de readaptação com fim de alimento barato.**” Disponível em: www.sindiracoes.org.br/index.php?option=com_content&task=view&id=261&Itemid=86. Acesso em 04/03/2009.

SOMAN, C. A.; van DONK, D. P.; GAALMAN, G. J. C. Capacitated planning and scheduling for combined make-to-stock production in the food industry: A illustrative case study. **International Journal of Production Economics**, v. 108, p. 191-199, 2007.

SPIECKERMANN, S.; STOBBE, M. Applications of Discrete-Event Simulation in the Chemical Industry. In: BANGSOW, S. (ed.). **Use Cases of Discrete Event Simulation – Appliance and Research**. Berlin: Springer, 2012. p. 309-319.

STANSFIELD, T.; MASSEY, R.; JAMISON, D. Get more from the future. **Industrial Engineer**, v. 46, n. 3, p. 38-42, 2014.

STURROCK, D. T. Tutorial: Tips for Successful Practice of Simulation. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2014, Savannah, Georgia, USA. **Proceedings...** Savannah, Georgia, USA, 2014. p. 90-96.

TAYLOR, S. G.; BOLANDER, S. F. A framework for flow manufacturing scheduling systems. **Industrial Management**, v. 37, n. 6, p. 1–4, 1995.

TAYLOR, S. G.; BOLANDER, S. F. Process flow scheduling calculations. **Production and Inventory Management**, v. 34, n.1, p. 58–64, 1993.

TAYLOR, S. G.; BOLANDER, S. F. Process flow scheduling principles. **Production and Inventory Management**, v. 32, n. 1, p. 67–71, 1991.

TAYLOR, S. G.; BOLANDER, S. F. Process flow scheduling: basic cases. **Production and Inventory Management**, v. 31, n. 3, p. 1–4, 1990.

TAYLOR, S. G.; BOLANDER, S. F. Process flow scheduling: past, present, and future. **Production and Inventory Management**, v. 38, n. 2, p. 21–25, 1997.

TAYLOR, S. G.; SEWARD, S. M.; BOLANDER, S. F. Why the process industries are different. **Production and Inventory Management**, v. 22, n. 4, p. 9–24, 1981.

TAYLOR, S. Production and inventory management in the process industries: a state of the art survey. **Production and Inventory Management**, v. 20, n. 1, p. 1–16, 1979.

TOSO, E. A. V.; MORABITO, R. Otimização no Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes de Produção: Estudo de Caso numa Fábrica de Rações. **Gestão & Produção**, v. 12, n. 2, p. 203-217, 2005.

WILLIAMS, E. J. Simulation attacks manufacturing challenges. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2014, Savannah, Georgia, USA. **Proceedings...** Savannah, Georgia, USA, 2014. p. 81-89.

WIJNGAARD, J., ZIJLSTRA, P. MRP application in the batch process industry. **Production Planning & Control**, v. 3, n. 3, p. 264-270, 1992.

YILMAZ, L.; TAYLOR, S. J. E.; FUJIMOTO, R.; DAREMA, F. Panel: The future of research in modeling & simulation. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2014, Savannah, Georgia, USA. **Proceedings...** Savannah, Georgia, USA, 2014. p. 2797-2811.

ZANI, ARIIVALDO. Mais tributos, menos investimentos. **Inforleite**, Sorocaba, v.53, p. 36-38, outubro. 2014. Disponível em:< <http://sindiracoes.org.br/mais-tributos-menos-investimentos/>> Acesso em: dez.2014.