



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO

JOSÉ MARIA DE CARVALHO JÚNIOR

SIMULAÇÃO E PLANEJAMENTO DE PRODUÇÃO EM INDÚSTRIAS
ALIMENTÍCIAS DE MÉDIO PORTE: UM ESTUDO DE CASO EM UMA LINHA
DE PRODUÇÃO DE SNACKS

Recife

2022

JOSÉ MARIA DE CARVALHO JÚNIOR

**SIMULAÇÃO E PLANEJAMENTO DE PRODUÇÃO EM INDÚSTRIAS
ALIMENTÍCIAS DE MÉDIO PORTE: UM ESTUDO DE CASO EM UMA LINHA
DE PRODUÇÃO DE SNACKS**

Dissertação apresentada à UFPE para a obtenção de grau de Mestre como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação Profissional em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Pesquisa Operacional.

Orientador: Prof. Dr. Cristiano Alexandre Virgínio Cavalcante

Recife

2022

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz CRB-4 / 2222

- C331s Carvalho Junior, Jose Maria de.
Simulação e planejamento de produção em indústrias alimentícias de médio porte: um estudo de caso em uma linha de produção de snacks / Jose Maria de Carvalho Junior. 2022.
59 f: figs., quads., tabs., abrev. e siglas.
- Orientador: Prof. Dr. Cristiano Alexandre Virgínio Cavalcante.
Dissertação (Mestrado Profissional) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Recife, 2022.
Inclui referências e apêndices.
1. Engenharia de produção. 2. Planejamento de produção. 3. Coleta de dados. 4. Simulação de eventos discretos. 5. ARENA. 6. Programação linear. 7. LINGO. 8. Pequenas e medias indústrias. I. Cavalcante, Cristiano Alexandre Virgínio (Orientador). II. Título.

UFPE

658.5 CDD (22. ed.)

BCTG / 2022 - 425

JOSÉ MARIA DE CARVALHO JÚNIOR

**SIMULAÇÃO E PLANEJAMENTO DE PRODUÇÃO EM INDÚSTRIAS
ALIMENTÍCIAS DE MÉDIO PORTE: UM ESTUDO DE CASO EM UMA LINHA
DE PRODUÇÃO DE SNACKS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Aprovado em: 22 / 02 / 2022

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Cristiano Alexandre Virgínio Cavalcante (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^ª Dr^ª Caroline Maria de Miranda Mota (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. André Luís Policani Freitas (Examinador Externo)
Universidade Estadual do Norte Fluminense

*Ao meu pai **José Maria**, por sempre
acreditar em mim e me apoiar.*

*À minha mãe **Terezinha**, por sua
constante preocupação e interseção
a Deus por mim.*

*À minha esposa **Lays** e minhas
filhas (princesas) **Júlia e Lara**, por
todo amor, compreensão e incentivo.*

RESUMO

A constante busca das indústrias para elevar seus índices de produtividade e reduzir seus custos é indispensável para que possam estar competitivas no mercado. Sistemas de manufatura em batelada costumam apresentar variações de produtos e processos nos sistemas de produção. Planejar e executar essas operações, com excelência, pode ser uma tarefa de difícil execução, devido à variação de demanda e ao surgimento de gargalos e tempos de espera nas linhas de produção, que aumentam os custos associados. Esse trabalho utilizou uma abordagem iterativa simulação-otimização para obtenção de um ótimo planejamento e sequenciamento de produção. A Simulação de Eventos Discretos, modelagem de um sistema com uma sequência discreta de eventos no tempo, tem se mostrado uma eficiente ferramenta de suporte às tomadas de decisão na modelagem de fluxos de trabalho na indústria de transformação, devido ao seu baixo custo, quando comparado à forma empírica, por tentativa e erro. Modelos de programação linear são comuns na busca da melhor programação de produção, especialmente, na redução do *makespan* (duração total da produção) e melhor aproveitamento de recursos. A disponibilidade e a qualidade de dados, fatores imprescindíveis para identificação do comportamento do sistema, são duas das questões mais desafiadoras na realização de projetos de simulação e otimização, especialmente em pequenas e médias indústrias, devido à ausência de investimento na coleta de dados e o complexo mapeamento de diferentes recursos. Um supervisor (*software* para supervisão, controle e aquisição de dados) foi desenvolvido para coleta de dados de forma *online*, através de uma rede industrial entre o servidor e os equipamentos da linha. Após um tempo de replicação de 6 dias, a simulação realizada no *software* ARENA[®] mostrou os gargalos da linha, capacidades produtivas das estações, tempos de espera e, combinado ao planejamento de produção, verificou-se que a maior limitação para um ótimo desempenho da linha é o baixo estoque de segurança dos itens. Novas programações foram realizadas, a partir do *software* de programação linear LINGO, e validadas através da simulação no ARENA[®], considerando um estoque suficiente para uma semana de demanda. O resultado foi a redução de 23,5% da mão-de-obra no estágio de empacotamento e maior produtividade das máquinas programadas.

Palavras-chave: planejamento de produção; coleta de dados; simulação de eventos discretos; ARENA; programação linear; LINGO; pequenas e médias indústrias.

ABSTRACT

The incessant pursuit of industries to increase their productivity rates and reduce their costs is indispensable for them to be competitive in the market. Production systems of batch processing often present product and process variations. Planning and executing these operations with excellence may be an arduous task due to presence of bottlenecks and waiting time in the production lines, that increases associated costs. This work made use of an iterative simulation-optimization approach to obtain optimal production planning and scheduling.. Discrete Event Simulation, modeling of a system as a discrete sequence of events over time, has proven to be an efficient decision support tool to modeling workflows in the manufacturing industry due to its low cost when compared to the empirical approach, guided by trial and error. Linear programming models are common in the pursuit of the best production schedule, especially, in the reduction of the *makespan* schedule (total duration of production) and better use of resources. Data availability and data quality, which are essential factors in identifying system behavior, are two of the most challenging questions in conducting simulation and optimization projects, especially in small and medium enterprises, due to the lack of investment in data collection and the complex mapping of different resources. A supervisory program (a software for supervision, control and data acquisition) was developed to collect data online through an industrial network connecting all the equipment line to the server where the software was installed. After a simulation replication time of 6 days, ARENA[®] software showed the line bottlenecks, station capacities and waiting time. Combining the simulation results with production planning, it was verified that the biggest limitation for optimum line performance is the low safety stock of the items. New production plans were made using the software of linear programming software LINGO and validated through simulation at ARENA[®], considering a sufficient stock for a week of demand. The result was a 23.5% reduction in labor in the packaging stage and a smaller amount of machine stops.

Keywords: production planning; data collection; discrete event simulation; ARENA; linear programming; LINGO; small and medium industries.

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 - Etapas de desenvolvimento do trabalho</i>	<i>21</i>
<i>Figura 2 – Processo Produtivo de produção de Snacks</i>	<i>24</i>
<i>Figura 3 - Layout de Equipamentos da linha de produção</i>	<i>25</i>
<i>Figura 4 - Arranjo Físico da linha de produção</i>	<i>25</i>
<i>Figura 5 - Estrutura sequencial do processo.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 6 - Abordagem de modelagem com classificação de famílias</i>	<i>29</i>
<i>Figura 7 - Arquitetura de Sistema SCADA</i>	<i>30</i>
<i>Figura 8 - Modelo de tela desenvolvida no Software Aveva Edge</i>	<i>31</i>
<i>Figura 9 - Histórico de Vendas.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 10 - Percentual de demanda por dia da semana</i>	<i>32</i>
<i>Figura 11 - Produção e Estoque Acumulado.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 12 - Etapas de uma Simulação.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 13 - Diagrama esquemática mostrando linha de produção</i>	<i>36</i>
<i>Figura 14 - Os artefatos da Modelagem Conceitual</i>	<i>37</i>
<i>Figura 15 - Diagrama de Ciclo Ativo (ACD) do processo estudado.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 16 – Modelo da linha de produção de Snacks no software ARENA</i>	<i>40</i>
<i>Figura 17 - Representação da Produção real em gráfico de Gantt</i>	<i>41</i>
<i>Figura 18 – Comportamento da Produção e Vendas de Snacks</i>	<i>42</i>
<i>Figura 19 – Programação de Produção com objetivo menor makespan</i>	<i>45</i>
<i>Figura 20 - Programação de Produção com objetivo menor número de máquinas em paralelo</i>	<i>46</i>
<i>Figura 21 - Programação de Produção com objetivo menor makespan e ilimitada capacidade de extrusão</i>	<i>46</i>
<i>Figura 22-Percentual em peso por gramatura por sabor: a)sabor 1 b)sabor 2 c)sabor 3 d)sabor 4 e)sabor 5 f)sabor 6.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 23 - Percentual de demanda em peso por sabor.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 24 – Quantidades de máquinas com objetivo de utilização mínima de recursos</i>	<i>49</i>

LISTA DE QUADROS

<i>Quadro 1 - Sequências de processos em arranjo celular</i>	<i>25</i>
<i>Quadro 2 - Sequenciamentos possíveis considerando a etapa final, de empacotamento.</i>	<i>26</i>
<i>Quadro 3 - Classificação de produtos de acordo com as Famílias.....</i>	<i>28</i>
<i>Quadro 4 - Classificação de Produtos Sabor x Gramatura</i>	<i>43</i>
<i>Quadro 5 - Gramaturas trabalhadas em cada máquina.....</i>	<i>43</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 - Distribuição de Probabilidade de acordo com ARENA Input Analyzer</i>	<i>38</i>
<i>Tabela 2 - Comparativo entre produção real e simulada no software ARENA.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabela 3 - Produção com aumento da capacidade do processo de extrusão</i>	<i>42</i>
<i>Tabela 4 - Quantidade de máquinas e horas necessárias com objetivo da redução do makespan (nMaq=8)</i>	<i>48</i>
<i>Tabela 5 - Quantidade de máquinas e horas necessárias com objetivo da utilização da menor quantidade de recursos</i>	<i>48</i>

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CLP – Controlador Lógico Programável

DES – Discrete Event Simulation

IHM – Interface Homem Máquina

MTU – *Master Terminal Unit*

RTUs – *Remote Terminal Units*

SCADA - *Supervisory Control And Data Acquisition*

SQL – *Structured Query Language*

WIP – *Work In Progress*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	JUSTIFICATIVA.....	13
1.2	OBJETIVO	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.2	REVISÃO DA LITERATURA	18
3	METODOLOGIA.....	21
4	PROCESSO ATUAL.....	24
4.1	PROCESSO PRODUTIVO.....	24
4.2	ARRANJO FÍSICO	25
4.3	PLANEJAMENTO DE PRODUÇÃO	26
5	COLETA DE DADOS.....	30
6	PLANEJAMENTO DE PRODUÇÃO.....	32
7	SIMULAÇÃO	34
7.1	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	36
7.2	DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS E PLANO PARA O PROJETO	36
7.3	MODELO CONCEITUAL	36
7.4	COLETA DE DADOS (INSERÇÃO DOS DADOS NA SIMULAÇÃO)	38
7.5	TRADUÇÃO DO MODELO	39
7.6	VERIFICAÇÃO	39
7.7	VALIDAÇÃO	39
7.8	DESENHO EXPERIMENTAL, RÉPLICAS, ANÁLISES	41
8	OTIMIZAÇÃO	43
9	CONCLUSÃO.....	51
	REFERÊNCIAS.....	52
	APÊNDICE A – MODELO MATEMÁTICO DESENVOLVIDO NO SOFTWARE LINGO	58
	APÊNDICE B – GRÁFICOS DE GANTT	59

1 INTRODUÇÃO

As indústrias precisam, constantemente, identificar oportunidades de melhoria em seus processos para aumentar sua produtividade e estarem competitivas no mercado de trabalho. Para Gomes e Trabasso (2016) e Amit et al. (2012), é essencial dispor de tempo para conhecer seus processos, variações e minimização dos gargalos. Devido ao pouco uso de tecnologia recente e ao custo e/ou falta de conhecimento, indústrias alimentícias de pequeno e médio porte apresentam dificuldade na obtenção desses dados (LIONG; HAMID; IBRAHIM, 2016).

Esse trabalho mostra um estudo de caso em uma linha de produção de salgadinhos de milho, em uma empresa de médio porte, localizada no estado de Alagoas.

São observadas oscilações na linha de produção, geralmente devido à disponibilidade dos equipamentos: ora há excesso de produto a ser empacotado, ora equipamentos são parados por ausência destes. São problemas controversos, em sistemas de manufatura, que engenheiros e gerentes estão, continuamente, buscando métodos para eliminar (ZAHRAEE et al., 2014). A proposta é quantificar e entender os gargalos e tempos de espera na linha de produção e sugerir mudanças para que o fluxo de trabalho decorra de forma contínua, sugerindo nova estratégia para planejamento de produção, visto que o dimensionamento dos lotes é a parte mais crucial no planejamento de produção (SAMBATT; WOARAWICHAJ; NAENNA, 2019).

Na linha de produção estudada observa-se um estágio em que a variação nos processos é evidenciada de forma bastante clara: a etapa de armazenamento/acondicionamento do produto extrudado, localizada entre os dois grandes processos: extrusão e empacotamento. Quando o silo de armazenamento do produto extrudado está cheio, a respectiva linha de extrusão precisa ser interrompida, momentaneamente, o que gera paradas e *start-ups* desnecessários, diminuindo a performance da linha, aumento do desperdício e tempo ocioso de alguns colaboradores. Nos momentos em que as empacotadoras demandam mais produto do que a produção dos *snacks* consegue ofertar, é preciso desligar alguma(s) empacotadora(s), até que o nível do pulmão se reestabeleça. Para analisar essas variações, far-se-á uso de Simulação de Eventos Discretos, devido às mudanças do sistema no tempo e por ser uma alternativa de baixo custo, quando comparada a outras alternativas. Quanto ao planejamento de produção, a modelagem matemática será a ferramenta utilizada.

Um supervisório foi desenvolvido, como parte deste trabalho, para coleta dos dados necessários aos processos de simulação e modelagem. A partir de sua verificação e validação, são figuradas algumas sugestões, que serão simuladas, em busca de melhorias nos processos.

Objetiva-se identificar, através da simulação e otimização da programação de produção, o número ideal de empacotadoras disponíveis e de pessoas para atender a demanda de maneira que se

obtenha melhor desempenho da linha produtiva. A partir dessa informação, saber-se-á a produção média esperada do processo de extrusão. Quanto à oscilação atual nos níveis dos silos, cogita-se a instalação de um projeto de automação que mantenha os níveis dos silos em *ranges* pré-estabelecidos com intuito de controlar a vazão da produção de salgadinhos com a finalidade de reduzir as paradas e *start-ups* do processo anterior.

1.1 JUSTIFICATIVA

O desempenho de uma linha de produção é altamente influenciado pelo planejamento, programação da produção e problemas relacionados a gargalos (AMIT et al., 2012; HESHMAT; SHARIEF; SEBAIE, 2013; SAFIZADEH; RITZMAN, 1997; UZSOY; LEE; MARTIN-VEGA, 1992).

Esse estudo de caso busca, a partir da validação do comportamento do sistema, sugerir mudanças (por exemplo: novo *layout*, número ideal de equipamentos na linha, número de funcionários, mudança de processo e/ou planejamento de programação de produção, automação) para ascender sua eficiência, o que levará a um aumento da produtividade e, conseqüentemente, maior chance de competitividade (ABED, 2008; HECKER; HUSSEIN; BECKER, 2010; RANI; ISMAIL; RAHMAN, 2014; TEOH; ITO; PERUMAL, 2017).

Em busca do melhor aproveitamento dos recursos, será feito uso da simulação, por ser um método muito mais barato, flexível, e que não atrapalha o funcionamento das linhas de produção, quando comparado às mudanças físicas (FARIZAL et al., 2021; PEKARČÍKOVÁ; TREBUŇA; MARKOVIČ, 2015). Em paralelo com o real sistema, a simulação é validada, causas e efeitos são identificados e entendidos e as melhorias podem ser testadas no *software* e, posteriormente, após levantadas as consequências, implementadas ao sistema real (RANI; ISMAIL; RAHMAN, 2014).

O uso da otimização junto à simulação tem se firmado uma importante abordagem para suporte à tomada de decisão dentro das empresas. A integração de ambas as ferramentas permite que soluções quase ótimas sejam encontradas a partir da modelagem matemática e verificadas no processo de simulação (GOMES; TRABASSO, 2016; RANI; ISMAIL; RAHMAN, 2014; SAMBATT; WOARAWICHAJ; NAENNA, 2019; VAN DER VORST; TROMP; VAN DER ZEE, 2009).

1.2 OBJETIVO

Objetivo Geral:

Analisar uma linha de produção, a partir de simulação, e desenvolver um modelo matemático, através da programação linear, para otimização do planejamento de produção, com melhor aproveitamento dos recursos e redução de custos.

Objetivos Específicos:

- Desenvolver um supervisor para realizar a coleta de dados de forma automática;
- Construir uma base de dados para analisar o comportamento do sistema;
- Identificar os problemas que estão levando o sistema às filas e tempos de espera;
- Simular a situação atual;
- Verificar e validar a simulação;
- Desenvolver um modelo matemático;
- Validar o modelo matemático;
- Simular mudanças sugeridas durante o trabalho;
- Encontrar a melhor programação de produção com menor *makespan* e/ou melhor aproveitamento dos recursos;
- Realizar comparação em reação aos critérios mais importantes para a gestão;
- Encontrar a melhor alternativa dentre as mudanças sugeridas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Pequenas e Médias Indústrias possuem grande foco em capacidade produtiva e pouca atenção à gestão dos materiais e às paradas por falhas de equipamentos, o que torna difícil o cumprimento do planejamento. Os planejadores de produção devem possuir equilíbrio nesses dois aspectos e possuir uma produção flexível com performance eficiente (VAN WEZEL; VAN DONK; GAALMAN, 2006).

Gargalos e tempos de espera são questões que engenheiros, gerentes e planejadores buscam eliminar em seus processos para que haja crescimento em sua produtividade e competitividade (OBEID; DAUZÈRE-PÉRÈS; YUGMA, 2014). Zahraee *et al.* (2014) evidencia os problemas relacionados à teoria de restrições como minimizadores de desempenho da linha de produção. A existência de filas de produto e de espera nas linhas acarretam aumento de custos produtivos (BARBOSA et al., 2018).

Pequenas e médias indústrias precisam habituar-se à criação e acompanhamento de indicadores em seus processos que as ajude identificar oportunidades de melhorias para suas linhas de produção a fim de aumentar sua produtividade e reduzir os custos no processo, o que possibilitará que se tornem mais competitivas no mercado. Utilização de mão-de-obra, tempos de processamento e tempos de espera são alguns elementos que precisam ser monitorados para reconhecimento de possíveis progressos (AMIT et al., 2012; HASTUTI; YULIANDO; AZIZ, 2015; LIONG; HAMID; IBRAHIM, 2016).

A identificação dos dados de entrada e o processo de coleta são as etapas mais cruciais no processo de construção do modelo, devido à influência destes nos resultados obtidos e o tempo investido. Recepção de dados desnecessários é esforço perdido, ausência de dados vitais acarretará em atraso na simulação. Quando à acuracidade, é preciso encontrar uma correspondência com a realidade atual, livres de viés (DÍAZ; GUTIÉRREZ; HERNÁNDEZ, 2018; ROBERTSON; PERERA, 2002).

Algumas indústrias utilizam sistemas manuais de estudos de tempo, fazendo uso de cronômetros e entrevistas com os colaboradores da planta para coleta de dados das linhas produtivas. Outras, realizam coleta de dados através de sistemas automáticos (CARSON II, 2002; KRISHNAN et al., 2018; LI et al., 2010). Para Mohani et al. (2020), Nitulescu e Korodi (2020), as aplicações de coleta de dados, controle e monitoramento são essenciais para supervisão das linhas de produção na indústria. Aplicações SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*), a exemplo do *software*

Aveva Edge, da companhia *Aveva*, são comumente utilizadas para aquisição de dados diretamente dos equipamentos, através de protocolos de comunicação industrial, como *MODBUS*.

A identificação dos dados de entrada e o processo de coleta são as etapas mais cruciais no processo de construção do modelo, devido à influência destes nos resultados obtidos e o tempo investido. Recepção de dados desnecessários é esforço perdido, ausência de dados vitais acarretará em atraso na simulação. Quando à acuracidade, é preciso encontrar uma correspondência com a realidade atual, livres de viés (DÍAZ; GUTIÉRREZ; HERNÁNDEZ, 2018; ROBERTSON; PERERA, 2002).

A coleta de dados manual exige bastante tempo, além de ser um processo com menor acuracidade no levantamento. Apesar de requerer investimento inicial para uma coleta de dados de forma automatizada, o tempo de coleta, após implementado, será bem menor, podendo ser *online*, ratificando a segurança na coleta (ROBERTSON; PERERA, 2002; RODRIGUEZ, 2015; SKOOGH; JOHANSSON; STAHERE, 2012).

Linhas de produção, quando equipadas com sistemas que colem dados detalhados dos equipamentos, como *DownTime* e *UpTime*, de forma automática, podem oferecer informações que serão utilizadas para encontrar gargalos no sistema. Usualmente pequenas e médias empresas não conseguem realizar essa coleta de forma contínua devido necessidade de investimento e falta de conhecimento (INGEMANSSON; OSCARSSON, 2005; JYOTSNA; SHARMA; KAPADIA, 2017).

A simulação computacional é uma das técnicas mais utilizadas e eficazes para analisar os sistemas de manufatura (GOMES; TRABASSO, 2016). Utilizar modelos virtuais permite que os efeitos e o comportamento do processo de produção sejam analisados, melhorando efetivamente a maneira como a produção opera, sem a necessidade de investimentos ou testes significativos em um sistema real (GOMES; TRABASSO, 2016; HECKER; HUSSEIN; BECKER, 2010; HEREDIA; CEBALLOS, 2018; RODIČ, 2017). Velumani e Tang (2017) afirmam que a DES é uma ferramenta eficaz para analisar operações complexas de fabricação com produtos e variabilidade do processo e que o planejamento de produção precisa obter boa habilidade para cumprir a demanda com menor custo possível.

Para Arohman et al. (2019), as pequenas e médias indústrias são obrigadas a melhorar sua produção, aumentando sua disponibilidade, melhorando a utilização de recursos e reduzindo o *makespan* para que se mantenham competitivas no mercado. As ferramentas de simulação e otimização servem de apoio aos tomadores de decisão para alcançar essas melhorias em uma planta produtiva (BAUDRY; MACHARIS; VALLÉE, 2017; BURSI et al., 2015).

A otimização de Sistemas de Eventos Discretos estocásticos é uma tarefa difícil, presente em um grande número de sistemas de manufatura. Encontrar uma solução ótima para o sistema

geralmente precede de um problema de simulação, com intuito de avaliar a performance do sistema (ALFIERI; MATTA; PEDRIELLI, 2015). Liu et al. (2018) se referem a esses processos como otimização da simulação.

Modelos de Programação Linear Inteira são, comumente, empregados no planejamento de produção com intuito de reduzir o tempo total de produção, através da melhor utilização dos recursos existentes, reduzindo ociosidade de máquinas e pessoas e projetando uma produção do que é, realmente, necessário (FARIZAL et al., 2021; ZENG et al., 2019).

Um dos *softwares* de simulação de manufatura mais utilizados, atualmente, é o ARENA[®]. Utiliza ambiente gráfico, baseado na linguagem de modelagem SIMAN, orientado a transações para a simulação de eventos discretos que consiste, basicamente, em duas partes complementares: o experimento: a estrutura estática, a montagem dos blocos no programa; e o modelo: o processo de simulação (GOMES; TRABASSO, 2016; KELTON; SADOWSKI; ZUPICK, 2015).

Uma simulação de evento discreto, *Discrete Event Simulation* (DES), é caracterizada por mudanças discretas no estado da simulação à medida que a simulação evolui ao longo do tempo. Sistemas de manufatura, onde produtos são processados em diferentes estações e intervalos, e que podem ser definidos quando alguma mudança aconteceu, são exemplos de sistemas que podem ser avaliados usando o DES, o que não acontece em processos de fluxo contínuo (BURSI et al., 2015).

Para realização da simulação, os dados devem ser levantados e inseridos no *software* para a construção do modelo atual. Estes devem representar, de forma fidedigna, o sistema real. De acordo com Suhadak *et al.* (2015), essa fase é importante para gerar confiança no modelo de simulação entre os usuários e os donos do processo: o comportamento e os dados de saída do são verificados e validados com os dados reais.

No modelo matemático de pesquisa operacional, um problema de pequena escala é preparado e resolvido manualmente e através do *software*. O problema é validado quando os resultados de ambos forem iguais (FARIZAL et al., 2021).

Após verificação e validação, simulações são realizadas com sugestões de mudanças no processo. Os cenários propostos são experimentados sem causar implicação no sistema real (HEREDIA; CEBALLOS, 2018). Os impactos decorrentes de cada uma das propostas sugeridas são comparados e o tomador de decisão decide qual cenário é o ideal para aquele momento. Essa comparação, sem modificações reais nas plantas, é uma das vantagens mais significativas da simulação (CARSON II, 2005; SUHADAK; AMIT; ALI, 2015). É importante enfatizar que a simulação apresenta o impacto da decisão no sistema. É o modelo matemático de programação linear que apresenta o resultado ótimo (PEKARČÍKOVÁ; TREBUŇA; MARKOVIČ, 2015).

2.2 REVISÃO DA LITERATURA

Pekarčíková, Trebuňa e Markovič (2015) mostram a aplicação da simulação como um método científico, com destaque à área industrial, com eficiência e economia na implantação de vários projetos para identificar quais as melhores alternativas para aplicação ao modelo real.

Tako e Robinson (2012) e Jahangirian et al. (2010) realizaram levantamento de mais de uma centena de trabalhos com abordagens de simulação como ferramentas de apoio a decisão no contexto logístico e de cadeia de suprimentos e observaram que o DES é a ferramenta mais utilizada.

Abed (2008), Hecker, Hussein e Becker (2015) e Hastuti, Yuliando e Aziz (2015) apresentam estudos de caso realizados em indústrias de panificação, consideradas de pequeno porte. Os autores destacam a grande variedade de produtos nesse modelo de empresa, que dificulta uma programação de produção com ótima utilização dos recursos disponíveis. Nos dois primeiros estudos de caso, os autores fizeram uso da simulação para elevação dos índices de disponibilidade e performance dos equipamentos, conferindo diminuição dos tempos de espera entre eles, o que gera uma redução nos custos de energia e horas trabalhadas. Os autores do terceiro trabalho utilizaram otimização através de programação inteira para redução do tempo total de produção de uma linha de produção com 5 sabores e 8 estágios.

Outro estudo desenvolvido em uma pequena indústria é o trabalho de Arohman et al. (2019). Este é realizado em uma manufatura de tingimento de tecidos de maneira artesanal com 10 estágios desde o corte ao empacotamento do produto final. Através da otimização, busca da melhor programação de produção, com intuito de reduzir tempos ociosos e de *setup*.

Barbosa *et al.* (2018) desenvolveram um trabalho na indústria do segmento *pet* com a finalidade de identificar onde estavam os gargalos e propor melhorias para eliminá-los. Os autores realizaram simulações analisando a disponibilidade de produtos, pela indústria, e a eficiência do setor de carregamento e identificou que o tempo de processo e de espera no carregamento estavam impedindo uma maior lucratividade da empresa.

Um estudo de caso, apresentado por Krishnan *et al.* (2018), foi feito em uma indústria de pneus, fazendo uso do *software* ARENA[®], em conjunto com algumas ferramentas de Gestão da Qualidade (Pareto, 5 porquês e diagrama causa-efeito) para identificar os motivos do gargalo. A simulação mostrou que a instalação de alguns outros equipamentos poderia reduzir, drasticamente, o tempo de espera no sistema e aumentar a produtividade.

Rani, Ismail e Rahman (2014) fizeram uso do *software* ARENA[®] para a realização de diversas simulações para alocação de operadores numa linha de produção de *snack* de mandioca. A partir dos

resultados obtidos na simulação, foram utilizadas técnicas de Análise por Envoltória de Dados para ranquear as alternativas.

Alguns trabalhos fazem uso da simulação junto a ferramentas do *Lean Manufacturing*. (GOMES; TRABASSO, 2016; SUHADAK; AMIT; ALI, 2015). Emmanuel, Goes e Trabasso (2017) sistematizaram a aplicação da simulação junto a um processo de melhoria contínua no chão de fábrica. Os resultados mostram que o tempo investido na modelagem é compensado no suporte à tomada de decisão, visto que as propostas no *kaizen* são, geralmente, um ciclo de tentativa e erro realizado por experimentação direta. Suhadak, Amit e Nazri Ali (2015) aplicaram a simulação utilizando ARENA® e o método Mapeamento do Fluxo de Valor para encontrar o melhor layout em uma indústria alimentícia, com foco nas distâncias entre máquinas, frequência de movimentação e capacidade.

AMIT *et al.* (2012) utilizou simulação com ARENA® para avaliar duas alternativas geradas a partir do procedimento de Planejamento Sistemático de Layout em uma indústria de *snacks*. A avaliação levou em consideração a distância total percorrida, tempo de deslocamento, custo total e capacidade produtiva. O último elemento era bastante importante devido à necessidade de ampliação, especialmente, em períodos sazonais.

Um modelo de simulação foi desenvolvido usando o software ARENA® para ilustrar os processos na produção de molho de pimenta. (LIONG; HAMID; IBRAHIM, 2016). Os elementos focados no trabalho foram: tempos de espera, tempo de processamento por entidade e total, utilização de recursos, número de trabalhadores e quantidade produzida. Os autores encontraram modelos que aumentaria a capacidade produzida reduzindo a utilização dos recursos (máquinas e mão de obra).

Carson (2011) apresenta técnicas e diretrizes para verificação e validação dos modelos de simulação, para que os mesmos possuam credibilidade de prever o mundo real atual e proposto.

Zupan e Herakovic (2015) identificaram que o balanceamento de linhas de produção apresenta resultados consideravelmente mais significativos quando são realizados em combinação com a Simulação de Eventos Discretos, pois oferece a possibilidade de examinar diferentes cenários “e se” de forma fácil e rápida.

O trabalho de Farizal *et al.* (2021) objetiva minimizar o *makespan* e o número de máquinas utilizadas em uma fábrica que manufatura 6 produtos em 4 linhas de produção em paralelo, com um estágio, e cada máquina com velocidades diferentes através da programação inteira utilizando o *software* LINGO® para resolução do modelo matemático. Os autores esperam reduzir, também, os estoques de matérias-primas e insumos e de produtos acabados.

Belkaid, Hadri e Bennekrouf (2018) e LI *et al.* (2010) apresentam metodologias para minimização do *makespan* em máquinas paralelas idênticas considerando único estágio através da otimização.

Um estudo de caso com máquinas paralelas não idênticas em uma planta espanhola de conservas de peixe é apresentado por Georgiadis et al. (2018). O objetivo deste é minimizar o tempo final de trabalho e de *changeovers*¹.

Angizeh et al. (2020) fez uso da otimização em uma indústria de iogurtes que produz 12 sabores diferentes, em 5 linhas de produção, em paralelo, com ênfase na redução de energia elétrica e de recursos humanos.

Yazdi, Azizi e Hashemmipour (2019) realizaram um trabalho em uma empresa de médio porte com objetivo de otimizar seu Sistema de Manuseio de Materiais através do índice *Overall Equipment Effectiveness*. Foram instalados dispositivos para levantamento dos dados de tempos de atividade e espera de cada equipamento, tempos de espera dos materiais em cada estação e calculado para cálculo do OEE. Sugestões foram levantadas e aplicadas em um modelo matemático e, posteriormente, simuladas no *software* ARENA[®] para validação do modelo proposto.

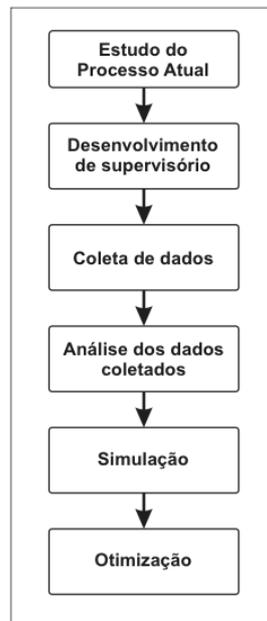
Torres et al. (2020) utilizaram os *softwares* ARENA[®] e LINGO[®] no processo simulação-otimização em uma indústria de mineração para o ótimo planejamento operacional nas minas. São programações realizadas diariamente objetivando a localização dos equipamentos de extração das matérias-primas e dos transportes destes, considerando a composição necessária de cada um deles e a performance e disponibilidade de cada um dos equipamentos.

¹ mudanças que acontecem na linha de produção, como mudanças de sabor e/ou de formato em alguma máquina

3 METODOLOGIA

As etapas para desenvolvimento deste trabalho são representadas na figura 1:

Figura 1 - Etapas de desenvolvimento do trabalho



Fonte: O autor, 2022

Estudo do processo Atual

O trabalho é iniciado com um estudo do processo atual, para que seja possível o desenvolvimento do modelo conceitual de DES no *software* de simulação (KAMARUDIN; RANI; HALIM, 2019; KRISHNAN et al., 2018; VELUMANI; TANG, 2017) e a identificação de todas as suposições e restrições para construção do modelo matemático (BELKAID; HADRI; BENNEKROUF, 2018) e quais dados serão necessários coletar do sistema.

São realizadas entrevistas com gerente da planta, líderes da linha, operadores, embaladoras para que sejam consideradas pontos de vistas de diversas posições.

Desenvolvimento de supervisório

Foi desenvolvido um supervisório no *software* Aveva Edge para realização da coleta de dados necessários, de forma automática, à simulação de eventos discretos e ao modelo matemático.

Extrusoras e máquinas de empacotamento são comandadas a partir de Controladores Lógico Programáveis (CLPs) cujos programas foram desenvolvidos pela própria empresa, o que confere uma vantagem para obtenção dos dados e envio ao supervisório através de uma rede de comunicação

Modbus RTU, protocolo bastante utilizado na indústria pela confiabilidade, velocidade e acessibilidade. (ÁDÁMKÓ; JAKABÓCZKI; SZEMES, 2018).

Coleta de dados

Após desenvolvimento do supervisor e rede de comunicação entre o servidor e os equipamentos estabelecida, os dados que servirão para uma análise mais detalhada do funcionamento do sistema, para simulação e otimização são armazenados, minuto a minuto, em um banco de dados SQL (*Structured Query Language*). Bursi et al. (2015) destaca dados relacionados a reparos e falhas, capacidade de produção e tempo de processamento como essenciais para a representação dos processos de produção na simulação.

Análise dos dados coletados

Os dados coletados são continuamente analisados para verificação/ajuste da etapa anterior. Os dados são analisados analítica e graficamente. Cálculos de disponibilidade e produtividade de cada máquina e gráficos de Gantt são desenvolvidos para melhor visualização e validação.

Simulação

O desenvolvimento do modelo é realizado no *software* Aveva Edge. Com interface gráfica, as estações são representadas por módulos, chamados estações, para representação dos locais por onde as entidades (matérias-primas, produtos em processo) passam por transformação.

Para a simulação, os dados coletados através do supervisor são alimentados no *Input Analyzer*, componente do *software* Aveva, com objetivo de identificar as distribuições de probabilidade que mais se adequam ao comportamento do sistema real para serem utilizadas na simulação do modelo (ABED, 2008; KAMARUDIN; RANI; HALIM, 2019; KRISHNAN et al., 2018).

As distribuições encontradas no *Input Analyzer*, dados de disponibilidade, tempo entre falhas, tempo de falhas de cada recurso são adicionados a cada estação, na etapa de desenho, para identificação, durante a simulação, de tempos de espera e filas no fluxo de materiais (HECKER; HUSSEIN; BECKER, 2010; KELTON; SADOWSKI; ZUPICK, 2015).

Após conclusão da etapa de desenho, o modelo computacional é executado para sua verificação (análise qualitativa do fluxo de materiais) e validação (análise quantitativa entre os dados reais e de saída da simulação). O modelo é considerado validado quando a análise quantitativa apresenta semelhança superior a 90% (CARSON II, 2002; KAMARUDIN; RANI; HALIM, 2019; LIONG; HAMID; IBRAHIM, 2016).

Uma vez verificado e validado, o modelo é confiável o suficiente para sequências de análise e otimização dos processos da linha de produção (HECKER; HUSSEIN; BECKER, 2010). A validação assegura o conhecimento do comportamento de cada estação da linha produtiva, que servirá de insumo para o processo de planejamento de produção.

Através de nova simulação, com a exclusão dos tempos de espera das estações, é possível identificar a capacidade produtiva da linha.

Otimização

Neste trabalho, a eficiência da produção é melhorada através da otimização do planejamento de produção tendo como propósito duas funções objetivo: minimização do *makespan* de produção e minimização do número de máquinas empacotadoras utilizadas em paralelo.

O grande número de variáveis torna o modelo matemático praticamente impossível de ser calculado de forma manual. Posto isto, foi utilizado o *software* LINGO, ferramenta que possui alto poder de otimização linear e não linear para encontrar, a partir de dados de entrada, o melhor resultado de produção (LINDO, 2018).

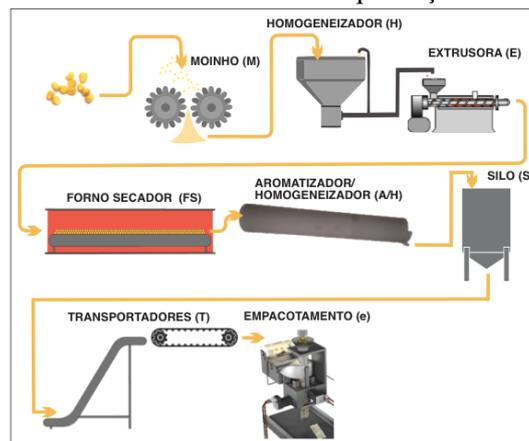
Os dados de saída resultantes do modelo matemático são verificados no ARENA para confirmar se os sequenciamentos de produção são viáveis ao sistema (FIORONI et al., 2008; VIEIRA et al., 2019).

4 PROCESSO ATUAL

4.1 PROCESSO PRODUTIVO

O processo produtivo, apresentado na figura 2, inicia com a moagem do milho degerminado a uma granulometria pré-estabelecida. O produto originado segue para homogeneizadores, responsáveis por fornecer farinha uniforme à etapa seguinte. Na etapa de extrusão, a matéria-prima sofre transformação através de um processo contínuo com alta temperatura e pressão, em conjunto com cisalhamento mecânico, por um curto período de tempo (CHEN et al., 1991). O produto extrudado é transferido para um forno, onde tem sua umidade diminuída, a fim de lhe conferir uma textura crocante. Após secagem, aditivos responsáveis pelo sabor são pulverizados e o produto com aroma é equalizado em um cilindro rotativo. Posteriormente, são direcionados a silos, que funcionam como pulmão, até que sejam transportados por sistemas de esteiras ao sistema de empacotamento automático e subsequente processo de enfardamento e estocagem.

Figura 2 – Processo Produtivo de produção de Snacks

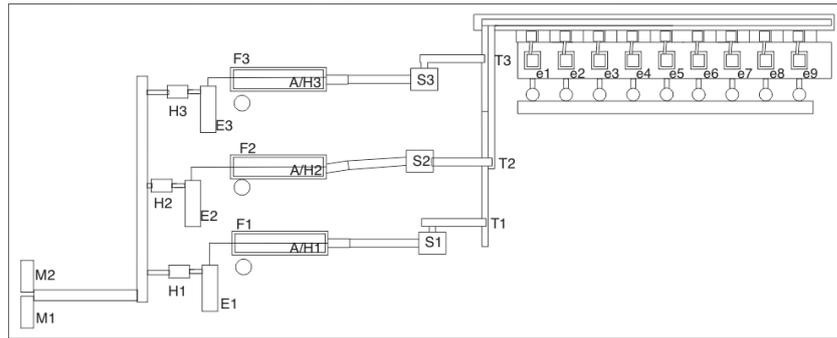


Fonte: O autor, 2022

O *layout* dos principais equipamentos da linha de produção estudada é disposto na figura 3: 2 moinhos (M), 3 linhas de extrusão [homogeneizador (H), extrusora (E), forno secador (FS), aromatizador/homogeneizador (A/H)], 3 silos (S), 3 sistemas transportadores (T), 9 máquinas de empacotamento (e). Os recursos humanos, a cada turma, são compostos por 4 pessoas entre moinhos e silos, 4 operadores das máquinas de empacotar, 13 pessoas no estágio empacotamento, 4 pessoas executando enfardamento e 1 líder de turma, totalizando 52 pessoas nas duas turmas existentes.

A disposição dos equipamentos permite o compartilhamento/mudança das máquinas entre linhas: as extrusoras e os fornos secadores são conectados através de conjuntos de tubulações. É possível que o produto extrudado seja direcionado a qualquer outro forno para secagem, assim como os produtos pós aromatizados/homogeneizados serem conduzidos a qualquer silo com pouca movimentação.

Figura 3 - Layout de Equipamentos da linha de produção



Fonte: O autor, 2022

4.2 ARRANJO FÍSICO

A linha de produção de *snacks* integra atributos dos arranjos físicos funcional e celular. O layout funcional traz, como grande vantagem, a alta taxa de utilização dos equipamentos e flexibilidade de alocação de operações entre as máquinas disponíveis; o arranjo celular garante uma baixa quantidade de trabalho em processo (IRANI; HUANG, 2000, 2006).

Embora as máquinas estejam localizadas similar ao arranjo físico funcional, como mostra a figura 4, suas configurações são dedicadas a células específicas de fabricação (quadro 1).

Figura 4 - Arranjo Físico da linha de produção



Fonte: O autor, 2022

Quadro 1 - Sequências de processos em arranjo celular

Produto #	Sequência
1	M1→H1→E1→FS1→A/H1→S1→T1→e1→F
2	M1→H1→E1→FS1→A/H 1→S1→T1→e2→F
3	M2→H2→E2→FS2→A/H 2→S2→T2→e3→F
4	M1→H3→E3→FS3→A/H 3→S3→T3→e4→F
5	M2→H2→E2→FS2→A/H 2→S2→T2→e5→F
6	M2→H2→E2→FS2→A/H 2→S2→T2→e6→F
7	M1→H3→E3→FS3→A/H 3→S3→T3→e7→F
8	M1→H3→E3→FS3→A/H 3→S3→T3→e8→F
9	M1→H1→E1→FS1→A/H 1→S1→T1→e9→F

Fonte: O autor, 2022

Devido à alta variedade de produtos manufaturados na linha, os fluxos de materiais entre as máquinas sofrem alterações durante os dias de trabalho. Os sistemas transportadores permitem que novas conformações celulares sejam possíveis, sustentando o arranjo físico existente. Considerando 3 produtos em processo distintos nos silos S1, S2, S3, visualizando apenas a etapa final, de empacotamento, existiriam 27 sequenciamentos possíveis (quadro 2). Alcançar a produtividade operacional ideal em sistemas com processamento em lote é um desafio para o planejamento e execução, quando comparado ao processo de produção contínuo, devido à quantidade de variáveis existentes.

Quadro 2 - Sequenciamentos possíveis considerando a etapa final, de empacotamento.

Produto #	Sequência		
1	S1→T1→e1→F	S2→T2→e1→F	S3→T3→e1→F
2	S1→T1→e2→F	S2→T2→e2→F	S3→T3→e2→F
3	S1→T1→e3→F	S2→T2→e3→F	S3→T3→e3→F
4	S1→T1→e4→F	S2→T2→e4→F	S3→T3→e4→F
5	S1→T1→e5→F	S2→T2→e5→F	S3→T3→e5→F
6	S1→T1→e6→F	S2→T2→e6→F	S3→T3→e6→F
7	S1→T1→e7→F	S2→T2→e7→F	S3→T3→e7→F
8	S1→T1→e8→F	S2→T2→e8→F	S3→T3→e8→F
9	S1→T1→e9→F	S2→T2→e9→F	S3→T3→e9→F

Fonte: O autor, 2022

4.3 PLANEJAMENTO DE PRODUÇÃO

O planejamento e programação de produção têm se tornado cada vez mais complexos nas indústrias alimentícias. Variabilidade da demanda, níveis de estoque de segurança, declínio da qualidade do produto, *shelf life*², são fatores que contribuem para a dificuldade no dimensionamento e programação de lotes. Adicionalmente, a diversidade de produtos aumentou bastante nos últimos tempos, o que obrigou as indústrias a participar do aumento de variabilidade, requerendo flexibilidade e coordenação eficiente dos recursos (CLAASSEN et al., 2016; DOGANIS; SARIMVEIS, 2008; MÉNDEZ et al., 2006; TOMOTANI; DE MESQUITA, 2018).

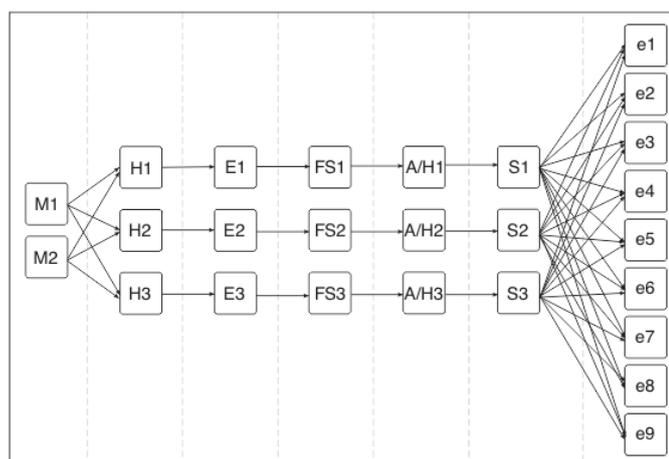
A integração do dimensionamento e programação de lotes é crucial para muitas empresas. O dimensionamento do lote procura determinar o momento e o nível ideal de produção, minimizando a soma dos custos de *set-ups* e tempo de espera. O sequenciamento estabelece a ordem na qual os lotes são executados dentro de um período de tempo, contabilizando os tempos e custos de configuração dependentes da sequência (CLARK; ALMADA-LOBO; ALMEDER, 2011).

Apesar da grande variedade de produtos fabricados, diariamente, suas produções envolvem os mesmos processos, diferenciando-se, apenas, na utilização de alguns equipamentos que funcionam

² prazo de validade de produtos perecíveis

em paralelo. São processos de múltiplos estágios, onde produções paralelas obedecem o mesmo sequenciamento, passando por cada estágio (MÉNDEZ et al., 2006; SUNDARAMOORTHY; MARAVELIAS, 2008). A figura 5 mostra a estrutura sequencial do processo, iniciando com os moinhos M1 e M2, que alimentam as linhas de extrusão em paralelo e finalizam com as máquinas de empacotar e_n .

Figura 5 - Estrutura sequencial do processo



Fonte: Adaptado de Méndez, 2006

Além da incerteza em relação à demanda, eventos imprevistos têm relação com o planejamento de produção. Alguns requerem ações imediatas, como quebras de máquinas, outros podem ser ignorados sem causar muito dano, exemplo da produção finalizada antes do planejado (VAN WEZEL; VAN DONK; GAALMAN, 2006).

A linha de produção sob estudo é responsável pela produção de 34 itens, que podem ser caracterizados por sabor, material de embalagem, gramatura da embalagem primária (peso de produto na embalagem), gramatura da embalagem secundária específicos para cada produto. O planejamento de produção é realizado diariamente pelo líder da primeira turma seguindo uma política de fabricação para estoque de acordo com a quantidade de segurança de cada item, que é definida através do comportamento da demanda dos últimos 3 meses, a cada dia da semana e sazonalidade. As quantidades a serem produzidas podem sofrer variações durante o dia devido os possíveis eventos citados no parágrafo anterior. O local de armazenamento de produtos acabados possui capacidade para, aproximadamente, 0,6 semana de vendas.

Os agrupamentos são baseados em similaridades entre produtos, processos e/ou custos em relação a *changeovers* (ALMADA-LOBO et al., 2015; CLAASSEN et al., 2016; KOPANOS; PUIGJANER; MARAVELIAS, 2011; MÉNDEZ et al., 2006; TEOH; ITO; PERUMAL, 2017). O planejador utiliza a caracterização por sabor e tipo (gramatura e material de embalagem) para realização do cronograma de produção, juntamente com a compatibilidade das máquinas de empacotamento com cada tipo.

A classificação das famílias, na linha de produção estudada, é realizada em relação aos sabores, devido ao acréscimo em custo e tempos de processos de ajustes da linha, quando produtos de famílias distintas são processados na mesma linha (KOPANOS; PUIGJANER; GEORGIADIS, 2009). O quadro 3 apresenta a classificação dos produtos de acordo com as famílias e tipos.

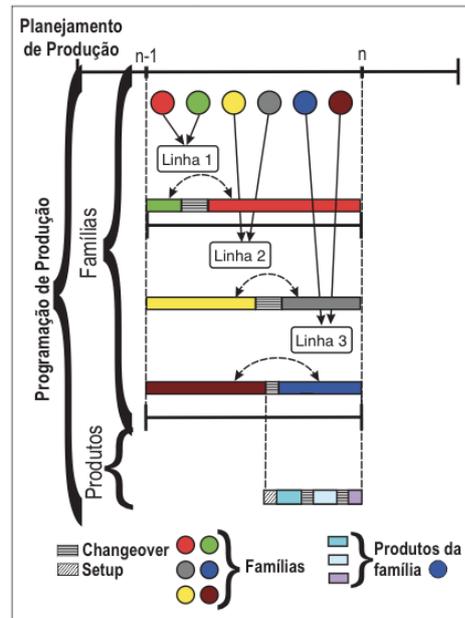
Quadro 3 - Classificação de produtos de acordo com as Famílias

Famílias	Produtos	
Família 01 Sabor 01	Tipo 01	Produto 01
	Tipo 02	Produto 02
	Tipo 03	Produto 03
	Tipo 04	Produto 04
	Tipo 05	Produto 05
	Tipo 06	Produto 06
	Tipo 07	Produto 07
Família 02 Sabor 02	Tipo 01	Produto 08
	Tipo 02	Produto 09
	Tipo 03	Produto 10
	Tipo 04	Produto 11
	Tipo 05	Produto 12
	Tipo 06	Produto 13
	Tipo 07	Produto 14
Família 03 Sabor 03	Tipo 01	Produto 15
	Tipo 02	Produto 16
	Tipo 03	Produto 17
	Tipo 04	Produto 18
	Tipo 05	Produto 19
	Tipo 06	Produto 20
	Tipo 07	Produto 21
Família 04 Sabor 04	Tipo 03	Produto 22
	Tipo 04	Produto 23
	Tipo 05	Produto 24
Família 05 Sabor 05	Tipo 01	Produto 25
	Tipo 02	Produto 26
	Tipo 03	Produto 27
	Tipo 04	Produto 28
	Tipo 05	Produto 29
	Tipo 06	Produto 30
	Tipo 07	Produto 31
Família 06 Sabor 06	Tipo 03	Produto 32
	Tipo 04	Produto 33
	Tipo 05	Produto 34

Fonte: O autor, 2022

A figura 6 apresenta uma abordagem de programação de produção caracterizada em famílias, no período entre $n-1$ e n , onde três linhas (linha 1, linha 2, linha 3) trabalham em paralelo, produzindo itens de 2 famílias diferentes cada (linha 1: vermelho e verde; linha 2: amarelo e cinza; linha 3: azul e marrom), que por sua vez são divididos em itens provenientes de cada uma das famílias (representados pelos retângulos menores da família de cor marrom).

Figura 6 - Abordagem de modelagem com classificação de famílias



Fonte: Adaptado de Kopanos *et al.*, 2011

Considerando a classificação mostrada no quadro 3, a programação de produção apresentada na figura 6 mostra a previsão de produção de 6 famílias divididas nas 3 linhas existentes dentro do período $n-1$ a n . Os produtos finais são apresentados pelos retângulos na parte inferior, empacotados em suas respectivas gramaturas e materiais de embalagem. Os retângulos hachurados entre famílias e produtos das famílias são *setup* e *changeovers* nos equipamentos, operações que aumentam custos produtivos pela diminuição da disponibilidade dos equipamentos, perda de materiais e utilização de recursos humanos (ALMADA-LOBO *et al.*, 2015; SEL; BILGEN; BLOEMHOF-RUWAARD, 2017)

5 COLETA DE DADOS

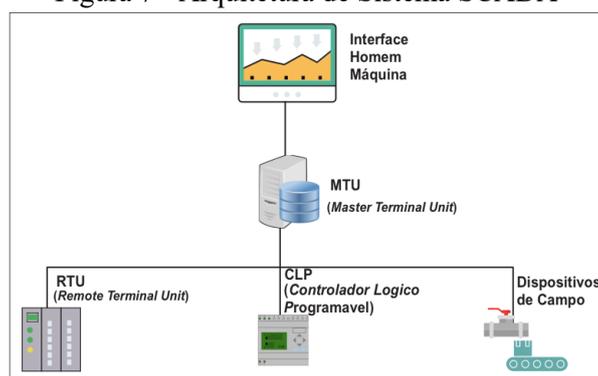
Dados coletados anteriormente a este trabalho limitavam-se a quantidades de recursos utilizados (matérias-primas e ingredientes, embalagens, recursos humanos) com periodicidade semanal e itens produzidos, diariamente, e de forma manual. Estes dados eram insuficientes para realização dos processos de simulação e otimização.

Tempo de disponibilidade, tempo entre falhas, tempo de falhas, família (sabor), tipo de produto empacotado, produção/minuto, capacidade de produção são dados necessários ao processo de simulação. A grande quantidade de dados necessários, acuracidade, e tê-los instantaneamente são fatores que contribuíram para a escolha de realizar a coleta de dados dos equipamentos de forma automática.

No âmbito deste trabalho, foi desenvolvido um supervisor, através do *software* Aveva Edge, para realização da coleta de dados da linha de produção, onde o servidor era conectado a todos os equipamentos da linha, por comunicação industrial *MODBUS*.

Softwares que utilizam sistema SCADA são comumente utilizados para monitorar e controlar os processos das indústrias. O sistema é composto por: MTU (*Master Terminal Unit*), responsável pela coleta de dados dos terminais remotos e pela lógica de controle, usualmente um servidor; RTUs (*Remote Terminal Units*) que trocam dados com o MTU; dispositivos como controladores lógico programáveis (CLPs), responsáveis pelo funcionamento da máquina; e dispositivos de campo, como sensores e atuadores - Figura 7 (ÁDÁMKÓ; JAKABÓCZKI; SZEMES, 2018; DANEELS; SALTER, 1999; PLIATSIOS et al., 2020).

Figura 7 - Arquitetura de Sistema SCADA

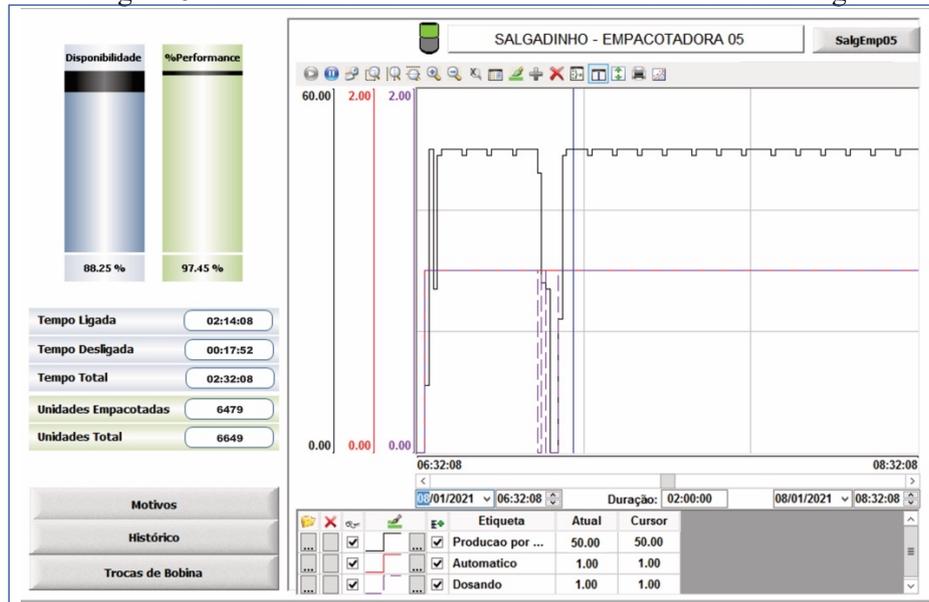


Fonte: Adaptado de Pliatsios et al. (2020) e Ádámkó et al., 2018

Um modelo de tela desenvolvida no Aveva Edge é mostrado na figura 8. Os índices disponibilidade e performance são calculados, respectivamente, por: razão entre o tempo de máquina ligada e o tempo em que estava programada para operar; quociente entre a quantidade de pacotes que

foram dosados e número de embalagens total que passaram pela máquina (a diferença entre ambos são embalagens vazias que somam às perdas). Embalagens que receberam produtos, mas estão fora do padrão de qualidade são a outra parte de desperdício.

Figura 8 - Modelo de tela desenvolvida no Software Aveva Edge



Fonte: O autor, 2022

Com os dois percentuais mencionados e o índice de qualidade (razão entre produtos bons e produtos empacotados) é possível obter, multiplicando os três, o OEE (*Overall Equipment Effectiveness*), dado fundamental para as equipes entenderem melhor os equipamentos e estabelecer, a partir destes, melhorias (SOHAL et al., 2010).

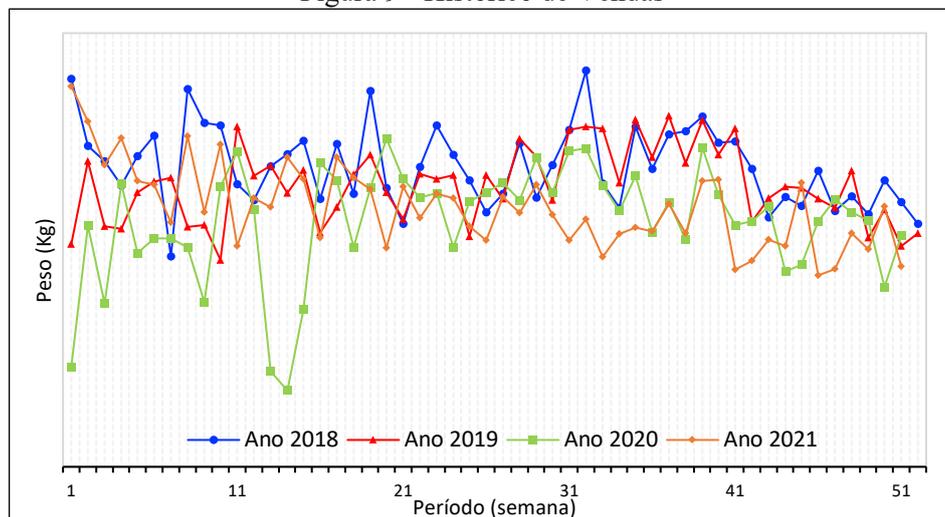
A tela do supervisor (figura 8) mostra, à direita, um gráfico *online* da quantidade de pacotes dosados por minuto (linha preta contínua), o período em que a máquina está ligada (linha vermelha contínua) e o período em que está acontecendo empacotamento de produto (linha lilás tracejada).

6 PLANEJAMENTO DE PRODUÇÃO

O planejamento de produção é realizado a partir da análise de estoque, histórico de vendas e capacidade produtiva. Um ERP (*Enterprise Resource Planning*) é utilizado para gerenciamento e armazenamento de todas as movimentações de produção e vendas, integrado, também, ao BI.

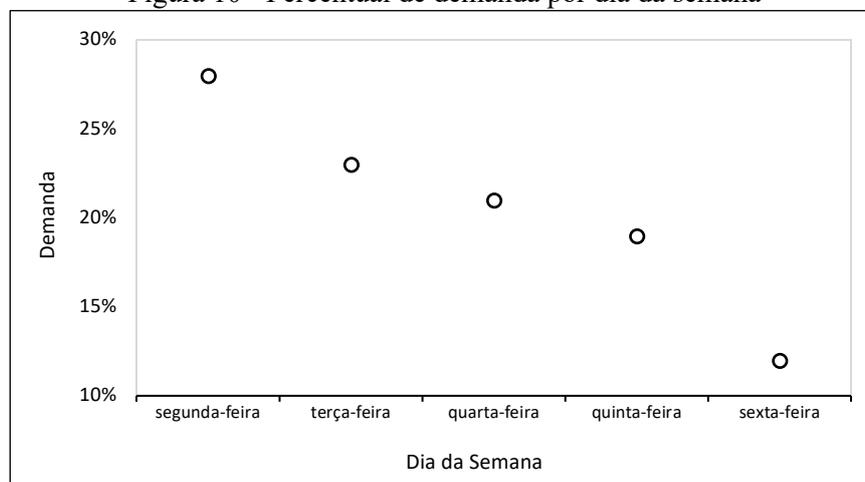
As figuras 9 e 10 apresentam gráficos gerados a partir de dados do ERP. A figura 9 mostra o histórico da demanda da seção de *snacks* por 4 anos, em semanas (eixo x) por peso, em kg (eixo y). É perceptível a similaridade do comportamento anual, um fator que contribui para um planejamento a longo prazo. A figura 10 mostra o percentual médio da demanda a cada dia da semana, contribuindo para uma maior assertividade na programação diária, visto que esta é feita diariamente, como mencionado no tópico 4.3. O comportamento das vendas nas semanas 13 e 14 de 2020 mostram impacto da pandemia covid-19.

Figura 9 - Histórico de Vendas



Fonte: O autor, 2022

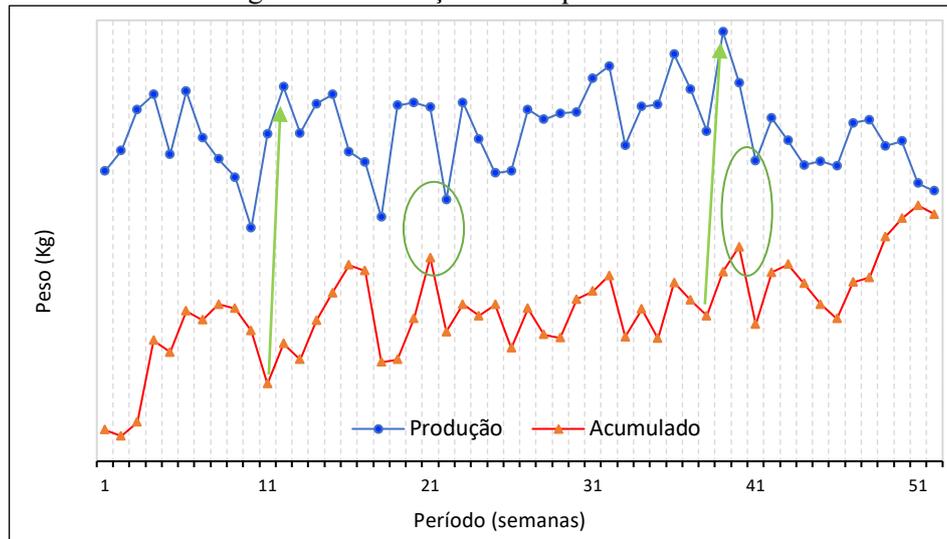
Figura 10 - Percentual de demanda por dia da semana



Fonte: O autor, 2022

Analisando o histórico de produção e estoque acumulado (figura 11), observa-se a relação existente entre ambos os fatores: no período em que a quantidade de produtos acabados é alta, a produção, na semana seguinte, sofre diminuição; o inverso também é verdadeiro: quando o estoque está baixo, a produção é aumentada no próximo período. As elipses, em verde, evidenciam o primeiro comportamento; as setas, o último. As reações de diminuição ou aumento de produção acontecem para controle da quantidade de produtos acabados no estoque.

Figura 11 - Produção e Estoque Acumulado



Fonte: O autor, 2022

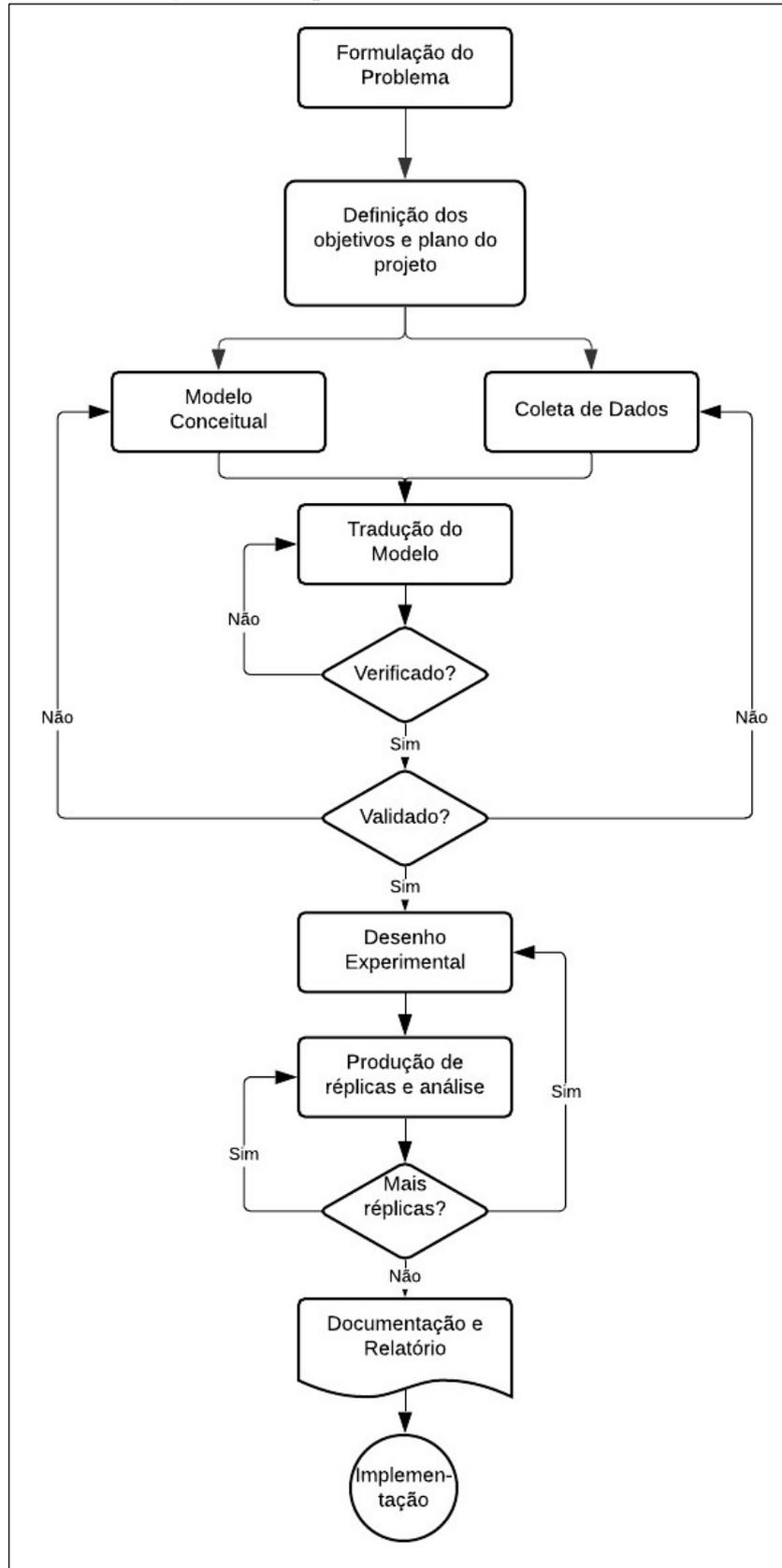
7 SIMULAÇÃO

A simulação é uma poderosa ferramenta para modelagem e análise de sistemas complexos, visto a dificuldade ou impossibilidade de resolução de problemas reais por métodos analíticos. É amplamente utilizada como ferramenta de suporte à decisão em problemas como estimativa de capacidade instalada, decisões de *mix* de produtos, *layouts* para linhas de produção e estocagem (ALTOK; MELAMED, 2007; VAN DER VORST; TROMP; VAN DER ZEE, 2009).

O modelo é definido como descritivo, pois o conteúdo a ser inserido no modelo é existente, seja por levantamento de dados reais ou requisitos e esboços pensados pelo desenvolvedor, guiadas por um conjunto de metas prescritas (HELDAL et al., 2016).

A simulação deve iniciar com a declaração do problema, que pode ser reformulada à medida que o projeto caminha. Há cenários em que se sabe que há um problema, no entanto, não se conhece a natureza do mesmo. Na etapa seguinte, deve-se especificar quais as respostas devem ser respondidas pelo processo de simulação e desenhar um plano geral contendo informações dos *stakeholders*, custo e etapas do trabalho. Os próximos passos são: construir um modelo que resulte em uma aproximação útil do sistema real e, em paralelo, iniciar a coleta de dados, que é responsável por grande parcela do tempo total do projeto. O programador deve decidir qual linguagem de programação e *software* realizar a modelagem, conhecido como tradução do modelo. Após desenho deste, deve haver verificação se o *layout* do programa possui o mesmo comportamento que o processo produtivo real. Após verificação, o modelo deve ser validado, realizando simulações e comparando os resultados de saída do sistema com os dados já conhecidos do processo real. O desenvolvedor irá definir os cenários que serão simulados: quais as modificações serão realizadas no modelo computacional construído e validado com finalidade de encontrar os resultados para cada proposta, que serão analisados na etapa seguinte. A partir da observação dos resultados, o analista determina se são necessárias novas réplicas e quais cenários, sejam existentes ou se haverá criação de novos. Quando os resultados forem suficientes, os programas devem ser documentados e reportados para futuras análises e possíveis modificações e, logo, implementados. O processo de simulação não é um processo linear que segue a sequência mencionada. Os estágios são refinados várias vezes durante o processo de simulação por meio de uma série de iterações no ciclo de vida do projeto (BANKS et al., 1984). A figura 12 apresenta o fluxograma de cada estágio.

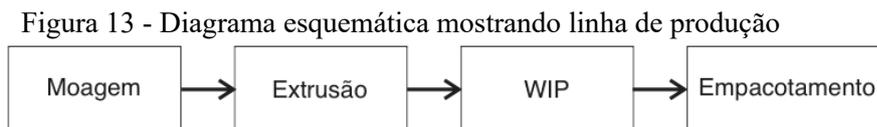
Figura 12 - Etapas de uma Simulação



Fonte: BANKS et al., 1984

7.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

A partir de conversas com os líderes e gerente, o principal problema identificado na linha foi a variação da quantidade de produtos no estágio *WIP (Work In Progress)*, devido à necessidade de planejamento de produção de 2 ou 3 famílias em paralelo para empacotamento em máquinas com limitado conhecimento de seus comportamentos, o que confere ociosidade de máquinas e recursos humanos ou excesso de produtos, forçando paradas nos processos anteriores. A figura 13 representa um diagrama esquemático de forma simplificada da linha estudada.



Fonte: O autor (2022)

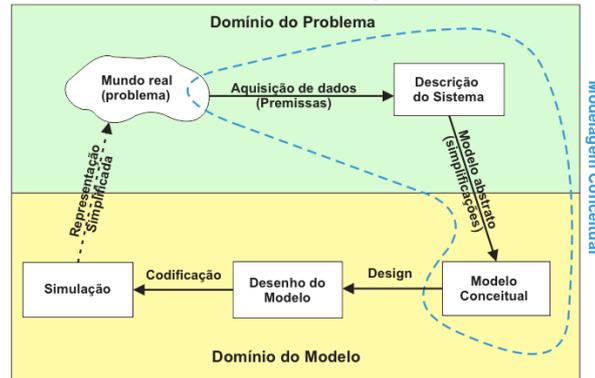
7.2 DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS E PLANO PARA O PROJETO

A empresa busca identificar, através da modelagem, as principais causas do ponto de estrangulamento que acontece no estágio anterior ao empacotamento, propor e simular as soluções para, juntamente com o planejamento de produção, ter uma produção mais uniforme, com intuito de reduzir os custos inerentes aos baixos índices de disponibilidade e performance, paradas e *setups* dos equipamentos e ociosidade de recursos humanos.

7.3 MODELO CONCEITUAL

O modelo precisa detalhar os elementos determinantes da linha necessários à solução do problema. Operações que não sejam essenciais na análise devem ser agrupadas e representadas de forma simplificada, componentes que não são necessários devem ser excluídos, fornecendo menor tempo necessário a esta etapa. É difícil definir métodos e procedimentos para o modelo conceitual por ser uma descrição em um modelo computacional, descrevendo entradas, saídas, conteúdo, suposições e simplificações (ROBINSON, 2008). A modelagem é o entendimento abstrato do processo real, modeladores distintos apresentarão conceitos diferentes para o mesmo problema (WANG; BROOKS, 2007). A figura 14 mostra a modelagem conceitual dentro do processo geral de simulação segundo Robinson (2016).

Figura 14 - Os artefatos da Modelagem Conceitual



Fonte: ROBINSON, 2016

Entradas, ou fatores experimentais, são dados inseridos no modelo responsáveis por melhor compreensão da situação do problema. As saídas são valores que traduzem se os objetivos estão sendo alcançados e norteiam em direção ao motivo, caso não estejam sendo atingidos. Suposições são feitas por crenças ou incertezas em relação ao sistema. As simplificações são feitas com intuito de minimizar o tempo de modelagem, contanto que não influencie no resultado do modelo (ROBINSON, 2016).

Tempos de espera, *WIP*, média, desvio padrão, quantidades absolutas de cada equipamento, disponibilidade do equipamento são dados de saída para determinar o cumprimento dos objetivos e razão pela qual não foram atingidos. Exemplos de fatores experimentais são: programação de produção, taxa de empacotamento/máquina, vazão de produto por linha.

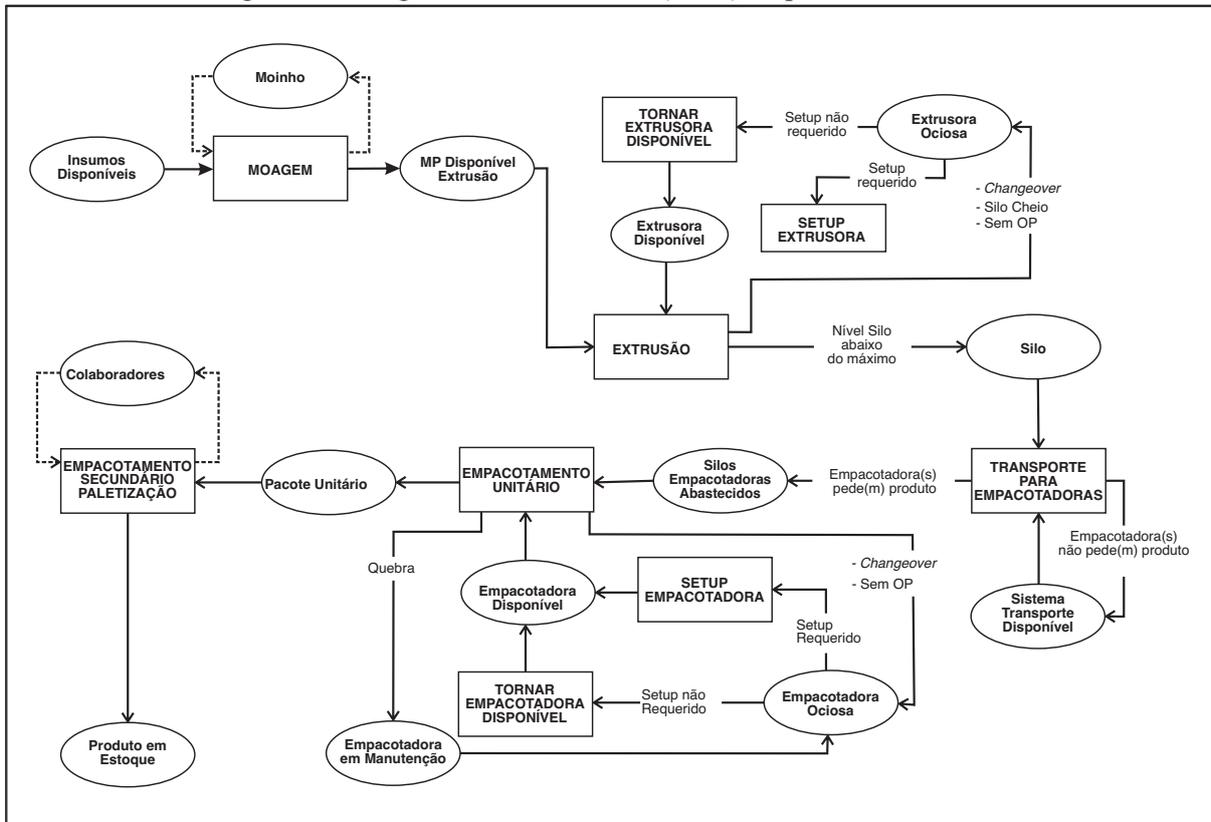
Um dos métodos mais antigos, que ajudam a conceituar o problema em DES é o *Activity Cycle Diagram -ACD*. É um método considerado simples, por utilizar apenas dois símbolos para descrever o ciclo do sistema: um retângulo e uma elipse que representam, respectivamente, estado ativo e estado de espera/fila. As setas que vão das elipses para os retângulos são condições; as que vão dos retângulos para as elipses, os resultados das atividades (CHOI et al., 2014; PAUL, 1993). Os trabalhos de Ourbih, Tari e Dahmani (2017) e Limsawasd e Athigankunagorn (2017) mostram a utilização de ACD na engenharia civil, Kehris (2009) faz uso deste em um sistema de manufatura, para posterior projeto de simulação.

A figura 15 mostra o comportamento da produção em estudo através do ACD. Partir-se-á de alguns pressupostos: há sempre matéria-prima na entrada das extrusoras, os funcionários estarão sempre disponíveis para realização dos serviços manuais, operações de reparo e quebras serão consideradas apenas nas empacotadoras, logo, na modelagem computacional, o processo de moagem e empacotamento secundário/paletização e paradas nos outros equipamentos por manutenção não serão evidenciados.

7.4 COLETA DE DADOS (INSERÇÃO DOS DADOS NA SIMULAÇÃO)

Dados de funcionamento das máquinas, coletados pelo supervisor, apresentados no capítulo 5, são inseridos no ARENA *Input Analyzer* para encontrar as distribuições de probabilidade mais apropriadas para cada estação de trabalho. Tempo programado, intervalos, tempo médio entre falhas (*mean time between failures* – MTBF), tempo médio para reparo (*mean time to repair* – MTTR) são convertidos em distribuições a serem utilizadas no processo de simulação. O resultado de cada estação é apresentado na tabela 1.

Figura 15 - Diagrama de Ciclo Ativo (ACD) do processo estudado



Fonte: O autor, 2022

Tabela 1 - Distribuição de Probabilidade de acordo com ARENA Input Analyzer

Estação	Distribuição de probabilidade	Estação	Distribuição de probabilidade
Capacidade Recepção Máx.	15ton/dia	Empacotadora 05	6 + LOGN (2.31, 3.16)
Processo de Moagem	TRIA (0.58, 0.6, 0.65)	Emp. 05 <i>Up Time Failure</i>	0.999 + EXPO (26)
Homogeneização	Constante	Emp. 05 <i>Down Time Failure</i>	0.5 + EXPO (4.41)
Extrusão linha 01	TRIA (2.2, 2.4, 2.45)	Empacotadora 06	6 + LOGN (1.63, 1.84)
Extrusão linha 02	TRIA (2.15,2.25,2.40)	Emp. 06 <i>Up Time Failure</i>	0.999 + GAMM (58.8, 0.466)
Extrusão linha 03	TRIA (2.41,2.52,2.58)	Emp. 06 <i>Down Time Failure</i>	0.5 + WEIB (5.28, 1.21)
Empacotadora 01	2 + LOGN (1.31, 0.779)	Empacotadora 07	14 + LOGN (2.76, 3.59)
Emp. 01 <i>Up Time Failure</i>	0.999 + 160*BETA (0.872, 2.67)	Emp. 07 <i>Up Time Failure</i>	0.999 + WEIB (21.8, 0.563)
Emp. 01 <i>Down Time Failure</i>	0.5 + EXPO (4.88)	Emp. 07 <i>Down Time Failure</i>	0.5 + LOGN (6.31, 9.85)
Empacotadora 02	2 + LOGN (135, 1.09)	Empacotadora 08	16 + LOGN (2.12, 2.16)
Emp. 02 <i>Up Time Failure</i>	0.5 + 76*BETA (0.53, 0.957)	Emp. 08 <i>Up Time Failure</i>	0.999 + GAMM (115, 0.616)
Emp. 02 <i>Down Time Failure</i>	0.5 + LOGN (5.89, 9.64)	Emp. 08 <i>Down Time Failure</i>	0.5 + WEIB (6.93, 1.23)
Empacotadora 03	2 + LOGN (1.9, 1.25)	Empacotadora 09	13 + LOGN (4.19, 14.4)
Emp. 03 <i>Up Time Failure</i>	0.999 + 103 * BETA (0.5, 2.33)	Emp. 09 <i>Up Time Failure</i>	0.999 + 132 * BETA (0.519, 3.01)
Emp. 03 <i>Down Time Failure</i>	0.5 + LOGN (2.98, 4.91)	Emp. 09 <i>Down Time Failure</i>	0.5 + WEIB (3.43, 0.965)

Fonte: O autor, 2022

7.5 TRADUÇÃO DO MODELO

A tradução do modelo consiste em ‘escrever’ o funcionamento do sistema na linguagem do *software*. O modelo fora programado no *software* ARENA, um dos pacotes de simulação mais utilizados no período para problemas de simulação discreta. Fora selecionado por possuir linguagem gráfica, o que reduz o tempo de programação, quando comparado às linguagens FORTRAN, C++, Visual Basic e apresentar bastante flexibilidade a mudanças, além de ser um sistema automatizado de coleta de estatísticas (GOMES; TRABASSO, 2016; SHANNON, 2002).

O modelo desenvolvido no software ARENA é apresentado na figura 16.

7.6 VERIFICAÇÃO

Essa etapa da simulação consiste em confirmar que o modelo criado possui o mesmo comportamento do processo real, o suficiente para o propósito de encontrar oportunidades de melhoria. A verificação é uma análise qualitativa, realizada a partir da análise de fluxo dos materiais na simulação, desde a recepção da matéria-prima ao empacotamento (ALEXANDER, 2006; HESHMAT; SEBAIE, 2013).

7.7 VALIDAÇÃO

Os dados de saída da simulação são utilizados para validação estatística do modelo, comparando-os com as medidas de saída do sistema real. Não existe validação absoluta pois todo modelo é uma representação aproximada de um sistema. Os valores devem apresentar uma assertividade de, pelo menos, 90% (CARSON II, 2005; CHUNG, 2004; HESHMAT; SHARIEF; SEBAIE, 2013).

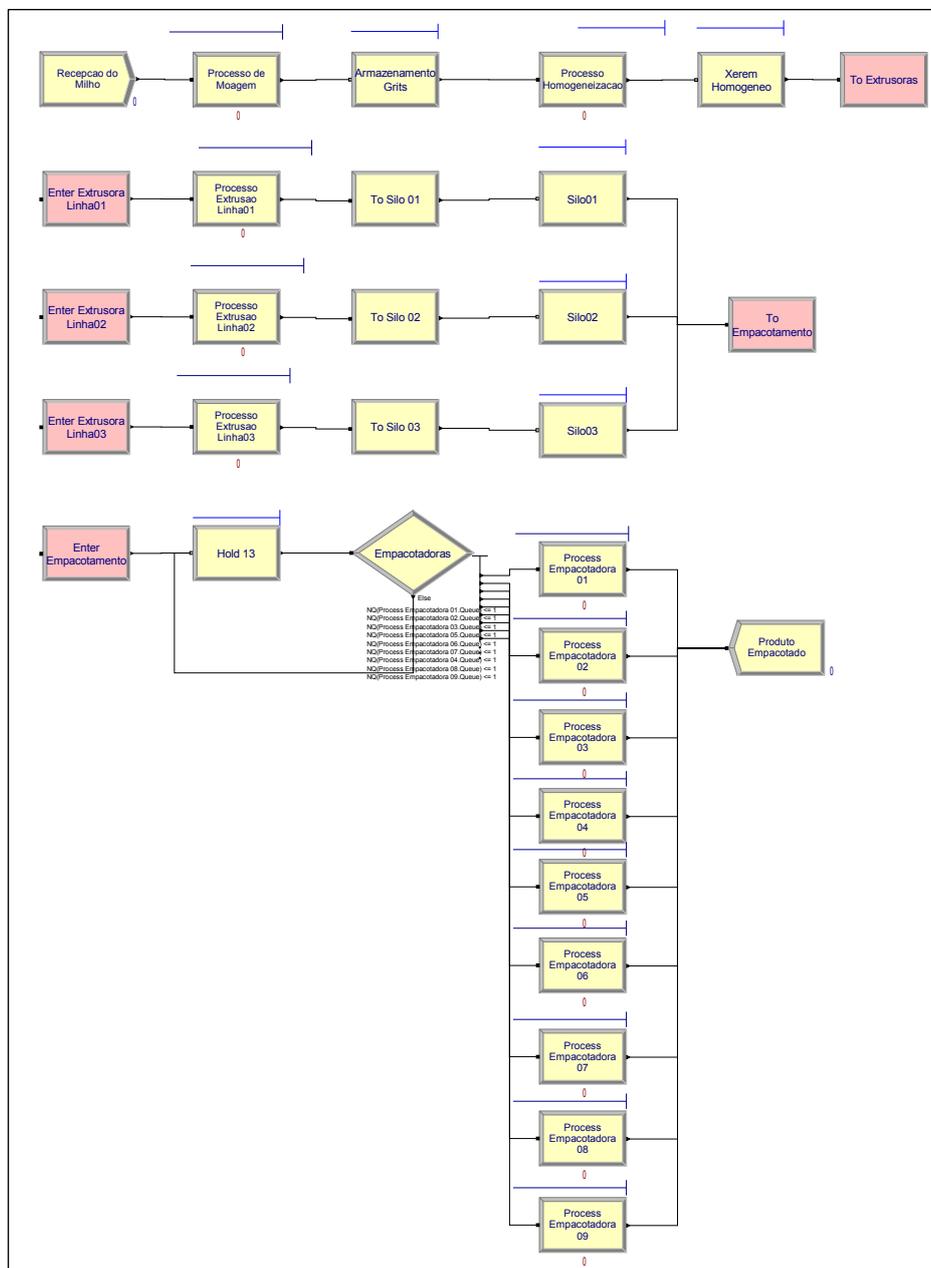
A tabela 2 apresenta comparativo entre o que fora realmente produzido durante o período (coluna 2) e o resultado apresentado pelo *software* (coluna 3). O peso total produzido no modelo foi de 54.990kg, enquanto no sistema real foi de 57.020kg, o que valida o modelo com uma assertividade de 96,44%. As demais estações, por possuírem capacidade maior do que a necessária, produzem toda a entrada da matéria-prima.

Tabela 2 - Comparativo entre produção real e simulada no software ARENA

Estação	Real (Kg)	ARENA (Kg)	% Validação Estatística
Extrusão linha 01	19411	18460	95,10
Extrusão linha 02	19872	19162	96,43
Extrusão linha 03	17737	17368	97,92
Empacotadora 01	10.767	10.200	94,73
Empacotadora 02	11.987	11.010	91,85
Empacotadora 03	9.732	9.440	97,00
Empacotadora 04	7.976	7.660	96,04
Empacotadora 05	4.906	4.880	99,47
Empacotadora 06	4.085	4.210	103,06
Empacotadora 07	2.057	2.160	105,01
Empacotadora 08	3.014	3.010	99,87
Empacotadora 09	2.496	2.420	96,96
	57.020	54.990	96,44

Fonte: O autor (2022)

Figura 16 – Modelo da linha de produção de Snacks no software ARENA

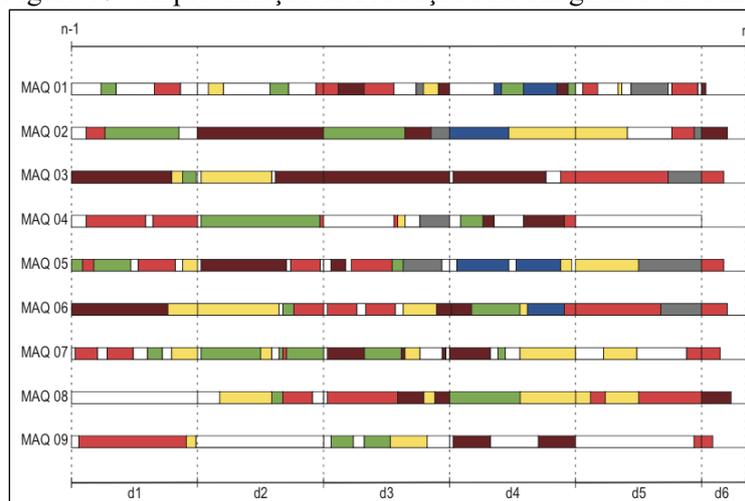


Fonte: O autor, 2022

7.8 DESENHO EXPERIMENTAL, RÉPLICAS, ANÁLISES

O histórico de produção diário e de paradas de máquinas, obtido a partir do supervisório, apresenta alguns momentos de falta de produção das empacotadoras devido à falta de produto nas estações dos silos. As cores apresentadas no gráfico de *Gantt* (figura 17) representam os sabores dos itens; os retângulos brancos correspondem aos momentos que as máquinas estão paradas. A limitação do almoxarifado de produtos acabados exige que itens de diferentes famílias sejam produzidos no mesmo dia e que esses mesmos itens entrem em produção no decorrer da mesma semana, logo, a necessidade de um novo planejamento de produção a cada dia, afetando negativamente o desempenho da linha. No período d1, observa-se, na máquina 05, que por duas vezes ela inicia o empacotamento do produto representado pela cor verde e passa ao produto correspondente à cor vermelha. Ocorre devido à quantidade de produto na estação *WIP* ser insuficiente para o abastecimento de todas as máquinas programadas naquele momento.

Figura 17 - Representação da Produção real em gráfico de Gantt



Fonte: O autor, 2022

Para identificação da capacidade produtiva da linha de empacotamento, foi realizada simulação da semana de maior produção, onde todas as máquinas estavam programadas e as paradas aconteceram, quase que em sua totalidade, por falta de produto e/ou pequenas paradas que já fazem parte da operação, como troca de película. Verificou-se que haveria um acréscimo de 13,60%, em peso, em produção, caso a capacidade de extrusão acompanhe esse incremento. O resultado é apresentado na tabela 3. A validação da simulação utilizou os dados da semana 39 (figura 18), onde a produção foi superior à venda de qualquer período, o que significa que a capacidade produtiva atende a demanda atual. As réplicas devem ser realizadas a fim de melhorar a utilização dos recursos em função de um melhor planejamento de produção.

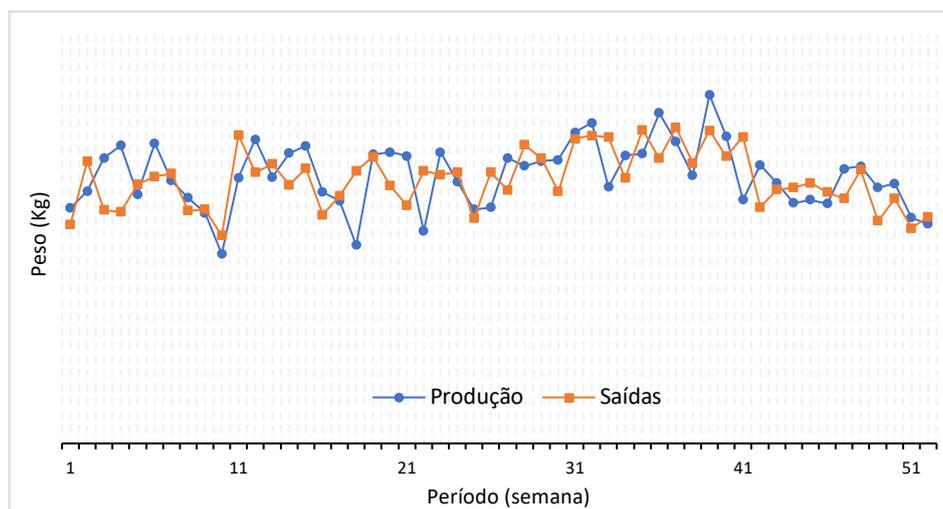
Tabela 3 - Produção com aumento da capacidade do processo de extrusão

Estação	Modelo validado (Kg)	Experimento 1 (Kg)
Empacotadora 01	10.731	12.020
Empacotadora 02	11.947	12.130
Empacotadora 03	9.699	10.830
Empacotadora 04	7.949	10.280
Empacotadora 05	4.890	5.280
Empacotadora 06	4.071	5.730
Empacotadora 07	2.050	2.650
Empacotadora 08	3.004	3.140
Empacotadora 09	2.488	2.500
Total	56.829	64.560

Fonte: O autor, 2022

Sugere-se ampliar o estoque de segurança a um espaço físico suficiente ao período de uma semana para cada um dos 34 itens produzidos. Desta forma, ao final da semana atual, seria possível realizar o planejamento da semana seguinte com sequenciamento de famílias, conhecendo quais máquinas e recursos humanos seriam necessários para a produção do complemento do estoque mínimo. O sequenciamento garantiria redução de paradas por trocas de sabores, devido ao baixo estoque nas estações *WIP*, fornecendo: redução de perdas, pois *changeovers* geram desperdícios de material; menor necessidade de intervenção do operador; maior produtividade, pois seriam minimizadas paradas e tempo de limpeza.

Figura 18 – Comportamento da Produção e Vendas de Snacks



Fonte: O autor, 2022

8 OTIMIZAÇÃO

O modelo matemático proposto foi desenvolvido para encontrar o melhor planejamento de produção semanal a partir de duas funções objetivo: mínimo *makespan* e menor número de máquinas.

Com finalidade de minimização de gargalos e tempos de espera no estágio dos silos, será adotada a produção de um único sabor (família) nas linhas de extrusão por vez, assumindo que haverá estoque de segurança de produtos acabados do tempo do planejamento de produção (uma semana).

A programação por família reduz a quantidade de trocas de películas nas empacotadoras, tempo de limpeza entre essas mudanças, *setups* e, especialmente, elimina a possibilidade de paradas de empacotadoras por quantidade insuficiente de produto daquela família enquanto há necessidade de parada no processo de extrusão de uma outra linha por excesso de produto de outro sabor.

Para simplificação do problema, os 34 itens apresentados no quadro 3 foram reclassificados em 3 gramaturas (peso de produto na embalagem) no quadro 4, visto que a mudança entre tipos, dentro da mesma família, necessita apenas da ação de troca de bobina, ação de rápida intervenção na máquina de empacotamento, reduzindo a quantidade de itens (I) para 16.

Quadro 4 - Classificação de Produtos Sabor x Gramatura

		Gramatura		
		1	2	3
SABOR	1	I ₁	I ₂	I ₃
	2	I ₄	I ₅	I ₆
	3	I ₇	I ₈	I ₉
	4	I ₁₀	I ₁₁	I ₁₂
	5	I ₁₃	I ₁₄	
	6	I ₁₅	I ₁₆	

Fonte: O autor, 2022

O quadro 5 apresenta quais gramaturas de produto podem ser produzidas em cada uma das 9 máquinas presentes na linha de produção. Para cálculo do modelo serão consideradas 11 máquinas (indicados entre os parênteses), devido às máquinas 6 e 7 empacotarem os produtos de gramatura 2 e 3, para fins de diferenciação, as mesmas atuam como máquinas distintas quando atuando em cada gramatura particular. O efeito disso é que ao invés de 9 máquinas, no modelo consideramos 11.

Quadro 5 - Gramaturas trabalhadas em cada máquina

		Gramatura		
		1	2	3
MÁQUINA	1	X (1)		
	2	X (2)		
	3	X (3)		
	4	X (4)		
	5		X (5)	
	6		X (6)	X (10)
	7		X (7)	X (11)
	8			X (8)
	9			X (9)

Fonte: O autor, 2022

Índices do modelo:

$i = máquina\ i = 1, \dots, M$

$j = hora\ j = 1, \dots, N$

As funções objetivo do modelo são dadas pelas equações 1 e 2. Equação 1 busca o planejamento com menor *makespan*, enquanto a equação 2 apresentará resultado do menor número de máquinas utilizadas em paralelo.

$$\min \sum_i^M \sum_j^N x_{ij} \cdot f_{ij} - C \cdot q \quad (1)$$

$$\min \sum_i^M \sum_j^N x_{ij} \cdot f_{ij} + C \cdot q \quad (2)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad (3)$$

x_{ij} é uma variável binária (equação 3): 1, a máquina i está programada para aquele sabor/gramatura no período j ; 0, não está programada; f_{ij} é um fator responsável pelo sequenciamento na produção, cujos elementos crescem proporcionalmente a j , apresentando efeito na minimização do tempo de planejamento; C é uma constante; q representa a quantidade máxima de máquinas em paralelo num período j .

As equações 4 e 5 mostram as restrições que as máquinas 6 e 10, assim como as máquinas 7 e 11 não podem estar programadas no mesmo período j , visto que são a mesma máquina, conforme quadro 5.

$$x_{6j} + x_{10j} \leq 1; \quad \forall j \quad (4)$$

$$x_{7j} + x_{11j} \leq 1; \quad \forall j \quad (5)$$

A produção programada de cada item deve ser maior ou igual à demanda I_n , equações 6 a 11, onde n representa o número do item. A quantidade produzida é dada pela soma da capacidade da máquina i a cada período j em que ela está programada. Os índices das máquinas relacionados a cada item seguem o quadro 5, o sequenciamento de sabores $j = n1...n2...$

$$\sum_{i=1}^{M=4} \sum_{j=1}^{N=N1} x_{ij} \cdot Capacidade_i \geq I_1; \quad (6)$$

$$\sum_{i=5}^{M=7} \sum_{j=1}^{N=N1} x_{ij} \cdot Capacidade_i \geq I_2; \quad (7)$$

$$\sum_{i=8}^{M=11} \sum_{j=1}^{N=N1} x_{ij} \cdot Capacidade_i \geq I_3; \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^{M=4} \sum_{j=N1}^{N=N2} x_{ij} \cdot Capacidade_i \geq I_4; \quad (9)$$

$$\sum_{i=5}^{M=7} \sum_{j=N1}^{N=N2} x_{ij} \cdot Capacidade_i \geq I_5; \quad (10)$$

$$\sum_{i=8}^{M=11} \sum_{j=N1}^{N=N2} x_{ij} \cdot Capacidade_i \geq I_6; \quad (11)$$

O peso empacotado total, a cada período j , é limitado pela capacidade de produtos extrudados (equação 12) e o período total deve ser inferior à quantidade de horas disponíveis (equação 13) que são 86 horas semanais.

$$\sum_i^M x_{ij} \cdot Capacidade_i \leq CapacidadeExtrusao; \quad (12)$$

$$\sum_j^N \frac{(C \cdot q)}{(C \cdot q + 1)} \leq Hdisponiveis \quad (13)$$

O número de máquinas de empacotamento programadas a cada período j é resultado da soma dos valores de x_{ij} das máquinas, como mostra a equação 14, para cada valor de j . O valor de q_j é essencial para programação dos recursos humanos necessários, e é menor ou igual ao número máximo de máquinas observando todos os períodos j , conforme equação 15.

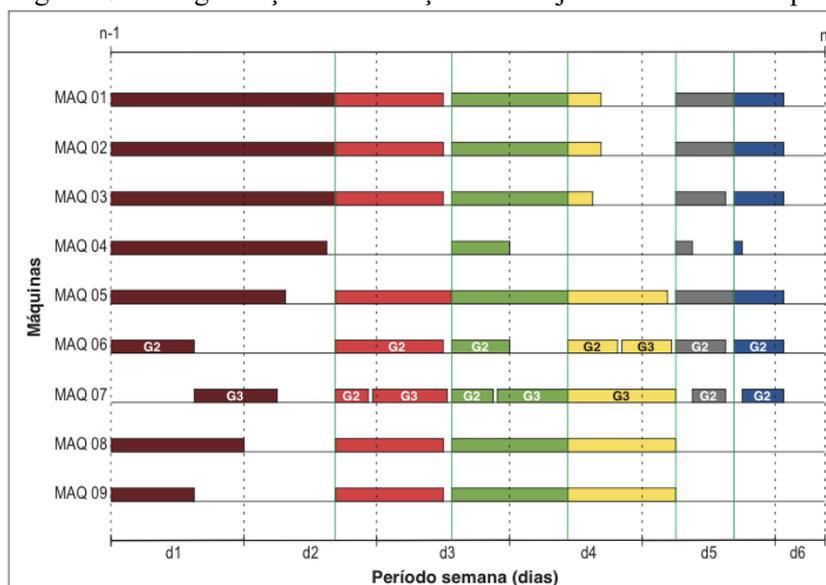
$$q_j = \sum_i^M x_{ij}; \quad \forall j \quad (14)$$

$$q_j \leq q \quad (15)$$

O modelo matemático apresenta 2.188 variáveis e 2.560 restrições. Devido a estes números, foi utilizado o *software* de programação linear LINGO, da empresa LINDO Systems Inc., para encontrar o melhor resultado no sequenciamento da produção para cada função objetivo. A programação escrita no *software* pode ser visualizada no apêndice A.

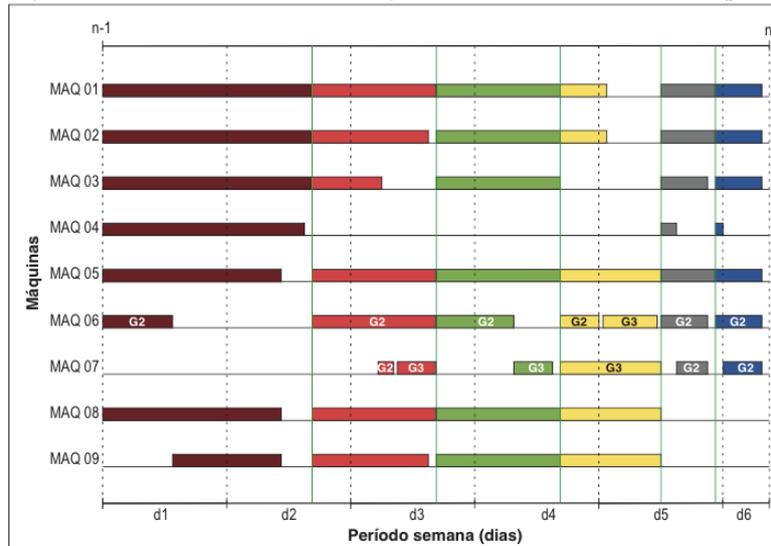
O resultado do processo de otimização com objetivo menor *makespan* de uma semana selecionada é mostrado na figura 19. Devido à limitação da capacidade de extrusão, a maior quantidade de máquinas trabalhando em paralelo é de 8 empacotadoras. A figura 20 apresenta o sequenciamento obtido com objetivo da utilização do menor número de máquinas em paralelo.

Figura 19 – Programação de Produção com objetivo menor makespan



Fonte: O autor, 2022

Figura 20 - Programação de Produção com objetivo menor número de máquinas em paralelo

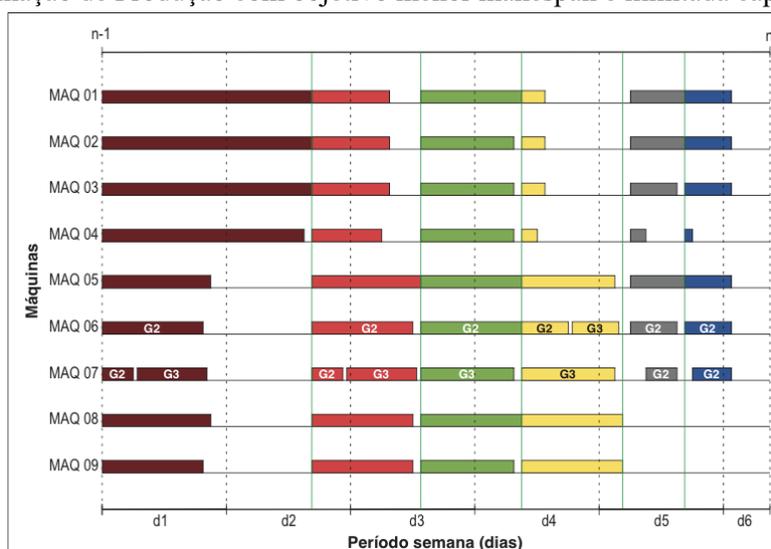


Fonte: O autor (2022)

Em ambos os objetivos é possível visualizar, com mais evidência nos sabores 1 e 4, períodos em que 4 ou 5 máquinas estão programadas para aquele período, isso acontece pois naquela determinada gramatura já atingiu a quantidade programada para a semana. Esse período em que as máquinas estão ociosas pode ser utilizado para realização de manutenção preventiva.

Uma nova simulação do modelo matemático com objetivo de menor *makespan* foi realizada eliminando a restrição da equação (7), assumindo que não há limitação na capacidade de extrusão, ou seja, sempre há produto disponível para a estação de empacotamento. Como mostra a figura 21, o tempo de planejamento não foi minimizado, devido à limitação das máquinas trabalharem com algumas gramaturas específicas.

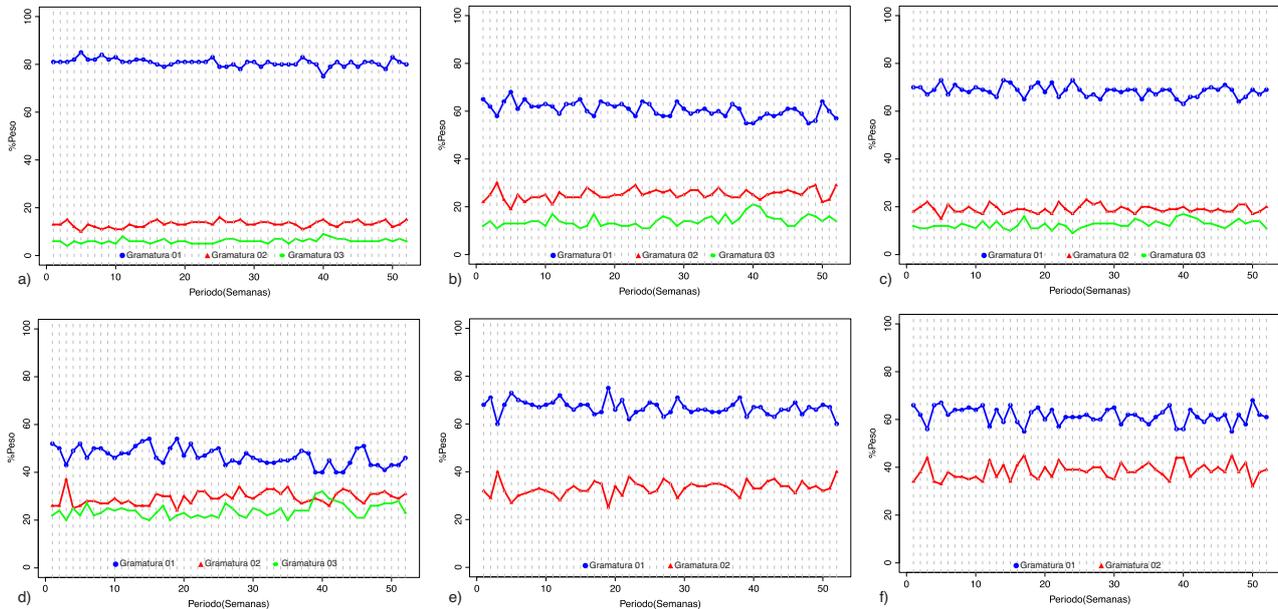
Figura 21 - Programação de Produção com objetivo menor makespan e ilimitada capacidade de extrusão



Fonte: O autor (2022)

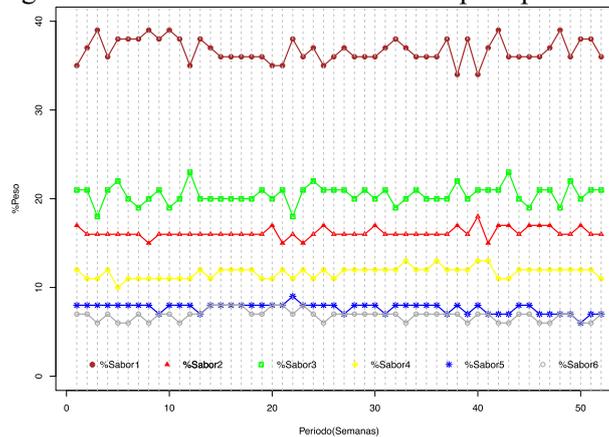
Espera-se que os sequenciamentos de produção de cada semana do ano apresentem comportamentos semelhantes aos apresentados nas figuras 19, 20 e 21, quando utilizadas as mesmas funções objetivo e restrições, pois a representatividade de gramatura/sabor.semana, assim como a de cada sabor na demanda total é similar, como constam nas figuras 22 e 23.

Figura 22-Percentual em peso por gramatura por sabor: a)sabor 1 b)sabor 2 c)sabor 3 d)sabor 4 e)sabor 5 f)sabor 6



Fonte: O autor, 2022

Figura 23 - Percentual de demanda em peso por sabor



Fonte: O autor, 2022

Em análise dos planejamentos resultantes nas figuras 19 a 21, os tomadores de decisão da empresa desconsideraram o planejamento com capacidade superior à atual na sequência, pois seria um investimento para incremento na estação de extrusão sem vantagem de redução de horas totais planejadas.

O modelo matemático foi executado, com ambos os objetivos, durante as 52 semanas do último ano (2021). Os resultados são apresentados nas tabelas 4 e 5.

Tabela 4 - Quantidade de máquinas e horas necessárias com objetivo da redução do makespan (nMaq=8)

SEMANA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Horas	50	64	70	57	64	67	67	57	60	49	80	68	74	67	69	58	62	68	74	65	58	69	69	72	55	69
SEMANA	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
Horas	65	76	71	61	79	82	78	69	80	75	85	72	83	78	92	62	65	72	68	69	63	72	56	65	57	60

Fonte: O autor, 2022

Tabela 5 - Quantidade de máquinas e horas necessárias com objetivo da utilização da menor quantidade de recursos

SEMANA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
nMaq	5	6	6	5	5	6	6	5	5	4	7	6	6	6	6	5	5	6	6	6	5	6	6	6	5	6
Horas	72	75	80	79	86	78	80	76	81	84	84	79	85	76	81	78	85	78	86	75	81	78	80	81	75	81
SEMANA	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
nMaq	6	7	6	6	7	7	7	6	7	7	7	6	7	7	7	6	6	6	6	6	5	6	5	6	5	5
Horas	75	81	83	73	83	86	82	81	85	80	90	85	87	81	93	73	77	85	77	81	83	84	78	76	78	81

Fonte: O autor, 2022

Os valores em amarelo, nas tabelas 4 e 5, excedem a quantidade de horas normais da semana (86 horas). A gerência da empresa deixou claro que é preferível a compensação de horas ou o pagamento de horas extras nesse período, caso realmente necessário, visto que semanas anteriores e posteriores possuem folga no planejamento, ou ainda a utilização de mão-de-obra de outras linhas, do que realizar contratação para necessidades pontuais como esta.

A primeira proposta, de programação baseado na utilização da maior quantidade de recursos e redução do tempo de execução, apresenta um desvio padrão de 8,93 horas e amplitude de 43 horas, o dobro da segunda, com desvio padrão de 4,42 horas e amplitude de 21 horas, sendo mais oportuno, para uma produção mais constante, o objetivo de utilização da menor quantidade de recursos em paralelo.

As quantidades de máquinas utilizadas por semana da tabela 5 são apresentados na figura 24. É possível visualizar a divisão do ano em 3 períodos, evidenciados pela separação feita pelas linhas verticais verdes no gráfico: semanas 1 a 27 e semanas 42 a 52, com 6 máquinas programadas em paralelo; semanas 28 a 41, com a programação de recursos para 7 máquinas ao mesmo tempo.

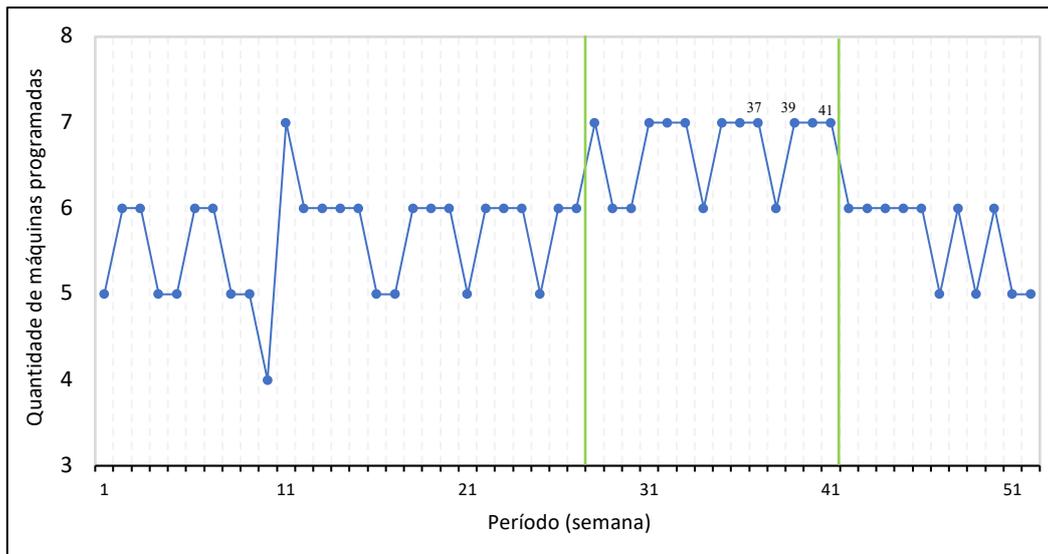
O sequenciamento apresentado na figura 20, com objetivo de menor utilização de recursos, foi adicionado ao *Schedule* do ARENA a fim de visualizar quão próximo estaria a programação sugerida pelo LINGO a partir do modelo já validado.

Considerando os resultados encontrados, aconselha-se diminuir o número de colaboradores no empacotamento de 13 para 10; e no processo de enfardar, diminuir um outro, número suficiente para o período de maior demanda. No grupo de operadores, promover um deles a planejador/executor

de manutenção preventiva, a fim de melhorar os tempos entre falhas e reduzir o tempo de reparo dos equipamentos.

Os meses de baixa demanda seriam utilizados para férias dos colaboradores. Considerando a economia da folha de pagamento, o retorno de investimento da ampliação do almoxarifado de produtos acabados aconteceria entre 5 e 6 meses.

Figura 24 – Quantidades de máquinas com objetivo de utilização mínima de recursos



Fonte: O autor (2022)

Tabela 5 - Comparativo entre dados de programação sugerida pelo LINGO e Simulação no Arena

Família/Sabor	Gramatura Produto	Gantt	ARENA	%ARENA/Gantt
Sabor 01	Gramatura 01	15.590	16.090	103,2%
Sabor 01	Gramatura 02	2.160	2.000	92,6%
Sabor 01	Gramatura 03	1.230	1.220	99,2%
Sabor 02	Gramatura 01	5.600	6.080	108,6%
Sabor 02	Gramatura 02	2.160	2.160	100,0%
Sabor 02	Gramatura 03	1.200	1.280	106,7%
Sabor 03	Gramatura 01	7.000	7.340	104,9%
Sabor 03	Gramatura 02	1.755	1.790	102,0%
Sabor 03	Gramatura 03	1.250	1.320	105,6%
Sabor 04	Gramatura 01	2.610	2.720	104,2%
Sabor 04	Gramatura 02	1.210	1.240	102,5%
Sabor 04	Gramatura 03	1.485	1.460	98,3%
Sabor 05	Gramatura 01	3.180	3.050	95,9%
Sabor 05	Gramatura 02	1.110	1.060	95,5%
Sabor 06	Gramatura 01	2.645	2.570	97,2%
Sabor 06	Gramatura 02	1.145	1.130	98,7%
		51.330	52.510	102,3%

Fonte: O autor (2022)

A figura 22 apresenta a programação escrita no software LINGO composta pelas funções objetivo (6) e (7) e pelas restrições apresentadas nas equações de (1) a (5). Os dados de entrada (capacidades e quantidades de máquinas) são importados a partir da planilha dados_entrada.xls. Os dados de saída são exportados para um arquivo, também com extensão .xls, onde são utilizados como fonte de dados para geração dos gráficos, para melhor visualização da sugestão do sequenciamento de produção, como nas figuras 19 e 20.

9 CONCLUSÃO

A simulação da linha de produção de salgadinhos de milho identificou um gargalo no estágio de extrusão a partir do tempo de espera e períodos não programados das empacotadoras. Verificou-se que a capacidade de produção pode ser ampliada em 13,60%, se conseguido aumentar a vazão do produto extrudado. No processo de otimização é ratificado a oportunidade de crescimento da produção. Os históricos de produção e vendas demonstram que há fatores ainda mais restritivos para a elevação da produtividade: a oscilante demanda e o pequeno espaço físico do almoxarifado de produtos acabados, que limita o planejamento de produção a um estoque de segurança quase que diário, devido ao grande número de itens.

Uma nova simulação foi realizada, considerando um almoxarifado com capacidade para uma semana de segurança e foi verificado que, com um planejamento de sequenciamento de famílias durante a semana, o número máximo de máquinas programadas seria reduzido de 9 para 7, em períodos de maior demanda e 6, em fases de menor saída. Com essa proposta, alguns colaboradores seriam remanejados para outros setores, enquanto outros permaneceriam na linha atual, responsáveis em aumentar a disponibilidade dos equipamentos através da manutenção preventiva e preditiva.

A previsibilidade oferecida pela solução encontrada proporcionará um planejamento mais assertivo, com maior desempenho da linha de produção: menos *start-ups*, menos paradas por falta de produto e/ou excesso destes, menos ajustes devido ao sequenciamento de famílias, maior aproveitamento de mão-de-obra, maior tempo entre falhas e menor tempo entre reparos. Períodos para atividades extras, como treinamentos, reuniões, folga presenteada, podem entrar no cronograma do planejador nas semanas com menor demanda.

Através da simulação, foi possível entender, de forma minuciosa, o comportamento do sistema e avaliar estratégias para sua operação. A partir deste conhecimento e com uso da programação linear, foram encontrados sequenciamentos ótimos de produção, considerando as restrições impostas no modelo. Futuros trabalhos podem incrementar dados de programação de paradas de máquinas voltadas à manutenção preventiva, como restrição de recurso àquele período, evidenciar os períodos de *setups* e paradas (manutenção ou *changeovers*), utilização de mais de uma família em paralelo.

REFERÊNCIAS

- ABED, S. Y. **Improving Productivity in Food Processing Industries Using Simulation - A Case Study Department of Industrial Engineering**. International Conference on SYSTEMS. **Anais...**2008
- ÁDÁMKÓ, É.; JAKABÓCZKI, G.; SZEMES, T. P. Proposal of a secure modbus RTU communication with Adi Shamir's secret sharing method. **International Journal of Electronics and Telecommunications**, v. 64, n. 2, p. 107–114, 2018.
- ALEXANDER, C. W. **Discrete Event Simulation for a batch processing**. Winter Simulation Conference. **Anais...**2006
- ALFIERI, A.; MATTA, A.; PEDRIELLI, G. Mathematical programming models for joint simulation–optimization applied to closed queueing networks. **Annals of Operations Research**, v. 231, n. 1, p. 105–127, 2015.
- ALMADA-LOBO, B. et al. Industrial insights into lot sizing and scheduling modeling. **Pesquisa Operacional**, v. 35, n. 3, p. 439–464, 2015.
- ALTOK, T.; MELAMED, B. **Simulation Modeling and Analysis with Arena**. [s.l: s.n.].
- AMIT, N. et al. **Using simulation to solve facility layout for food industry at XYZ Company**. IEEE Symposium on Humanities, Science and Engineering Research. **Anais...**2012
- ANGIZEH, F. et al. Optimal production scheduling for smart manufacturers with application to food production planning. **Computers and Electrical Engineering**, v. 84, p. 106609, 2020.
- AROHMAN, D. et al. Job Scheduling To Minimize Makespan At Smes of Batik Industry. n. February, 2019.
- BANKS, J. et al. **Discrete-Event System Simulation**. [s.l: s.n.]. v. 4
- BARBOSA, G. L. L. et al. A manufacturing bottleneck case study through the theory of constraints and computational simulation of the proposed bottleneck solution. **Brazilian Journal of Operations & Production Management**, v. 15, n. 1, p. 54–67, 2018.
- BAUDRY, G.; MACHARIS, C.; VALLÉE, T. Range-based Multi-Actor Multi-Criteria Analysis: A combined method of Multi-Actor Multi-Criteria Analysis and Monte Carlo simulation to support participatory decision making under uncertainty. **European Journal of Operational Research**, v. 264, n. 1, p. 257–269, 2017.
- BELKAID, F.; HADRI, A.; BENNEKROUF, M. Efficient Approach for Parallel Machine Scheduling Problem. **2018 International Colloquium on Logistics and Supply Chain Management, LOGISTIQUA 2018**, p. 158–163, 2018.
- BURSI, F. et al. Simulating continuous time production flows in food industry by means of discrete event simulation. **International Journal of Food Engineering**, v. 11, n. 1, p. 139–150, 2015.
- CARSON II, J. S. **Verification and Validation**. Winter Simulation Conference. **Anais...**2002
- CARSON II, J. S. **Introduction to modeling and simulation**. Winter Simulation Conference. **Anais...**2005

- CHEN, J. et al. Effects of Extrusion Conditions on Sensory Properties of Corn Meal Extrudates. **Journal of Food Science**, v. 56, n. 1, p. 84–89, 1991.
- CHOI, B. K. et al. Parameterized ACD modeling of flexible manufacturing systems. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**, v. 11, n. 2, p. 637–642, 2014.
- CHUNG, C. A. **Simulation Modelling Handbook: A Practical Approach**. [s.l.: s.n.].
- CLAASSEN, G. D. H. et al. On production planning and scheduling in food processing industry: Modelling non-triangular setups and product decay. **Computers and Operations Research**, v. 76, p. 147–154, 2016.
- CLARK, A.; ALMADA-LOBO, B.; ALMEDER, C. Lot sizing and scheduling: Industrial extensions and research opportunities. **International Journal of Production Research**, v. 49, n. 9, p. 2457–2461, 2011.
- DANEELS, A.; SALTER, W. **What Is Scada ?** International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems. **Anais...1999** Disponível em: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:WHAT+IS+SCADA+?#0>
- DÍAZ, C. A.; GUTIÉRREZ, E. M. A. G.; HERNÁNDEZ, M. R. C. **Model to define the optimal production program in a food processor SME optimizing economic resources**. International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. **Anais...2018**
- DOGANIS, P.; SARIMVEIS, H. Optimal production scheduling for the dairy industry. **Annals of Operations Research**, v. 159, n. 1, p. 315–331, 2008.
- FARIZAL, F. et al. Production Scheduling Optimization to Minimize Makespan and the Number of Machines with Mixed Integer Linear Programming. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 1041, n. 1, p. 012046, 2021.
- FIORONI, M. M. et al. CONCURRENT SIMULATION AND OPTIMIZATION MODELS FOR MINING PLANNING. p. 759–767, 2008.
- GEORGIADIS, G. P. et al. **Production Scheduling of Multi-Stage, Multi-product Food Process Industries**. [s.l.] Elsevier Masson SAS, 2018. v. 43
- GOMES, V. E. D. O.; TRABASSO, L. G. A Proposal Simulation Method towards Continuous Improvement in Discrete Manufacturing. **Procedia CIRP**, v. 57, p. 270–275, 2016.
- HASTUTI, R. P.; YULIANDO, H.; AZIZ, I. W. F. Production Scheduling Using Mixed Integer Programming: Case of Bread Small and Medium Enterprise at Yogyakarta. **Agriculture and Agricultural Science Procedia**, v. 3, p. 211–215, 2015.
- HECKER, F.; HUSSEIN, W.; BECKER, T. Analysis and optimization of a bakery production line using ARENA. **International Journal of Simulation Modelling**, v. 09, n. December 2010, p. 208–216, 2010.
- HELDAL, R. et al. Descriptive vs prescriptive models in industry. **International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems**, p. 216–226, 2016.
- HEREDIA, D. A. V.; CEBALLOS, F. Simulation-Based Improvement Procedure for Small-Scale Shoe Manufacturing Companies. **Journal of Advanced Manufacturing Systems**, v. 17, n. 1, p.

23–33, 2018.

HESHMAT, M.; SHARIEF, M. A. E.-; SEBAIE, M. G. E.-. Simulation Modeling of production lines: A case study of cement production line. **Journal of Engineering Sciences**, v. 41, p. 1045–1053, 2013.

INGEMANSSON, A.; OSCARSSON, J. **Discrete-event simulation and automatic data collection improve performance in a manufacturing system**. Winter Simulation Conference. **Anais...**2005

IRANI, S. A.; HUANG, H. Custom design of facility layouts for multiproduct facilities using layout modules. **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, v. 16, n. 3, p. 259–267, 2000.

IRANI, S. A.; HUANG, H. Cascading flowlines and layout modules: Practical strategies for machine duplication in facility layouts. **International Journal of Flexible Manufacturing Systems**, v. 17, n. 2, p. 119–149, 2006.

JAHANGIRIAN, M. et al. Simulation in manufacturing and business: A review. **European Journal of Operational Research**, v. 203, n. 1, p. 1–13, 2010.

JYOTSNA, K.; SHARMA, A.; KAPADIA, H. **Data acquisition in wind power plant using SCADA**. International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies. **Anais...**2017

KAMARUDIN, N. F.; RANI, R. M.; HALIM, F. A. **Improving the Food Manufacturing System by Using Simulation and DEA**. [s.l.] Springer Singapore, 2019.

KELTON, W. D.; SADOWSKI, R. P.; ZUPICK, N. B. **Simulation with Arena**. [s.l.: s.n.].

KOPANOS, G. M.; PUIGJANER, L.; GEORGIADIS, M. C. Optimal production scheduling and lot-sizing in Yoghurt production lines. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 49, n. C, p. 1153–1158, 2009.

KOPANOS, G. M.; PUIGJANER, L.; MARAVELIAS, C. T. Production planning and scheduling of parallel continuous processes with product families. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 50, n. 3, p. 1369–1378, 2011.

KRISHNAN, S. et al. Bottleneck identification in a tyre manufacturing plant using simulation analysis and productivity improvement. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 11, p. 24720–24730, 2018.

LI, X. et al. A Multiobjective Optimization Approach to Solve a Parallel Machines Scheduling Problem. **Advances in Artificial Intelligence**, v. 2010, n. October, p. 1–10, 2010.

LIONG, C. Y.; HAMID, S. H. A.; IBRAHIM, I. M. **Improving the performance of chili sauce manufacturing process using simulation approach**. AIP Conference Proceedings. **Anais...**2016

LIU, R. et al. A survey on simulation optimization for the manufacturing system operation. **International Journal of Modelling and Simulation**, v. 38, n. 2, p. 116–127, 2018.

MÉNDEZ, C. A. et al. State-of-the-art review of optimization methods for short-term scheduling of batch processes. **Computers and Chemical Engineering**, v. 30, n. 6–7, p. 913–946, 2006.

- MOHANI, S. S. et al. SCADA System Framework for Monitoring, Controlling and Data Logging of Industrial Processing Plants. **2020 International Conference on Computational Intelligence, ICCI 2020**, n. October, p. 149–152, 2020.
- NIȚULESCU, I.-V.; KORODI, A. Supervisory Control and Data Acquisition Approach in Node-RED: Application and Discussions. **IoT**, v. 1, n. 1, p. 76–91, 2020.
- OBEID, A.; DAUZÈRE-PÉRÈS, S.; YUGMA, C. Scheduling job families on non-identical parallel machines with time constraints. **Annals of Operations Research**, v. 213, n. 1, p. 221–234, 2014.
- PAUL, R. J. **Activity cycle diagrams and the three phase method**. Winter Simulation Conference. **Anais...**1993
- PEKARČIKOVÁ, M.; TREBUŇA, P.; MARKOVIČ, J. SIMULATION AS PART OF INDUSTRIAL PRACTICE. **International Scientific Journal about Logistics**, v. 2, n. 2, p. 5–8, 2015.
- PLIATSIOS, D. et al. **A Survey on SCADA Systems: Secure Protocols, Incidents, Threats and Tactics**. IEEE Communications Surveys & Tutorials. **Anais...IEEE**, 2020
- RANI, R. M.; ISMAIL, W. R.; RAHMAN, A. A. **Determining the optimal operator allocation in SME's food manufacturing company using computer simulation and data envelopment analysis**. AIP Conference Proceedings. **Anais...**2014
- ROBERTSON, N.; PERERA, T. Automated data collection for simulation? **Simulation Practice and Theory**, v. 9, n. 6–8, p. 349–364, 2002.
- ROBINSON, S. Conceptual modelling for simulation Part I: Definition and requirements. **Journal of the Operational Research Society**, v. 59, n. 3, p. 278–290, 2008.
- ROBINSON, S. **A tutorial on conceptual modeling for simulation**. Winter Simulation Conference. **Anais...**2016
- RODIČ, B. Industry 4.0 and the New Simulation Modelling Paradigm. **Organizacija**, v. 50, n. 3, p. 193–207, 2017.
- RODRIGUEZ, C. **User interface to automate the collection and processing of data for discrete event simulation projects**. Science and Information Conference,. **Anais...**2015
- SAFIZADEH, M. H.; RITZMAN, L. P. Linking performance drivers in production planning and inventory control to process choice. **Journal of Operations Management**, v. 15, n. 4, p. 389–403, 1997.
- SAMBATT, M.; WOARAWICHAI, C.; NAENNA, T. Inventory lot sizing and supplier selection for multiple products, multiple suppliers, multiple periods with storage space using lingo program. **MATEC Web of Conferences**, v. 259, p. 04004, 2019.
- SEL, Ç.; BILGEN, B.; BLOEMHOF-RUWAARD, J. Planning and scheduling of the make-and-pack dairy production under lifetime uncertainty. **Applied Mathematical Modelling**, v. 51, p. 129–144, 2017.
- SHANNON, R. E. **Introduction to the art and science of simulation**. Winter Simulation Conference. **Anais...**2002

- SKOOGH, A.; JOHANSSON, B.; STAHR, J. Automated input data management: Evaluation of a concept for reduced time consumption in discrete event simulation. **Simulation**, v. 88, n. 11, p. 1279–1293, 2012.
- SOHAL, A. et al. Implementation of OEE – issues and challenges. **Competitive and Sustainable Manufacturing Products and Services, Milano: Poliscrpt**, n. 1997, p. 1–8, 2010.
- SUHADAK, N. S. @; AMIT, N.; ALI, M. N. Facility Layout for SME Food Industry via Value Stream Mapping and Simulation. **Procedia Economics and Finance**, v. 31, n. 15, p. 797–802, 2015.
- SUNDARAMOORTHY, A.; MARAVELIAS, C. T. Modeling of storage in batching and scheduling of multistage processes. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 47, n. 17, p. 6648–6660, 2008.
- TAKO, A. A.; ROBINSON, S. The application of discrete event simulation and system dynamics in the logistics and supply chain context. **Decision Support Systems**, v. 52, n. 4, p. 802–815, 2012.
- TEOH, Y. S.; ITO, T.; PERUMAL, P. Invisibility of impact from customer demand and relations between processes in Overall Equipment Effectiveness (OEE). **Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing**, v. 11, n. 5, p. 1–11, 2017.
- TOMOTANI, J. V.; DE MESQUITA, M. A. Lot sizing and scheduling: a survey of practices in Brazilian companies. **Production Planning and Control**, v. 29, n. 3, p. 236–246, 2018.
- TORRES, V. F. N. et al. Integrated optimization and simulation models for short-term open-pit mine planning. **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 120, n. 11, p. 617–626, 2020.
- UZSOY, R.; LEE, C. L.; MARTIN-VEGA, L. A. A review of production planning and scheduling models in the semiconductor industry part I: System characteristics, performance evaluation and production planning. **IIE Transactions**, v. 24, n. 4, p. 47–60, 1 set. 1992.
- VAN DER VORST, J. G. A. J.; TROMP, S. O.; VAN DER ZEE, D. J. Simulation modelling for food supply chain redesign; Integrated decision making on product quality, sustainability and logistics. **International Journal of Production Research**, v. 47, n. 23, p. 6611–6631, 2009.
- VAN WEZEL, W.; VAN DONK, D. P.; GAALMAN, G. The planning flexibility bottleneck in food processing industries. **Journal of Operations Management**, v. 24, n. 3, p. 287–300, 2006.
- VELUMANI, S.; TANG, H. Operations Status and Bottleneck Analysis and Improvement of a Batch Process Manufacturing Line Using Discrete Event Simulation. **Procedia Manufacturing**, v. 10, p. 100–111, 2017.
- VIEIRA, M. et al. Integrating Simulation and Optimization for Process Planning and Scheduling Problems. **Computer Aided Chemical Engineering**, v. 46, p. 1441–1446, 2019.
- WANG, W.; BROOKS, R. J. Improving the understanding of conceptual modelling. **Journal of Simulation**, v. 1, n. 3, p. 153–158, 2007.
- YAZDI, P. G.; AZIZI, A.; HASHEMIPOUR, M. A hybrid methodology for validation of optimization solutions effects on manufacturing sustainability with time study and simulation approach for SMEs. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, n. 5, 2019.

ZAHRAEE, S. M. et al. Simulation of Manufacturing Production Line Based on Arena. **Advanced Materials Research**, v. 933, p. 744–748, 2014.

ZENG, C. et al. Auction-based approach for a flexible job-shop scheduling problem with multiple process plans. **Engineering Optimization**, v. 51, n. 11, p. 1902–1919, 2019.

ZUPAN, H.; HERAKOVIC, N. Production line balancing with discrete event simulation: A case study. **IFAC-PapersOnLine**, v. 28, n. 3, p. 2305–2311, 2015.

APÊNDICE A – MODELO MATEMÁTICO DESENVOLVIDO NO *SOFTWARE* LINGO

```

SETS:
HORAS/H1..H30/:qA,qB,qC,qD,qE,qF;
MAQUINAS:capacidade,m;
Maq_Hora(Maquinas,Horas):A,B,C,D,E,F,mh;
Sabor/S1..S6/;
Gramatura/G1..G3/;
DEM(Sabor,Gramatura):SG;
ENDSETS

DATA:
Maquinas, Capacidade, SG, mh=
@OLE('DATA dados_entrada.xls',
'Maquinas','capacidade','SG1','fator');
@OLE('DATA dados_saida.xls',
'S1_1','S2_1','S3_1','S4_1','S5_1','S6_1')= A,B,C,D,E,F;
ENDDATA

MIN = @sum(Maq_hora(I,H):A(I,H)*mh(I,H))+@sum(Maq_hora(I,H):B(I,H)*mh(I,H))+@sum(Maq_hora(I,H):C(I,H)*mh(I,H))
+ @sum(Maq_hora(I,H):D(I,H)*mh(I,H))+@sum(Maq_hora(I,H):E(I,H)*mh(I,H))+@sum(Maq_hora(I,H):F(I,H)*mh(I,H)) + C*q;

! + está para representar que será utilizado o sinal + ou - a depender do resultado que se deseja. Para menor makespan
(menor tempo de execução, o sinal será negativo (-), para menor quantidade de recursos (máquinas), o sinal será positivo
(+);

!G é uma constante com valor elevado;

@sum(Horas(H):G*QA(H)/(G*QA(H)+1))+@sum(Horas(H):G*QB(H)/(G*QB(H)+1))+@sum(Horas(H):G*QC(H)/(G*QC(H)+1))+
@sum(Horas(H):G*QD(H)/(G*QD(H)+1))+@sum(Horas(H):G*QE(H)/(G*QE(H)+1))+@sum(Horas(H):G*QF(H)/(G*QF(H)+1)) <= 86;

!SABOR 1;
S1G1=@sum(Maq_hora(I,H)| I#LE#4:Capacidade(I)*A(I,H)); S1G1>=SG(1,1);
S1G2=@sum(Maq_hora(I,H)| I#GE# 5 #AND# I#LE#7:Capacidade(I)*A(I,H)); S1G2>=SG(1,2);
S1G3=@sum(Maq_hora(I,H)| I#GE# 8 #AND# I#LE#11:Capacidade(I)*A(I,H)); S1G3>=SG(1,3);
@For(Horas(H):QA(H)=@SUM(Maq_Hora(I,H):A(I,H))); @For(Horas(H):QA(H)<=q);

!SABOR 2;
S2G1=@sum(Maq_hora(I,H)| I#LE#4:Capacidade(I)*B(I,H)); S2G1>=SG(2,1);
S2G2=@sum(Maq_hora(I,H)| I#GE# 5 #AND# I#LE#7:Capacidade(I)*B(I,H)); S2G2>=SG(2,2);
S2G3=@sum(Maq_hora(I,H)| I#GE# 8 #AND# I#LE#11:Capacidade(I)*B(I,H)); S2G3>=SG(2,3);
@For(Horas(H):QB(H)=@SUM(Maq_Hora(I,H): B(I,H))); @For(Horas(H):QB(H)<=q);

!SABOR 3;
S3G1=@sum(Maq_hora(I,H)| I#LE#4:Capacidade(I)*C(I,H)); S3G1>=SG(3,1);
S3G2=@sum(Maq_hora(I,H)| I#GE# 5 #AND# I#LE#7:Capacidade(I)*C(I,H)); S3G2>=SG(3,2);
S3G3=@sum(Maq_hora(I,H)| I#GE# 8 #AND# I#LE#11:Capacidade(I)*C(I,H)); S3G3>=SG(3,3);
@For(Horas(H):QC(H)=@SUM(Maq_Hora(I,H):C(I,H))); @For(Horas(H):QC(H)<=q);

!SABOR 4;
S4G1=@sum(Maq_hora(I,H)| I#LE#4:Capacidade(I)*D(I,H)); S4G1>=SG(4,1);
S4G2=@sum(Maq_hora(I,H)| I#GE# 5 #AND# I#LE#7:Capacidade(I)*D(I,H)); S4G2>=SG(4,2);
S4G3=@sum(Maq_hora(I,H)| I#GE# 8 #AND# I#LE#11:Capacidade(I)*D(I,H)); S4G3>=SG(4,3);
@For(Horas(H):QD(H)=@SUM(Maq_Hora(I,H):D(I,H))); @For(Horas(H):QD(H)<=q);

!SABOR 5;
S5G1=@sum(Maq_hora(I,H)| I#LE#4:Capacidade(I)*E(I,H)); S5G1>=SG(5,1);
S5G2=@sum(Maq_hora(I,H)| I#GE# 5 #AND# I#LE#7:Capacidade(I)*E(I,H)); S5G2>=SG(5,2);
S5G3=@sum(Maq_hora(I,H)| I#GE# 8 #AND# I#LE#11:Capacidade(I)*E(I,H)); S5G3>=SG(5,3);
@For(Horas(H):QE(H)=@SUM(Maq_Hora(I,H):E(I,H))); @For(Horas(H):QE(H)<=q);

!SABOR 6;
S6G1=@sum(Maq_hora(I,H)| I#LE#4:Capacidade(I)*F(I,H)); S6G1>=SG(6,1);
S6G2=@sum(Maq_hora(I,H)| I#GE# 5 #AND# I#LE#7:Capacidade(I)*F(I,H)); S6G2>=SG(6,2);
S6G3=@sum(Maq_hora(I,H)| I#GE# 8 #AND# I#LE#11:Capacidade(I)*F(I,H)); S6G3>=SG(6,3);
@For(Horas(H):QF(H)=@SUM(Maq_Hora(I,H):F(I,H))); @For(Horas(H):QF(H)<=q);

@For(Maq_Hora(I,H):A(7,H)+A(10,H)<=1); @For(Maq_Hora(I,H):A(6,H)+A(11,H)<=1);
@For(Maq_Hora(I,H):B(7,H)+B(10,H)<=1); @For(Maq_Hora(I,H):B(6,H)+B(11,H)<=1);
@For(Maq_Hora(I,H):C(7,H)+C(10,H)<=1); @For(Maq_Hora(I,H):C(6,H)+C(11,H)<=1);
@For(Maq_Hora(I,H):D(7,H)+D(10,H)<=1); @For(Maq_Hora(I,H):D(6,H)+D(11,H)<=1);

@For(Maq_hora(I,H):@BIN(A(I,H)));
@For(Maq_hora(I,H):@BIN(B(I,H)));
@For(Maq_hora(I,H):@BIN(C(I,H)));
@For(Maq_hora(I,H):@BIN(D(I,H)));
@For(Maq_hora(I,H):@BIN(E(I,H)));
@For(Maq_hora(I,H):@BIN(F(I,H)));

@For(Horas(H):@sum(Maq_Hora(I,H):capacidade(I)*A(I,H))<=750);
@For(Horas(H):@sum(Maq_Hora(I,H):capacidade(I)*B(I,H))<=750);
@For(Horas(H):@sum(Maq_Hora(I,H):capacidade(I)*C(I,H))<=750);
@For(Horas(H):@sum(Maq_Hora(I,H):capacidade(I)*D(I,H))<=750);
@For(Horas(H):@sum(Maq_Hora(I,H):capacidade(I)*E(I,H))<=750);
@For(Horas(H):@sum(Maq_Hora(I,H):capacidade(I)*F(I,H))<=750);

@GIN(q);

```

APÊNDICE B – GRÁFICOS DE GANTT

As figuras apresentadas nesse apêndice representam planejamentos de produção sugeridos a partir da modelagem matemática, no *software* LINGO, tendo como objetivo o menor número de recursos. As programações seguem o sequenciamento de família (sabores) representados por cores.

