



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

DANILO LOPES DE LUCCAS

**INCREMENTO DA PRODUTIVIDADE EM UMA INDÚSTRIA DE
PRODUÇÃO DE DETERGENTE EM PÓ POR MEIO DA APLICAÇÃO DA TEORIA
DAS RESTRIÇÕES E SIMULAÇÃO POR EVENTOS DISCRETOS**

Recife
2024

DANILO LOPES DE LUCCAS

**INCREMENTO DA PRODUTIVIDADE EM UMA INDÚSTRIA DE
PRODUÇÃO DE DETERGENTE EM PÓ POR MEIO DA APLICAÇÃO DA TEORIA
DAS RESTRIÇÕES E SIMULAÇÃO POR EVENTOS DISCRETOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Profissional em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Pesquisa Operacional

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo José Pires Ferreira.

Recife
2024

. Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Luccas, Danilo Lopes de.

Incremento da produtividade em uma indústria de produção de detergente em pó por meio da aplicação da Teoria das Restrições e simulação por eventos discretos / Danilo Lopes de Luccas. - Recife, 2025.

57f.: il.

Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação Profissional em Engenharia de Produção, 2024.

Orientação: Rodrigo José Pires Ferreira.

Inclui referências.

1. Teoria das Restrições; 2. Simulação por eventos discretos; 3. Planejamento; 4. Controle da Produção. I. Ferreira, Rodrigo José Pires. II. Título.

UFPE-Biblioteca Central

DANILO LOPES DE LUCCAS

**INCREMENTO DA PRODUTIVIDADE EM UMA INDÚSTRIA DE
PRODUÇÃO DE DETERGENTE EM PÓ POR MEIO DA APLICAÇÃO DA TEORIA
DAS RESTRIÇÕES E SIMULAÇÃO POR EVENTOS DISCRETOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Profissional em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção. **Área de concentração:** Pesquisa Operacional

Aprovada em: 27 / 12 / 2024

BANCA EXAMINADORA

Prof. Rodrigo José Pires Ferreira, PhD (UFPE)

Prof. Alexandre Ramalho Alberti, PhD (UFPE)

Prof. Joelton Fonseca Barbosa, PhD (UFRN)

AGRADECIMENTOS

Concluir o mestrado foi mais do que uma realização acadêmica; foi uma jornada cheia de desafios, aprendizados e, acima de tudo, muito apoio das pessoas que amo. Quero começar agradecendo à minha esposa, Ludmila, minha parceira de vida, por estar ao meu lado em cada passo dessa caminhada. Você não só me incentivou a buscar esse sonho, mas também me suportou – e suportou mesmo – em tantos momentos solitários e intensos de estudo e desenvolvimento da dissertação. Saber que minha família estava comigo me deu força e tornou essa jornada, que poderia ser árdua, muito mais prazerosa.

À minha filha Maria Luiza, minha inspiração constante, quero dizer o quanto você foi compreensiva. Mesmo sem entender completamente por que os finais de semana eram tomados por aulas e estudos, você sempre aceitou quando eu dizia que era por um sonho. Meu maior desejo é que essa experiência que compartilhamos sirva como inspiração para você buscar os seus próprios sonhos, com toda a garra e determinação que eu vi em você enquanto me apoiava, mesmo que à sua maneira.

Aos meus colegas de classe, meu agradecimento pela troca de experiências e aprendizados. Vocês fizeram com que o conteúdo, às vezes denso, se tornasse mais leve e mais fácil de absorver, trazendo vivências reais que enriqueceram cada discussão. E aos professores, que dedicaram tempo, paciência e sabedoria, moldando não só o meu conhecimento, mas também minha visão profissional e pessoal, minha gratidão eterna.

Um agradecimento especial ao meu orientador, Professor Dr. Rodrigo, pela paciência, dedicação e disponibilidade em me guiar durante o momento mais solitário dessa jornada: a construção da dissertação. Sua orientação foi essencial para que eu conseguisse transformar ideias em um trabalho consistente e relevante. E à banca examinadora, por sua disponibilidade em pleno período pós-Natal e por contribuir com críticas construtivas que deram ainda mais valor a essa pesquisa.

Esse mestrado foi mais do que um título; foi uma prova de que, com as pessoas certas ao nosso lado, não há sonho grande demais para se realizar. Obrigado a todos que fizeram parte dessa caminhada.

“A produtividade nunca é um acidente. É sempre o resultado de um compromisso com a excelência, planejamento inteligente e esforço focado.”

Paul J. Meyer.

RESUMO

Este trabalho apresenta um modelo para aumentar a produtividade em uma indústria de detergente em pó utilizando a teoria das restrições (TOC) e a simulação por eventos discretos. A pesquisa foi conduzida em uma fábrica localizada no nordeste do Brasil, que abastece os mercados das regiões norte e nordeste, e que tem enfrentado uma crescente demanda por seus produtos. A metodologia do estudo foi estruturada como um estudo de caso, envolvendo pesquisas bibliográficas, documentais e coleta de dados em campo, integrando abordagens quantitativas e qualitativas. Foram mapeados processos produtivos, analisados dados operacionais e desenvolvidos cenários por meio de simulações no software plant simulation. Durante o estudo, identificou-se o transportador de caneca como o principal gargalo do sistema produtivo, e um algoritmo foi implementado para otimizar a distribuição de materiais entre as linhas de envase. Os resultados das simulações indicam que a nova lógica de abastecimento proposta aumenta a produção diária entre 4,9 t/dia e 6,46 t/dia, reduzindo de 38% a 65,6% a quantidade de material não distribuído para as linhas de envase. Este estudo contribui para a literatura ao demonstrar a eficácia da combinação de TOC e simulação por eventos discretos na otimização de processos industriais.

Palavras-chave: teoria das restrições; simulação por eventos discretos; planejamento; controle da produção.

ABSTRACT

This study presents a model to enhance productivity in a powdered detergent industry using the Theory of Constraints (TOC) and discrete event simulation. The research was conducted in a factory located in northeastern Brazil, supplying markets in the northern and northeastern regions, which has experienced growing demand for its products. The study's methodology was structured as a case study, involving bibliographic and documental research, field data collection, and the integration of quantitative and qualitative approaches. Production processes were mapped, operational data analyzed, and scenarios developed through simulations using the Plant Simulation software. During the study, the bucket conveyor was identified as the main bottleneck in the production system, and an algorithm was implemented to optimize the distribution of materials across packaging lines. The simulation results indicate that the proposed new supply logic increases daily production by 4.9 t/day to 6.46 t/day, reducing the amount of material not distributed to the packaging lines by 38% to 65.6%. This study contributes to the literature by demonstrating the effectiveness of combining TOC and discrete event simulation in optimizing industrial processes.

Keywords: theory of constraints; discrete event simulation; production control; planning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Percentual de tempo perdido por categoria de perdas de manufatura	12
Figura 2 - Representação gráfica da metodologia	15
Figura 3 - Fluxograma de resolução de problema utilizando simulação por eventos discretos.....	28
Figura 4 - Representação do processo produtivo.....	31
Figura 5 - Tempo em que as enchedoras operaram com nível baixo de pó nas moegas.....	35
Figura 6 - Dimensões e Distância entre as moegas de alimentação das linhas de envase (mm)	36
Figura 7 - Gráfico de distribuição das ocorrências de falhas nas linhas de envase.....	38
Figura 8 - Variação dos níveis das moegas das linhas de envase condição atual.....	39
Figura 9 - Variação dos níveis da moega da linha 4.....	40
Figura 10 - Variação dos níveis da moega da linha 18.....	41
Figura 11 - Interrupções da operação das linhas por duração de tempo.....	43
Figura 12 - Cenário de falhas na lógica nova para baixas frequência	44
Figura 13 - Cenário de falhas na lógica nova para altas frequência	44
Figura 14 - Representação do modelo no software	45
Figura 15 - Enchimento das moegas com a lógica atual para falha de baixa frequência	46
Figura 16 - Material retornado nas canecas com a lógica atual para falha de baixa frequência	46
Figura 17 - Material processado por linha com a lógica atual para falha de baixa frequência..	47
Figura 18 - Enchimento das megas das linhas com lógica nova para falhas de baixa frequência	48
Figura 19 - Material retornado nas canecas com lógica nova para falhas de baixa frequência	48
Figura 20 - Material envasado, com a lógica nova, por enchedora para falhas de baixa frequência	49

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Dados medidos em Campo do transportador	32
Quadro 2 - Capacidade das linhas de envase.....	33
Quadro 3 - Massas medidas nas canecas dos transportador de canecas.....	34
Quadro 4 - Comparativo de benefício das lógicas para falhas de alta frequência.....	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIPLA – Associação Brasileira das Indústrias de Produtos de Higiene e Limpeza e Saneantes de uso doméstico e profissional

BPR – *Business Process Reengineering*

DBR – *Drum, Buffer, Rope*

FIFO – *First in, First Out*

MPS – *Master Plan Scheduler*

MRP I - Planejamento do Recurso Materiais

MRP II – Planejamento de Recursos de Manufatura

PCP – Planejamento e Controle da Produção

PIB – Produto Interno Bruto

STP – Sistema Toyota de Produção

TOC – *Theory of Constraints*

TPS – *Toyota Productions System*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	JUSTIFICATIVA	12
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO	13
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	13
1.4	METODOLOGIA.....	14
2	BASE CONCEITUAL.....	16
2.1	TEORIA DAS RESTRIÇÕES - TOC	17
2.2	SIMULAÇÃO POR EVENTOS DISCRETOS	21
2.3	PLANO MESTRE DE PRODUÇÃO.....	23
2.4	PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO (PCP).....	25
3	MÉTODO PROPOSTO PARA ANÁLISE DE GARGALOS NO PROCESSO DE ENCHIMENTO DE MOEGAS EM LINHAS DE EVASE DE DETERGENTE EM PÓ	28
4	ESTUDO DE CASO	31
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS	31
4.2	DESCRIÇÃO DA LÓGICA DE OPERAÇÃO	38
4.2.1	Lógica atual de operação do sistema simulado	38
4.2.2	Desenvolvimento de um novo algoritmo para o transportador de caneca	41
4.3	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	45
4.3.1	Análise dos Resultados	50
4.4	IMPLICAÇÕES PRÁTICAS.....	50
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	52
5.1	LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	53
	REFERÊNCIAS.....	55

1 INTRODUÇÃO

A produção indústria tem uma representatividade importante na economia do Brasil fabricando produtos que atendem a necessidade diária dos consumidores. De acordo Júnior (2023), em 2022, a indústria respondeu por 23,9% do PIB brasileiro. Neste setor se encontra a indústria de produção de detergente em pó. Esta por sua vez tem uma importância significativa para a qualidade de vida da população brasileira, por ser um produto amplamente utilizado em tarefas domésticas essenciais como lavagem de roupas e cuidados da casa, contribuindo para a manutenção da saúde e bem-estar das pessoas.

A produção de detergente em pó envolve um sistema industrial complexo, no qual se utiliza uma cadeia logística integrada e eficiente. Essa cadeia inclui o fornecimento de insumos a granel, tanto sólidos quanto líquidos, que são processados em etapas industriais para a formulação do produto final. O processo de produção caracteriza-se por ser misto, com etapas de formulação em batelada (batch) e armazenamento em silos que auxiliam na etapa final de processamento, garantindo um ritmo de abastecimento constante para as linhas de envase. Estas linhas, por sua vez, são responsáveis por preparar o produto para distribuição. Por fim, os produtos acabados são encaminhados para centros de distribuição estrategicamente localizados, permitindo a cobertura eficiente do mercado e atendendo às crescentes demandas dos consumidores.

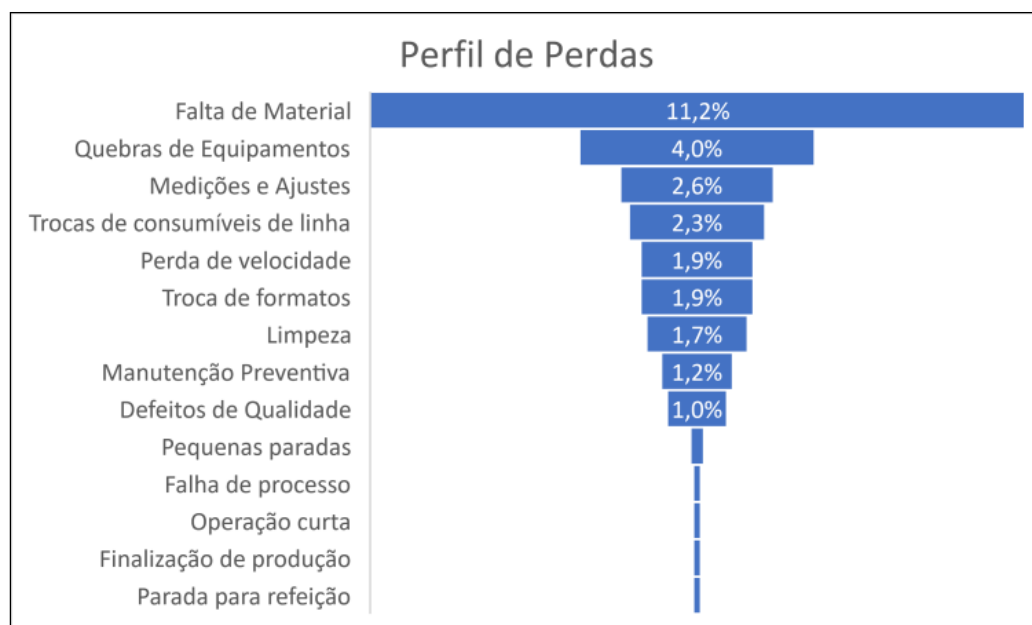
Mendonça (2023), em sua reportagem para Associação Brasileira das Indústrias de Produtos de Higiene, Limpeza e Saneantes de Uso Doméstico e de Uso Profissional – ABIPLA – apontou uma previsão de aumento de produção de 2% para 2023 em produtos de limpeza. Neste contexto, encontra-se uma fábrica de produção de detergente em pó, que tem como objetivo estratégico abastecer o mercado consumidor do norte e nordeste do Brasil. Tal indústria vive de forma mais intensa em 2023 uma crescente demanda por seus produtos, pressionando os engenheiros desta fábrica a buscar alternativas que aumente a disponibilidade de capacidade produtiva para atender a atual demanda do mercado. Este é um cenário o qual o presente trabalho buscou, através da aplicação da teoria das restrições (*Theory of Constraints*) estudar alternativas para aumentar a disponibilidade de capacidade produtiva da fábrica para atender a demanda do mercado. Portanto, o presente trabalho limitou seu escopo de estudo na aplicação do TOC e avaliação de alternativas que alcancem o objetivo de aumentar a produção, testando alternativas no ambiente digital por meio da simulação por eventos discretos.

1.1 JUSTIFICATIVA

A fábrica, ponto focal deste estudo, está operando com 96% da sua capacidade produtiva efetiva, em virtude de atender a demanda do mercado de detergente em pó. Considerando os parâmetros internos da empresa para construção do planejamento de produção, a atual ocupação fabril encontra-se 11% acima do valor de referência padrão adotado na empresa que é de 85%. Tal patamar de ocupação eleva o grau de risco de não atendimento do plano produtivo advindo de eventos não planejados. Assim, buscar soluções para liberar capacidade produtiva, reduzindo o grau de risco do não cumprimento do plano justifica o esforço em buscar alternativas para solucionar essa problemática de limitação de capacidade.

Buscando fechar o escopo do estudo, a Figura 1 apresenta o perfil de apontamento das perdas de manufatura da fábrica em estudo, acumulado no período de janeiro a junho de 2023. A falta de material, caracterizada como falta de pó para as linhas e envase, é a maior ineficiência registrada representando sozinha 11,2% do tempo não produtivo da fábrica, o que justifica aprofundarmos no entendimento desta perda e buscar solução para reduzi-la.

Figura 1 - Percentual de tempo perdido por categoria de perdas de manufatura



Fonte: próprio autor

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo principal dessa pesquisa dissertativa é encontrar uma alternativa que reduza a perda de produção, ocasionada pela falta de material nas linhas de envase, e que consequentemente, aumente a produção da fábrica. A alternativa escolhida deve apresentar seu impacto quantitativamente calculado antes da real implantação, e consequentemente melhoria na produtividade dos ativos.

Como objetivos específicos pretende-se:

- Ampliar o conhecimento sobre a teoria das restrições no ambiente industrial;
- Validar o uso da simulação no ambiente industrial como ferramenta prática de teste de soluções de baixo custo e alto impacto no processo de tomada de decisão;
- Aplicar de forma prática a teoria das restrições como alternativa de metodologia para solucionar problemas;
- Mapear o processo e entender com profundidade o princípio de funcionamento do sistema.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação foi desenvolvida em 5 capítulos e teve como objetivo central explorar os conceitos da teoria das restrições e aplicação do uso da simulação por eventos discretos para avaliar alternativas de abordagem de problema operacional no ambiente industrial. No capítulo 1, é apresentado o contexto do cenário ao qual a indústria pertence, bem como os objetivos a serem alcançados com a aplicação da teoria das restrições e simulação. O capítulo 2 busca apresentar o referencial teórico que suporta a pesquisa, assim como a abrangência desses conceitos aplicados à indústria. Em seguida, o capítulo 3 apresenta um roteiro de aplicação dos conceitos para solucionar um problema no ambiente industrial utilizando TOC e simulação. O capítulo 4 detalha a aplicação dos conceitos de TOC e simulação em um estudo de caso no ambiente industrial. Finalmente, no capítulo 5, apresenta-se a solução encontrada para o problema e sugestões de aplicação.

1.4 METODOLOGIA

Para a elaboração deste trabalho, foram realizadas pesquisas bibliográficas, documentais, entrevistas e consultas a banco de dados de sistemas de apontamento de paradas operacionais e coletas automáticas de dados do processo produtivo. Segundo Miguel (2010), a pesquisa aplicada é caracterizada por buscar soluções práticas para problemas reais, como ocorre neste estudo que trata de desafios operacionais em uma indústria de detergente em pó.

A pesquisa apresenta natureza exploratória e descritiva. Gil (2008), a abordagem exploratória é usada para obter maior familiaridade com o problema, enquanto a descritiva documenta processos e suas interações de forma detalhada. Ademais, a abordagem mista, quantitativa e qualitativa, conforme Cauchick Miguel *et al.* (2012), integra a análise de dados numéricos com observações qualitativas, sendo essencial em contextos complexos como o analisado neste trabalho.

A metodologia adotada pode ser classificada como um estudo de caso, conforme Yin (2001), uma vez que se concentrou em uma indústria específica localizada no nordeste do Brasil. Este método permitiu um aprofundamento na compreensão do contexto e na modelagem dos processos. As etapas incluíram o levantamento de dados primários e secundários para embasar a modelagem e análise do processo.

Durante a primeira etapa da pesquisa, houve o mapeamento dos processos, coleta e análise de dados, identificando o transportador de caneca como o principal gargalo do sistema produtivo. Em seguida, analisou-se a lógica de operação do sistema e foi criado um modelo de simulação utilizando o software Plant Simulation da AVEVA. Segundo Banks *et al.* (2010), a simulação por eventos discretos é uma ferramenta poderosa para avaliar cenários e propor melhorias fundamentadas em dados.

No passo seguinte, desenvolveu-se um algoritmo para melhorar a distribuição do material entre as moegas das linhas de envase, considerando as características específicas dos equipamentos e os dados históricos de produtividade e falhas. O algoritmo foi implementado e validado por meio de simulação, demonstrando impacto positivo nas condições simuladas.

Por fim, para facilitar o entendimento do método adotado, apresenta-se na Figura 2 um fluxograma metodológico que ilustra, de forma clara e detalhada, as etapas seguidas na pesquisa, abrangendo desde a identificação do problema até a proposição e avaliação da solução. Essa abordagem estruturada permitiu testar alternativas no ambiente digital

previamente à sua implementação prática, assegurando maior confiabilidade e precisão nos resultados obtidos.

Figura 2 - Representação gráfica da metodologia



Fonte: próprio autor

2 BASE CONCEITUAL

A elevada competição entre empresas por participação no mercado, conhecida como *market share*, visa manter e aumentar os resultados financeiros através da fidelização de clientes recorrentes e da atração de novos clientes. Embora o aumento de preços seja uma alternativa para o crescimento da receita, ele pode impactar negativamente o *market share*. Internamente, as empresas buscam otimizar a produção, reduzir custos e melhorar a qualidade do produto, áreas que influenciam diretamente o desempenho no mercado e a decisão de compra dos clientes. Além disso, a rápida adaptação às mudanças nas demandas do mercado e às inovações tecnológicas é crucial. Esses desafios destacam a importância de identificar e gerenciar as restrições que limitam o desempenho da empresa.

A Teoria das Restrições (TOC) é uma abordagem de gestão apresentada por Goldratt (1990). Essa teoria se baseia na ideia de que em qualquer processo produtivo, há pelo menos uma restrição que limita a capacidade do sistema todo. Essa restrição pode ser representada por um recurso físico, como uma máquina, ou por uma restrição de políticas, como um procedimento burocrático de gestão de estoque, por exemplo. Ela oferece uma abordagem sistemática para resolver problemas, priorizando ações que impactam diretamente a restrição.

Robinson e Brooks (2024), a simulação por eventos discretos é uma técnica para modelar e analisar sistemas complexos. Ela permite criar um ambiente virtual onde é possível testar diferentes cenários, variando parâmetros e estratégias. Ao simular processos, as empresas podem entender melhor o comportamento do sistema, antecipar impactos de mudanças e tomar decisões com maior segurança.

Assunção e Jacobs (2016), realizaram um estudo comparativo entre layouts sob a ótica da teoria das restrições com o apoio de simulação de eventos discretos em uma empresa de alimentos e obtiveram ganhos na redução do número de recursos necessários para operação, melhor balanceamento e fluxo da matéria prima conforme a necessidade do produto alcançando aumento de ganhos na casa de 12,34% com uma redução dos investimentos quando comparada à segunda alternativa estudada. A facilidade e flexibilidade proporcionadas pela simulação em estudos de cenários são extremamente atraentes para os tomadores de decisão. Essa técnica não só oferece números quantitativos para comparar diferentes cenários, mas também permite visualizar o impacto das alterações de forma emulada em um ambiente virtual.

A TOC com a simulação por eventos discretos proporciona uma abordagem robusta para otimizar a gestão de recursos e o planejamento de produção. A TOC, ao identificar e focar

nas restrições críticas do sistema, permite que as empresas concentrem seus esforços nas áreas que mais impactam a eficiência global. Quando combinada com a simulação por eventos discretos, essa abordagem ganha uma dimensão adicional, permitindo a modelagem de diferentes cenários e a análise detalhada do comportamento do sistema sob diversas condições. Essa sinergia possibilita uma visualização clara dos impactos potenciais de mudanças antes de sua implementação real, facilitando a tomada de decisões estratégicas. Empresas que utilizam essas ferramentas em conjunto conseguem não apenas melhorar o fluxo de produção e reduzir custos, mas também aumentar a flexibilidade e a capacidade de resposta às demandas do mercado, resultando em um sistema produtivo mais eficiente e resiliente.

A seção 2.1 deste capítulo se dedica a uma apresentação da Teoria das Restrições (TOC). Aqui, exploramos como a TOC identifica e gerencia gargalos no processo produtivo, propondo uma abordagem sistemática para melhorar o fluxo de produção e maximizar a eficiência e a lucratividade. A seção 2.2 aborda a Simulação por Eventos Discretos. Nesta parte, discutimos como essa técnica permite modelar e analisar sistemas complexos, criando um ambiente virtual para testar diferentes cenários e estratégias, ajudando na tomada de decisões mais seguras e informadas.

Na seção 2.3, apresentamos o Plano Mestre de Produção (MPS). Esta seção explica a importância do MPS no planejamento de médio prazo, detalhando como ele desdobra o plano de vendas e operações em produtos individuais, garantindo a satisfação do cliente e o controle dos níveis de estoque. Por fim, a seção 2.4 foca no Planejamento e Controle da Produção (PCP). Aqui, discutimos como o PCP gerencia e coordena todas as etapas do processo produtivo, otimizando a alocação de recursos, minimizando custos e maximizando a eficiência operacional para atender à demanda do mercado de forma eficaz.

2.1 TEORIA DAS RESTRIÇÕES - TOC

A Teoria das Restrições (TOC- *Theory of Constraints*), conforme proposta por Goldratt (1990), enfatiza a identificação e gestão de gargalos no processo produtivo para melhorar o fluxo de produção, sugerindo que o desempenho de qualquer sistema é limitado por um número restrito de restrições e que a melhoria contínua deve focar nesses pontos. Para implementar a TOC, Goldratt (1990) descreve cinco etapas:

- Identificar as restrições do sistema: Nessa fase, busca-se compreender quais são os gargalos que limitam o desempenho da organização.
- Decidir como explorar as restrições: Uma vez identificadas, as restrições devem ser abordadas de maneira estratégica para otimizar o fluxo de trabalho.
- Subordinar os demais recursos ao ritmo da restrição: Os demais recursos da organização devem ser alinhados à capacidade da restrição principal.
- Elevar a restrição: Aqui, o foco está em melhorar a capacidade da restrição, seja por meio de investimentos ou aprimoramentos.
- Quando o recurso restritivo aumentar, voltar ao passo 1: Esse ciclo contínuo visa manter a organização adaptada às mudanças e evoluções, eventualmente identificando uma mudança do local da restrição.

Goldratt (1990), apresenta um conjunto de ferramentas e conceitos que permitem analisar e otimizar processos produtivos. Entre os principais estão os modelos matemáticos que auxiliam na compreensão das restrições e na implementação de soluções eficazes. Dentre os modelos matemáticos, o cálculo da capacidade do gargalo e o tempo de ciclo são informações de destaque na aplicação da metodologia e são obtidas da seguinte forma:

- Capacidade do Gargalo = $\text{Tempo Disponível do Gargalo } (\Delta t) / \text{Tempo Necessário para Processar uma Unidade } (T\zeta)$
- Tempo de Ciclo = $\text{Tempo de Processamento no Gargalo} + (\text{Estoque em Processo} / \text{Taxa de Saída})$

Pereira e Alves Filho (2009) avaliaram os sistemas de produção da Ford em comparação com o Sistema Toyota de Produção (TPS) desenvolvido por Shingo e Ohno. Eles observaram que, embora o sistema lean seja amplamente aplicado em diversas indústrias, ele nem sempre consegue melhorar o desempenho organizacional devido às diferenças nos ambientes de produção. Um exemplo citado é o fracasso na implementação do *lean* na empresa *Hitachi Tool Engineering*, onde as particularidades do ambiente de produção não permitiram que os benefícios esperados fossem alcançados. A Teoria das Restrições (TOC) foi então aplicada para resolver os problemas enfrentados, demonstrando ser mais adequada para aquele contexto específico.

O principal objetivo da TOC é identificar e gerenciar essas limitações, de modo a maximizar a eficiência e a lucratividade do sistema. Para isso, a teoria propõe um conjunto de ferramentas e técnicas, como o uso do diagrama de causa e efeito (também conhecido como diagrama de Ishikawa) para identificar as causas raízes das restrições, e o uso do sistema de medição de desempenho para avaliar o impacto das mudanças implementadas. A TOC também sugere que se deve focar no desempenho do sistema na totalidade, em vez de otimizar partes isoladas, já que a melhoria de apenas uma parte não resultará necessariamente em uma melhoria do sistema todo.

Na prática, a TOC incorpora os conceitos estratégicos de tambor, pulmão e corda (DBR – *Drum Buffer Rope*). O tambor dita o ritmo da produção. O pulmão protege o processo evitando que falte material para o tambor e cliente, protegendo o sistema contra as flutuações e incertezas inerentes aos processos produtivos, assim estabilizando o atendimento da demanda real. A corda alinha a produção à demanda real. Empresas que implementam a TOC reportam uma redução significativa nos desperdícios e lead times, ao passo que aumentam a satisfação dos clientes com entregas mais ágeis e confiáveis.

Pereira e Alves Filho (2009) destacam como a TOC pode ser adaptada para ambientes industriais menos estáveis e mostra os limites dessa abordagem. A aplicação do método DBR resultou em melhorias significativas para a empresa *Hitachi Tool Engineering* em substituição ao *Toyota Production System* - TPS. A TOC se apresentou menos sensível às perturbações do fluxo e mais adequada para ambientes instáveis, em contraste com o Sistema Toyota de Produção – TPS - que requer um ambiente estável para funcionar eficazmente, assim se mostrando uma teoria aplicável em diferentes ambientes e processos e, apesar de seus benefícios, a implementação não está isenta de desafios. A *Hitachi Tool Engineering* obteve os seguintes benefícios ao aplicar a TOC: Desempenho de prazo de entrega atingiu 85% de cumprimento de prazos, comparado aos 40% anteriores; Redução de inventário e tempo de ciclo ocasionando uma redução do inventário de 8 meses para 2,4 meses e os tempos de ciclo cortados pela metade; Aumento de capacidade, houve um aumento de 20% na capacidade de envio com a mesma força de trabalho.

Um exemplo da versatilidade da aplicação da TOC em diferentes processos é apresentado por Azaria, Ronen e Shamir (2023), que exploraram a aplicação da TOC no ambiente judicial de Israel. As principais dificuldades enfrentadas incluíram a resistência à mudança, onde a introdução de novas práticas e alterações nos procedimentos estabelecidos encontrou resistência por parte dos colaboradores. Para superar isso, foram necessários

workshops e sessões de planejamento para alinhar todos os juízes às novas metodologias propostas. Além disso, a complexidade na subordinação do sistema foi um desafio, pois, após a identificação e otimização do gargalo, alinhar todas as outras partes do sistema à nova cadência mostrou-se complexo. A mudança para políticas de agendamento mais estruturadas, como o FIFO (*First In, First Out*) a nível de casos, exigiu um planejamento meticuloso e inicialmente aumentou o tempo de espera para entrada na fase de julgamento. A TOC, sendo um processo iterativo, requer monitoramento constante e ajustes frequentes, demandando recursos significativos e um comprometimento contínuo da organização para garantir a sustentabilidade das melhorias ao longo do tempo. Outro desafio significativo foi a necessidade de uma mudança cultural, pois a implementação bem-sucedida da TOC requer uma mentalidade de melhoria contínua e uma abordagem colaborativa, o que pode ser difícil de alcançar em ambientes onde predomina uma cultura de silos e competitividade interna (Hackman; Wageman, 1995).

Gupta (2003) discute a aplicação da TOC no planejamento estratégico, mostrando como a metodologia pode ajudar as organizações a alinhar seus recursos com suas prioridades competitivas. Gupta, Boyd e Sussman (2004) sugere que para tal alinhamento seja feito, se utilize de ferramentas como o Diagrama de Árvore da Realidade Futura e o Diagrama de Árvore de Transição, que ajudam a mapear os caminhos de melhoria contínua. Gupta (2003), destaca a complexidade de ajustar todos os processos organizacionais para apoiar a restrição identificada. Isso pode envolver mudanças significativas em políticas, procedimentos e até mesmo na estrutura organizacional, o que requer um forte compromisso da liderança e um planejamento cuidadoso.

A Teoria das Restrições oferece um *framework* para a melhoria do desempenho organizacional ao focar em restrições específicas e promover uma cultura de melhoria contínua com foco no resultado global. No entanto, a sua implementação bem-sucedida requer um planejamento cuidadoso, a gestão da resistência à mudança e um compromisso contínuo com a adaptação e refinamento dos processos (Goldratt, 1990).

Dentre as vantagens da aplicação da teoria das restrições destacam-se:

- Melhoria da eficiência: A TOC é eficaz em identificar e eliminar gargalos, resultando em um fluxo de produção mais suave e eficiente (Goldratt, 1990).

- Aumento da produtividade: Ao focar nas restrições, as organizações podem maximizar a utilização de seus recursos críticos, aumentando a produção sem necessariamente aumentar os custos (Gupta, 2008).
- Redução de estoques: A metodologia ajuda a minimizar os estoques, o que reduz os custos de armazenagem e melhora o capital de giro (Goldratt, 1990).
- Melhoria contínua: A TOC promove uma cultura de melhoria contínua, incentivando as organizações a continuamente identificar e resolver novas restrições (Dettmer, 1997).

Como desafios da aplicação da TOC temos:

- Resistência à mudança: A implementação da TOC pode enfrentar resistência significativa por parte dos funcionários e gestores, que podem estar apegados aos métodos tradicionais (Hackman; Wageman, 1995).
- Complexidade na implementação: Ajustar todos os processos organizacionais para alinhar com a restrição identificada pode ser um processo complexo e demorado (Gupta, 2003).
- Necessidade de mudança cultural: A adoção bem-sucedida da TOC requer uma mudança cultural significativa, que pode ser difícil de implementar em organizações com culturas profundamente enraizadas (Gupta; Boyd; Sussman, 2004).

2.2 SIMULAÇÃO POR EVENTOS DISCRETOS

Hollocks (2006) afirma que o uso da simulação começou na década de 1950. Inicialmente, algumas instituições de pesquisa, como *Dollis Hill* no Reino Unido e *Bell Laboratories* nos EUA, construíram dispositivos especiais para representar sistemas específicos de filas estocásticas, como para o tráfego telefônico.

A simulação tem encontrado aplicação em uma variedade de áreas, incluindo a reengenharia e o redesenho de processos de negócios, onde tem sido frequentemente citada como uma ferramenta eficaz. A simulação também tem sido empregada em áreas como planejamento de recursos humanos e modelagem de sistemas de produção. Assim, a simulação se revela uma ferramenta que encontra aplicação em diversas áreas de estudo de processos.

Silva (2018) aplicou a simulação por eventos discretos em operações de mina subterrânea, destacando diversos benefícios, especialmente em operações complexas como a mineração subterrânea:

1. Diagnóstico de problemas: A simulação possibilita a detecção precisa de problemas no sistema. Ao simular a sequência de eventos, é possível identificar onde ocorrem atrasos e congestionamentos, permitindo concentrar esforços nas áreas problemáticas.
2. Teste de alternativas: Com a simulação, é possível experimentar diferentes cenários e estratégias sem interferir diretamente na operação real. Isso permite avaliar alterações antes de colocá-las em prática, otimizando decisões e minimizando riscos.
3. Entendimento do sistema: A simulação auxilia na compreensão do sistema como um todo, incluindo interações complexas entre diferentes componentes. Isso é particularmente relevante em minas subterrâneas, onde a dinâmica é complexa.

Silva (2018) destaca as seguintes etapas na construção da simulação por eventos discretos:

1. Modelagem do sistema: Definir os elementos do sistema (máquinas, processos, estoques) e suas interações. Construir um modelo que represente de maneira fiel a operação.
2. Coleta de dados: Coletar dados reais sobre tempos de processamento, fluxos, capacidades e outras variáveis relevantes. Esses dados são fundamentais para calibrar o modelo.
3. Validação do modelo: Conferir se o modelo reproduz de maneira precisa o comportamento observado no sistema real. Ajustar parâmetros conforme necessário.
4. Execução da simulação: Executar o modelo com diferentes cenários, alterando parâmetros e estratégias. Registrar resultados, como tempos de ciclo, utilização de recursos e problemas identificados.

Lins e Droguett (2008) trabalharam com um algoritmo genético multi objetivo integrado com simulação discreta de eventos onde propuseram uma abordagem para otimizar a

confiabilidade e o custo de sistemas reparáveis. Deste podemos destacar benefícios e desafios da aplicação conforme a seguir:

- Benefícios:
 - Realismo: A combinação da simulação de eventos discretos com o algoritmo genético permite uma abordagem mais realista para caracterizar a confiabilidade do sistema.
 - Compromisso: As soluções encontradas apresentam um compromisso entre a confiabilidade do sistema e seus custos associados.
 - Ferramenta Valiosa: O método proposto pode ser uma ferramenta valiosa para tomada de decisão no projeto do sistema.
- Desafios:
 - Complexidade: Integrar a simulação de eventos discretos com o algoritmo genético requer modelagem detalhada e consideração de múltiplos objetivos.
 - Ajuste de Parâmetros: Encontrar os parâmetros ideais para o algoritmo genético e a simulação pode ser desafiador.
 - Tempo de Execução: A execução conjunta da simulação e do algoritmo genético pode ser computacionalmente intensiva.

A simulação é uma ferramenta valiosa que se aplica a várias áreas de estudo de processos. No entanto, ainda existem desafios a serem superados, incluindo a necessidade de maior pesquisa na área, a superação das limitações do modelo e as complexidades da aplicação no ambiente empresarial, por necessitar de informações precisas do sistema a ser modelado, dados de qualidade que muitas vezes não estão facilmente disponíveis, escassez de conhecimento especializados e a integração com sistemas existentes.

2.3 PLANO MESTRE DE PRODUÇÃO

As atividades de planejamento de produção são agrupadas em níveis de decisão, cada um com seus próprios horizontes de planejamento, detalhamento de informação e metas. O nível operacional lida com o curto prazo, geralmente entre uma semana e um mês. Em

contrapartida, o planejamento tático foca em decisões de médio prazo (6 a 18 meses), enquanto o nível estratégico se ocupa de decisões de longo prazo (2 a 5 anos) (Jonsson; Ivert, 2015).

Essas atividades se baseiam em dois princípios fundamentais: gestão de prioridades e capacidade. A gestão de prioridades é orientada ao cliente, determinando as quantidades de produtos a serem entregues em uma data específica. Já a gestão de capacidade é a resposta do produtor ao cliente, comparando a capacidade dos recursos disponíveis, fundos financeiros e disponibilidade de matéria-prima com a demanda para identificar o que a empresa precisa para cumprir os prazos contratuais (Arnold; Chapman; Clive, 2008).

Gourgand, Lemoine e Norre (2010) destacam que o planejamento estratégico (plano de vendas e operações) administra a satisfação da demanda, levando em conta a estratégia geral da empresa e fornecendo um quadro para níveis inferiores de tomada de decisão. O planejamento tático estabelece, no nível do item mestre, a quantidade que deve ser produzida em cada período do horizonte de planejamento para satisfazer a demanda do cliente sob condições de produção ótimas. Por fim, o planejamento operacional (programação) gerencia os fluxos físicos para garantir a disponibilidade de produtos no sistema de produção de acordo com o que foi definido no nível tático.

O Planejamento Mestre de Produção (MPS – *Manufacturing Performance System*) é um componente crucial do planejamento de médio prazo, conforme discutido por Akhoondi e Lotfi (2016). Ele desempenha um papel vital na divisão do plano de vendas e operações (S&OP) para produtos individuais em um horizonte de planejamento mais curto.

Baglin, Lamouri e Thomas (2015) ressaltam que o horizonte de planejamento para o MPS deve ser extenso o suficiente para abranger o maior tempo de espera cumulativo para fornecimento e produção. Isso garante que o MPS seja eficaz e eficiente. Jonsson e Ivert (2015) destaca a importância do MPS como um meio de comunicação entre a gestão de pedidos de vendas e a produção. Ele permite que o departamento de vendas estabeleça as quantidades que podem ser reservadas para os clientes e as datas em que os pedidos devem ser entregues.

De acordo com APICS (2011), o MPS tem três objetivos principais, dois dos quais são garantir a satisfação do cliente em relação aos prazos de entrega e controlar os níveis de estoque. Esses objetivos são alcançados através de duas entregas principais do processo do MPS: A primeira entrega é um plano de produção que indica as quantidades de produtos acabados a serem fabricados por semana dentro do horizonte do MPS. A segunda entrega é um plano de entrada para a programação que indica o tempo de produção para cada ordem de produção.

Essas entregas garantem que o MPS seja eficaz em atingir seus objetivos e contribuir para a satisfação do cliente.

Jonsson e Ivert (2015), aborda uma distinção crucial entre os resultados obtidos pelo MPS e os objetivos que uma empresa pretende alcançar através do processo do MPS. Um dos resultados mais significativos do MPS é a criação de um plano de produção viável. Este plano orienta o que deve ser produzido, visando atingir um ou mais dos seguintes objetivos: incremento da produtividade, otimização da capacidade disponível, aprimoramento do atendimento ao cliente e manutenção do estoque no nível adequado.

Os profissionais que trabalham com planejamento mestre têm a responsabilidade de avaliar diferentes cenários do MPS, levando em consideração a viabilidade da produção. No entanto, é importante ressaltar que o MPS, por si só, não assegura a utilização ideal dos recursos ou a entrega pontual dos produtos. Ele necessita de sistemas de gestão eficazes que garantam a capacidade de resposta diante de eventuais interrupções que surgem no ambiente produtivo. Este é um processo complexo, mas fundamental para converter objetivos estratégicos em programas de produção viáveis. Portanto, a implementação eficaz do MPS é essencial para o sucesso operacional e estratégico de uma empresa.

2.4 PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO (PCP)

O Planejamento e Controle da Produção (PCP) é um componente crucial no ambiente de negócios. A competitividade acirrada e a globalização têm impulsionado as empresas a buscar incessantemente aprimoramentos em seus processos, produtos e serviços, por meio de estratégias bem definidas. O PCP, quando bem implementado e gerenciado, pode ser um diferencial competitivo significativo no cenário empresarial atual (Pacheco, 2014).

O PCP é uma estratégia crucial que desempenha um papel significativo nos critérios competitivos ganhadores de pedidos e/ou qualificadores. Compreendendo um conjunto de técnicas e estratégias, o PCP é empregado pelas empresas para gerenciar e coordenar todas as etapas do processo produtivo. O objetivo principal é otimizar a alocação de recursos, minimizar custos e maximizar a eficiência operacional. Seu objetivo central é garantir que os recursos disponíveis sejam utilizados de maneira eficiente para atender à demanda do mercado, ao mesmo tempo em que se minimizem custos e se maximize a qualidade dos produtos (Arnold; Chapman; Clive, 2008).

Através do planejamento e controle eficaz da produção, é possível que as empresas alcancem maior eficiência, competitividade e satisfação dos clientes. Além disso, ele tem o papel de acompanhar a execução do plano, garantindo que as metas de produção sejam alcançadas e que os recursos sejam utilizados eficientemente permitindo que as empresas atendam à demanda do mercado de forma mais precisa e rápida, garantindo a disponibilidade de produtos no momento certo e no local adequado. Isso pode ser crucial para ganhar pedidos e se qualificar como um fornecedor preferencial no mercado (Jonsson; Ivert, 2015).

O PCP é um processo multifacetado que envolve uma série de etapas interligadas, todas essenciais para a eficiência e eficácia da produção. Este inicia-se com a previsão de demanda, uma etapa crucial que utiliza dados históricos, tendências de mercado e outros fatores relevantes para prever a demanda futura dos produtos da empresa. Após a previsão de demanda, a empresa entra na etapa de planejamento da capacidade de produção, determinando a quantidade de recursos necessários, como mão de obra, materiais e equipamentos, para atender à demanda prevista. Em seguida, ocorre a programação da produção, que envolve a criação de um cronograma detalhado especificando quando cada etapa do processo de produção deve ocorrer. As etapas subsequentes incluem o planejamento de materiais e de mão de obra: o planejamento de materiais determina quais materiais serão necessários e quando devem ser adquiridos, enquanto o planejamento da mão de obra envolve a determinação do número de trabalhadores necessários e quando eles devem estar disponíveis. Finalmente, a emissão de ordens de produção fornece instruções detalhadas para o chão de fábrica sobre o que deve ser produzido, quando e com quais materiais. Acompanhar a produção é uma etapa importante que envolve o monitoramento do progresso da produção para garantir que ela esteja ocorrendo conforme o planejado. Finalmente, a última etapa é o controle da produção, que envolve a verificação do andamento da produção e a realização de ajustes conforme necessário para garantir que os objetivos de produção sejam atingidos (APICS, 2011).

Tais etapas do PCP amplamente gerenciadas e coordenadas por meio de ferramentas de planejamento de requisitos de materiais – MRP I - e planejamento de recursos da manufatura – MRP II. O MRP I engloba basicamente as etapas de previsão de demanda, planejamento de matérias e emissão de ordens de produção. Já o MRP II engloba um escopo mais amplo do PCP ficando responsável pelas etapas de: Planejamento da capacidade de produção, Planejamento da mão de obra, acompanhamento da produção e controle da produção (Arnold; Chapman; Clive, 2008).

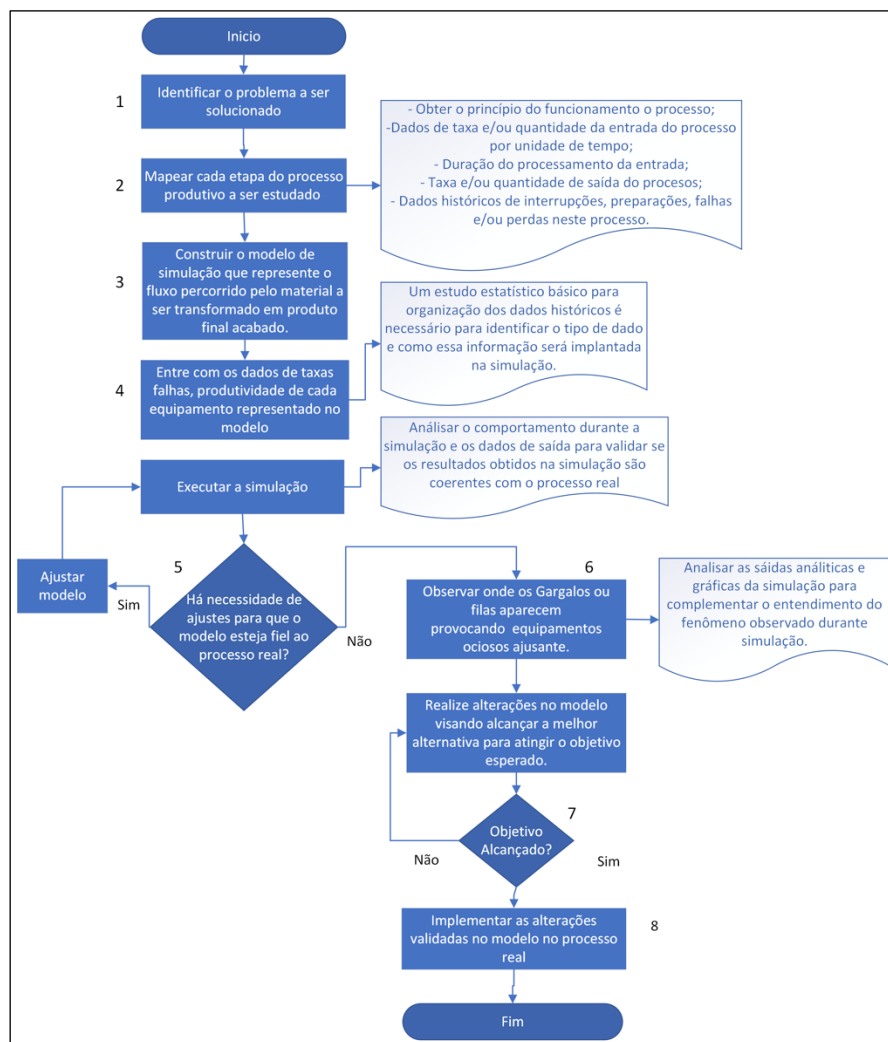
A crescente competição no mercado exige que as empresas busquem constantemente maneiras de otimizar seus processos produtivos, reduzir custos e melhorar a qualidade dos produtos. A TOC oferece uma abordagem eficaz para identificar e gerenciar os gargalos que limitam a capacidade produtiva. Complementando essa teoria, a simulação por eventos discretos permite modelar e analisar sistemas complexos, possibilitando a visualização de diferentes cenários e a tomada de decisões mais informadas. Estudos como o de Assunção e Jacobs (2016) demonstram que a combinação da TOC com a simulação pode resultar em melhorias significativas na eficiência operacional e na redução de custos. Esse método visa maximizar a entrega do produto acabado, minimizando inventário e despesas operacionais o que converge com o papel do PCP no ambiente produtivo (Silva, 2018).

A TOC, ao promover um ciclo contínuo de identificação e elevação das restrições dos processos da empresa, buscando sempre melhorar a capacidade produtiva, fornece informações relevantes para os processos do MPS e PCP. Esses incorporam as informações de restrições de capacidade ao ciclo contínuo de revisão e constantes ajustes nos planos de produção e os cronogramas, baseando-se nos feedbacks e nos dados de desempenho. Isso permite uma adaptação rápida às mudanças e melhorias contínuas no processo produtivo. Combinar o DBR aos processos de PCP e MPS se torna uma estratégia interessante na gestão do processo produtivo (Pereira; Alves Filho, 2009).

3 MÉTODO PROPOSTO PARA ANÁLISE DE GARGALOS NO PROCESSO DE ENCHIMENTO DE MOEGAS EM LINHAS DE EVASE DE DETERGENTE EM PÓ

A resolução de problemas de gargalo em uma processos fabril é algo frequentemente trabalhado, visto a característica dinâmica que o gargalo apresenta. Ao se resolver a restrição imposta pelo gargalo em uma determinada etapa do processo de produção, outro gargalo aparecerá em outra posição podendo ser uma máquina específica, um processo de trabalho ou até mesmo a logística de fornecimento de matéria-prima (Goldratt; Cox, 1997). O estudo para resolução do problema de falta de pó usando teoria das restrições e simulação por eventos discretos foi elaborado seguindo os passos do fluxograma abaixo representado na Figura 3.

Figura 3 - Fluxograma de resolução de problema utilizando simulação por eventos discretos



Fonte: próprio autor

Este fluxograma processual busca servir como um guia visual para entender o processo de resolução de problema. Este foi dividido em 8 passos descritos a seguir:

O passo 1 diz respeito a identificar o problema a ser solucionado. É uma etapa fundamental para o sucesso do trabalho, pois contempla a delimitação do problema a ser estudado com a simulação, as perguntas a serem respondidas e quais informações e dados serão utilizados para construção do modelo. O estudo de caso da dissertação se restringiu a entender o problema na distribuição do pó para as moegas das embaladoras, etapa do processo identificada como gargalo, buscando responder a pergunta de minimização da perda de falta de pó para a embalagem.

O passo 2 consiste em mapear os subprocessos do sistema produtivo a ser simulado bem como entender o princípio operacional dos equipamentos e como estes subprocessos interagem entre si. Informações importantes são obtidas a partir de respostas a questões como:

- O processo é contínuo ou batelada?
- O processo opera em regime de turnos?
- Há operadores trabalhando em mais de uma máquina gerando deslocamento e tempo de espera entre etapas?
- Qual a frequência e tempo de set up de cada máquina?
- Quais as velocidades de produção em unidades por hora?
- Qual é o perfil de perdas de produção do processo e seus dados históricos?

Para o estudo de caso foram levantados dados como volume dos silos de alimentação do transportador de caneca, quantidade, velocidade e volume das canecas, vazão nominal do transportador, tempo de esvaziamento das moegas entre os sensores de nível alta e baixo das enchedoras, princípio de funcionamento e lógica de distribuição do pó, volume e distâncias entre moegas das enchedoras, tempos e frequências de paradas por manutenção, set ups de processo e indisponibilidade das enchedoras para receber pó.

No passo 3, ocorre a construção do modelo. Esta etapa exige o conhecimento adquirido nas etapas 1 e 2 para modelar o fluxo do processo, considerando os equipamentos e as etapas existentes. Isso inclui as fases de armazenamento e movimentação de materiais, seja de forma manual ou automatizada, em processos contínuos ou em bateladas.

O Passo 4 é uma continuidade do passo 3 onde se faz a inserção dos dados históricos determinísticos e probabilísticos existentes no processo como informações de produtividade, taxa de falhas, tempos de movimentação de materiais. Para os dados probabilísticos é requerido um estudo dos dados históricos para encontrar as informações estatísticas importantes a serem fornecidas ao modelo, como exemplo: tipo de distribuição dos dados históricos, a média e desvio padrão. Essas são as informações básicas para que o modelo utilize a informação probabilísticas na simulação.

Já o passo 5 é a etapa interativa onde observamos o modelo trabalhar e comparamos com o processo real para validar que o modelo está funcionando em conformidade ao processo real. Neste passo ajustes são necessários para que o modelo de simulação esteja refletindo o processo real fornecendo as saídas para a próxima etapa.

O passo 6 é onde ocorre análise das saídas da simulação observando onde ocorrem perdas de produtividade e surgimento de acúmulo de material para processamento.

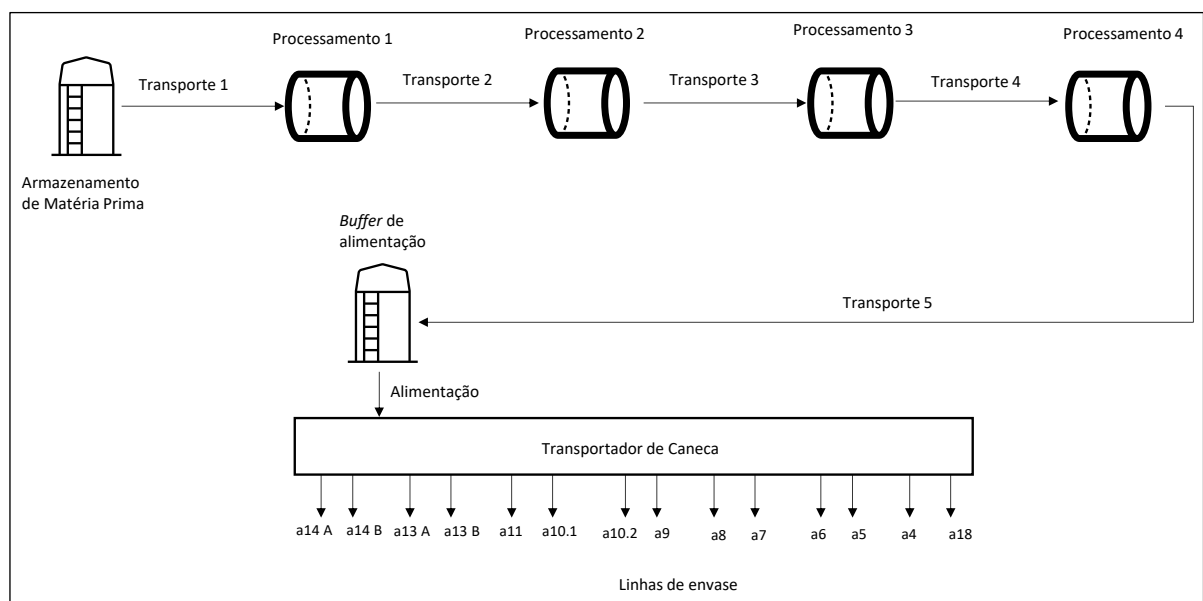
O Passo 7 é o mais criativo do trabalho, onde se buscam alternativas, testam-se no modelo de simulação e avalia-se a performance das respostas obtidas, visando solucionar o problema das perdas. Diversos cenários de simulação são criados para encontrar a solução mais eficaz, com menor risco e impacto para o processo real.

Passo 8 é a etapa que costuma levar mais tempo de desenvolvimento e esforço cognitivo para apresentar e vender a solução desenvolvida, bem como de negociação para encontrar os recursos necessários, tempo, pessoas e patrocínio financeiro para realizar as alterações físicas no processo real.

4 ESTUDO DE CASO

O processo de produção do detergente em pó está representado de forma simplificada na Figura 4. Este inicia no armazenamento de matéria prima o qual tem seu material movimentado pelo transporte 1 alimentando a primeira etapa do processo de produção do detergente em pó, processamento 1. Na sequência ocorrem uma série de transportes e processamentos do pó base até que este esteja pronto e disponível no buffer de alimentação do transportador de caneca. O processo anterior ao buffer de alimentação ocorrer em bateladas de produção. A partir do buffer ocorre de forma contínua abastecendo as linhas de envase do detergente em pó.

Figura 4 - Representação do processo produtivo



Fonte: próprio autor

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

O transportador de caneca é um sistema composto por uma correia com várias canecas acopladas a ela. Esta correia é tracionada por um conjunto de acionamento composto por motor redutor e roda dentada. Esta última responsável por transmitir o movimento à correia de transporte das canecas. Abaixo do transportador estão posicionadas as moegas de cada uma das linhas de envase. Todas as moegas possuem sensores de medição de nível alto, médio e baixo. Quando é atingido o nível médio, é enviado um sinal ao controlador lógico programável – CLP

- que é responsável pelo acionamento pneumático de um braço. Com o levantamento do braço, as canecas que passam acima da moega são viradas e o material é descarregado na moega da respectiva linha.

Uma vez que a movimentação do transportador de canecas ocorre no sentido anti-horário, as primeiras linhas (14, 13, 11) têm preferência, já que serão abastecidas antes, no caso de levantamento de diversos braços simultaneamente. Com isso, existe a possibilidade das canecas chegarem vazias nas últimas linhas (18, 04, 05), isso devido a lógica atual de abastecimento. Além da lógica de abastecimento favorecer as primeiras linhas, as últimas linhas são mais modernas, velozes e eficientes, como consequência demandam mais material que as demais.

Em campo, buscando entender a quantidade de material descarregado nas moegas, realizou-se uma verificação nas moegas das linhas 14A e 14B. Constatou-se que após o levantamento do braço referente às moegas das linhas 14A e 14B, são descarregadas 4 canecas até que o respectivo braço se abaixe novamente. Foram realizadas diversas medições em campo, e não foram constatados descarregamentos superiores a 4 canecas. Vale ressaltar que não foram realizadas medições das demais moegas das outras linhas uma vez que não era possível garantir que as canecas que estavam sendo descarregadas estavam cheias ou vazias. Posto isso, realizou-se o cálculo de capacidade de abastecimento do transportador de caneca com base em dados medidos em campo. O Quadro 1 apresenta os valores alterados do real para efeito de confidencialidade. A vazão calculada de abastecimento do transportador de caneca é de 31,7 t/h.

Quadro 1 - Dados medidos em Campo do transportador

Descrição	Valor
Número de canecas	441
Capacidade de cada Caneca [kg]	7
Tempo de ciclo do transportador de caneca [segundos]	341,7
Vazão calculada de abastecimento do transportador [t/h]	31,7

Fonte: próprio autor

Considerando a capacidade nominal de cada uma das linhas de produção do detergente em pó, o transportador de canecas precisaria de ter uma capacidade mínima de 36,6 t/h,

conforme apresentado no Quadro 2. O cálculo foi realizado considerando capacidade de 5,63 t/h para as linhas 04 e 18, que correspondem as linhas que produzem unidades de 1 kg.

Quadro 2 - Capacidade das linhas de envase

Linhas de Envase	Capacidade [t/h]
Linha 14	3,62
Linha 13	3,62
Linha 11	2,01
Linha 10	3,62
Linha 09	2,01
Linha 08	2,01
Linha 07	3,62
Linha 06	2,41
Linha 05	2,41
Linha 04	5,63
Linha 18	5,63
Total	36,6

Fonte: próprio autor

Ainda em busca do entendimento da capacidade do transportador de canecas, foram feitas medições de massa de três canecas em campo. O Quadro 3 apresenta as massas de referência obtida na medição de campo. Uma vez que a coleta em campo não foi realizada de maneira precisa, considera-se que houve erro ao coletar o pó referente à caneca 1 assim retirando esse outlier. Portanto, considerou-se as massas medidas da caneca 2 e da caneca 3.

Quadro 3 - Massas medidas nas canecas dos transportador de canecas

Canecas	Massa medida [Kg]
Caneca 1	12,1
Caneca 2	9,4
Caneca 3	7,8

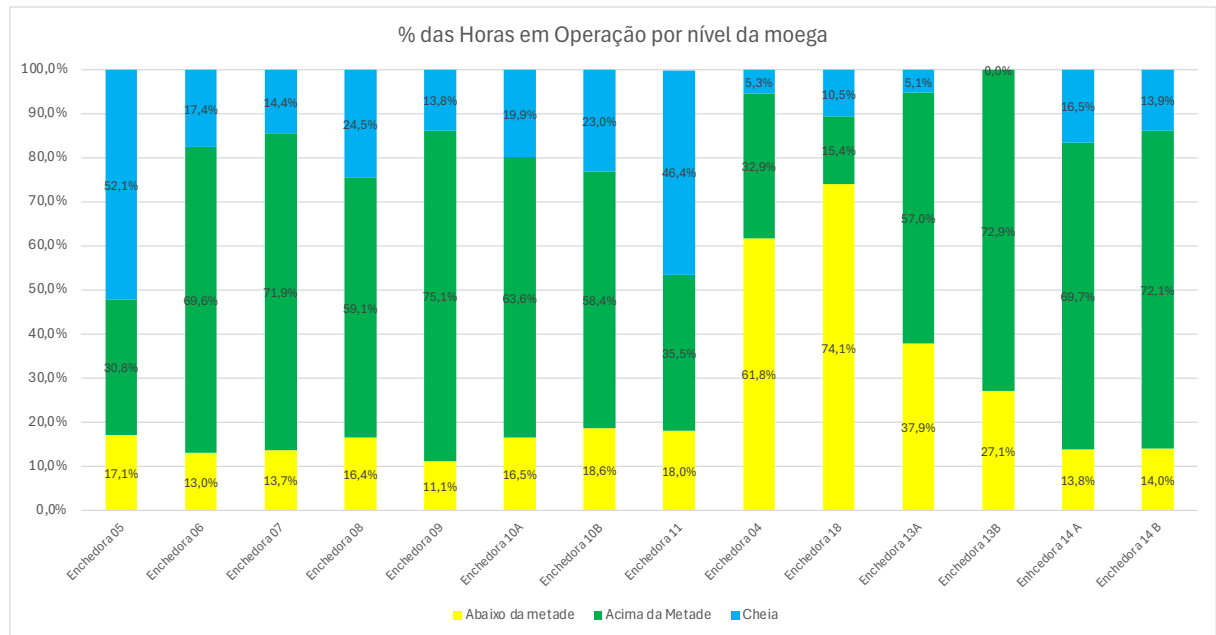
Fonte: próprio autor

Considerando que as canecas possam ser abastecidas com 7 kg, é possível atingir a capacidade de 32,4 t/h de abastecimento do transportador de caneca. É importante destacar que, para a hipótese de 32,4 t/h de capacidade, os problemas operacionais como: material impregnado nas canecas reduzindo o volume útil de transporte e variações do escoamento do pó no silo buffer para o transportador devem ter uma frequência quase nula de ocorrência não sendo levado em consideração no estudo.

Durante a observação da operação do transportador em campo via supervisório, foi possível notar que cerca de 30% das canecas do transportador permaneciam cheias. Isso representa uma perda de capacidade produtiva, uma vez que as canecas cheias representam material não abastecido às moegas das linhas de envase. Assim, após constatar o problema de capacidade de abastecimento do transportador de canecas por meio das medições em campo, buscou-se dados de controle de processo no período de setembro a dezembro de 2023 para entender a proporção do tempo em que as linhas operavam abaixo da metade do nível da moega, indicativo de deficiência de abastecimento caracterizando o gargalo do processo produtivo.

Operar as linhas com as moegas de abastecimento com um nível baixo provocam problemas de qualidade do produto devido a variações de peso gerando rejeição de produto semiacabado. Este cenário leva o time operacional a atuar de forma manual nas linhas desabilitando o abastecimento daquelas que possuem baixa vazão, para priorizarem as linhas de maior vazão, mitigando a geração de produto rejeitado bem como a perda de produtividade. A Figura 5 indica o percentual do tempo operacional, por enchedoras das linhas, que trabalharam com o nível da moega baixo da metade, acima da metade ou cheia. As linhas que se destacam com um tempo operacional acima de 60% operando com o nível da moega abaixo da metade foram linha 04 e linha 18.

Figura 5 - Tempo em que as enchedoras operaram com nível baixo de pó nas moegas

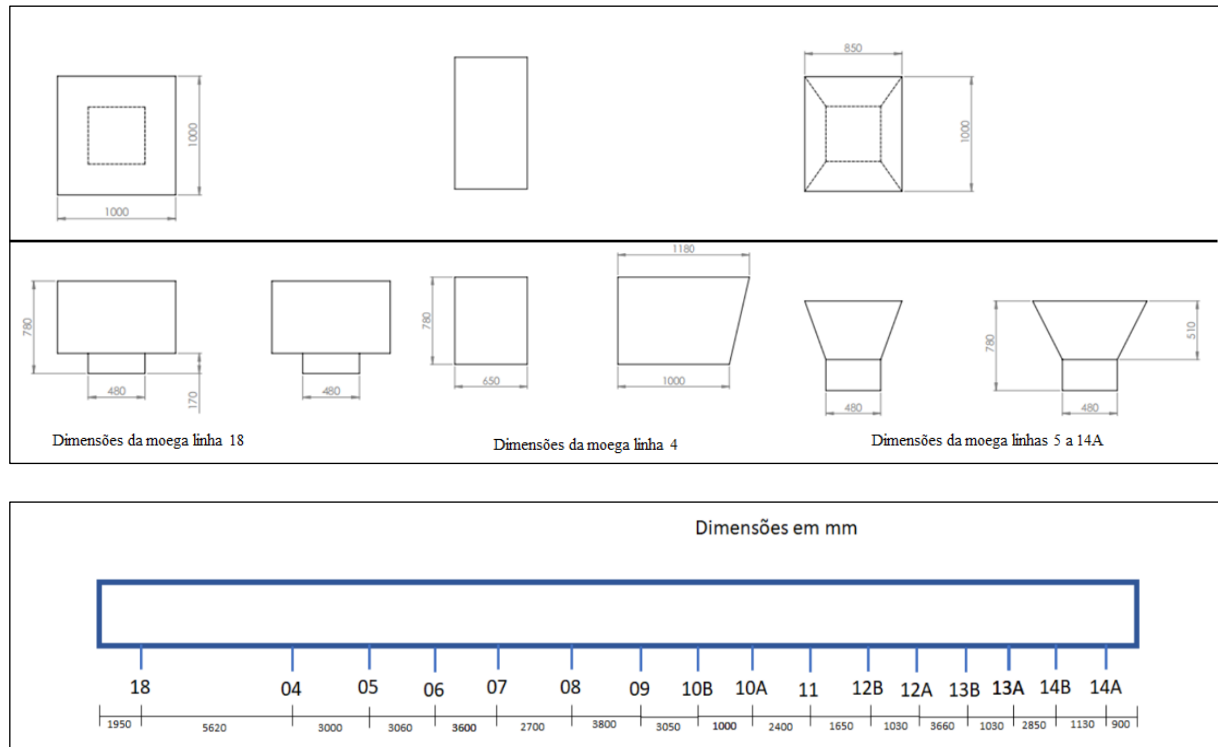


Fonte: próprio autor

Diante deste cenário buscou-se desenvolver uma lógica de abastecimento que viesse a elevar a produtividade do transportador de canecas, assim melhorando a produtividade da fábrica.

A nova lógica de abastecimento das moegas leva em consideração a possibilidade de descarregar essas canecas que retornam ao ponto de abastecimento cheias, para não haver perda de capacidade produtiva. Uma das etapas de construção dessa lógica é conhecer as dimensões físicas das moegas, assim como as distâncias entre elas representada na Figura 6. Outra informação importante para elaboração da lógica é conhecer a distância entre os sensores de nível cheio e vazio que são de aproximadamente 135 mm entre si. Essas informações servirão de base para calcularmos de forma virtual com base na ativação dos sensores de nível o volume das moegas, a velocidade de envase da linha e taxa de esvaziamento da moega criando um fator de projeção de demanda de abastecimento.

Figura 6 - Dimensões e Distância entre as moegas de alimentação das linhas de envase (mm)



Fonte: próprio autor

Conhecendo as dimensões físicas, os dados de produtividade das linhas e a indisponibilidade de equipamentos, utilizou-se o software de simulação por eventos discretos, *Plant Simulation* da empresa AVEVA, para simular o processo atual e posteriormente implementar na simulação a proposta de uma nova lógica otimizada para comparação dos impactos positivos desta na distribuição de pó entre moegas.

Os dados de entrada para modelar o processo no software na condição atual foram:

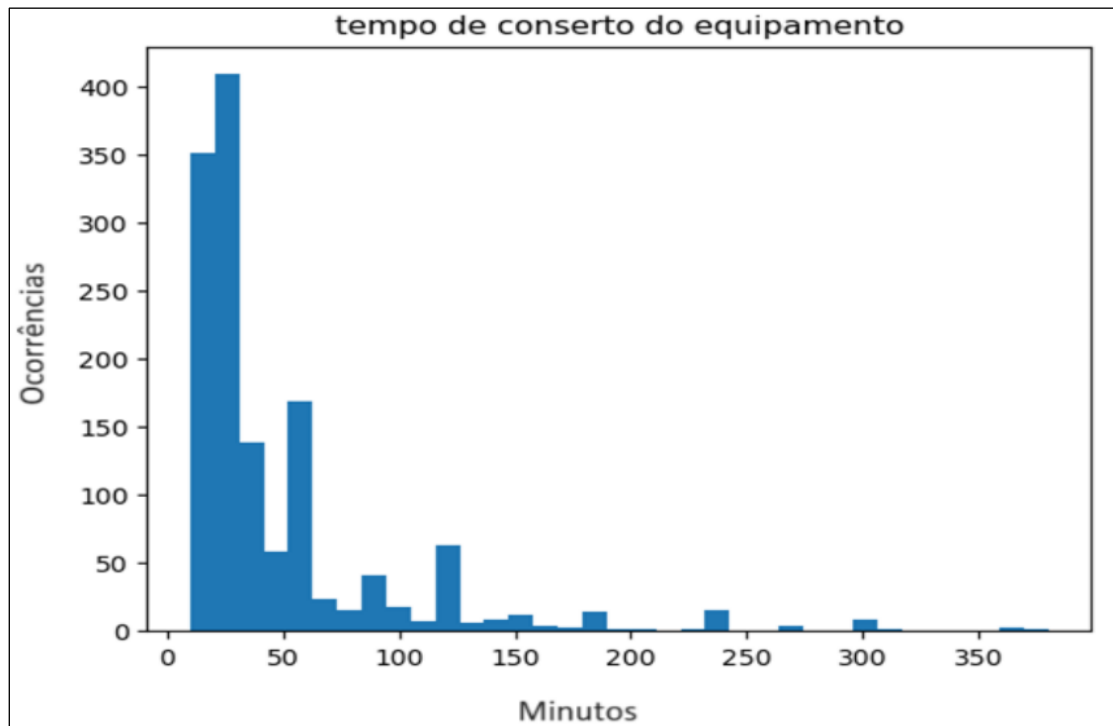
- Dados históricos de parada de máquina com distribuição conforme Figura 7. Estes foram inseridos na simulação como distribuição de Erlang com tempo médio de reparo de 50 minutos;
- Capacidade produtiva dos equipamentos do processo e linhas de envase;
- Eficiência dos equipamentos de envase. Este dado foi obtido do sistema informatizado de coleta de dados da produção. Sua forma de cálculo é a divisão das horas trabalhadas pelas horas programadas para produção multiplicado por 100%;

- Número percentual de pacotes que foram produzidos acima do peso alvo da linha, considerando o formato de pacote em operação;
- Capacidades em kg do silo *buffer* de alimentação do transportador de caneca considerando o nível de controle dos sensores;
- Horas programadas das linhas de envase;

A escolha da distribuição de Erlang para modelar os dados históricos de parada de máquina no modelo de simulação, justifica-se pelas propriedades específicas dessa distribuição, amplamente reconhecidas na literatura. Banks et al. (2010), a distribuição de Erlang é ideal para representar tempos associados a processos compostos por múltiplas fases sucessivas, como é típico em reparos de máquinas, que frequentemente envolvem diagnósticos, substituição de peças e ajustes. Law e Kelton (2007) destacam sua adequação para modelar variáveis aleatórias não negativas com assimetria positiva, como observado nos dados analisados, que apresentam uma alta concentração de tempos próximos a 40 minutos e uma cauda longa. Essa flexibilidade torna a Erlang particularmente apropriada para simulações que exigem um ajuste mais refinado em comparação à distribuição exponencial simples, permitindo considerar a influência de múltiplas etapas independentes no tempo total de reparo. Assim, a seleção da distribuição de Erlang não apenas reflete aderência ao comportamento empírico dos dados, mas também segue as melhores práticas recomendadas na simulação de sistemas de eventos discretos.

Os dados da Figura 7, obtidos do sistema de apontamento das perdas de produção, o qual é feito de forma manual por operadores de linha. Deste sistema as perdas que implicam em paradas de equipamentos não planejadas fazem parte dos dados estudados.

Figura 7 - Gráfico de distribuição das ocorrências de falhas nas linhas de envase



Fonte: próprio autor

4.2 DESCRIÇÃO DA LÓGICA DE OPERAÇÃO

Esta seção está dividida em subseções que detalham a lógica atual de operação e os aspectos fundamentais da operação do sistema de enchimento do transportador de caneca e sua distribuição assim como o desenvolvimento de um novo algoritmo para otimizar o processo e os resultados das simulações realizadas.

4.2.1 Lógica atual de operação do sistema simulado

O sistema de enchimento do transportador de caneca e sua distribuição, o qual tem uma operação contínua e perene, segue a lógica de que:

- Ao retornar ao ponto de enchimento, estando a caneca vazia, esta é completada em sua capacidade máxima desde que o silo *buffer* tenha material suficiente;
- Quando o nível de pó nas moegas das linhas é baixo, definido pelo sensor de nível, o sistema de tombamento de canecas desta linha é acionado e as canecas do

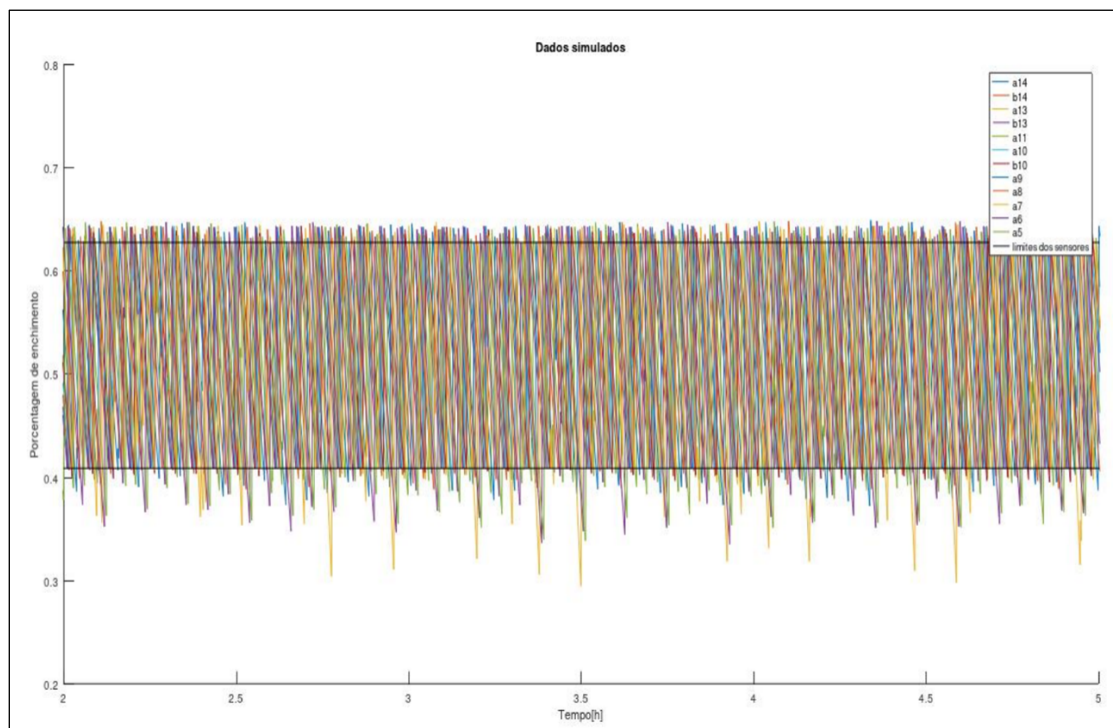
transportador começam a virar nessa moega, despejando todo o conteúdo do seu interior, até que o sensor de nível alto seja alcançado;

- Estando a moega com o sensor de nível alto atuado essa moega não é abastecida;
- A lógica de abastecimento das moegas da linha não considera a ordem de solicitação de enchimento, mas a proximidade da moega que necessita de pó e sua proximidade com as canecas cheias;

A seguir são apresentados os gráficos de saída da simulação com a lógica atual indicando a variação dos níveis das moegas das linhas de envases.

A Figura 8 mostra que as moegas oscilam com uma alta frequência entre os níveis dos sensores alto e mínimo. Estes níveis estão representados na figura 8 sendo o nível mínimo logo acima do valor 0,4 no eixo da ordenada e o nível alto logo acima do 0,6 no mesmo eixo, ambos na cor preta. É notório que com uma frequência alta o nível das moegas ultrapassa o sensor de nível mínimo indicando uma certa latência no abastecimento de pó o ocasionando a perda por falta de material.

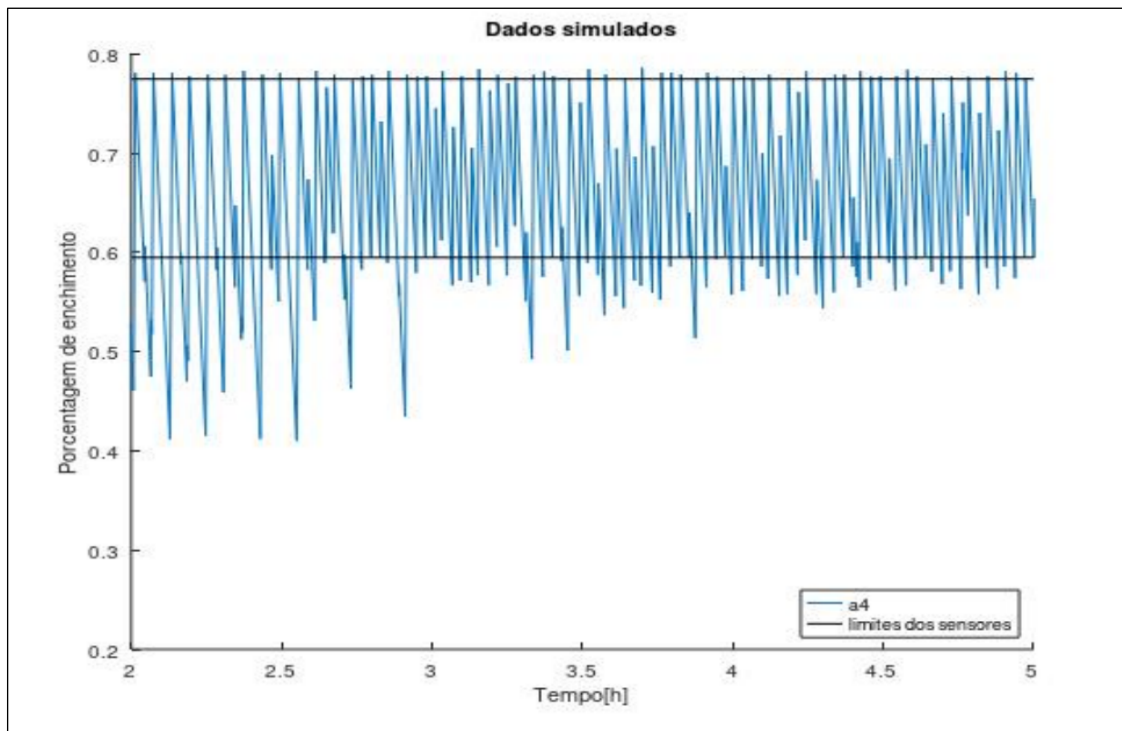
Figura 8 - Variação dos níveis das moegas das linhas de envase condição atual



Fonte: próprio autor

Considerando que as linhas 04 e 18 são as linhas de maior velocidade e que estão posicionadas na extremidade oposta ao ponto de abastecimento, destaca-se nas Figuras 9 e 10 o comportamento dos níveis das moegas explicitando a frequência de falta de pó para essas linhas.

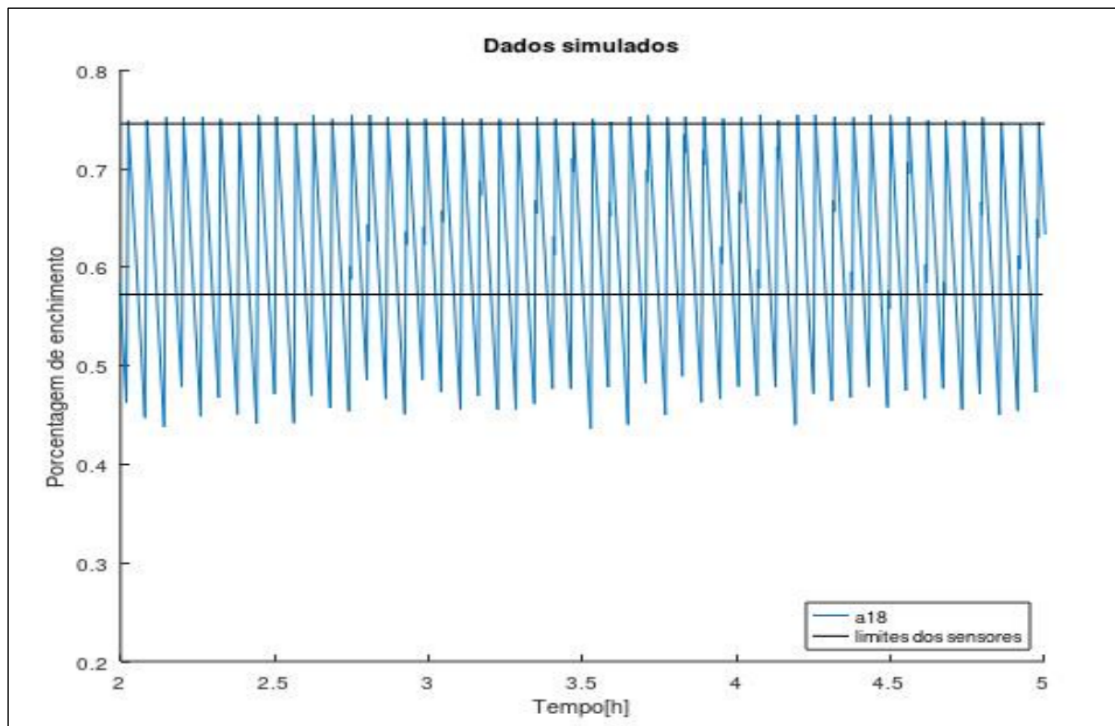
Figura 9 - Variação dos níveis da moega da linha 4



Fonte: próprio autor

Comparando as Figuras 9 e 10 observa-se que a linha 18 apresenta um padrão estável de comportamento de nível com uma maior amplitude de variação que reflete em um tempo total maior de indisponibilidade de pó nessa linha. Um dos fatores que explica isso é a sua posição na extremidade oposta ao ponto de enchimento, figura 6, associado a capacidade dessas linhas operarem 1kg, o que aumenta a demanda instantânea da linha 04 que precede a linha 18, assim gerando menos caçambas de pó disponível para abastecer a linha 18. A comparação dessas duas figuras a firma que a lógica atual favorece o abastecimento das linhas mais próximas ao ponto de entrada das canecas cheias.

Figura 10 - Variação dos níveis da moega da linha 18



Fonte: próprio autor

A simulação da operação atual mostrou que ocorrem variações frequentes abaixo dos limites dos sensores das moegas sendo as linhas 04 e 18 as com maior frequência. Isso justifica as perdas de produção por falta de pó e uma maior incidência de defeito de qualidade por variação no peso nessas linhas.

4.2.2 Desenvolvimento de um novo algoritmo para o transportador de caneca

Na busca por reduzir a perda de produção proveniente da falta de pó nas moegas das linhas, buscou-se elaborar uma nova lógica de abastecimento que distribua melhor o material existente entre as linha, utilizando apenas o feedback dos sensores de nível alto e nível baixo das moegas, reduzindo o retorno de canecas cheias, de modo que, nos momentos em que a vazão das empacotadoras for maior do que a vazão de alimentação do transportador de canecas, o sistema consiga acomodar a produção pelo maior tempo possível.

O objetivo do novo algoritmo é otimizar a distribuição de material entre as linhas de envase, utilizando feedback dos sensores de nível das moegas para reduzir o retorno de canecas

cheias e maximizar a eficiência da produção. A seguir, descrevemos os principais componentes e etapas do algoritmo:

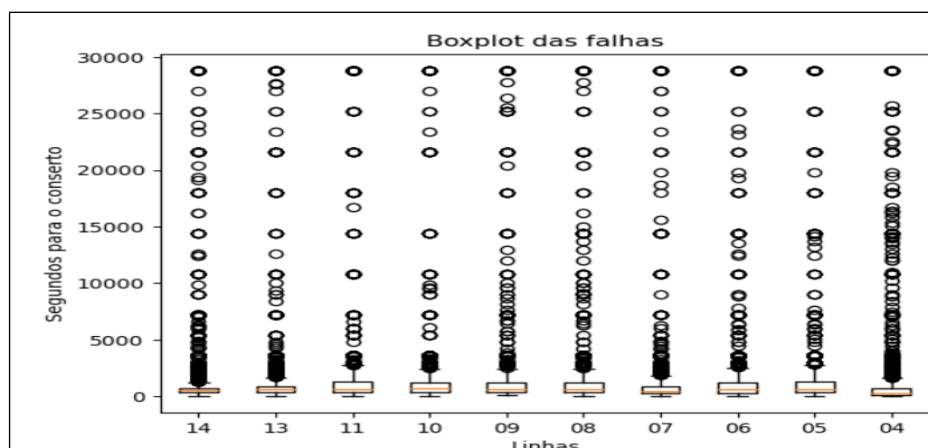
- Atribuição de números às moegas: cada moega é numerada de acordo com sua posição na linha de abastecimento. Por exemplo, a moega A14 recebe o número 1, a moega B14 recebe o número 2, e assim por diante até a moega A18, que recebe o número 14.
- Criação de um parâmetro de estimativa: um parâmetro denominado "estimativa" é criado para calcular a quantidade de material em cada moega. Este parâmetro é atualizado continuamente para refletir a quantidade de material presente.
- Modelagem das canecas: as 441 canecas do transportador são modeladas virtualmente, cada uma com atributos de posição e material. Inicialmente, as canecas estão igualmente espaçadas, com a primeira caneca na posição zero e as demais em posições negativas.
- Cálculo da velocidade das canecas: a velocidade de cada caneca é calculada com base no período do ciclo e no tamanho do transportador. Esta velocidade é usada para atualizar a posição das canecas a cada segundo.
- Atualização da posição das canecas: a posição das canecas é atualizada na frequência de 1 Hz, somando a velocidade calculada à posição atual. Quando uma caneca cheia passa por uma moega que precisa de material, ela despeja o conteúdo na moega e a estimativa da moega é aumentada.
- Redução da estimativa com o tempo: a quantidade estimada de material em cada moega é continuamente reduzida com base na vazão nominal da enchedora correspondente. Essa vazão é calculada em toneladas por hora e convertida para uma taxa por segundo.
- Ajuste da estimativa com base nos sensores: para garantir a precisão, a estimativa é ajustada sempre que há uma alteração no nível lógico dos sensores de nível alto e baixo das moegas. Isso assegura que a estimativa reflita corretamente o nível de material.
- Cálculo do parâmetro de importância: um parâmetro de importância é calculado para cada moega, sendo inversamente proporcional à estimativa de material. Moegas com menos material têm maior importância.

- Ordenação e abastecimento das moegas: as moegas são ordenadas de forma decrescente de acordo com o parâmetro de importância. As moegas mais importantes são abastecidas primeiro, desde que não estejam em reparo e não tenham atingido o nível alto.
- Ajuste para Falta de Material: Se o sensor de nível baixo indicar falta de material, a importância da moega é elevada significativamente, e seu dispositivo de alimentação é ativado imediatamente.
- Consideração da Disponibilidade Operacional: A disponibilidade operacional das linhas é calculada com base em dados históricos de falhas, considerando uma disponibilidade de 95%. Cenários de falhas de alta e baixa frequência foram modelados para testar a robustez do algoritmo.

Este algoritmo visa melhorar a eficiência do sistema de abastecimento, garantindo que todas as moegas recebam material de forma equilibrada e contínua, minimizando perdas e maximizando a produção.

Visando um estudo mais próximo da realidade os cenários estudados foram modelados com duas distribuições de parada das linhas, sendo a distribuição nomeada 2, para alta frequência: como exemplo, paradas para troca de consumíveis das linhas; A distribuição 1, para baixa frequência, como quebras das linhas. Durante estas interrupções da operação nenhum material é removido do interior das moegas. A Figura 11 mostra a distribuição de interrupções por linha. Esses dados foram inseridos no modelo seguindo a distribuição de Erlang.

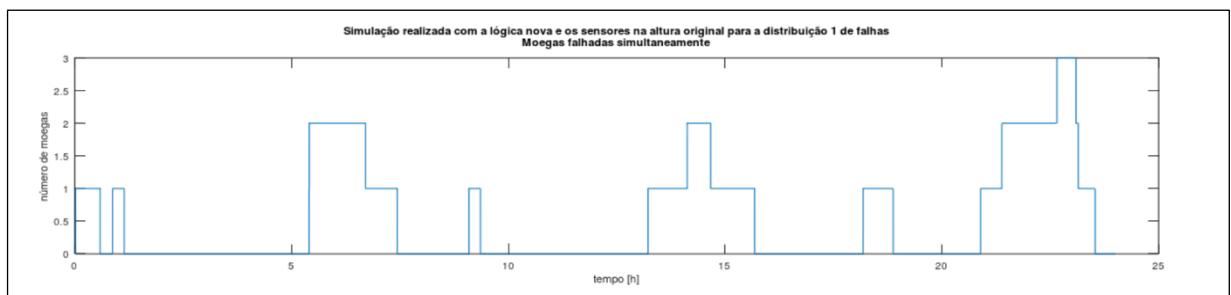
Figura 11 - Interrupções da operação das linhas por duração de tempo



Fonte: próprio autor

As Figuras 12 e 13 mostram os resultados da simulação para a lógica nova para as interrupções de baixa e alta frequência respectivamente. Observa-se na Figura 12 que 3 é o número máximo de moegas em falhas simultaneamente. Moegas em falhas significa que a enchedora entrou em falha e deixou de reduzir pó da moega.

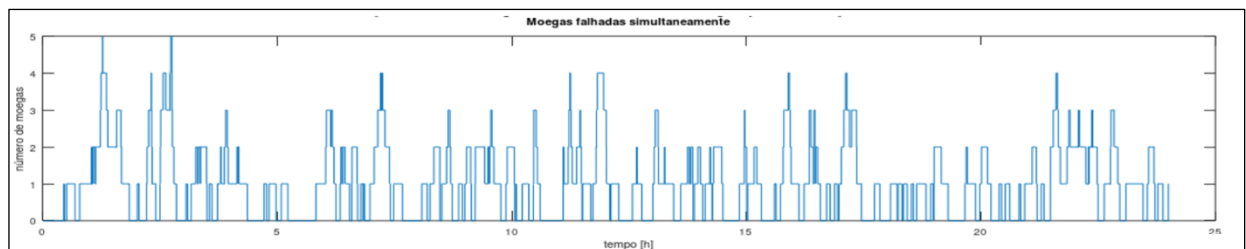
Figura 12 - Cenário de falhas na lógica nova para baixas frequência



Fonte: próprio autor

A Figura 13 traz o resultado da indisponibilidade das linhas para os eventos de alta frequência onde temos picos de 5 linhas indisponíveis sendo que praticamente há uma linha de envase parada ao longo das 24h simuladas.

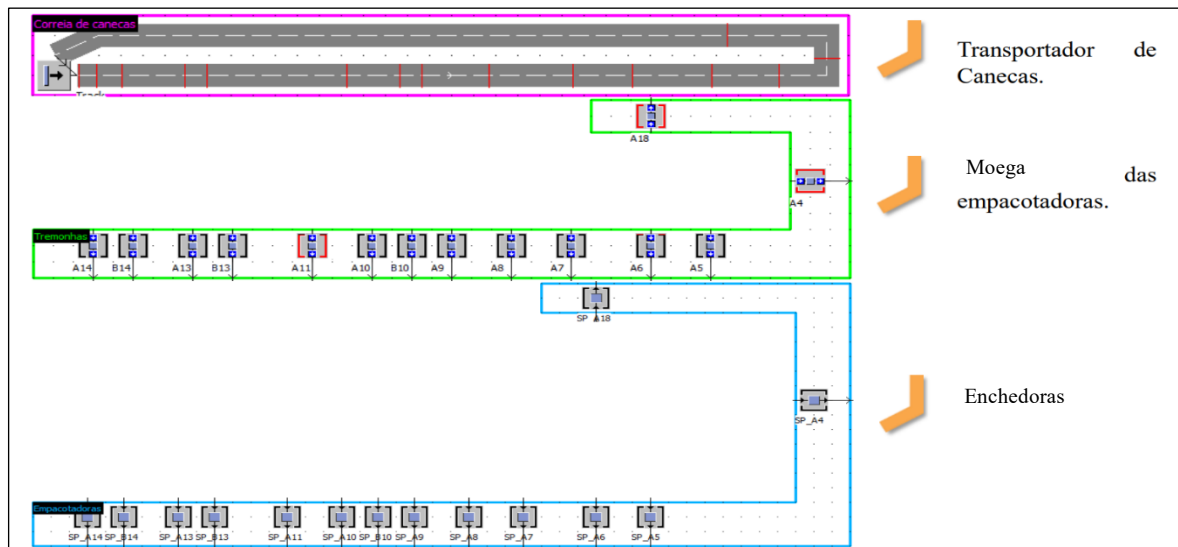
Figura 13 - Cenário de falhas na lógica nova para altas frequência



Fonte: próprio autor

A Figura 14 mostra a visualização do sistema gargalo modelado no software de simulação representado pelo transportador de canecas, moegas de alimentação das linhas de envase e as enchedoras das linhas.

Figura 14 - Representação do modelo no software



Fonte: próprio autor

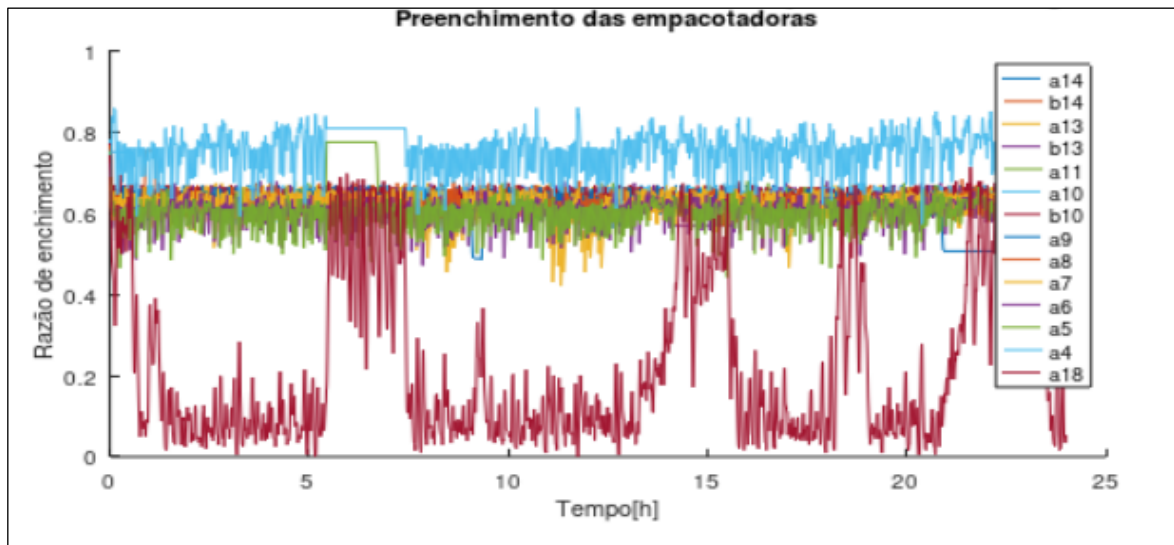
4.3 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

O problema de gargalo na distribuição de pó para as embalagens foi modelado 4 vezes considerando as frequências de falhas históricas e o algoritmo operacional atual e o novo, da seguinte forma:

- Lógica atual para falha de baixa frequência;
- Lógica atual para falha de alta frequência;
- Lógica nova para falha de baixa frequência;
- Lógica nova para falha de alta frequência;

A Figura 15 demonstra o resultado da saída da simulação para a lógica atual para a distribuição de falhas com baixa frequência. Nota-se que o nível da moega da linha 18 apresenta grandes períodos de falta de pó e um a estabilidade no nível de enchimento das moegas das demais linhas.

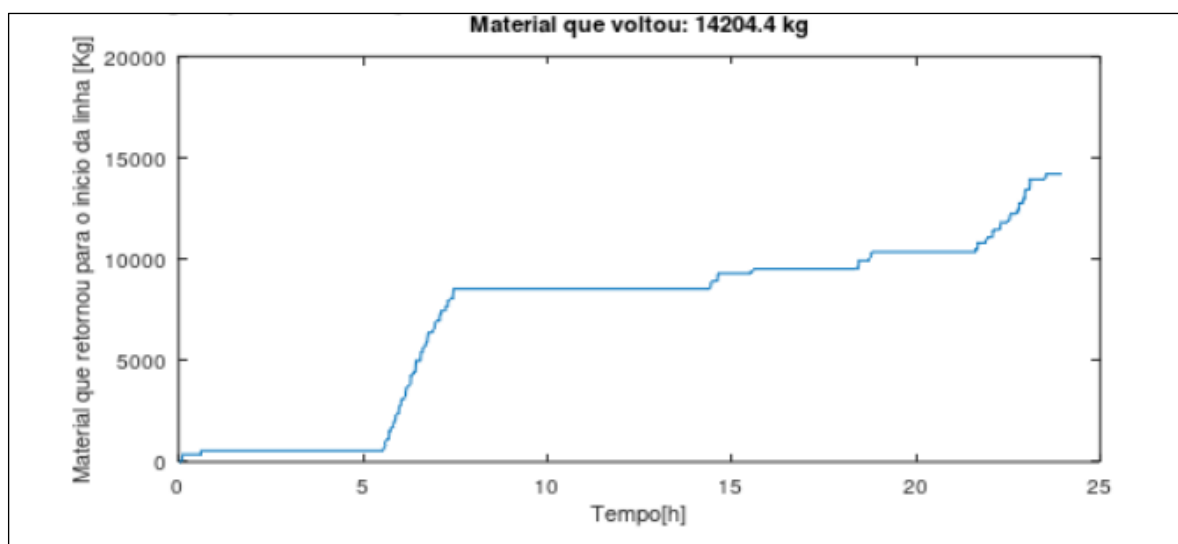
Figura 15 - Enchimento das moegas com a lógica atual para falha de baixa frequência



Fonte: próprio autor

A Figura 16 traz de forma acumulativa a quantidade de pó retornado ao ponto de enchimento das canecas, para o mesmo cenário da simulação da Figura 15 explicitando o descompasso entre a demanda por pó na linha 18 e o retorno de pó não distribuído para o ponto de enchimento das canecas.

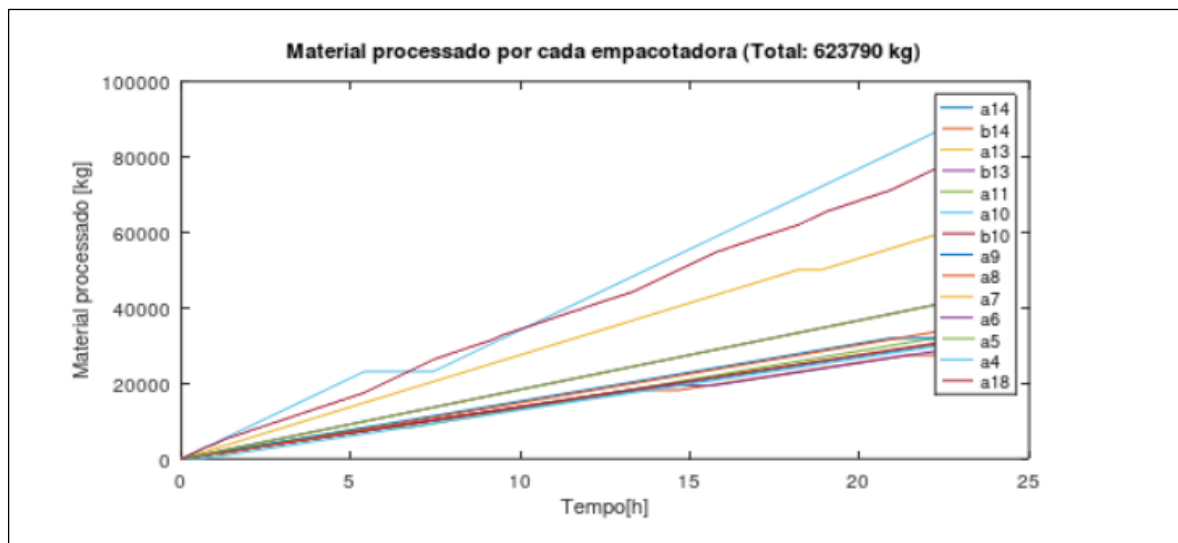
Figura 16 - Material retornado nas canecas com a lógica atual para falha de baixa frequência



Fonte: próprio autor

A Figura 17 demonstra o material processado por cada enchedora onde observamos que as linhas de menor capacidade produtiva, mas que estão próximas ao ponto de abastecimento tiveram uma produtividade maior que as linhas 04 e 18 que possuem uma capacidade superior de produção comparado às demais, porém estão na extremidade oposta ao ponto de abastecimento.

Figura 17 - Material processado por linha com a lógica atual para falha de baixa frequência

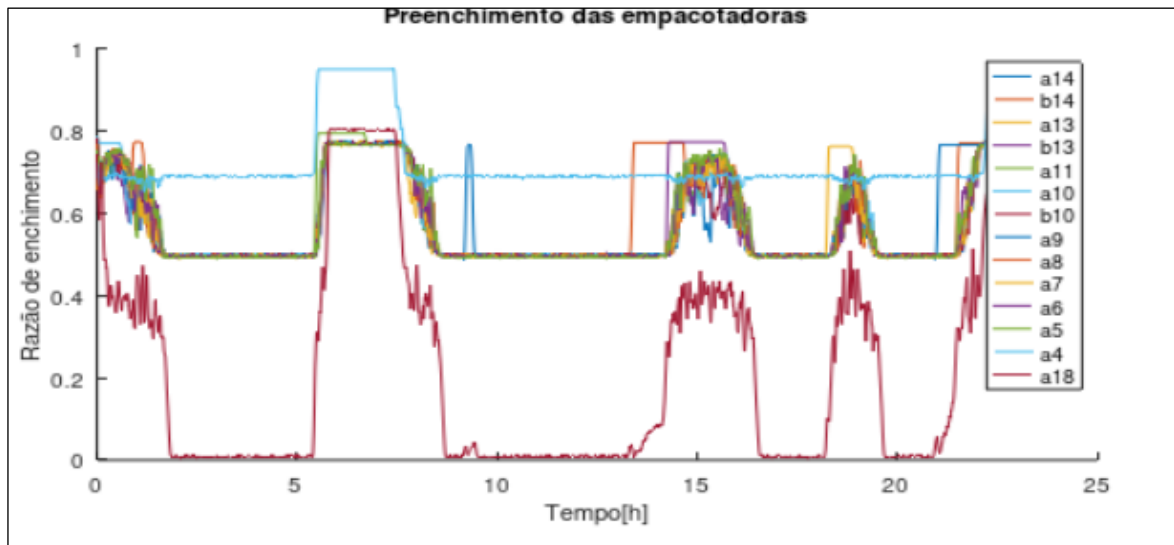


Fonte: próprio autor

Durante a simulação para 24 horas de operação com a lógica atual e falhas de baixa frequência, analisando o resultado da linha 18, constatou que essa passou 18% do seu tempo disponível para operação com a moega vazia aguardando recebimento de pó.

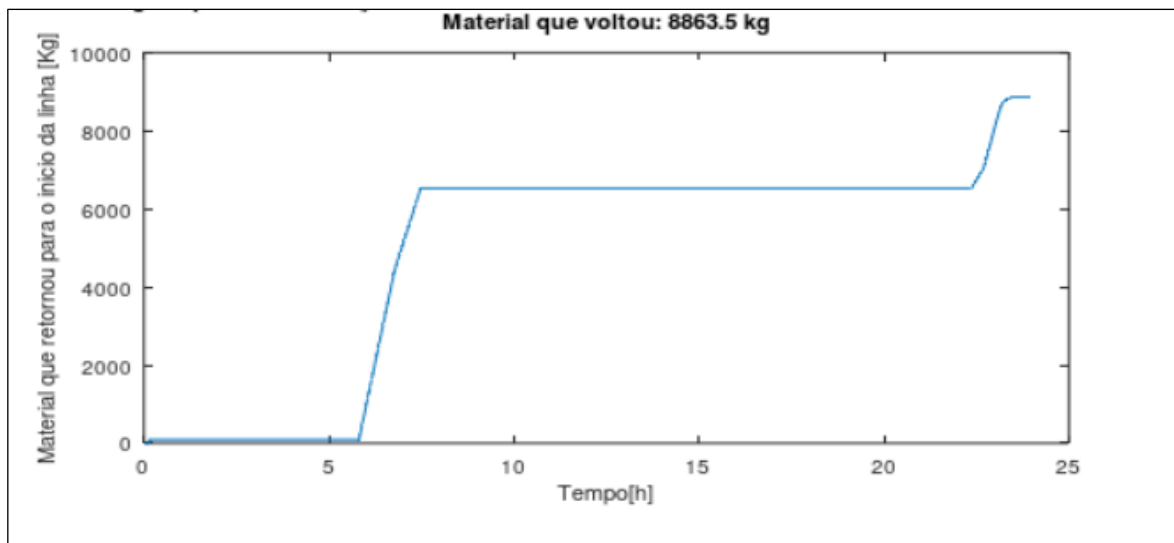
A Figura 18 apresenta o resultado da simulação com a lógica nova para falhas de baixa frequência. Observa-se que as oscilações tiveram um comportamento mais estável e a linha 18 apresentou uma redução de 4% no tempo aguardando pó na moega, o que trouxe uma redução no retorno de pó para o ponto de enchimento de 37,6%, demonstrado na figura 19, quando comparado ao cenário da lógica atual.

Figura 18 - Enchimento das moegas das linhas com a lógica nova para falhas de baixa frequência



Fonte: próprio autor

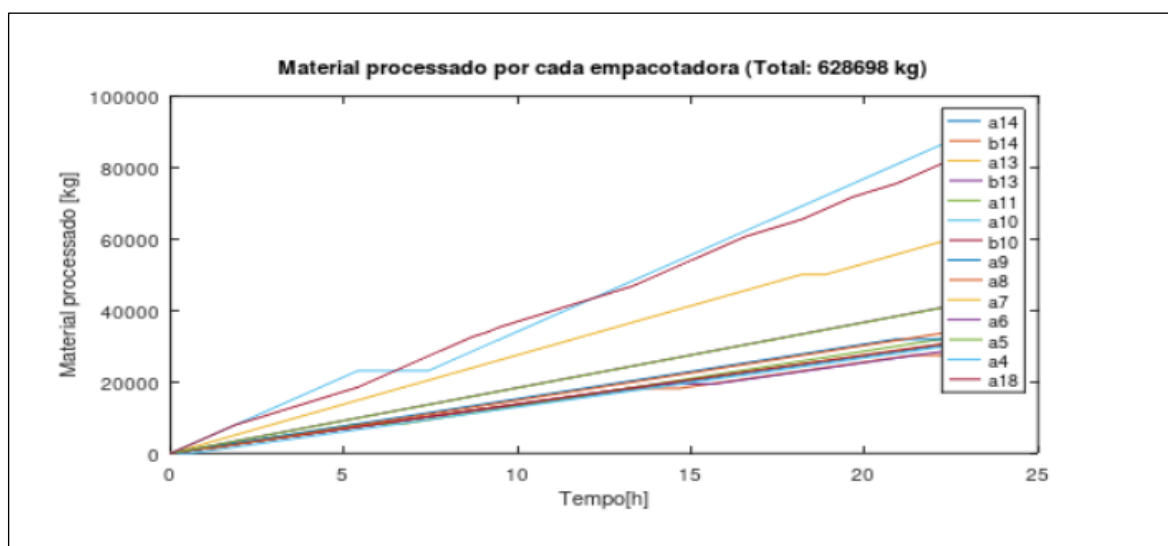
Figura 19 - Material retornado nas canecas lógica nova para falhas de baixa frequência



Fonte: próprio autor

A nova lógica após a simulação de 24 horas de operação, comparando o resultado da Figura 17 com o da Figura 20 abaixo, nota-se um incremento de 0,7% na produção da fábrica com uma melhor produtividade da linha 18.

Figura 20 - Material envasado, com a lógica nova, por enchedora para falhas de baixa frequência



Fonte: próprio autor

O resultado da simulação para as falhas de alta frequência com a lógica atual e nova estão demonstrados no Quadro 4.

Quadro 4 - Comparativo de benefício das lógicas para falhas de alta frequência

Item avaliado	A	B	% B/A
	Lógica atual - falhas de alta frequência	Lógica nova - falhas de alta frequência	Comparativo entre lógicas de operação
Material retornado ao ponto de enchimento [Kg]	20964,6	13742,7	- 34,4%
Material processado nas empacotadoras [Kg]	616937	623367	1%
Condição de operação da linha 18 (falta de pó)	6%	0%	100%

Fonte: próprio autor

Para o cenário de falha de alta frequência o fator indisponibilidade por falha apareceu como um ponto de perda de produtividade para a fábrica indicado a necessidade de um estudo voltado para o aumento da disponibilidade dessa linha.

4.3.1 Análise dos Resultados

Efetivamente, a nova lógica desenvolvida retarda o tempo de esvaziamento pleno de uma moega em um cenário o qual a vazão de abastecimento da linha é inferior a vazão de saídas das empacotadoras. O retardo supracitado gera um aumento momentâneo na quantidade de material processado, pois permite que mais empacotadora funcionem simultaneamente por mais tempo. É esperado que uma menor variabilidade nos níveis das moegas traga o benefício de redução dos defeitos por qualidade advindos da variação de densidade provocado por oscilações no nível das moegas. Alterando a lógica é possível observar uma queda expressiva na quantidade de material que retorna para o início da linha e, conseqüentemente, vai para o processo. A nova lógica reduz o tempo no qual a empacotadora a18 fica sem pó e não causa falta de material nas demais empacotadoras.

O aumento do intervalo entre os sensores de nível alto e baixo faz com que as moegas trabalhem como buffers mais eficientes. Considerando o prazo de um dia, é possível afirmar que a nova lógica nas condições simuladas resultou em acréscimo na quantidade de material processado. Em resumo, podemos concluir que a nova lógica apresentou ganho incremental na produção da fábrica na faixa de 0,8% a 1% da produção diária, podendo representar um aumento na produção entre 4,9 t/dia a 6,4 t/dia, a depender da frequência de falhas.

4.4 IMPLICAÇÕES PRÁTICAS

Para implementar a nova lógica de funcionamento, será necessário realizar algumas mudanças no sistema de controle do transportador de caneca. Atualmente, o controlador lógico programável (CLP) deste equipamento não possui espaço em sua memória para o novo programa e, além disso, já está descontinuado no mercado de fornecimento de peças sobressalentes. Portanto, a substituição do CLP é imperativa para que o novo programa opere com desempenho e segurança adequados. Essa substituição requer um investimento que está previsto no portfólio de projetos de 2024/2025, visando a estratégia de confiabilidade operacional, dado que o equipamento é obsoleto e não possui peças sobressalentes. O orçamento estimado desse investimento, incluindo materiais, serviços de instalação e configuração, é de R\$ 120.000,00.

A nova lógica de funcionamento promove um incremento diário de 4,9 t/dia de detergente em pó, no cenário mais desfavorável, em uma operação que trabalha com restrição de demanda, aplicando cotas de quantidade de produto a ser comprado pelos clientes. O tempo de retorno desse investimento, conhecido como payback, é de 15 dias, o que demonstra ser um projeto atraente para a organização. Esse rápido retorno sobre o investimento evidencia a viabilidade econômica do projeto, tornando-o uma opção vantajosa para melhorar a eficiência e a produtividade da fábrica. a capacidade produtiva em 0,7% com a nova lógica.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A nova lógica proposta para enfrentar a falta de pó para as linhas de envase apresenta como benefício um aumento no tempo de operação das linhas antes da sua parada total por falta de pó. Este ganho implicou em um aumento das horas trabalhadas das linhas o que trás um ganho de 4,9 ton/dia de incremento na produção no cenário conservador. Fato importante é que a nova lógica traz o aumento do tempo das linhas 04 e 18 envasando, refletindo em uma redução de 60% das canecas que retornavam cheias para o ponto de abastecimento, dor essa relatada de forma frequente pelos operadores.

Considerando o prazo de um dia de operação, é possível afirmar que a nova lógica nas condições simuladas resultou em acréscimo na quantidade de material processado distribuído pelo transportador de canecas. Visando um estudo mais profundo no processo, é possível estudar cada tipo de falha de forma separada e aumentar o intervalo de tempo simulado para uma representação mais fidedigna do processo como um todo.

Embora seja possível observar que, em certos cenários ocorre o retorno de canecas para o início da linha e em um determinado intervalo de tempo a moega A18 apresente falta de material, este fator não deve ser relacionado à nova lógica, uma vez que este retorno ocorre em momentos em que todas as moegas estão completamente cheias. Dessa forma, a atitude para se contornar este fato envolve outros fatores, como por exemplo, o redimensionamento das moegas das empacotadoras e/ou reposicionamento dos sensores nas moegas.

Embora a nova lógica apresente vantagens para o processo, é necessário comentar que, uma vez que para seu funcionamento requer virtualizar e estimar alguns parâmetros do transportador de canecas, é preciso que se tenha conhecimento e controle destes parâmetros ou os resultados obtidos podem ser imprevisíveis.

O modelo proposto foi aplicado e dentre os principais resultados, pode se destacar os seguintes impactos:

- Impactos Sociais – o aumento da produtividade pode levar à estabilidade e aumento de empregos na indústria de detergentes, especialmente na região Nordeste do Brasil, promovendo o desenvolvimento socioeconômico local. Além disso, o aumento da eficiência produtiva ajuda a atender a crescente demanda por detergentes, produtos essenciais para a higiene doméstica, contribuindo para a saúde pública e o bem-estar das comunidades

- Impactos Ambientais - Processos produtivos otimizados consomem menos energia e recursos, reduzindo a pegada ambiental da fábrica.

- Impactos Econômicos - A redução de gargalos e a melhoria na eficiência operacional permitem à empresa expandir sua participação no mercado, atendendo melhor às regiões Norte e Nordeste do Brasil. Menores perdas e maior aproveitamento de recursos contribuem para reduzir os custos operacionais e melhorar as margens de lucro. pode-se destacar o incremento estimado de 8260 kg de pó embalado por dia por meio da simulação e expectativa do potencial de redução da geração de reprocesso por oscilação de densidade do material envasado. A metodologia da teoria das restrições possibilitou a definição do gargalo com foco no ótimo global e aplicação da simulação como ferramenta de aceleração do processo de avaliação de soluções e redução de riscos na implantação da solução recomendada.

A dissertação contribui não apenas para a eficiência industrial, mas também para o desenvolvimento sustentável, reforçando o papel da engenharia de produção na transformação econômica e social do país.

5.1 LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Observamos na Figura 13 que o cenário de falhas de alta frequência, indicando que problemas crônicos pairam sobre a performance da fábrica sendo recomendado uma análise profunda das perdas e aplicação de métodos de análise e solução de problemas almejando reduzir tal impacto na disponibilidade das linhas. Adicionar um cenário que considere os dados de defeitos de qualidade, correlacionando estes com a variação do nível da moega, lança uma contribuição ao conhecimento tácito do time operacional de que variações no nível das moegas e operá-las com nível baixo, provocam uma maior rejeição de produto acabado por variação no peso do pacote.

Outra melhoria incremental que pode ser estudada e testada por simulação é reposicionar os sensores em cada moega de forma que a distância entre eles seja superior a atual, consequentemente melhorando o volume de armazenamento de pó nas moegas o que favoreceria para um cenário de falhas prolongadas, nas quais é essencial que as moegas realizem seu papel de *buffer*.

A simulação por eventos discretos mostra ser uma ferramenta poderosa e aliada ao time de melhoria de processos e pesquisa operacional, proporcionando validar a melhor alternativa

para solucionar os gargalos dos processos proporcionando uma implementação prática e padronizada e mais suave pela característica de proporcionar testes em modelo digital.

Fatores como apontamentos manuais incrementam um desafio no modelamento de sistemas em softwares de simulação devido a baixa confiabilidade e as vezes deficiência na classificação e organização de dados estruturados e não estruturados. Tal fator gera um esforço de validação e preparação dos dados para se tirar as informações relevantes e confiáveis para alimentar o modelo. Por fim um fator limitante é a baixa disseminação do conhecimento de simulação no ambiente fabril associado a conceitos de TOC o que gera um esforço extra de nivelamento de conceitos e preparação para convencimento da técnica aplicada e resultado da informação obtida.

A TOC é amplamente aplicada em diferentes processos, associá-la ao uso de simulação por eventos discretos torna, para o tomador de decisão do negócio, palatável assumir e implementar a solução ali apresenta. Isso pelo simples fato de estar vendo o que ocorre hoje no processo dele e como a solução ali proposta impacta o negócio dele, primeiramente no modelo computacional. Assim a disseminação do conhecimento de técnicas de simulação vem evoluindo de forma acelerada com a evolução da digitalização da indústria o que impulsiona a disseminação do uso de ferramentas de simulação como aliada na solução de melhorias de processos industriais ou mesmo transacionais.

REFERÊNCIAS

- AHASLIDES. **O que é teoria das restrições?** Um guia simples para aumentar a eficiência. 2023. Disponível em: <https://ahaslides.com/pt/blog/what-is-theory-of-constraints/>. Acesso em: 8 jun. 2024.
- AKHOONDI, F.; LOTFI, M. M. A Heuristic Algorithm for Master Production Scheduling Problem with Controllable Processing Times and Scenario-Based Demands. **International Journal of Production Research**, v. 54, p. 3659-3676, 2016.
- ALMEIDA, M. S. *et al.* **Utilização da simulação em ARENA 7.0 no auxílio ao balanceamento da célula de montagem de uma fábrica de calçados.** XXVI Encontro Nacional.
- APICS. **APICS Dictionary**. Chicago, IL: The Association for Operations Management, 2011.
- ARNOLD, J. T.; CHAPMAN, S. N.; CLIVE, L. M. **Introduction to Materials Management**. 6th ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education, Inc., 2008. ISBN 9780132337618.
- ASSUNÇÃO, L.; JACOBS, W. **Estudo comparativo entre layouts sob a ótica dos indicadores da teoria das restrições com apoio de simulação de eventos discretos em empresa de alimentos.** 2016. Monografia (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade do Vale do Taquari - Univates, Lajeado, 16 dez. 2016.
- AZARIA, Y.; RONEN, B.; SHAMIR, N. **Justice in Time: A Theory of Constraints Approach.** *Journal of Operations Management*, v. 69, n. 7, p. 1202-1208, 2023.
- BAGLIN, G.; LAMOURI, S.; THOMAS, A. **Maîtriser Les Progiciels ERP**. Paris: Economica, 2015.
- BANKS, J. **Forty years of discrete-event simulation—a personal reflection.** *Journal of the Operational Research Society*, 2005.
- BANKS, J. *et al.* **Discrete-event system simulation**. 5th ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2010.
- BONARA, J. V. *et al.* **Uma revisão teórico-conceitual sobre a teoria das restrições.** **Revista Latino-Americana de Inovação e Engenharia de Produção**, Curitiba, v. 9, n. 15, p. 6-21, 2021. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/relainep/article/download/78697/44052>. Acesso em: 8 jun. 2024.
- DETTMER, W. H. **Goldratt's Theory of Constraints: A Systems Approach to Continuous Improvement**. Milwaukee, WI: ASQ Quality Press, 1997.
- GOLDRATT, E. M.; COX, J. **A Meta: Um Processo de Melhoria Contínua**. São Paulo: Educator, 1997.

GOLDRATT, E. M. **The Haystack Syndrome**: Sifting Information Out of the Data Ocean. Croton-on-Hudson, NY: North River Press, 1990.

GOURGAND, M.; LEMOINE, D.; NORRE, S. Metaheuristic for the Capacitated Lot-Sizing Problem: A Software Tool for MPS Elaboration. **International Journal of Mathematics in Operational Research**, v. 2, p. 724-747, 2010.

GUPTA, M. C.; BOYD, L. H.; SUSSMAN, L. To Better Maps: A TOC Primer for Strategic Planning. **Business Horizons**, v. 47, n. 2, p. 15-26, 2004.

GUPTA, M. C. Constraints Management – Recent Advances and Practices. **International Journal of Production Research**, v. 41, n. 4, p. 647-659, 2003.

HACKMAN, J. R.; WAGEMAN, R. Total Quality Management: Empirical, Conceptual, and Practical Issues. **Administrative Science Quarterly**, v. 40, n. 2, p. 309-342, 1995.

HOLLOCKS, B. Forty years of discrete-event simulation—a personal reflection. **Journal of the Operational Research Society**, v. 57, p. 1383-1399, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602128>. Acesso em: 10 dez. 2023.

JONSSON, P.; IVERT, L. K. Improving Performance with Sophisticated Master Production Scheduling. **International Journal of Production Economics**, v. 168, p. 118-130, 2015.

JÚNIOR, J. Alckmin e representantes do setor defendem nova política de industrialização do Brasil. **Toda Matéria**, 2023. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/noticias/1007566-alckmin-e-representantes-do-setor-defendem-nova-politica-de-industrializacao-do-brasil>. Acesso em: 10 dez. 2023.

LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation Modeling and Analysis**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2007.

LINS, I. D.; DROGUETT, E. L. Multiobjective optimization of availability and cost in repairable systems design by genetic algorithms and discrete event simulation. **Pesquisa Operacional**, v. 29, n. 1, p. 43-66, jan.-abr. 2009.

LUCCAS, D. L.; FERREIRA, R. J. P. Uso da teoria das restrições e simulação para aumento de produtividade em uma indústria de detergente em pó. **XLIV Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, p. 1-10, 2024. Disponível em: http://dx.doi.org/10.14488/ENEGEP2024_TCE_411_2014_48330. Acesso em: 10 dez. 2023.

MENDONÇA, E. Brasil é agora o quarto maior mercado global para produtos de limpeza. **Toda Matéria**, 2023. Disponível em: <https://abipla.org.br/brasil-e-agora-o-quarto-maior-mercado-global-de-produtos-de-limpeza>. Acesso em: 10 dez. 2023.

PACHECO, D. A. de J. Teoria das Restrições, Lean Manufacturing e Seis Sigma: limites e possibilidades de integração. **Produção, São Paulo**, v. 24, n. 4, p. 940-956, 2014.

PEREIRA, N. A.; ALVES FILHO, A. G. Standing on the Shoulders of Giants: Production concepts versus production applications. The Hitachi Tool Engineering example. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 16, n. 3, p. 333-343, jul.-set. 2009.

REVISTA CIENTÍFICA ELETRÔNICA DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO. Os princípios da teoria das restrições sob a ótica da mensuração. v. 10, n. 2, p. 45-56, 2019.

ROBINSON, S.; BROOKS, R. Assumptions and simplifications in discrete-event simulation modelling. **Journal of Simulation**, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/17477778.2024.2407369>. Acesso em: 10 out. de 2024.

SAKURADA, N. M.; IKUO, D. **Aplicação de simuladores de eventos discretos no processo de modelagem de sistemas de operações de serviços**. 2009.

SENSIO. **Teoria das Restrições (TOC)**: desvendando essa metodologia eficaz para gestão. 2021. Disponível em: <https://www.sensio.com.br/blog/teoria-das-restricoes-toc>. Acesso em: 8 jun. 2024.

SILVA, J. R.; SANTOS, A. B. TOC - Industrial de colchões. Aumento do desempenho. **Congresso Brasileiro de Pesquisa Mineral**, v. 12, n. 3, p. 123-138, 2022.

SILVA, J. Um pouco além do just-in-time: uma abordagem à teoria das restrições. **Revista de Gestão e Produção**, São Paulo, v. 15, n. 3, p. 45-58, 2018.

SMARTSHEET. **Guia definitivo sobre a Teoria das Restrições**. 2022. Disponível em: <https://pt.smartsheet.com/all-about-theory-of-constraints>. Acesso em: 8 jun. 2024.

VALENCIA, E. *et al.* Modeling of the Master Production Schedule for the Digital Transition of Manufacturing SMEs in the Context of Industry 4.0. **Sustainability**, v. 14, p. 12562, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su141912562>.

VERGARA, S. C. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração**. 14. ed. São Paulo: Atlas, 2013.

VERGARA, S. C. **Projetos e Relatórios de Pesquisa em Administração**. 12. ed. São Paulo: Atlas, 2010.