



**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**Aplicação da Teoria das Restrições  
com Simulação em um Processo de  
Beneficiamento de Café**

**Arthur de Melo Cardozo**

**Brasília, Maio de 2022**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**Aplicação da Teoria das Restrições  
com Simulação em um Processo de  
Beneficiamento de Café**

**Arthur de Melo Cardozo**

*Trabalho de conclusão de curso submetido ao Departamento de Engenharia  
de Produção como requisito parcial para obtenção  
do grau de Engenheiro de Produção*

**Banca Examinadora**

Prof. Clóvis Neumann, EPR/UnB  
*Orientador*

---

Prof. Annibal Affonso Neto  
*Examinador Interno*

---

## FICHA CATALOGRÁFICA

CARDOZO, ARTHUR DE MELO

Aplicação da Teoria das Restrições com Simulação em um Processo de Beneficiamento de Café [Distrito Federal] 2022.

xvi, 50 p., 210 x 297 mm (EPR/FT/UnB, Engenheiro, Engenharia de Produção, 2022).

Trabalho de conclusão de curso - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia de Produção

- |               |                          |
|---------------|--------------------------|
| 1. Simulação  | 2. Teoria das Restrições |
| 3. Arena      | 4. Otimização            |
| I. EPR/FT/UnB | II. Título (série)       |

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CARDOZO, A. M (2022). *Aplicação da Teoria das Restrições com Simulação em um Processo de Beneficiamento de Café*. Trabalho de conclusão de curso, Departamento de Engenharia de Produção, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 50 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR 1: Arthur de Melo Cardozo

TÍTULO: Aplicação da Teoria das Restrições com Simulação em um Processo de Beneficiamento de Café.

GRAU: Engenheiro de Produção ANO: 2022

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Trabalho de conclusão de curso e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. Os autores reservam outros direitos de publicação e nenhuma parte desse Trabalho de conclusão de curso pode ser reproduzida sem autorização por escrito dos autores.

---

Arthur de Melo Cardozo

Depto. de Engenharia de Produção (EPR) - FT

Universidade de Brasília

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil

## **Dedicatória**

*"We have to live a life of no regrets."*

*- Portgas D. Ace.*

## **Agradecimentos**

*Agradeço à minha mãe Rosimary e meu pai Jorge, aos meus irmãos Heitor, Guilherme, Eduardo, e aos meus tios e meu primo pela paciência, pelo apoio e por proporcionar alegria e conhecimento ao longo de toda a minha jornada.*

*Agradeço à minha namorada Valéria, por me incentivar nos momentos difíceis e de estresse. Obrigado pela paciência e suporte.*

*Agradeço aos amigos que fiz ao longo do curso, especialmente o João Pedro, Gabriel, Mateus, Daniel A. e Daniel B., com quem compartilhei as graças e dificuldades da graduação. Sem eles o processo teria sido muito mais árduo, principalmente nos momentos finais, agravados pela pandemia.*

*Agradeço também à Universidade de Brasília e aos professores do Departamento de Engenharia de Produção, por propiciar um ambiente de aprendizado rico e contribuir para minha formação acadêmica e profissional.*

*Arthur de Melo Cardozo*

# SUMÁRIO

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b> .....                                    | <b>3</b>  |
| 1.1      | CONTEXTO .....   | 3         |
| 1.2      | OBJETIVOS .....  | 4         |
| 1.3      | LIMITAÇÕES .....   | 4         |
| 1.4      | ESTRUTURA DO TRABALHO.....                                 | 5         |
| <b>2</b> | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....                         | <b>6</b>  |
| 2.1      | GERENCIAMENTO DE PROCESSOS .....                           | 6         |
| 2.2      | TEORIA DAS RESTRIÇÕES .....                                | 7         |
| 2.2.1    | TAMBOR-PULMÃO-CORDA .....                                  | 9         |
| 2.2.2    | PROCESSO DE APRIMORAMENTO CONTÍNUO .....                   | 10        |
| 2.2.3    | MEDIDAS DE DESEMPENHO .....                                | 12        |
| 2.3      | SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL .....                              | 13        |
| 2.3.1    | MODELOS E SISTEMAS.....                                    | 13        |
| 2.4      | ARENA .....  | 15        |
| 2.5      | TEORIA DO ENFOQUE META ANALÍTICO CONSOLIDADO.....          | 16        |
| 2.5.1    | PREPARAÇÃO DA PESQUISA .....                               | 16        |
| 2.5.2    | APRESENTAÇÃO E INTERRELAÇÃO DOS DADOS.....                 | 18        |
| 2.5.3    | DETALHAMENTO, MODELO INTEGRADOR E VALIDAÇÃO POR EVIDÊNCIAS | 23        |
| 2.5.4    | CONCLUSÃO DA ANÁLISE .....                                 | 29        |
| <b>3</b> | <b>METODOLOGIA</b> .....                                   | <b>30</b> |
| 3.1      | CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA .....                           | 30        |
| 3.2      | CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA .....                           | 30        |
| 3.3      | ESTRUTURA DO MODELO .....                                  | 31        |
| <b>4</b> | <b>DESENVOLVIMENTO</b> .....                               | <b>33</b> |
| 4.1      | ANALISAR O PROBLEMA E COLETAR INFORMAÇÕES:.....            | 33        |
| 4.2      | COLETAR OS DADOS:.....                                     | 34        |
| 4.3      | CONSTRUIR O MODELO: .....                                  | 35        |
| 4.4      | VERIFICAR O MODELO: .....                                  | 36        |
| 4.5      | VALIDAR O MODELO: .....                                    | 37        |
| 4.6      | PROJETAR E EXPERIMENTAR A PARTIR DA SIMULAÇÃO: .....       | 37        |
| 4.6.1    | CENÁRIO ORIGINAL .....                                     | 38        |
| 4.6.2    | CENÁRIO MAIOR DEMANDA .....                                | 40        |
| 4.7      | ANALISAR OS RESULTADOS .....                               | 42        |
| 4.7.1    | CENÁRIO ORIGINAL .....                                     | 42        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 4.7.2    | CENÁRIO MAIOR DEMANDA .....            | 43        |
| 4.8      | RECOMENDAÇÕES FINAIS .....             | 44        |
| 4.9      | CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....            | 44        |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÃO.....</b>                  | <b>45</b> |
| 5.1      | TRABALHOS FUTUROS .....                | 46        |
|          | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b> | <b>47</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.1  | Diagrama de componentes da TOC. ....                      | 8  |
| 2.2  | Focalização em cinco etapas .....                         | 11 |
| 2.3  | Maneiras de se estudar um sistema.....                    | 14 |
| 2.4  | Exemplo tela Arena .....                                  | 16 |
| 2.5  | Método TEMAC.....   | 17 |
| 2.6  | Evolução das Publicações .....                            | 19 |
| 2.7  | <i>Wordcloud - Web of Science</i> .....                   | 22 |
| 2.8  | <i>Wordcloud - Scopus</i> .....                           | 22 |
| 2.9  | Gráfico de Cocitação - Base <i>Web of Science</i> .....   | 24 |
| 2.10 | Gráfico de Cocitação - Base <i>Scopus</i> .....           | 25 |
| 2.11 | Gráfico de Acoplamento - Base <i>Web of Science</i> ..... | 26 |
| 2.12 | Gráfico de Acoplamento - Base <i>Scopus</i> .....         | 27 |
| 3.1  | Fluxograma do desenvolvimento do modelo.....              | 32 |
| 4.1  | Fluxograma do Processo de Produção de Café.....           | 35 |
| 4.2  | Modelagem do Processo de Produção de Café ARENA .....     | 36 |
| 4.3  | Comparativo processo simulado ARENA .....                 | 37 |
| 4.4  | Processamento do empacotamento .....                      | 38 |
| 4.5  | Modelagem Alterada .....                                  | 39 |



## LISTA DE TABELAS

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 2.1 | Consultas na Web Of Science e Scopus.....                           | 17 |
| 2.2 | Periódicos de maior relevância.....                                 | 18 |
| 2.3 | Relação das revistas vs tópico pesquisado.....                      | 19 |
| 2.4 | Tipos de publicação por bases.....                                  | 20 |
| 2.5 | Relação de publicações mais citadas nas bases de dados .....        | 20 |
| 2.6 | Autores que mais publicaram nas bases de dados .....                | 21 |
| 2.7 | Relação de pesquisas por países .....                               | 21 |
| 4.1 | Entidades no modelo de simulação .....                              | 40 |
| 4.2 | Status de filas e utilização mais críticos no cenário .....         | 41 |
| 4.3 | Entidades no modelo de simulação alternativa. ....                  | 41 |
| 4.4 | Resultados das alterações propostas na reavaliação do sistema ..... | 42 |
| 4.5 | Comparativo indicadores do cenário original.....                    | 43 |

## LISTA DE QUADROS

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 2.1 | Indicadores de desempenho da TOC .....                | 12 |
| 4.1 | Sugestões de distribuições na ausência de dados ..... | 34 |

## LISTA DE SIGLAS

|       |  |
|-------|--|
| BPM   | <i>Business Process Model</i>                |
| BPMN  | <i>Business Process Model and Notation</i>   |
| OPT   | <i>Optimized Production Technology</i>       |
| POOGI | <i>Process of Ongoing Improvement</i>        |
| RRC   | Recurso com Restrição de Capacidade          |
| TEMAC | Teoria do Enfoque Meta Analítico Consolidado |
| TOC   | Teoria das Restrições                        |
| TPC   | Tambor-Pulmão-Corda                          |
| VBA   | Visual Basic For Applications                |
| WIP   | <i>Work In Progress</i>                      |

---

## RESUMO

O ganho de produtividade e utilização de recursos de forma eficiente são aspectos cruciais para determinar o sucesso de uma empresa. Com esse objetivo, ao longo da história, foram desenvolvidos diversos métodos para otimizar sistemas de produção até o surgimento da Teoria das Restrições (TOC) visando o aprimoramento do planejamento e controle da produção por meio de uma sequência lógica de identificação dos recursos limitadores da capacidade. Dessa forma, a utilização do processo de aprimoramento contínuo contido na TOC mostra-se uma solução efetiva na elevação de restrições dentro de um sistema. A partir desse cenário, o presente estudo desenvolveu um estudo de caso com uma abordagem combinada, para a aplicação do ciclo da melhoria contínua em um processo de beneficiamento em uma fábrica de torrefação e moagem de café. Para isso foi utilizada a modelagem e simulação computacional com o auxílio do software ARENA demonstrando sua aplicabilidade e vantagens em diferentes cenários. Como resultado foi possível identificar o recurso gargalo e aplicar propostas de soluções. Os resultados dos testes nos cenários propostos levaram a um aumento de produtividade e redução das filas em um processo gargalo no cenário original. No cenário com aumento de demanda foi possível reduzir o *lead time* do sistema em até 87%.

**Palavras - chave:** Teoria das Restrições, Simulação Computacional, Estudo de Caso.

---

## ABSTRACT

Gaining productivity and using resources efficiently are crucial aspects to determine the success of a company. With this objective, throughout history, several methods were developed to optimize production systems until the emergence of the Theory of Constraints (TOC) aiming at the improvement of production planning and control through a logical sequence of identification of the limiting resources of the capacity. Thus, the continuous improvement process contained in the TOC proves to be an effective solution in lifting restrictions within a system. From this scenario, the present study developed a case study with a combined approach, for the application of the continuous improvement cycle in a beneficiation process in a coffee roasting and grinding plant. For this, modeling and computational simulation were used with the help of the ARENA software, demonstrating its applicability and advantages in different scenarios. As a result, it was possible to identify the bottleneck resource and apply proposed solutions. The test results in the proposed scenarios led to an increase in productivity and reduction of queues in a process bottleneck in the original scenario. In the scenario with increased demand, it was possible to reduce the system lead time by up to 87%.

**Keywords:** Theory of Constraints, Computer Simulation, Case Study.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTO

O planejamento e controle de uma operação é essencial para determinar sua capacidade de criar produtos por meio de seus recursos de forma contínua atendendo às demandas do mercado. Assim, em ambientes de alta competitividade é essencial conciliar a capacidade dos recursos da operação com a demanda do mercado para entregar os produtos certos na hora certa (Slack et al. 2018).

Diversas metodologias surgiram ao longo da história visando otimizar sistemas de produção, dentre elas a *Optimized Production Technology* (OPT), de Goldratt, para controlar sistemas de produção de capacidade finita, aprimorando os sistemas fabris (Fry, Cox e Jr 1992).

A OPT foi posteriormente difundida sobre o nome de Teoria das Restrições (TOC) em forma de técnica de otimização de sistemas por meio do livro *A Meta*, que expõe o uso da abordagem por meio de um romance, que elucida suas aplicações em meios industriais (III, CFPIM e Jr 2010).

A teoria das restrições consiste em uma sequência lógica para aumentar a eficiência de seu processo produtivo por meio da identificação e aprimoramento de recursos gargalo, aqueles que restringem a capacidade geral do sistema (Slack et al. 2018).

A TOC por sua vez, representou uma teoria geral para o gerenciamento de sistemas de produção, observando-os de forma holística, permitindo com que tivesse penetração em áreas de contabilidade, logística, marketing, gerenciamento de processos (Watson, Blackstone e Gardiner 2007).

Por outro lado, o investimento em infraestruturas para o aumento de eficiência pode ser custoso e os sistemas de suporte à tomada de decisão são recomendados para uma análise integral do processo. A simulação é a experimentação de sistema real por meio de um modelo detalhado que determina como o sistema responde a mudanças em sua estrutura, ambiente ou recursos (Bateman Royce O. Bowden e Harrell 2013).

Dessa forma, a aplicação conjunta da TOC e da simulação computacional pode representar um importante fator para o processo de aprimoramento de um sistema de produção mostra-se prolífico, como apresentado nos trabalhos de (Schneider 2017), (Sabbadini et al. 2013) e (Bernardino et al. 2019).

Logo, o presente projeto se propôs a entender o estado de desenvolvimento da pesquisa da TOC na academia atualmente, identificando os principais fatores de relevância, levantando boas práticas e então aplicá-las em um processo produtivo sobre essa ótica utilizando a simulação computacional.

## 1.2 OBJETIVOS

Nessa sessão estão apresentados os objetivos gerais e específicos deste trabalho. O presente estudo tem como objetivo geral a aplicação da Teoria das Restrições com o apoio da modelagem e simulação discreta para identificar gargalos e aprimorar um processo produtivo de uma empresa de torrefação, moagem e ensacamento de café.

Por consequência, podem ser definidos como objetivos específicos do trabalho:

- Desenvolver uma modelagem do fluxo de um processo produtivo na forma de um estudo de caso;
- Analisar o fluxo de materiais no modelo desenvolvido utilizando o modelo de aprimoramento contínuo da teoria das restrições;
- Apontar melhorias no sistema com base nos resultados obtidos;
- Comparar os resultados simulados com os resultados originais.

## 1.3 LIMITAÇÕES

O trabalho foi realizado no período de crescimento da pandemia de COVID-19 por meio da variante *Ômicron* (WHO 2021), impossibilitando o acesso a ambientes reais. Além disso, dados de capacidade de produção são considerados estratégicos, dificultando o contato à distância.

Dessa forma, optou-se por realizar o trabalho com dados pré-existentes com base em dados coletados em estudos anteriores em uma empresa de torrefação e moagem de café.

## 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está organizado em cinco capítulos. O capítulo 1 tratou da contextualização do tema, apresentação dos objetivos e limitações.

O capítulo 2 fornece uma visão do referencial teórico utilizado para o entendimento da teoria das restrições e seus métodos, simulação computacional e do *software* Arena para melhor compreensão dos principais temas e fundamentação do desenvolvimento do trabalho. Por fim, traz uma revisão do estado da arte por meio de pesquisa bibliométrica acerca da teoria das restrições utilizando a teoria do enfoque meta analítico consolidado.

O capítulo 3 apresenta o arcabouço metodológico utilizado para a realização da pesquisa desse trabalho e seus parâmetros.

O capítulo 4 demonstra o desenvolvimento do modelo utilizado para o estudo de caso apresentando os parâmetros da simulação e processamento.

Por último, o capítulo 5 expressa as discussões acerca dos resultados encontrados, apontando também sugestões de trabalhos futuros.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta sessão apresenta uma fundamentação teórica do presente trabalho, apresentando conceitos da teoria das restrições e simulações. Esses referenciais são apresentados para melhor compreensão das definições básicas dos conhecimentos aplicados.

### 2.1 GERENCIAMENTO DE PROCESSOS

Para o entendimento de um sistema de produção é fundamental sedimentar as conceituações acerca de processos. Processos são o conjunto de atividades e comportamentos inter-relacionados para produzir um resultado específico e repetitivo, transformando insumos (*inputs*) em produtos ou serviços (*outputs*) com valor para um cliente (CBOK 2013).

Nesse sentido, de acordo com (Slack et al. 2018), é fundamental analisar os processos de uma organização para promover o uso eficiente dos seus recursos, verificando os fluxos de atividades e materiais para identificar tempos, capacidades, desempenho e custos relacionados.

Assim, o gerenciamento de processos se porta como uma ação básica para que as organizações consigam reagir aos estímulos que ocorrem em seu ambiente de atuação sendo esta a tarefa que coordena a forma como as atividades e recursos são empregados, dividindo e organizando o trabalho (Sordi 2017).

O *Business Process Management* (BPM) ou Gerenciamento dos processos de negócio é, portanto, uma disciplina gerencial de mercado padronizada que permite modelar o funcionamento do processo em diferentes cenários, permitindo desenhar seu fluxo, executar e documentar mudanças, medir atributos, monitorar indicadores, controlar e melhorar processos visando o cumprimento da missão da empresa, o atingimento das metas, a melhoria contínua, a redução dos esforços empregados, prazos de entrega de *outputs* e redução dos custos relacionados (CBOK 2013).

Logo, apresentado este cenário, a gestão de processos é uma importante ferramenta de suporte para a identificação de problemas otimização dos processos.

Na sessão a seguir serão apresentados os tópicos relacionados à Teoria das Restrições, que pode se utilizar desses mecanismos para obter melhores resultados.

## 2.2 TEORIA DAS RESTRIÇÕES

A Teoria das Restrições surge na década de 70, idealizada pelo físico israelense Eliyahu M. Goldratt. originada do *software Optimized Production Technology* (Tecnologia da Produção Otimizada), que tinha como objetivo identificar e solucionar problemas empresariais (Spencer e Cox 1995). Apesar de não ser administrador utilizou conhecimentos da física para melhorar o desempenho global de empresas e processos.

A metodologia foi amplamente divulgada com a publicação do livro “A Meta” em 1984 em que o autor apresenta a *Theory of Constraints* (TOC) como um procedimento de aprimoramento constante para ajudar as pessoas e organizações a refletirem sobre as causas raiz de problemas, criar soluções e aumentar a produtividade prática dos processos (III, CFPIM e Jr 2010).

De acordo com o TOC, o objetivo das organizações é realizar lucros tanto agora quanto no futuro. Para tanto, a TOC utiliza indicadores financeiros comumente usados para quantificar seu objetivo geral de ganhar dinheiro: lucro líquido, retorno sobre o investimento e fluxo de caixa (Cogan 2007). Esses objetivos financeiros são desdobrados em objetivos operacionais.

Desta forma, pode-se afirmar que a TOC é um sistema de gestão holística que consiste em três macro componentes. Estes componentes foram esquematizados no diagrama apresentado na figura 2.1, indicando cada uma das três possíveis divisões e suas respectivas técnicas:

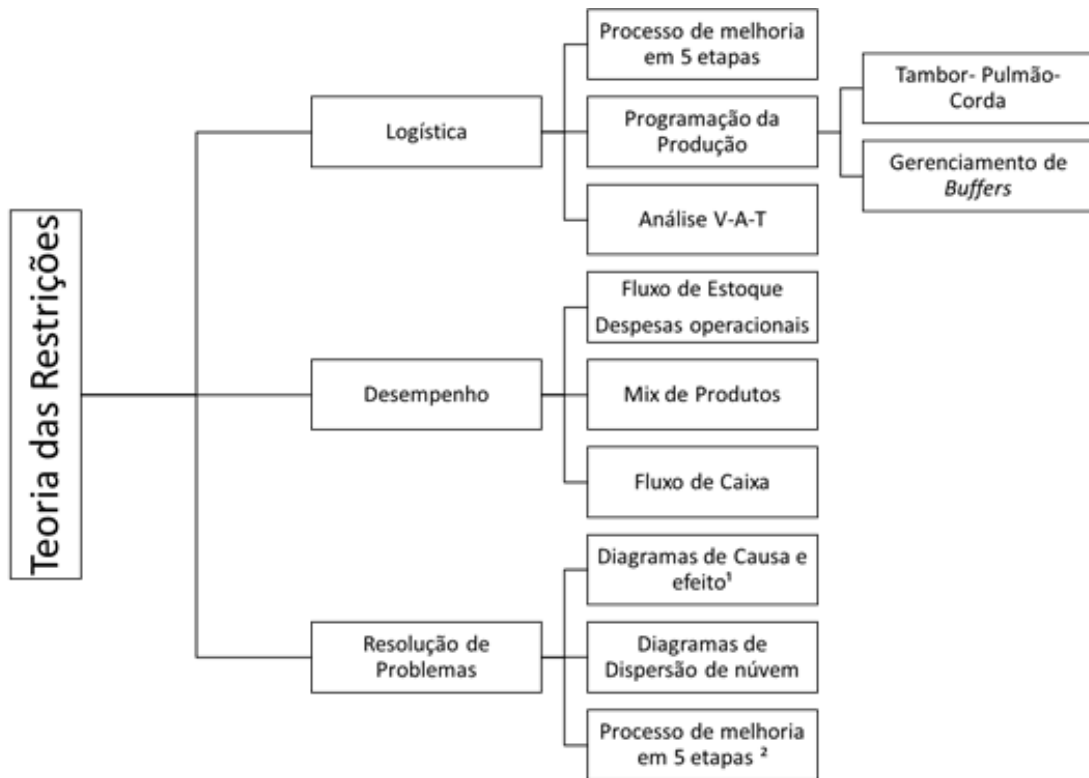


Figura 2.1: Diagrama de componentes da TOC. Adaptado de (Spencer e Cox 1995)

<sup>1</sup> - Diagramas de causa e efeito consistem em qualquer das metodologias comumente utilizadas na TOC: Árvore de realidade atual; Diagrama de dispersão de nuvem; árvore de realidade futura; árvore de realidade de pré-requisitos; diagrama de árvore de transição <sup>2</sup> - Quando o Processo de Melhoria em Cinco Etapas é aplicado fora do campo de logística ele pertence à Resolução de Problemas.

Assim, é possível detalhar os os pilares apontados para um melhor entendimento em:

1. **Logístico:** componente relacionado com as ferramentas e elementos de gestão da operação como o gerenciamento de restrições, planejamento de produção e posicionamento de estoques;
2. **Desempenho:** compreende a definição de indicadores claros para acompanhamento de rendimento, volume de estoques, despesas operacionais;
3. **Resolução de Problemas:** integra análises de causa e efeito e outras técnicas de entendimento e diagramação das restrições encontradas para sua otimização de acordo com suas causas.

Dada esta caracterização, a Teoria das Restrições parte da premissa que todos os sistemas produtivos possuem ao menos um gargalo que pode ser definido como processo que limita a capacidade de performance do sistema. Assim, ela é utilizada para responder os questionamentos que seguem para a otimização da produção (Verma 1997):

- **O que mudar:** cada empresa ou organização encontra-se em um ambiente real com problemas, ameaças e oportunidades que requerem atenção, ação corretiva ou aprimoramento. No entanto, possuem também recursos escassos, sendo necessário priorizar os problemas para gerar um ganho de desempenho. Dessa forma esta pergunta leva à identificação das causas raiz.
- **Para o que mudar:** Com a identificação e priorização dos problemas é necessário identificar suas possíveis soluções. Esta fase leva à exploração das soluções para o problema raiz.
- **Como mudar:** Apontado como o tópico mais difícil dos questionamentos é como mudar o sistema. Esta dificuldade ocorre devido sua relação com diversas variáveis como tempo, esforço, capital, resistência do pessoal envolvido.

Tais questionamentos são também avaliados por (Cogan 2007) que afirma que o ponto focal da aplicação da TOC é o entendimento das relações de causa e efeito. Desta forma, é possível focar os esforços nos elos mais fracos do processo aumentando sua produtividade (Goldratt e Cox 2014).

Estes elos mais fracos são chamados de restrições ou gargalos. Podem ser observados de diferentes formas conforme o contexto em que são observadas. No caso de gargalos de produção, como apresentado no livro “A Meta” (Goldratt e Cox 2014), são apresentados como processos de menor capacidade. No caso de da gestão de projetos o livro “Corrente Crítica” (Goldratt 2013) descreve estas restrições na forma de caminho crítico.

Já de acordo com (Slack et al. 2018), um gargalo é definido como atividade ou estágio em que ocorre congestionamento causado pela carga de trabalho imposta ser maior do que a capacidade daquele posto de trabalho lidar com ela. É definido, portanto, como sobrecarga de um processo.

No presente projeto o maior foco está localizado na componente logística da TOC. Para melhor entendimento e responder aos questionamentos levantados cabe destacar alguns conceitos fundamentais da Teoria das Restrições que serão abordados no trabalho e nos subtópicos a seguir.

### 2.2.1 Tambor-Pulmão-Corda

O Tambor-Pulmão-Corda (TPC) ou *Drum-Buffer-Rope* (DBR) é uma técnica para avaliação e gerenciamento de recursos em uma empresa. Segundo (III, CFPIM e Jr 2010) é um método para a aplicação da TOC em um ambiente de serviços ou produção de bens. O TPC é utilizado para planejamento, execução e controle da produção, primeiramente apresentados no livro “A Meta” (Goldratt e Cox 2014) e posteriormente explorado em outros livros do autor. A técnica, como citado anteriormente, possui foco em aumentar a eficiência de um processo com atividades interdependentes.

Os nomes dos fatores são alegorias de uma tropa, em que o mais lento é colocado no meio de uma fila, o ritmo das passadas é medido pela percussão e para manter a coesão todos são ligados por uma corda (Cogan 2007). Os componentes são conceituados a seguir:

O primeiro elemento, nomeado Tambor (*Drum*), é a atividade que mais leva tempo numa produção, dessa forma é ela que dita o tempo do processo, definida como gargalo ou recurso com restrição de capacidade (RRC) (Goldratt e Cox 2014). De acordo com (Slack et al. 2018) os gargalos definem a eficiência de um processo dado que por mais que este ponto esteja ocupado em sua capacidade máxima, as outras atividades estarão abaixo de seu volume máximo. Assim sendo, o tambor estabelece a velocidade máxima do sistema produtivo sob boas condições.

O segundo conceito, chamado Pulmão (*Buffer*), é uma proteção de tempo contra possíveis variáveis que possam atingir o processo produtivo como por exemplo flutuações na demanda. Seu propósito é, portanto, garantir que os insumos necessários estejam disponíveis ao gargalo para processamento sem que haja pausas. Segundo (Goldratt e Cox 2014) o conceito de pulmão representa uma resposta a sucção excessiva no processo, sendo necessário seu posicionamento em níveis estratégicos do planejamento e controle da produção para garantir seu desempenho.

O último elemento, denominado corda (*Rope*), é o mecanismo de sinalização ou *feedback* que informa o status do pulmão e do tambor ao sistema produtivo, mantendo a subordinação da operação à restrição do sistema. De acordo com (Slack et al. 2018) é fundamental por impedir que as outras partes do processo trabalhem a plena capacidade, gerando excesso de *Work in Progress* (WIP) incorrendo em custos e desperdícios. Dessa forma, sua função é realizar a comunicação entre as entradas do processo, o gargalo e a demanda do mercado.

Com esses elementos é possível fazer um diagnóstico do sistema produtivo e planejar as melhorias para incremento de desempenho. Estas melhorias seguem, segundo a TOC, um processo específico que será detalhado no próximo subtópico.

### **2.2.2 Processo de aprimoramento contínuo**

A técnica de focalização em cinco etapas foi desenvolvida em 1985 como uma ferramenta de melhoria contínua da TOC (III, CFPIM e Jr 2010), conhecida pela alcunha de “*Process of Ongoing Improvement*” (POOGI) ou Processo de Aprimoramento Contínuo. As etapas são descritas na imagem 2.2.

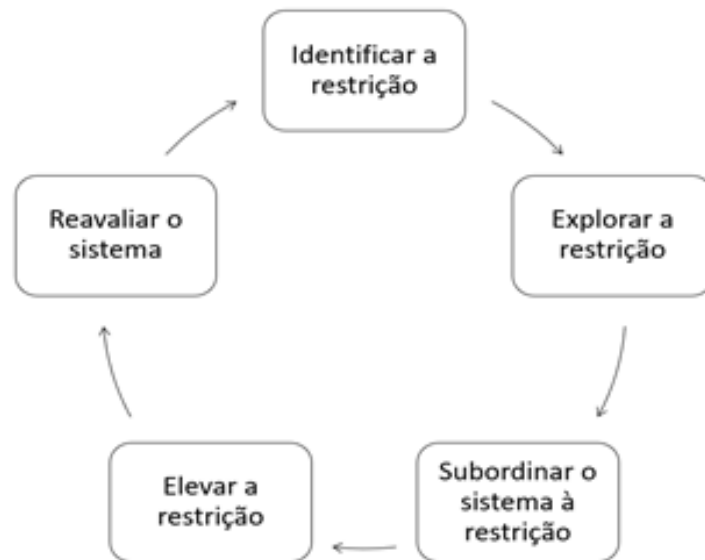


Figura 2.2: Focalização em 5 etapas.  
 Fonte: Adaptado de (Rahman 2002)

Assim, podem ser detalhadas as etapas representadas nos seguintes descritivos:

**1. Identificar a restrição do sistema:**

Para identificar as restrições de um problema é fundamental realizar análises de capacidade e carga e discernir os pontos de menor capacidade, que, por sua vez, indica a capacidade máxima do sistema como um todo.

A restrição pode se apresentar de forma física como a velocidade de um processo ou a capacidade de um veículo ou de forma não física como a demanda de um mercado, a confiabilidade de um fornecedor ou uma política interna (Wojakowski 2016). Cabe ressaltar que as restrições em um processo são sempre únicas a não ser que a organização ou projeto tenha diversos fluxos de valor independentes entre si (Techt 2015).

- 2. Explorar a restrição do sistema:** A restrição define a capacidade global do sistema. Nesse ponto é fundamental explorar ao máximo o tambor. No caso de restrições físicas é importante implementar melhorias nos processos e esforços de manutenção e controle para manter o fluxo contínuo da produção (Mariz 2019). Cabe ainda citar (Cogan 2007), que afirma que qualquer aprimoramento em recursos não-gargalos são apenas miragens, dado que o sistema é enforcado no ponto de restrição.

3. **Subordinar o sistema à restrição:** Os outros recursos do sistema devem obedecer ao ritmo dos recursos restritos para garantir seu funcionamento contínuo em toda a organização. Este limite é responsável por determinar a capacidade produtiva global da empresa, bem como a receita da empresa. Desta forma, é necessário planejar e equilibrar e sincronizar a operação aplicando o método DBR. Portanto, o material é liberado para produção de acordo com a taxa de consumo de recursos, podendo haver uma antecipação equivalente ao pulmão (*buffer*). Após o processo de subordinação é necessário avaliar o processo global para determinar se a restrição foi movida para outro lugar no processo, garantindo que se está avaliando o gargalo corretamente (Slack et al. 2018).
4. **Elevar a restrição do sistema:** Elevar a restrição do sistema, de acordo com (Slack et al. 2018), significa anulá-las seja por elevar a capacidade do gargalo ou eliminá-lo por completo. Este tipo de mudança requer investimentos no sistema para ampliar a fronteira de capacidade, sendo necessários estudos de viabilidade econômica e custo-benefício com base no aprimoramento do sistema (Techt 2015).
5. **Reavaliar o sistema:** Por último, caracterizando um ciclo contínuo de melhoria, deve-se retornar à análise do sistema de produção. Cabe ressaltar que sempre haverá uma restrição para limitar os benefícios da organização. Realizar a focalização em cinco estágios é uma etapa fundamental para alcançar efetivamente a melhoria contínua (Drumond et al. 2014). Ainda, segundo (Goldratt e Cox 2014), é necessário evitar que a inércia gere novas restrições ao sistema.

### 2.2.3 Medidas de Desempenho

A teoria das restrições conta com medidas de desempenho que quantificam o atendimento dos objetivos. A TOC utiliza três parâmetros norteadores para o alcance das metas locais (Moellmann 2008):

Quadro 2.1: Indicadores de desempenho da TOC.

| Parâmetros de desempenho locais   | Definições  |
|-----------------------------------|---|
| <b>Ganhos (G)</b>                 | É a taxa que representa o ganho do sistema. De um modo geral, é calculado subtraindo-se todos os fundos que entram na empresa dos fundos pagos aos fornecedores.  |
| <b>Inventário (I)</b>             | Representa o investimento do sistema na compra de todos os insumos e materiais para processamento e venda. Corresponde, portanto, aos recursos investidos pelo sistema no que pretende vender. Pode ser dividido em estoque de materiais (matéria-prima) e outros ativos (máquinas e equipamentos). |
| <b>Despesas Operacionais (DO)</b> | Corresponde ao valor despendido para transformar o investimento em ganhos, contemplando desde a folha de pagamentos, despesas gerais, impostos.   |

Fonte: Adaptado de Corbett (1998)

Assim, o objetivo de uma organização deve ser aumentar seu ganho (G) reduzindo seu inventário (I) e suas despesas operacionais (DO) (Naor, Bernardes e Coman 2013). Dessa forma, pode-se dizer que a ordem de prioridade da TOC é: (1.) aumentar o rendimento de uma produção e; (2.) reduzir os estoques e despesas (Corbett 1998).

## 2.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A simulação computacional de sistemas é um conjunto de ferramentas para construção de modelos que descrevem computacionalmente, de forma abstrata, sistemas reais ao longo do tempo, construindo um modelo e testando-o para avaliar sua operação e comportamento diante de condições diversas (Moreira. 2011). O princípio é, portanto, estudar o comportamento do modelo visando obter soluções ou identificar possíveis gargalos e oportunidades na operação de maneira mais prática, segura e com custos potencialmente menores (Bateman Royce O. Bowden e Harrell 2013).

Para (Chwif e Medina 2010), a simulação tem se tornado popular por sua flexibilidade, que permite mudar o estado real de um sistema em momentos no tempo desencadeados por eventos. Essas análises são possíveis por meio de modelos que replicam seus comportamentos quando submetidos a tais condições.

### 2.3.1 Modelos e Sistemas

Um sistema pode ser caracterizado por um conjunto organizado de entidades que trabalham juntas para obter um resultado específico comum (Kelton 2014).

De acordo com (Banks et al. 2013) os sistemas são compostos de:

- **Entidade:** trata-se do objeto de interesse no sistema. No caso de um sistema de produção pode ser exemplificada por uma máquina.
- **Atributo:** trata-se de propriedades das entidades. Seguindo o exemplo anterior podem ser exemplificados atributos de máquinas como velocidade de processamento e capacidade.
- **Atividade:** trata-se da função desempenhada pela entidade ou o recurso em um período de tempo. Seguindo o exemplo anterior podem ser consideradas atividades das máquinas a solda e a estampagem.
- **Evento:** trata-se de algo que ocorre instantaneamente e pode alterar o status do sistema. São divididos em endógenos, quando as atividades e eventos ocorrem dentro do sistema e exógenos quando causados por atividades e eventos no ambiente. Seguindo o exemplo anterior podem ser considerados eventos endógenos o processamento do material pela máquina e apontados como eventos exógenos a chegada de materiais.
- **Status:** trata-se do estado do sistema num determinado tempo. Seguindo o exemplo levantado anteriormente as máquinas podem estar disponíveis, em uso, quebradas etc.



Os chamados modelos são definidos como uma representação simplificada de um sistema contendo os elementos que o afetam, podendo ser divididos em modelos físicos e matemáticos. Os modelos físicos podem ser definidos numa representação física maior ou menor que o sistema original como por exemplo a representação de uma célula ou uma maquete. Um modelo matemático, por sua vez, utiliza notação simbólica e equações para definir regras que representem o sistema (Banks et al. 2013). Dessa forma, a figura 2.3 reflete esta divisão.

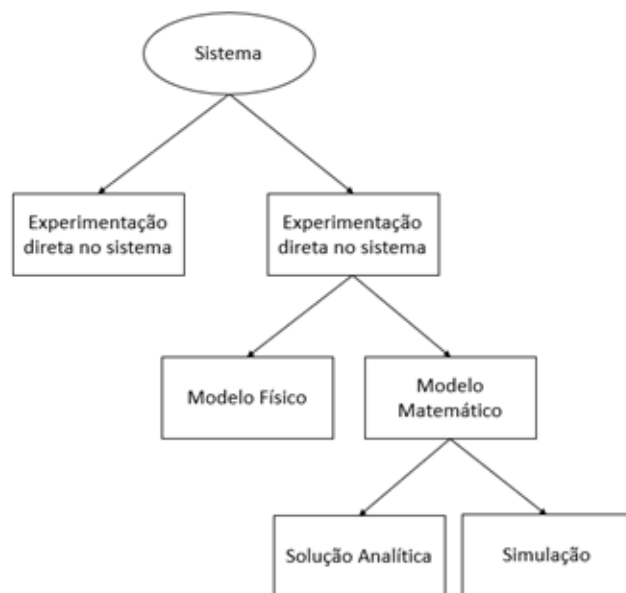


Figura 2.3: Maneiras de se estudar um sistema.  
 Fonte: (Law, Kelton e Kelton 2014)

Dentro dos modelos matemáticos existe a simulação computacional, técnicas para descrever, de forma abstrata, sistemas reais ao longo do tempo. Os modelos de simulação podem ser classificados em três diferentes dimensões (Law, Kelton e Kelton 2014):

- **Estáticos ou Dinâmicos:**

Os modelos estáticos representam sistemas que não sofrem alteração com tempo ou de modo a representar o sistema em um período específico cabendo citar como exemplo os Modelos de Montecarlo.

Já os modelos dinâmicos de simulação representam sistemas que evoluem com o decorrer do tempo como o funcionamento de uma fábrica ou o transporte de materiais.

- **Determinístico ou Estocástico:**

Os modelos de simulação que não contém componentes randômicos são chamados de determinísticos. Esse tipo de modelo pode ser exemplificado por um sistema de programações lineares.

Caso o modelo tenha características que envolvam componentes aleatórias ele é classificado como estocástico. Os modelos de simulação estocástica podem ser exemplificados por sistemas de controle de estoques e filas. Os modelos estocásticos produzem, por sua vez, resultados aleatórios que devem ser observados como estimativas.

- **Contínuo ou Discreto:**

Os modelos contínuos possuem variáveis que se alteram de forma gradual como por exemplo o movimento de uma aeronave.

Já os modelos discretos são definidos por variáveis que se alteram instantaneamente em diferentes momentos de tempo. Podem ser exemplificados como discretos o atendimento em determinado serviço em que o número de consumidores é alterado quando chega estes chegam ou partem do sistema.

De acordo com (Kelton 2014) e (Banks et al. 2013) a vantagem do uso das ferramentas de simulação se dá: pela possibilidade de testar novas políticas e processos; pela exploração do sistema sem a realização de paradas da operação real; testar novos layouts e configurações sem comprometer recursos; testar hipóteses; comprimir ou expandir o tempo para avaliação de fenômenos e; pela realização de análise de gargalos para descobrir em que ponto do processo há acúmulo de *work in progress* (WIP), materiais e informações atrasando o sistema.

## 2.4 ARENA

O software Arena® é uma ferramenta para simulação de eventos discretos e contínuos, sendo amplamente utilizado na indústria e na academia (Altiok e Melamed 2007). Oferecido pela Rockwell Automation o *software* conta com um ambiente gráfico integrado e recursos para análise estatística, modelagem de processos, animação, e análise de resultados.

Todo o processo de criação do modelo é feito através de blocos e caixas. Isso é feito de maneira intuitiva, dado que representa o fluxo das informações e processos necessários, muito comum, conhecido por aqueles que já utilizam metodologias *Business Process Model and Notation* (BPMN).

O Arena utiliza a linguagem de simulação SIMAN que conta com duas classes de objetos: os blocos e os elementos. Blocos são estruturas lógicas básicas que representam operações enquanto elementos são objetos que representam instalações, recursos, filas ou outros recursos utilizados para coleta estatística (Altiok e Melamed 2007).

Também conta com uma arquitetura aberta integrada com o *Visual Basic for Applications* (VBA) e C++ possibilitando transferência de dados entre aplicações externas (Kelton 2014).

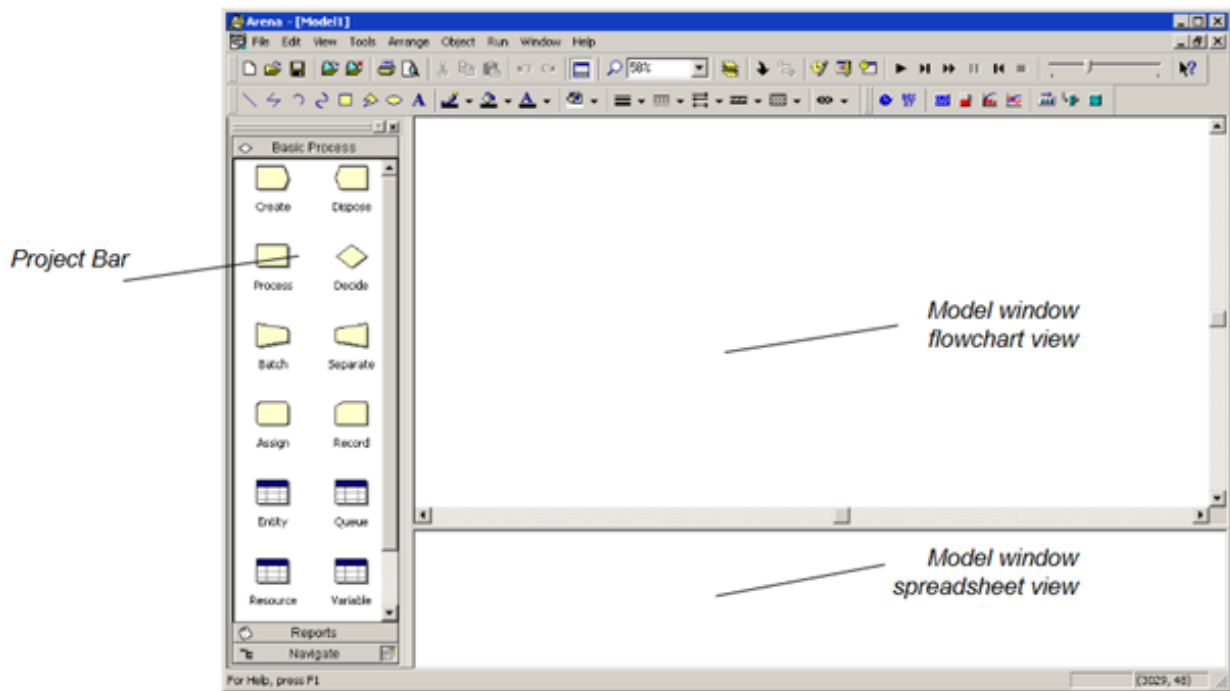


Figura 2.4: Exemplo tela Arena  
 Fonte: (Bradley 2007)

Ainda de acordo com (Kelton 2014) o software conta com diversas outras ferramentas cabendo citar *input analysis* e *output analysis*, que identificam dados reais para escolha da melhor distribuição estatística para aplicação no modelo e analisar estes dados durante o processo de simulação.

## 2.5 TEORIA DO ENFOQUE META ANALÍTICO CONSOLIDADO

Esta sessão apresenta uma análise do estado da arte do que já foi e vem sendo estudado acerca da teoria das restrições. A análise foi realizada por meio de bibliometria, utilizando a Teoria do Enfoque Meta Analítico Consolidado (TEMAC), proposto por (Mariano e Rocha 2017).

O TEMAC é uma metodologia desenvolvida observando as características de impacto dos artigos e trabalhos produzidos de forma holística e sistemática, representando uma abordagem qualitativa e integrativa, de forma a entender o contexto atual da produção científica. Para isso, divide-se em 3 etapas que envolvem a preparação da pesquisa, a apresentação e interrelação de dados e o detalhamento, modelo integrador e validação por evidências, como mostra a figura 2.5.

### 2.5.1 Preparação da Pesquisa

A primeira etapa do processo foi preciso definir uma base de dados para realizar as análises. Optou-se, dessa forma, por utilizar as bases:

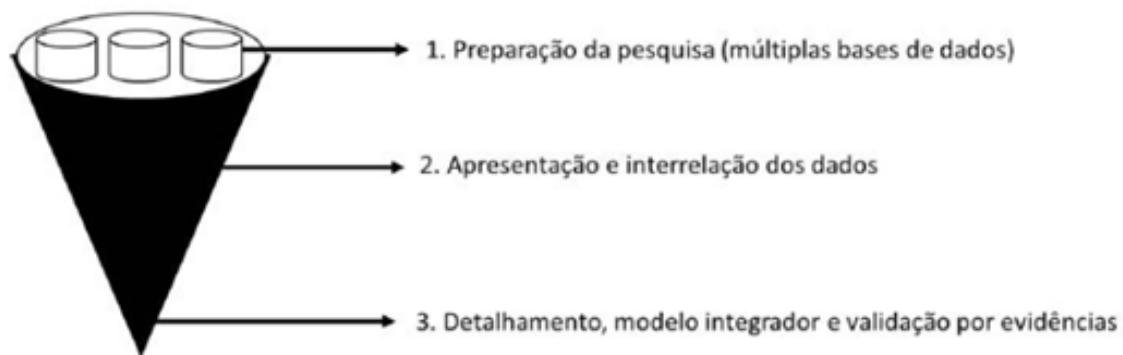


Figura 2.5: Modelo TEMAC  
 Fonte: (Mariano e Rocha 2017)

*Web of Science*, que conta com plataforma multidisciplinar de citações índices e especialidades, contando com cerca de 171 milhões de registros (Clarivate 2022) e;

*Scopus*, maior banco de dados de resumos e citações de literatura, incluindo revisão por pares: revistas científicas, livros, anais de conferências e publicações da indústria (Elsevier 2022).

Definidas as bases a serem analisadas escolheu-se o termo de pesquisa “*Theory of Constraints*” com um espaço amostral considerando os registros mais antigos de 1991 até a atualidade, em fevereiro de 2022. Além disso, na base *Web of Science* foram delimitadas as categorias: “*Engineering Industrial*”, “*Operations Research Management Science*” e “*Engineering Manufacturing*”. Enquanto na base *Scopus* as categorias observadas foram “*Engineering*” e “*Decision Sciences*”. Dessa forma foram obtidos os dados contidos na tabela 2.1:

Tabela 2.1: Consultas na Web Of Science e Scopus.

|                             | <i>Web of Science</i>   | <i>Scopus</i>                          |
|-----------------------------|---|--|
| <b>Termo Buscado</b>        | "Theory of Constraints"   |  |
| <b>Período</b>              | 1991 até 2022   |  |
| <b>Filtros de Categoria</b> | "Engineering Industrial",<br>"Operations Research Management Science", e<br>"Engineering Manufacturing" | "Engineering" e<br>"Decision Sciences" |
| <b>Número de Resultados</b> | 380   | 948                                    |

Fonte: Autor

A partir desses resultados é possível partir para a segunda etapa, no que se é apresentado no subtópico seguinte.

## 2.5.2 Apresentação e interrelação dos dados

A segunda etapa de análise ocorreu seguindo as aplicações bibliométricas para identificar os padrões e inter-relações entre os resultados encontrados.

O primeiro tópico a ser avaliado são os periódicos de maior relevância nas categorias selecionadas. Assim, foi consultado o fator de impacto no *Journal Citation Report*, no período disponível para acesso referente ao ano de 2020, com as classes selecionadas na busca do (Clarivate 2022). Assim, o resultado pode ser observado na tabela 2.2.

Tabela 2.2: Periódicos de maior relevância.

| <b>Classificação</b> | <b>Nome do Periódico</b>                              | <b>Categoria</b>               | <b>Total de Citações</b> | <b>Fator de Impacto (2020)</b> | <b>Quartil</b> |
|----------------------|---|--------------------------------|--------------------------|--------------------------------|----------------|
| 1                    | IEEE Transactions on Industrial Informatics           | Engineering, Industrial - Scie | 27,02                    | 10.215                         | Q1             |
| 2                    | Journal of Industrial Information Integration         | Engineering, Industrial - Scie | 1,149                    | 10.063                         | Q1             |
| 3                    | Journal Of Product Innovation Management              | Engineering, Industrial - Scie | 9,469                    | 6.987                          | Q1             |
| 4                    | Journal Of Management In Engineering                  | Engineering, Industrial - Scie | 5,173                    | 6.853                          | Q1             |
| 5                    | Ieee Transactions On Engineering Management           | Engineering, Industrial - Scie | 4,148                    | 6.146                          | Q1             |
| 6                    | Computers Industrial Engineering                      | Engineering, Industrial - Scie | 20,964                   | 5.431                          | Q2             |
| 7                    | Industrial Management Data Systems                    | Engineering, Industrial - Scie | 6,459                    | 4.224                          | Q2             |
| 8                    | Journal Of Construction Engineering And Management    | Engineering, Industrial - Scie | 12,131                   | 3.951                          | Q2             |
| 9                    | Applied Ergonomics                                    | Engineering, Industrial - Scie | 9,523                    | 3.661                          | Q2             |
| 10                   | Engineering Construction and Architectural Management | Engineering, Industrial - Scie | 3,113                    | 3.531                          | Q2             |

Fonte: Fonte: (Clarivate 2022)

Levantadas esses periódicos é possível apontar quais são os canais de maior fator de impacto, apontado pelo número médio de vezes que artigos de um periódico publicado nos últimos dois anos foram citados (Garfield 2006).

Em seguida, a tabela 2.3 mostra as revistas que mais publicaram sobre o tópico pesquisado:

Tabela 2.3: Relação das revistas vs tópico pesquisado.

| Periodicos                                    | Web of Science |     | Scopus      |     |
|---|----------------|-----|-------------|-----|
|   | Publicações    | %   | Publicações | %   |
| International Journal Of Production Research  | 100            | 26% | 103         | 11% |
| Production Planning And Control               | 22             | 6%  | 23          | 2%  |
| International Journal Of Production Economics | 19             | 5%  | 20          | 2%  |

Fonte: Autor

Dessa forma, observa-se que entre os cinco veículos que mais publicaram acerca do tema abordado dentre as diferentes bases, são comuns os jornais de alto impacto como: o “*International Journal Of Production Research*” contanto com um fator de impacto de 8.568, primeiro quartil, e 30.233 citações; a “*Production Planning and Control*” também do primeiro quartil, com fator de impacto 7,044 e um total de 6.024 citações; e a “*International Journal Of Production Economics*” com fator de impacto 7, 885 e um total de 32.606 citações.

Essa análise mostra-se significativa, dado que aponta que o tema já foi abordado por autores de qualidade e em vetores de relevância, indicando, portanto, diversas fontes a serem observadas no presente estudo.

Também foi observada a produção anual de estudos acerca dos tópicos abordados como pode-se observar na figura 2.6:

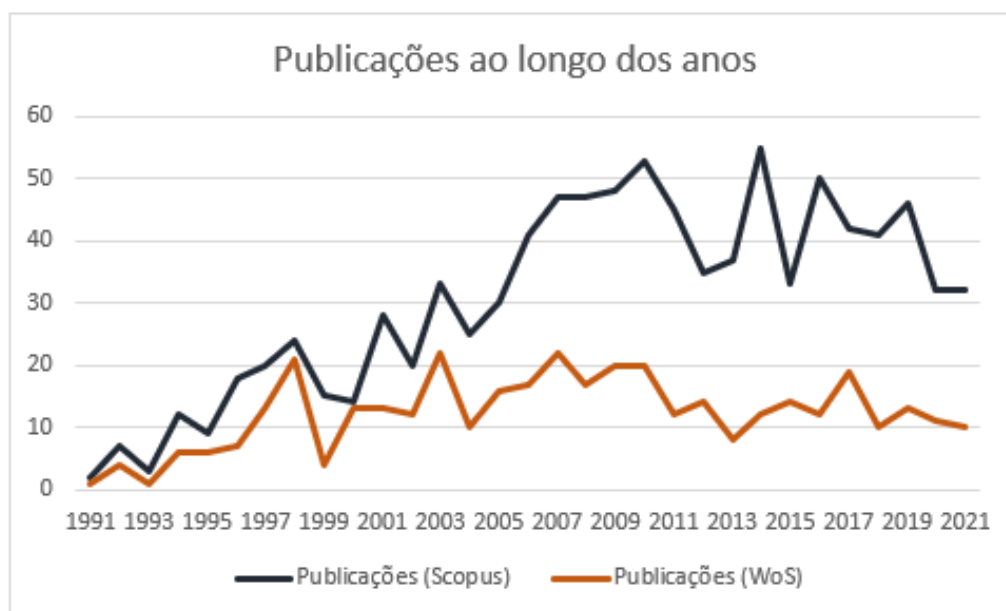


Figura 2.6: Evolução das publicações  
Fonte: Adaptado de (Clarivate 2020)

Apesar de possuir uma movimentação difusa, o número de produções acerca do tópico foi crescente desde o início das produções, mostrando possível interesse específico do tema.

Quanto ao tipo de publicação, observa-se o mesmo padrão nas duas bases, em que a maioria é representada por artigos científicos e artigos para conferências, como pode ser observado na tabela 2.4.

Tabela 2.4: Tipos de publicação por bases.

| <b>Tipo de Publicação</b> | <b>WoS</b> | <b>Scopus</b> |
|---------------------------|------------|---------------|
| Artigo                    | 65,79%     | 59,70%        |
| Artigo de Conferência     | 36,05%     | 34,20%        |

Fonte: Autor

A análise ainda pode ser aprofundada identificando os artigos mais citados sobre a teoria das restrições. Para isso, pode-se observar na tabela 2.5 os cinco mais citados em cada uma das bases de dados utilizada:

Tabela 2.5: Relação de publicações mais citadas nas bases de dados.

|               | <b>Título</b>   | <b>Autor</b>                | <b>Ano</b> | <b>Citações</b> |
|---------------|---|-----------------------------|------------|-----------------|
| <b>WoS</b>    | On the merits and pitfalls of critical chain scheduling   | Herroelen, W et al          | 2001       | 168             |
|               | The evolution of a management philosophy: The theory of constraints   | Watson, Kevin J. et al.     | 2007       | 140             |
|               | Solving the integrated product mix-outsourcing problem using the Imperialist Competitive Algorithm                        | Nazari-Shirkouhi, S. et al. | 2010       | 127             |
|               | Theory Of Constraints And Linear-programming - A Comparison   | Luebbe, R; et al            | 1992       | 94              |
|               | A comparative analysis of utilizing activity-based costing and the theory of constraints for making product-mix decisions | Kee, R; et al               | 2000       | 85              |
| <b>Scopus</b> | On the merits and pitfalls of critical chain scheduling   | Herroelen, W et al          | 2001       | 249             |
|               | Theory of constraints: A review of the philosophy and its applications  | Rahman, S.                  | 1998       | 190             |
|               | The evolution of a management philosophy: The theory of constraints   | Watson, Kevin J. et al.     | 2007       | 181             |
|               | Solving the integrated product mix-outsourcing problem using the Imperialist Competitive Algorithm                        | Nazari-Shirkouhi, S. et al. | 2010       | 162             |
|               | How to compare six sigma, lean and the theory of constraints  | Nave, D.                    | 2002       | 141             |

Fonte: Autor

Pode-se observar a importância dos trabalhos que se repetem em ambas as bases, assegurando sua qualidade como referência no tema.

O artigo “*The evolution of a management philosophy: The theory of constraints*”, de (Watson, Blackstone e Gardiner 2007), trata de um histórico da Teoria das Restrições que começa como um software de agendamento e evolui para uma filosofia de ferenciamento, avaliando e revisando a produção no período e direcionando as fragilidades para novos estudos.

Já o artigo “*Solving the integrated product mix-outsourcing problem using the Imperialist Competitive Algorithm*”, de (Nazari-Shirkouhi et al. 2010), avaliou como otimizar o mix de produtos utilizando um algoritmo meta-heurístico e comparando os resultados obtidos pelo algoritmo com resultados da abordagem da Teoria das Restrições.

Foram ainda realizadas análises quanto aos autores que mais publicaram com o objetivo de complementar a análise anterior, indicando as referências mais produtivas no tema relacionados na tabela 2.6:

Tabela 2.6: Autores que mais publicaram nas bases de dados.

| WoS            |             | Scopus       |             |
|----------------|-------------|--------------|-------------|
| Autores        | Publicações | Autores      | Publicações |
| Ronen B        | 13          | Ronen, B     | 17          |
| Gupta M        | 10          | Sun, S.D     | 17          |
| Wu HH          | 10          | Wang, J.Q    | 17          |
| Chakravorty SS | 9           | Cox, J.F     | 12          |
| Atwater JB     | 7           | Lacerda, D.P | 12          |

Fonte: Autor

Ao se relacionar essa tabela com a anterior, nota-se que os autores mais produtivos acerca do tema não são necessariamente os de trabalhos de maior relevância. Cita-se, porém, que os trabalhos de Cox, encontram-se dentre os top 20 mais citados. Dessa forma, pode-se observar que há um aumento de produção de autores recentes, enquanto os mais antigos, apesar de produção um pouco mais baixa, apresentam trabalhos com mais citações.

Para mais, os países com maior produção no tempo, em que se pode observar grande produção brasileira, representando a quinta colocação no *WoS* em número de publicações e quarta colocação na plataforma *Scopus*. Ademais, observa-se o maior volume de produção provindo dos Estados Unidos e China. A título de comparação, também foi observada a produção brasileira na tabela 2.7.

Tabela 2.7: Relação de pesquisas por países

| País de Publicação | WoS    | Scopus |
|--------------------|--------|--------|
| Estados Unidos     | 31,05% | 24,05% |
| China              | 15,53% | 16,87% |
| Brasil             | 3,95%  | 7,5%   |

Fonte: Autor



Ainda, após as análises dos vetores de importância, foram realizadas análises mais focadas nos conteúdos dos trabalhos. Para isso, foi utilizada a ferramenta *TagCrowd*. Assim com foco palavras chaves e termos mais encontrados foram analisados os abstracts de cada trabalho levantado nas bases de dados afim de identificar fatores que se repetem ao longo das pesquisas. Os 50 termos de maior recorrência formaram as nuvens de palavras, como pode ser observado nas figuras 2.7 e 2.8:



Figura 2.7: *Wordcloud - Web of Science*  
 Fonte: Autor



Figura 2.8: *Wordcloud - Scopus*  
 Fonte: Autor

A partir dos esquemas gráficos apresentados é possível observar que, fora o termo principal pesquisado, “*theory of constraints*”, apresentam destaque os termos “processos”, “gestão”, “produção”, “melhoria” e “planejamento” em tradução livre. Infere-se, portanto, o uso da metodologia para aprimoramento da gestão de operações e gestão. Além disso, em menor grau, pode-se destacar os termos “otimização”, “algoritmos”, apontando para o uso de *frameworks* para o aprimoramento de sistemas.

Ademais, cabe destacar o termo “simulação”, que sugere que a simulação é uma ferramenta que apresenta determinada frequência no que tange as pesquisas sobre o tópico abordado.

### 2.5.3 Detalhamento, modelo integrador e validação por evidências

A terceira etapa do método TEMAC traduz-se na especificação das principais contribuições e abordagens por meio de análises de co-citação e acoplamento bibliográfico.

A co-citação identifica a relação de dois documentos citados em conjunto por meio de suas frequências de ocorrência conjunta, enquanto o acoplamento bibliográfico representa a proximidade teórica entre os estudos por meio da comparação entre as referências compartilhadas entre os artigos (Grácio 2016).

O estudo desses fatores foi realizado por meio do *software* VOSviewer, utilizando os dados extraídos das bases de dados *Scopus* e *Web of Science*, como detalhado anteriormente. O *software* permite a criação de mapas de calor para melhor visualização das perspectivas supracitadas, representados nas imagens 2.9 e 2.10 :

Na análise de cocitação dos dados obtidos nas bases *Web Of Science* pode-se observar que existem quatro *clusters*, e demonstra-se também a predominância da importância das publicações de Goldratt, responsável pela concepção da metodologia bem como modelos de sua aplicação em produção, projetos e *supply chain*.

Dessa forma, o *cluster* vermelho concentra trabalhos de aplicação da teoria das restrições em operações como exemplificado pelo trabalho de (Mabin e Davies 2003) que avalia diversas aplicações da TOC na literatura e apresenta uma análise dos resultados no desempenho operacional e financeiro obtido pelas empresas.

O *cluster* azul apresenta estudos e trabalhos relacionados aos conceitos da filosofia, dada a concentração dos livros de Goldratt neste agrupamento (Goldratt e Cox 2014) (Goldratt 2013) (Fox e Goldratt 1986) (Goldratt et al. 1990).

Ademais, pode-se citar o *cluster* verde, relacionado ao trabalho de (Plenert 1993), que avalia a aplicação em ambientes de múltiplas restrições aplicando programação linear. Neste *cluster* são relacionados trabalhos de múltiplas restrições e relacionados com programação linear e pesquisa operacional.

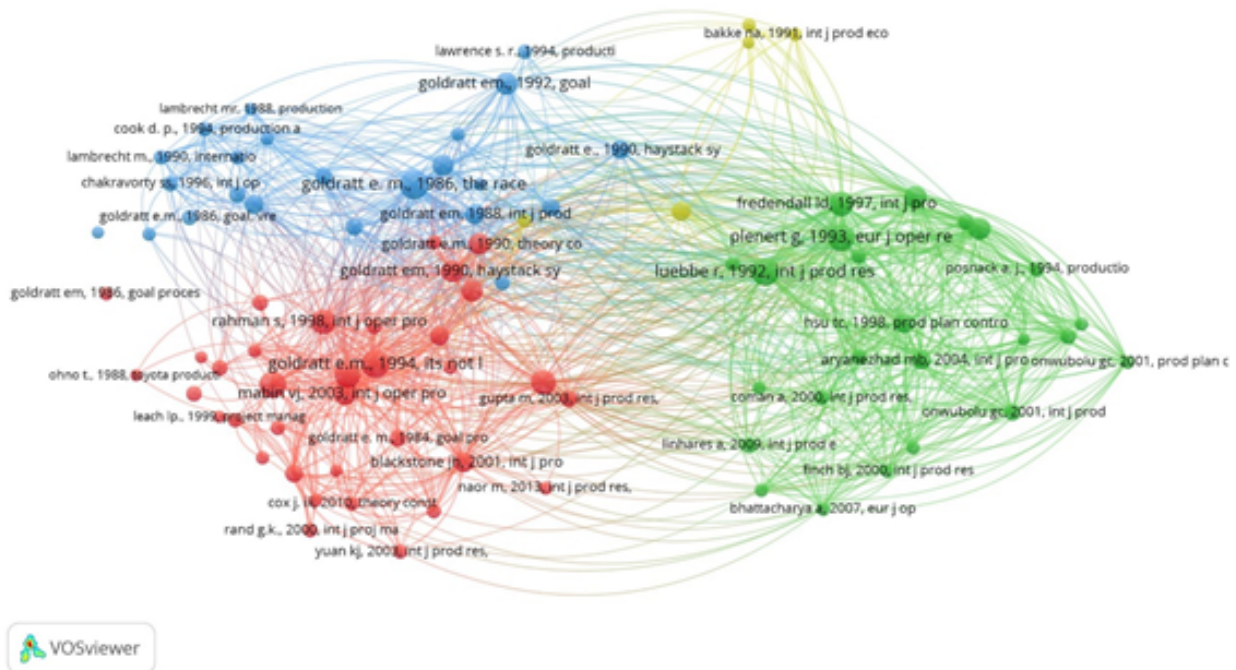


Figura 2.9: Gráfico de Cocitação - Base *Web of Science*  
 Fonte: Autor

Por último, o grupamento amarelo apresenta trabalhos relacionados aos estudos de custos e decisão de mix de produtos como exemplificado pelo trabalho de (Kee e Schmidt 2000), que realiza uma análise comparativa do uso dos métodos de custeio, comparando o custeio baseado em atividades (ABC) com a teoria das restrições para tomada de decisão quanto ao mix de produtos.

Na base *Scopus*, por sua vez foi obtida a configuração de *clusters* descrita pela imagem 2.10:

Na análise realizada com os dados da *Scopus*, pode-se observar a existência de três *clusters* bem definidos.

O *cluster* verde com destaque para trabalhos como de (Fredendall e Lea 1997) que estuda a heurística de decisão de mix de produtos a partir da teoria das restrições e a compara com outras abordagens como a programação linear inteira na maximização a produção de sistemas.

O *cluster* azul é muito similar ao verde e aponta para trabalhos que utilizam a programação linear e algoritmos de otimização associados aos conceitos da teoria das restrições, como pode ser exemplificado pelo trabalho de (Coman e Ronen 2000), que apresenta uma análise do problema de terceirização com a identificação de variáveis pertinentes e seus relacionamentos para a formulação de um problema de programação linear e identificação de soluções analíticas. Assim, propõe um modelo utilizando a programação linear associada à teoria das restrições.

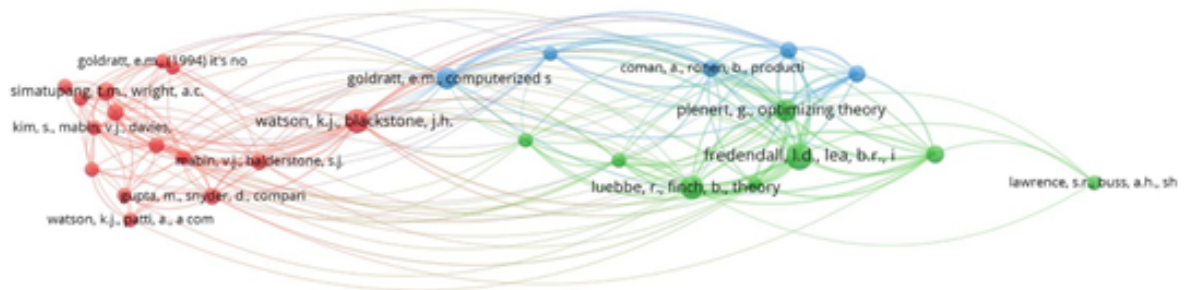


Figura 2.10: Gráfico de Cocitação - Base *Scopus*  
 Fonte: Autor

No *cluster* vermelho vale ressaltar a importância de trabalhos como de (Watson, Blackstone e Gardiner 2007) que apresenta a evolução da filosofia de gestão da teoria das restrições, evolução e aplicação das técnicas relacionadas; e de (Gupta e Boyd 2008), que indica os usos da teoria das restrições como uma teoria geral para o gerenciamento de operações, integrando os dois conceitos

Com isso, é possível perceber artigos que são regularmente citados juntos indicam tendências e semelhanças nos agrupamentos de estudos e autores.

Em seguida, pode-se observar as análises de acoplamento que complementam a análise. Com a análise de acoplamento pode-se identificar os principais segmentos de desenvolvimento de estudos recentes, indicando bases teóricas similares por meio da associação entre as publicações citadas.

Nesta, foram removidos os estudos de revisão, que poderiam afetar as observações e foram considerados os últimos 3 anos de produção, dado que a força dos acoplamentos independe da análise de frequência, sendo proveitoso avaliar estudos mais recentes (Mariano e Rocha 2017). Assim, observam-se nas figuras 2.11 e 2.12:

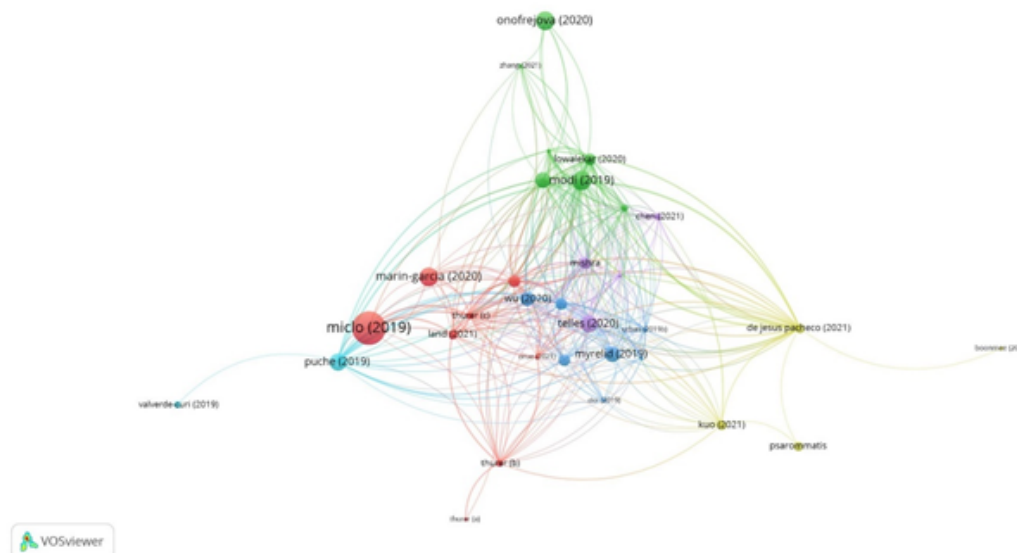


Figura 2.11: Gráfico de Acoplamento - Base *Web of Science*  
 Fonte: Autor

Com a análise de acoplamento bibliográfico acerca dos dados da base de dados do *Web of Science*, podem-se observar, nos últimos 3 anos, alguns focos de pesquisa.

O *cluster* em amarelo indicam trabalhos relacionados à competitividade e indústria 4.0 associados à teoria das restrições. Cita-se o trabalho brasileiro realizado por (Pacheco, Junior e Matos 2021), que avaliou o impacto da teoria das restrições nas principais dimensões competitivas da estratégia de operações (alta velocidade, entrega no prazo, alta flexibilidade, baixo custo e alta qualidade) utilizando uma análise quantitativa e qualitativa para avaliar a intensidade da influência e sobreposição entre os campos do conhecimento e identificar uma maneira de utilizar os elementos da TOC para mitigar conflitos entre objetivos operacionais no desenho organizacional.

Também cabe apontar o trabalho de (Kuo et al. 2021), que estuda o ganho de competitividade por meio do aumento da performance de entrega somando os conceitos da teoria das restrições e da indústria 4.0. Nesse estudo foi avaliado um sistema de alerta e monitoramento de controle de vencimentos (DDC) com base na comunicação máquina-a-máquina, o que permitiu monitorar e executar DDC para cada processo com base no controle de buffer da teoria das restrições.

O *cluster* azul representa estudos de contabilidade relacionados à teoria das restrições. A exemplo, cita-se o trabalho de (Myrelid e Olhager 2019), que desenvolve uma metodologia de custeio híbrido para fabricação em indústrias utilizando conceitos da contabilidade enxuta, contabilidade de rendimentos e teoria das restrições para aplica e este método num estudo de caso.

O *cluster* verde apresenta estudos relacionados ao uso da teoria das restrições em estudos relacionados ao gerenciamento de cadeia de suprimentos e simulação. A exemplo cita-se os trabalhos de: (Modi, Lowalekar e Bhatta 2019) que realiza um estudo de caso da aplicação da TOC e seus benefícios no desempenho da cadeia de suprimentos da maior empresa de fabricação de fechaduras na Índia; e o trabalho de (Onofrejova et al. 2020) que realiza a simulação, modelagem matemática e análise dos fatores de relevância no processo da manufatura de lareiras representando uma redução de 90 % nos tempos de espera nos *buffers* do sistema.

O *cluster* vermelho indica um viés voltado às aplicações em operações e gerenciamento de materiais. Assim, citam-se: (Miclo et al. 2019) sobre o uso do Demand Driven Material Requirements Planning (DDMRP), lógica do MRP incorporando elementos de *Lean* e da TOC, avaliando sua adequabilidade e eficiência com relação a outras abordagens mais amplamente aceitas como o MRP II, *Lean* e *Kanban*. Para isso, utiliza de simulações computacionais para realizar uma série de experimentos que indicam uma possível superioridade do DDMRP; o trabalho de (Marin-Garcia et al. 2020) apresenta uma proposta de utilização da gestão de operações de saúde para planejamento de recursos durante a pandemia de COVID-19 com base em dados obtidos em um hospital da Espanha.

Os *clusters* azul claro e roxo apresentam menor coesão entre si e indicam, respectivamente, estudos acerca do uso conjunto com outras metodologias de gerenciamento da produção e também com o foco na abordagem DBR (Puche et al. 2019) (Telles et al. 2020).

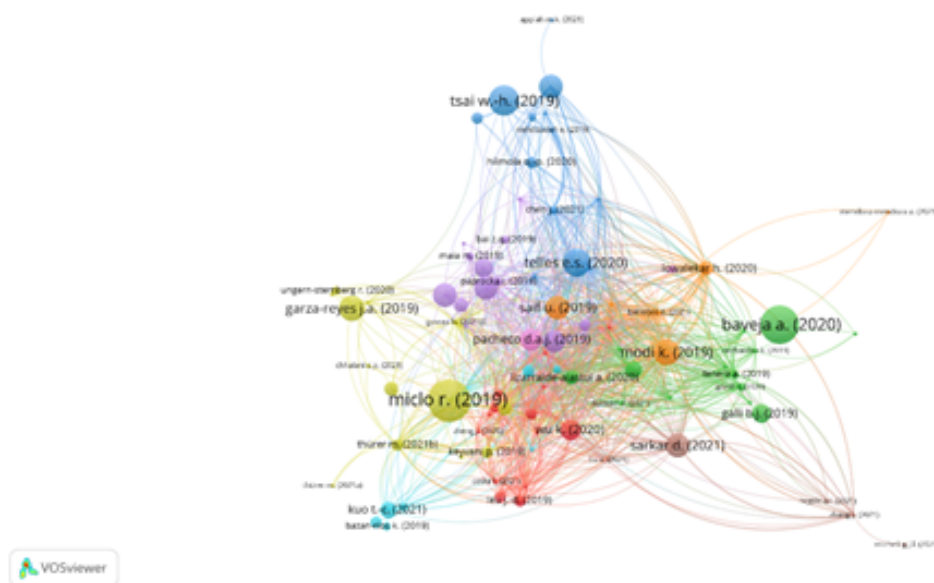


Figura 2.12: Gráfico de Cocitação - BaseScopus  
Fonte: Autor

Apesar de a base *Scopus* apresentar mais *clusters*, como representado na figura 2.12, a maioria segue de forma similar os conceitos estudados na base *Web of Science*. Com base nos autores em destaque, pode-se citar alguns *clusters* que representam diferença:

O *cluster* marrom, nesta análise, representa o uso da TOC para o gerenciamento de projetos. O trabalho de maior força de associação é de (Sarkar, Jha e Patel 2021), que trata do desenvolvimento de um *framework* de gerenciamento de projetos da cadeia crítica (CCPM) para implementação em projetos relacionados à construção. Dessa forma, o autor indica uma estrutura de dimensionamento de *buffer* integrando as incertezas do cronograma, como incerteza, variabilidade do ambiente externo, escassez de recursos e outras análises de riscos. Assim, o autor aplica o método em um projeto de rodovia na Índia. O estudo de caso aponta resultados vantajosos sobre os métodos tradicionais de gerenciamento de cronograma de processos, mitigando impactos de incertezas por meio de *buffers*.

O *cluster* laranja segue no mesmo sentido na análise da base anterior, apresentando trabalhos que relacionam o uso da teoria das restrições associados à gestão da cadeia de suprimentos, cabe destacar o trabalho já citado de (Miclo et al. 2019).

Também é possível citar o estudo de (Lowalekar e Basu 2020) que utiliza os conceitos de *Mafia Offer*, técnica associada à TOC que examina as restrições da companhia para encontrar uma maneira de atingir diretamente a necessidade do cliente por meio de ofertas de difícil recusa ou paridade com os concorrentes, para avaliar seu desempenho em um estoque de produtos em deterioramento para escoamento uma cadeia de suprimentos. Essa análise é feita por meio de equações probabilísticas utilizando cadeias de Markov e equação de Chapman-Kolmogorov para identificar as probabilidades de ocorrência dos eventos, simulando resultados para modelos tradicionais e o modelo *Mafia Offer*, que apontou resultados positivos no uso da técnica para aprimoramento do desempenho financeiro geral, tanto do produtor quanto do varejista em uma cadeia de suprimentos com itens em deterioração.

O *cluster* em ciano remete a artigos associando conceitos da Indústria 4.0, como é observado em (Kuo et al. 2021), que avalia o uso das tecnologias da indústria 4.0 para coletar e processar informações em tempo real acerca do controle de validade dos produtos (*Due date control*, DDC). Dessa forma, foi desenvolvida uma estrutura de sistema de alerta de produtos em processamento (WIP) com base em uma abordagem de comunicação máquina a máquina. É proposto, posteriormente, um monitorar e execução do DDC para cada processo com base no controle de *buffer* da teoria das restrições.

O *cluster* amarelo indica estudos relacionados à aplicação em operações como no já citado estudo de (Modi, Lowalekar e Bhatta 2019). Nessa base de dados, o *cluster* divide-se em dois, o que não ocorria na anterior, sendo a amarela mais focada na identificação de gargalos em operações de produção de bens de consumo, enquanto o *cluster* em roxo indica trabalhos mais focados em agendamentos e aplicações relacionadas ao *lean*.

O *cluster* azul apresenta estudos relacionados ao custeio e aspectos contábeis da aplicação da técnica, principalmente nas áreas mais externas, seguindo com os trabalhos de (Myrelid e Olhager 2019), já citado, e (Tsai e Jhong 2019), que desenvolve um modelo de decisão de produção com base em limitadores de taxa de carbono combinando a contabilidade ABC e a TOC para gestão de custos de produção em uma indústria de sapatos.

Por último, o *cluster* vermelho possui menor coesão entre si. Seus dois trabalhos com maior força de acoplamento bibliográfico são (Wu, Zheng e Shen 2020), que avalia a efetividade do uso da Teoria das Restrições por meio de estudos de simulação, identificando que pode não ser a metodologia ideal em configurações estocásticas. Para isso, foi realizado um estudo de caso em que se mostra, devido à variabilidade e dependências, que os processos de *front-end* podem ter um impacto maior no desempenho do sistema do que os gargalos do sistema, implicando que melhorar os gargalos do sistema como sugerido pelo TOC, tradicionalmente, pode ser ineficaz dado a maior capacidade atual de coletar dados de custos e variabilidade de máquinas e processos, produzindo melhorias mais otimizadas e específicas.

O segundo trabalho de maior força, de (Land et al. 2021), que compara diversas abordagens para identificação e gerenciamento de problemas em um fluxo operacional, dentre elas a teoria das restrições e a produção enxuta, para então propor uma metodologia sob a ótica do *design*.

Dessa forma, pode-se dizer que o *cluster* vermelho indica estudos de *benchmarking* da aplicação e proposição de novas metodologias para resolução de problemas relacionados à TOC.

#### **2.5.4 Conclusão da Análise**

Por fim, pode-se dizer que esta análise bibliométrica apresenta o estado da arte das pesquisas na teoria das restrições, no período em que se realiza este trabalho no primeiro trimestre de 2022, que se mostra como um campo em evolução, apesar de um sistema inicialmente simples, sendo utilizado para o desenvolvimento de novas metodologias e como *benchmarking*.

Indica-se também, na análise, uma tendência na aplicação conjunta com conceitos de simulação computacional, mostrando sua relevância e sendo um motivador para a aplicação de um estudo de caso.



## 3 METODOLOGIA

Nessa sessão estão apresentadas as metodologias utilizadas para o desenvolvimento do presente trabalho e sua caracterização.

### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

O trabalho possui a finalidade de compreender o processo de aplicação e utilização da Teoria das Restrições com base no processoda técnica de melhoria contínua (POOGI) associada à modelagem e simulação computacional discreta com o uso do *software* Arena avaliando os possíveis impactos de mudanças pontuais no sistema em sua capacidade.

Assim, foi desenvolvido na forma de um estudo de caso aplicado uma análise com base nos dados de (Medeiros e Lima 2019), que avalia a capacidade da produção de uma fábrica de cafés em Ituiutaba, Minas Gerais. A fábrica é caracterizada como de médio porte e opera na torrefação, moagem e empacotamento de cafés.

No trabalho analisado, a autora coleta os dados dados por meio de entrevistas semiestruturadas e cronometragem das atividades no processo. A coleta de dados ocorreu calculando-se a média e o desvio padrão das amostras até que esses valores fossem equivalentes à média acumulada e o desvio padrão acumulado, para garantir a robustez da informação. A partir dessa coleta foi possível realizar a análise estatística dos dados indicando sua distribuição aproximada. Além disso, apresenta também as capacidades nominais de cada máquina.

A utilização de dados de uma pesquisa terceira representou limitações quanto às análises possíveis e a obtenção de novas informações para gerar cenários considerando fatores além dos estudos de capacidade.

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

De acordo com (Gil et al. 2010), a pesquisa é um sistema organizado para fornecer respostas aos questionamentos e avaliar teorias e hipóteses levantadas quanto a sua validade.

Quanto à sua natureza, o presente trabalho consiste em pesquisa aplicada, contendo pesquisas voltadas para a aplicação prática e resolução de problemas específicos encontrados na sociedade (Gil et al. 2010). O trabalho realizado, por sua vez, visou o desenvolvimento de um modelo para otimização do uso de recursos utilizando a TOC.

Quanto à abordagem, que se refere ao tipo de análise e tratamento de dados, este estudo classifica-se como uma pesquisa combinada, com aspectos quantitativos e qualitativos dado que utiliza o modelo de simulação discreta para traduzir dados em informações e avalia-los. (Silva e Menezes 2005).

Do ponto de vista dos objetivos pode ser classificada como pesquisa exploratória dado seu caráter de explicitação do problema a fim de proporcionar maior familiaridade com assunto. O trabalho apresenta seus procedimentos na forma de estudo de caso em que são coletados e analisados dados em suas condições naturais para análise de um evento. Dessa forma, apresenta-se um estudo detalhado de poucos objetivos para desenvolver conhecimento detalhado do problema abordado. (Gil et al. 2010).

### **3.3 ESTRUTURA DO MODELO**

Para o desenvolvimento do modelo utilizado no estudo de caso o trabalho seguirá a estrutura proposta por (Altiok e Melamed 2007) que sugere um processo para o desenvolvimento de modelagem e simulação em oito etapas. O fluxo é descrito na imagem abaixo:

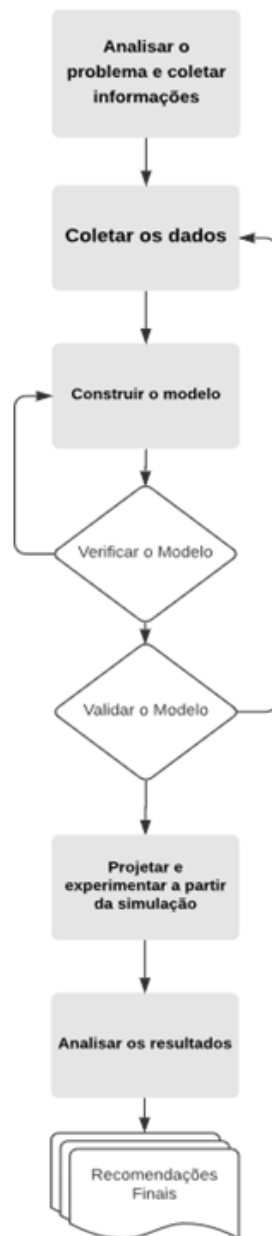


Figura 3.1: Fluxograma do desenvolvimento do modelo.  
 Fonte: (Altiok e Melamed 2007)

Os respectivos desenvolvimentos em cada etapa apontada no fluxo bem como seu detalhamento podem ser observados no capítulo de desenvolvimento.

## 4 DESENVOLVIMENTO

Este capítulo apresenta o detalhamento e execução das etapas de desenvolvimento indicadas pela metodologia, seguindo o fluxo de construção de modelo de simulação computacional e o processo de focalização em cinco etapas da TOC.

### 4.1 ANALISAR O PROBLEMA E COLETAR INFORMAÇÕES:

A primeira etapa para a construção de um modelo de simulação é a análise do problema em si. Segundo (Banks et al. 2013) a formulação do problema deve ser o pontapé para qualquer estudo de simulação, para isso devem ser analisados e entendidos os aspectos relevantes, sendo preciso coletar informações sobre o problema, identificar os parâmetros e variáveis de entrada, métricas de desempenho, o relacionamento entre estes elementos levantados bem como as regras gerais que regem as funções do sistema.

Ainda de acordo com (Banks et al. 2013), no caso de uma declaração de problema desenvolvida pelo analista que está propondo o estudo de simulação é necessário que a formulação do problema seja validada pelos detentores do processo avaliado. Existem também ocasiões em que o problema deve ser reformulado com a progressão do estudo.

Em concordância com (Altiok e Melamed 2007), essa etapa inclui, ainda, o desenvolvimento de diagramas que representam o fluxo lógico do sistema, bem como qualquer outro meio de representação das relações conhecidas entre as entidades, atributos, atividades, eventos e seus status bem como as hierarquias entre eles.

No presente projeto foi proposto um estudo de caso em que fosse aplicada a teoria das restrições em um sistema por meio da simulação computacional para investigar, na prática, seus efeitos.

Dessa forma, foi definida como base para análise o trabalho de (Medeiros e Lima 2019), que realizou um trabalho de mensuração da capacidade de uma pequena fábrica de cafés ensacados em Ituiutaba (MG). Ao avaliar o processo, optou-se por utilizar apenas aqueles realizados de forma industrial, excluindo do estudo os processos considerados artesanais. Dessa forma, serão tratados os produtos: Café em grãos torrados (5kg); Café moído (500g).

O processo em questão inicia-se com o recebimento do grão cru do café, que passa por um processo mecanizado de pré-limpeza. Com os grãos limpos eles são transportados para a máquina de torra e resfriamento. Nestes processos são realçadas as características organolépticas do produto.

Em seguida os grãos são separados quanto à origem e qualidade, formando-se os blends diversos para venda, que podem ser ensacados diretamente para a venda do produto em grãos ou passar por mais uma etapa de processamento.

Essa etapa de processamento é a moagem, que conta com duas máquinas de capacidades distintas. A moagem é sucedida dos processos de expedição que incluem as atividades de envase, empacotamento, lacre e paletização.

## 4.2 COLETAR OS DADOS:

Nessa etapa são coletados os dados necessários para realizar as estimativas dos parâmetros de entrada do modelo. Também são propostas as distribuições para o modelo a partir dos dados coletados.

(Kelton 2014) afirmam que há situações em que não é possível obter intervalos de dados confiáveis relacionados aos parâmetros de entrada da modelagem. Tal situação ocorre em casos em que o sistema não realiza coleta de dados claros, quando a base existente é problemática ou em casos em que não se pode ter a cooperação necessária ou a autorização para a análise desses dados. Nesses casos deve-se assumir algumas suposições arbitrárias chamadas “dados *ad hoc*”. No caso de uso de dados *ad hoc* é recomendado escolher um valor determinístico ou designar um intervalo de parâmetros de entrada e simular o modelo no intervalo designado.

O quadro 4.1 indica as distribuições recomendadas para diferentes tipos de dados nos casos de ausência de dados ou de sua falta de confiabilidade.

Quadro 4.1: Sugestões de distribuições na ausência de dados.

| Distribuição | Parâmetros       | Características   | Exemplos de Uso                                       |
|--------------|------------------|---|---|
| Exponencial  | Média            | Alta variância<br>Limitado na esquerda<br>Ilimitado na direita      | Tempos de Intervalo<br>Intervalo de falha de máquinas |
| Triangular   | Mín., Moda, Máx. | Simétrica ou não-simétrica<br>Limitada nos dois lados               | Tempo de atividades                                   |
| Uniforme     | Mín., Máx.       | Todos os valores distribuídos igualmente<br>Limitada nos dois lados | Pouco conhecimento sobre os processos                 |

Fonte: Kelton (2014)

Assim sendo, foi avaliado o processo de (Medeiros e Lima 2019) e optou-se por utilizar os dados secundários levantados pela autora em que se destacam:

- Capacidade de cada processo em Kg/s;
- Tempos de processamento em segundos;
- Categorias de produtos;

- Tempo útil de operação;

Além disso, foram definidas as taxas de entrada no sistema de seguindo uma distribuição exponencial, com base na capacidade e demanda de produção encontrada pela autora.

### 4.3 CONSTRUIR O MODELO:

Primeiramente foi desenhado o fluxo do processo considerando os produtos avaliados no presente estudo. Dessa forma, foi modelado como indica a figura 4.1:

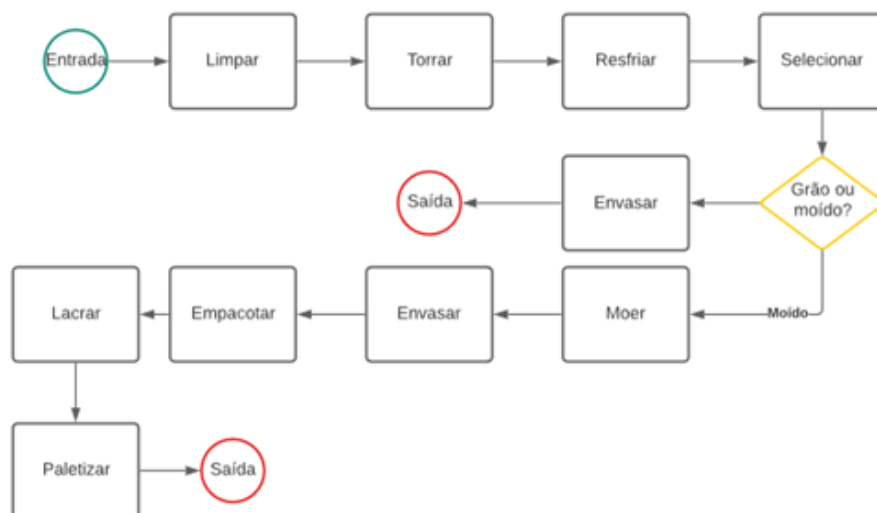


Figura 4.1: Fluxograma do Processo de Produção de Café  
 Fonte: Adaptado de (Medeiros e Lima 2019)

Com a definição do problema e os dados necessários coletados pode-se prosseguir para a construção do modelo e sua implementação no programa proposto. No caso do presente trabalho o ambiente utilizado para a programação é o Arena.

O modelo foi desenvolvido utilizando os módulos *Basic*, *Advanced Process* e *Advanced Transfer*. Na categoria *Basic Process* foram inseridos os inputs de taxa de entrada de material por meio do bloco *Create*, definidos os blocos *Batch* que juntam os produtos de acordo com a necessidade de tamanho de cada pacote.

Por meio do bloco *Assign*, são atribuídas as categorias dos produtos envolvidos no modelo. Nesse módulo também são definidas as capacidades dos equipamentos em cada posto de trabalho por meio da tabela *Resource*.

Por último, são definidos por meio da tabela *Set* os agrupamentos de recursos para cada atividade específica, contendo pessoas e máquinas.

Já categoria *Advanced Process* foram inseridos marcadores de estoque com os blocos *Hold* para utilizar expressões indicando a necessidade de uso de estoque no sistema.

Na categoria *Advanced Transfer* foram definidos os tempos de movimentações entre as estações e a correta sequência de execução da atividade para a realização do processo.

O processo de criação de modelos de simulação pelo Arena é utilizado uma interface gráfica representando um fluxo de processo produtivo, como pode-se observar na figura 4.2 que representa a modelagem:



Figura 4.2: Modelagem do Processo de Produção de Café ARENA  
Fonte: Autor

#### 4.4 VERIFICAR O MODELO:

Segundo (Banks et al. 2013) nessa etapa são avaliados os comportamentos e performance do modelo no âmbito de seu funcionamento computacional. Caso seja possível validar a estrutura lógica e sua representação em ambiente computacional esta etapa é concluída.

Para se atingir confiabilidade nos experimentos de simulação é fundamental replicar cada cenário diversas vezes a fim de obter resultados com menor variabilidade estatística (Altiok e Melamed 2007).

Cabe ressaltar, neste tópico, as premissas consideradas para a execução da simulação:

- Não foram consideradas taxas de erros;
- Não foram considerados tempos de calibragem de máquinas ou *setup*;
- Não há taxa de manutenção dos equipamentos;
- Não foi possível obter dados quanto aos custos relacionados aos maquinários, WIP, estoques e demais recursos, inviabilizando uma análise mais detalhada neste aspecto;
- Não existem obstruções no sistema além das possíveis filas geradas.

Para o tempo de execução foi utilizado um total de 6,55 horas de tempo útil de trabalho por dia, definido nos dados primários originalmente levantados.

Quanto ao número de replicações, dado o alto volume de entidades de entrada no modelo, foram utilizadas um total de 30 replicações com 2 dias de aquecimento e 30 dias de operação para obter resultados fiéis ao estado original.

#### 4.5 VALIDAR O MODELO:

Cada modelo deve ser inicialmente tratado puramente como uma proposta e precisa ser validado. A validação do modelo verifica a aderência entre o modelo e os dados empíricos (medidas do sistema real a ser modelado). Um bom ajuste do modelo significa que o conjunto de indicadores de desempenho previstos pelo modelo são consistentes ou razoavelmente consistentes com os indicadores correspondentes observados em sistemas reais avaliados. Essa verificação só é possível se o sistema ou a simulação existir na realidade e se as medidas e dados necessárias estiverem disponíveis. Quaisquer diferenças importantes indicam que o modelo proposto não é adequado para o propósito do projeto e precisa ser modificado.

Para essa análise foram utilizados os dados de capacidade encontrados no sistema para os dois produtos. Dessa forma, obteve-se o seguinte:

|                     | Resultado Original | Resultado Simulação | Dif. |
|---------------------|--------------------|---------------------|------|
| Café moído 500g     | 40.030             | 41.117              | 2,7% |
| Café Torrado        | 1.132              | 1.093               | 3,4% |
| Lead Time total (s) | 14.557             | 15.130              | 3,9% |

Figura 4.3: Comparativo processo simulado ARENA

Fonte: Autor

Os resultados representam pacotes de café moído com cada um pesando 500g e café torrado pesando 5kg.

Assim, o cenário foi considerado coerente com relação ao modelo base, dado que os indicadores de comparação apresentam diferença menor que 4 % entre a capacidade e da simulação base.

#### 4.6 PROJETAR E EXPERIMENTAR A PARTIR DA SIMULAÇÃO:

Nessa etapa deve-se projetar e determinar cada cenário a ser experimentado. Essa análise sobre quais cenários e alternativas simular depende dos resultados obtidos anteriormente pelo modelo analisado (Banks et al. 2013).



Neste tópico, o estudo de caso visou a aplicação da POOGI no sistema observado. Apresentou-se, portanto, o cenário original e um breve cenário com a capacidade da empresa sobre estresse para indicar os gargalos caso a capacidade da empresa não fosse suficiente na última etapa do ciclo.

#### 4.6.1 Cenário Original

##### 4.6.1.1 Identificar a Restrição

Primeiramente, a partir do cenário base foi avaliado o processo e identificada a restrição nos processos de empacotamento.

Apesar de utilizar dados que são comportados pela capacidade do processo, observa-se a formação de filas no referido processo, fazendo com que o tempo médio atinja valores 115 % superiores aos observados no sistema real, gerando ociosidade nos processos subsequentes, como pode ser observado na figura 4.4:

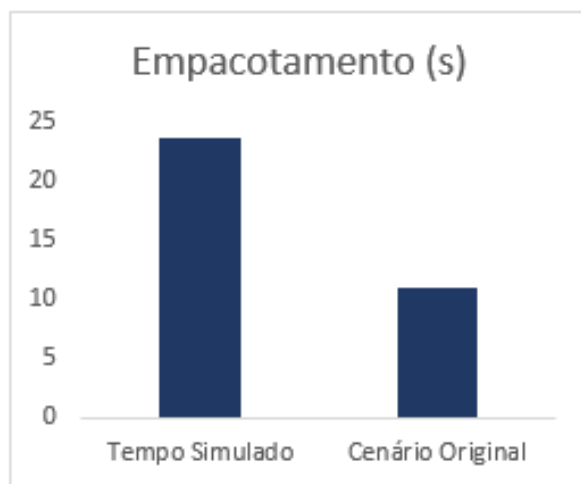


Figura 4.4: Tempo de processamento do empacotamento após simulação.  
Fonte: Autor

O processo de moagem é o que ocupa maior porcentagem do tempo total acumulado de processamento, tornando-o essencial para o sistema de produção. Porém, pode-se dizer que com a capacidade de apenas um dos dois moinhos é suficiente para atingir à demanda simulada.

##### 4.6.1.2 Explorar a Restrição

Posterior à identificação, foram realizadas análises visando explorar a restrição. Com este propósito foram sugeridos dois cenários:

- i. No primeiro avaliou-se a inserção de um estoque de materiais (pulmão) para suportar a atividade por meio da simulação. A alternativa foi proposta entendendo que o processo conta apenas com uma taxa de utilização média obtida de 63%.
- ii. Um segundo cenário, cenário observado foi a possível alocação de capacidade para o empacotamento, atualmente em 5 kg por ciclo de processamento, para uma capacidade para 10kg a cada ciclo de processamento, funcionando em paralelo, considerando que é uma máquina de baixa capacidade comparada com as demais.

#### 4.6.1.3 Subordinar o Sistema à Restrição

Com a restrição identificada optou-se pela inserção de um pulmão ante o processo. Assim testou-se um estoque com volume de 150 kg de produtos pré-processados, abastecidos diariamente antes da atividade de empacotamento. Para isso foi implementada a função *Hold* no *software*, permitindo gerar a condição: se a máquina estiver com fila menor ou igual a 1 item ou se sua capacidade for maior que o uso atual é solicitada a entrada de material no sistema, por meio do construtor de expressões. Assim, foi formada também a figura da “corda”, comunicando quando inserir estes itens na produção.

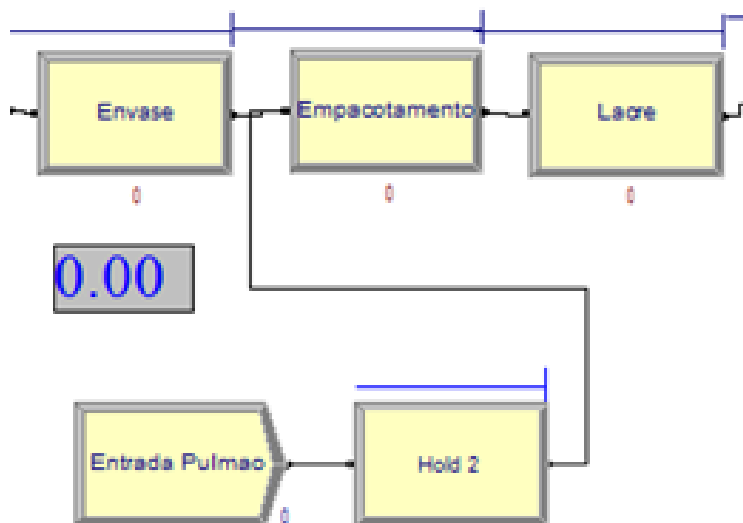


Figura 4.5: Alterações realizadas na modelagem  
Fonte: Autor

#### 4.6.1.4 Elevar a Restrição

Para maximizar a eficiência da produção, esta etapa buscou eliminar os problemas anteriormente delimitados a partir dos cenários sugeridos.

#### 4.6.1.5 Reavaliar o Sistema

Após avaliar as restrições e considerando que a capacidade instalada é suficiente para o atingimento das demandas sugeridas, sem incorrer em demandas físicas, recomendam-se novas análises em busca do ampliamto de restrições de demanda (mercado).

### 4.6.2 Cenário Maior Demanda

#### 4.6.2.1 Identificar a Restrição

Considerando que o sistema possuísse uma capacidade abaixo da demanda utilizada, seria possível identificar outros gargalos. Nesse sentido, adaptando os parâmetros da simulação para uma base de produção, com a demanda de 2 ton./h no sistema ao longo do mesmo período e replicações do primeiro cenário. Essa capacidade sobrecarrega o sistema e foi selecionada discricionariamente para este propósito.

Foram necessárias adaptações no sistema quanto as suas capacidades para que a simulação fosse comportada na capacidade computacional disponível, adaptando a unidade padrão da entidade de entrada no sistema para base de 10kg.

Tabela 4.1: Entidades no modelo de simulação

|         | Média de entidades |
|---------|--------------------|
| Entrada | 68780              |
| Saída   | 59164              |

Fonte: Autor

A partir dessa análise pode-se observar que só foi possível processar aproximadamente 86% da demanda.

#### 4.6.2.2 Explorar a Restrição

Nesse cenário, podemos exercitar a identificação do gargalo, que se encontra no processo da torra. O processo, apresenta um tempo de espera de até 91 vezes o valor do tempo esperado para execução da tarefa, gerando ociosidade em todos os processos subsequentes. A tabela 4.2 mostra outros processos com maior ocorrência de filas e suas taxas de utilização.

Tabela 4.2: Status de filas e utilização mais críticos no cenário.

|               | Tempo processamento | Tempo Espera | Taxa de Utilização |
|---------------|---------------------|--------------|--------------------|
| Torra         | 1100,29             | 100317,09    | 100%               |
| Blend         | 263,51              | 32,51        | 85%                |
| Empacotamento | 23,54               | 41,59        | 79%                |

Fonte: Autor

Essa ociosidade é grave ao se considerar que é uma das primeiras etapas do processamento do material. Na análise proposta, temos que a torra funciona em 100% da capacidade durante todo o período. O segundo processo com maior utilização é o de blend com cerca de 85%.

#### 4.6.2.3 Subordinar o Sistema à Restrição

Como o processo já se encontra em seu limite de operação, é necessário aumentar sua capacidade. Para o ajuste dessa análise, foi proposto o aumento da capacidade em 60%.

#### 4.6.2.4 Elevar a Restrição

Com a implementação do aumento de capacidade proposto no processo ele deixa de ser o fator limitante no sistema. Nesse caso a produção não só passa a atender à demanda em 94% como também aumenta a utilização de todos os demais processos diminuindo a ociosidade.

Tabela 4.3: Entidades no modelo de simulação alternativa.

|         | Média de entidades |
|---------|--------------------|
| Entrada | 74104              |
| Saída   | 69784              |

Fonte: Autor

Nesse caso, a utilização da capacidade é reduzida a um percentual de 83%. Com a alteração a restrição é movida para o processo de Blend, como esperado dada a análise antes da adequação, obtendo utilização de 100%. Apesar do processo ainda contar com filas reduziu os valores observados na etapa anterior em 99%.

#### 4.6.2.5 Reavaliar o Sistema

Com a alteração a restrição é movida para o processo de Blend, como esperado dada a análise antes da adequação, obtendo utilização de 100% e um tempo de espera de 45.913,59 segundos.

Para uma próxima iteração sua capacidade foi aumentada em 30% para que o seu tempo de processamento por tonelada se aproxime ao do antigo recurso gargalo. Nessa simulação as máquinas tiveram uma elevação geral em sua utilização, promovendo melhor balanceamento da produção. Assim, atingiu-se 98,63% da demanda inserida no sistema. A utilização do processo passou de 100% para cerca de 81%.

Com a alteração o envase passa a utilizar 100% da capacidade e uma fila de 14.584,30 segundos. Nesse caso, para balancear os tempos de processamento a capacidade do processo foi dobrada e realizada em paralelo, o mesmo foi feito para o processo de ensacamento dado que a sua capacidade por segundo é similar. Também foi inserido um estoque intermediário como o utilizado na análise anterior.

Os indicadores dos processos alterados podem ser observados na tabela 4.4:

Tabela 4.4: Resultados das alterações.

|               | Taxa de Utilização |
|---------------|--------------------|
| Torra         | 85%                |
| Blend         | 82%                |
| Envase        | 52%                |
| Empacotamento | 48%                |
| Pallet        | 96%                |

Fonte: Autor

Com as alterações nas capacidades foi possível atingir à demanda solicitada com boa resposta, atendendo a demanda em média em 99,9% ao longo das 30 replicações, mantendo taxas de utilização altas nos recursos que possuem menor capacidade por unidade de produto processado. Isso correspondeu, portanto a uma redução dos lead times em 87% e um ganho de capacidade de produção de 14%.

Também foi possível observar que a inserção de um pulmão no recurso gargalo permitiu ajustar o ritmo de produção. Observou-se a partir dessa análise a necessidade de estudos futuros avaliando a influência do posicionamento do gargalo. No cenário proposto observou-se um aumento do WIP com seu deslocamento para o fim do processo.

## 4.7 ANALISAR OS RESULTADOS

### 4.7.1 Cenário Original

Nessa etapa são avaliados os resultados obtidos pelos experimentos realizados no modelo de simulação. Para isso os indicadores estimados pelas execuções dos projetos passam por uma análise lógica e estatística (Altiok e Melamed 2007).

Assim, a tabela 4.5 aponta os resultados obtidos na análise de cenário original, comparando-os com os as soluções propostas.

Tabela 4.5: Comparativo indicadores do cenário original.

| Valores médios obtidos          | Cenário Original | Alteração 1 | Alteração 2 |
|---------------------------------|------------------|-------------|-------------|
| Café moído 500g                 | 41117,00         | 41184,36    | 41217,00    |
| WIP sistema (kg)                | 204,23           | 191,48      | 194,91      |
| Tempo de Fila Empacotamento (s) | 12,69            | 0,25        | 0,00        |
| Capacidade em uso               | 63%              | 74%         | 4%          |

Fonte: Autor

Com base nesses dados, pode-se perceber um aumento da utilização do recurso identificado como gargalo na situação atual e uma redução nas filas geradas, promovendo um ganho de produção.

Com a análise foi possível perceber que o cenário 2, apesar de reduzir os tempos do processo aos valores esperados de acordo com a média encontrada nas observações reais, apresenta um *work in progress* no sistema semelhante ao cenário 1 e uma ociosidade muito maior que todos os demais cenários. Dessa forma, esse cenário se apresenta como desperdício de recursos.

O cenário 1, por sua vez, concentrou-se em alocar um dos silos de estoque para funcionar como pulmão do processo com limitação e inserir uma comunicação entre a ociosidade desse processo e os materiais armazenados. Dessa forma foi possível aumentar o uso dos recursos disponíveis, reduzindo filas no processo em 98%.

#### 4.7.2 Cenário Maior Demanda

A análise nos permite identificar como o ciclo POOGI funciona em um sistema de produção com o apoio da simulação e observar o comportamento dinâmico das restrições de um processo produtivo.

Foram necessários um total de cinco alterações no sistema para que fossem atendidas as demandas projetadas. Essas alterações permitiram uma redução dos *lead times* do sistema em 87%.

Observou-se também que na medida em que o gargalo se deslocava o valor do WIP também era alterado. Tal fator não era confirmado com o total de itens produzidos. Pode-se supor que tal fato ocorra diante de o gargalo ter se deslocado para as atividades mais ao fim do processo, dando espaço para entrada de mais materiais no sistema.

Como recomendação para iterações futuras seria necessário um redimensionamento da estratégia de produção para que fosse mantido um ritmo de produção parelho entre as máquinas, além de inserir pulmões nos processos de menor capacidade para que se mantenham com utilização alta.

#### **4.8 RECOMENDAÇÕES FINAIS**

Por fim, com as análises dos resultados obtidos nos experimentos de simulação são sugeridas as recomendações finais para a resolução do problema do sistema.

Com base na primeira análise cabe indicar que o primeiro cenário melhora a eficiência global do processo, aumentando seu *output*, reduzindo as filas e aumentando a utilização de recursos.

A segunda análise possibilitou entender como funciona a realocação de restrições num sistema de forma generalista. Mais dados seriam necessários para balancear o processo de acordo com o Tambor e avaliar os custos de alteração.

Por meio desse estudo de simulação foi possível generalizar o sistema de produção de uma fábrica de beneficiamento de café, avaliando alterações no sistema produtivo com baixo custo. Ressalta-se a limitação do trabalho na obtenção de informações, contando apenas com os dados secundários de uma avaliação de capacidade prévia.

Novas avaliações podem ser feitas considerando fatores como custos dos operadores necessários para o funcionamento de cada máquina, de materiais, de venda de produtos e de estoques, tempos de *setup*, maior *mix* de produtos, tempos de falha de máquina, controle de qualidade, estratégias de programação da produção e entre outros fatores.

#### **4.9 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO**

Este capítulo demonstrou os resultados obtidos a partir da metodologia descrita no capítulo 3. Após a leitura desta sessão foi possível compreender como foram realizadas cada etapa bem como avaliados as saídas de cada modelo.

## 5 CONCLUSÃO

No decorrer do período de pesquisa foi constatada a versatilidade e utilização ao longo do tempo da Teoria das Restrições e suas capacidades em diversos escopos da gestão de sistemas, seja nos pilares logísticos, de identificação de causa e efeito e de indicadores.

Com a realização do projeto foi possível compreender as atuais linhas de pesquisa acerca da Teoria das Restrições por meio de uma análise bibliométrica utilizando o modelo integrador Teoria do Enfoque Meta Analítico Consolidado – TEMAC, para prover uma base conceitual, os trabalhos de maior impacto e relevância no tema. Dessa forma pode-se também determinar as principais linhas de pesquisa no tema, promovendo um maior conhecimento acerca do tema e suas aplicações, conceitos e tecnologias.

A presente pesquisa se propôs, a partir dessas informações, compreender as capacidades e possibilidades comuns da Teoria das restrições, bem como a utilização de suas técnicas associadas à modelagem e simulação. A natureza da pesquisa foi de natureza aplicada, buscando a aplicação prática, de abordagem combinada, de aspectos qualitativos e quantitativos. Por último, conta com objetivo exploratório, propiciando familiaridade com o problema relacionado.

Afirma-se, portanto, que o objetivo geral do trabalho foi atendido considerando que o projeto conseguiu promover uma proposta de utilização da TOC a partir do ciclo POOGI utilizando a simulação discreta desenvolvida com o suporte do sistema ARENA demonstrando sua efetividade.

A partir dessa base conceitual, foi desenvolvido um modelo de simulação para uma linha de produção de cafés envolvendo a torrefação, moagem e ensacamento. Ressalta-se que, diante da inacessibilidade de um ambiente fabril real, o estudo de caso foi realizado a partir dos dados de outros trabalhos acadêmicos, levantando a capacidade de equipamentos e a análise dos tempos de produção e outras informações operacionais.

Essa oclusão de acesso limitou o escopo do estudo quanto ao mix de produtos, as possibilidades de alterações nos layouts, custos e análise de recursos humanos em cada posto do processo.

Com a documentação e leitura crítica das referências foi possível atingir o primeiro objetivo específico modelando o processo dos produtos de café selecionados para o estudo de caso. Dessa forma, foi possível visualizar a sequência de execução das atividades para que fosse obtido o produto ao final do processo.

O segundo objetivo específico foi atendido por meio da simulação, que permitiu aplicar o ciclo POOGI passo a passo, promovendo maior entendimento de sua aplicação e a validade da teoria estudada. Com estes dados, foi desenvolvido um modelo de simulação por meio do *software* ARENA, para replicar o ambiente identificado e identificar os gargalos e aprimorar a eficiência do sistema.



Com o uso da aplicação citada anteriormente, foi possível identificar alguns padrões e comprovar a viabilidade e efetividade da metodologia na forma de um estudo de caso. Por fim, com as comparações foi possível validar a simulação e comprovar as melhorias geradas pelas alterações no sistema. Com isso, identificou-se o impacto de balancear o ritmo da produção no primeiro cenário analisado, enquanto no segundo foi possível observar o comportamento dinâmico da restrição com os aumentos de capacidade.

O uso das ferramentas da teoria das restrições associadas à simulação computacional mostra-se uma ferramenta poderosa para avaliar realização de investimentos, alterações na produção e capacidade com baixo risco.

## **5.1 TRABALHOS FUTUROS**

Por meio desta, sugere-se futuras pesquisas associando as técnicas da TOC com conceitos modernos como gêmeos digitais, inteligência artificial e indústria 4.0. Estes temas ainda se apresentam pouco explorados e podem trazer mais modernidade ao assunto, promovendo análises em tempo real com a virtualização de entidades físicas para uma análise mais precisa e identificação dinâmica de restrições.

Recomenda-se ainda, a aplicação da simulação computacional associada ao processo de aprimoramento contínuo da TOC em outros sistemas produtivos, avaliando informações não consideradas neste trabalho como taxas de aproveitamento, custos de pessoal, e falhas de maquinário.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Altiok e Melamed 2007 ALTIOK, T.; MELAMED, B. *Simulation modeling and analysis with Arena*. [S.l.]: Elsevier, 2007.

Banks et al. 2013 BANKS, J.; II, J. S. C.; BARRY, L. et al. *Discrete-event system simulation fifth edition*. [S.l.]: Pearson, 2013.

Bateman Royce O. Bowden e Harrell 2013 BATEMAN ROYCE O. BOWDEN, T. J. C. T. J.; HARRELL, C. R. *Simulação De Sistemas: Aprimorando Processos de Logística, Serviços Manufatura*. [S.l.]: Elsevier Brasil, 2013. v. 1.

Bernardino et al. 2019 BERNARDINO, P. E. M.; PAKES, P. R.; SILVA, B. B.; BIANCHINI, V. K.; RAZZINO, C. do A. Aplicação da teoria das restrições em uma indústria calçadista de franca/sp: Um estudo de caso. In: *IX Congresso Brasileiro de engenharia de produção. Ponta Grossa, PR*. [S.l.: s.n.], 2019.

Bradley 2007 BRADLEY, A. *User's Guide Arena*. [S.l.]: Rockwell Automation Technologies, 2007.

CBOK 2013 CBOK, B. Guia para o gerenciamento de processos de negócio corpo comum de conhecimento. *Association of Business Process Management Professionals. ABPMP BPM CBOK*, v. 3, p. 13, 2013.

Chwif e Medina 2010 CHWIF, L.; MEDINA, A. C. *Modelagem e simulação de eventos discretos: teoria e prática*. [S.l.]: São Paulo: Leonardo Chwif, 2010.

Clarivate 2020 CLARIVATE. *Web of Science: Journal Citation Reports*. 2020.

Clarivate 2022 CLARIVATE. *AAbout Web of Science*. 2022. Disponível em: <<https://clarivate.com/webofsciencegroup/solutions/web-of-science/>>. Acesso em: 20 de Janeiro de 2022.

Cogan 2007 COGAN, S. *Contabilidade gerencial: uma abordagem da teoria das restrições*. [S.l.]: Saraiva, 2007.

Coman e Ronen 2000 COMAN, A.; RONEN, B. Production outsourcing: a linear programming model for the theory-of-constraints. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 38, n. 7, p. 1631–1639, 2000.

Corbett 1998 CORBETT, T. *Throughput accounting: TOC's management accounting system*. [S.l.]: North river press Great Barrington, 1998.

Drumond et al. 2014 DRUMOND, H. A. et al. Avaliação financeira do processo de transplantes de fígado em minas gerais: um estudo do diálogo entre o custeio baseado em atividades e a teoria das restrições. Universidade Federal de Minas Gerais, 2014.

Elsevier 2022 ELSEVIER. *About Scopus*. 2022. Disponível em: <<https://www.elsevier.com/solutions/scopus>>. Acesso em: 20 de Janeiro de 2022.

Fox e Goldratt 1986 FOX, R. E.; GOLDRATT, E. *The race*. [S.l.]: North River Press New York, 1986.

Fredendall e Lea 1997 FREDENDALL, L. D.; LEA, B.-R. Improving the product mix heuristic in the theory of constraints. *International journal of production research*, Taylor & Francis, v. 35, n. 6, p. 1535–1544, 1997.

- Fry, Cox e Jr 1992 FRY, T. D.; COX, J. F.; JR, J. H. B. An analysis and discussion of the optimized production technology software and its use. *Production and Operations Management*, Wiley Online Library, v. 1, n. 2, p. 229–242, 1992.
- Garfield 2006 GARFIELD, E. The history and meaning of the journal impact factor. *jama*, American Medical Association, v. 295, n. 1, p. 90–93, 2006.
- Gil et al. 2010 GIL, A. C. et al. *Como elaborar projetos de pesquisa*. [S.l.]: Atlas São Paulo, 2010. v. 5.
- Goldratt et al. 1990 GOLDRATT, E. et al. *Haystack syndrome*. [S.l.]: North River Press, 1990.
- Goldratt 2013 GOLDRATT, E. M. Corrente crítica: Teoria das restrições (toc) em gestão de projetos. In: *Corrente Crítica: Teoria das Restrições (TOC) em gestão de projetos*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 268–268.
- Goldratt e Cox 2014 GOLDRATT, E. M.; COX, J. A meta: um processo de aprimoramento contínuo. In: *A meta: um processo de aprimoramento contínuo*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 318–318.
- Grácio 2016 GRÁCIO, M. C. C. Acoplamento bibliográfico e análise de cocitação: revisão teórico-conceitual. *Encontros Bibli: revista eletrônica de biblioteconomia e ciência da informação*, v. 21, n. 47, p. 82–99, 2016.
- Gupta e Boyd 2008 GUPTA, M. C.; BOYD, L. H. Theory of constraints: a theory for operations management. *International Journal of Operations & Production Management*, Emerald Group Publishing Limited, 2008.
- III, CFPIM e Jr 2010 III, J. F. C.; CFPIM, C.; JR, J. G. S. *Theory of constraints handbook*. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2010.
- Kee e Schmidt 2000 KEE, R.; SCHMIDT, C. A comparative analysis of utilizing activity-based costing and the theory of constraints for making product-mix decisions. *International journal of production economics*, Elsevier, v. 63, n. 1, p. 1–17, 2000.
- Kelton 2014 KELTON, W. D. *Simulation with ARENA*. [S.l.]: McGraw hill, 2014.
- Kuo et al. 2021 KUO, T.-C.; HSU, N.-Y.; LI, T. Y.; CHAO, C.-J. Industry 4.0 enabling manufacturing competitiveness: Delivery performance improvement based on theory of constraints. *Journal of Manufacturing Systems*, Elsevier, v. 60, p. 152–161, 2021.
- Land et al. 2021 LAND, M. J.; THÜRER, M.; STEVENSON, M.; FREDENDALL, L. D.; SCHOLTEN, K. Inventory diagnosis for flow improvement—a design science approach. *Journal of Operations Management*, Wiley Online Library, v. 67, n. 5, p. 560–587, 2021.
- Law, Kelton e Kelton 2014 LAW, A. M.; KELTON, W. D.; KELTON, W. D. *Simulation modeling and analysis*. [S.l.]: McGraw Hill, 2014. v. 5.
- Lowalekar e Basu 2020 LOWALEKAR, H.; BASU, S. Theory of constraints based mafia offer for supply chains of deteriorating products. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 58, n. 14, p. 4421–4449, 2020.
- Mabin e Davies 2003 MABIN, V.; DAVIES, J. Framework for understanding the complementary nature of toc frames: insights from the product mix dilemma. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 41, n. 4, p. 661–680, 2003.
- Mariano e Rocha 2017 MARIANO, A. M.; ROCHA, M. S. Revisão da literatura: apresentação de uma abordagem integradora. In: *AEDEM International Conference*. [S.l.: s.n.], 2017. v. 18, p. 427–442.

- Marin-Garcia et al. 2020 MARIN-GARCIA, J. A.; GARCIA-SABATER, J. P.; RUIZ, A.; MAHEUT, J.; GARCIA-SABATER, J. J. Operations management at the service of health care management: Example of a proposal for action research to plan and schedule health resources in scenarios derived from the covid-19 outbreak. *Journal of Industrial Engineering and Management*, v. 13, n. 2, p. 213–227, 2020.
- Mariz 2019 MARIZ, F. B. d. A. R. *Análise comparativa dos modelos Drum-Buffer-Rope e Constant Work-In-Process em um ambiente com montagem e produção contra pedido*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2019.
- Medeiros e Lima 2019 MEDEIROS, M. d. F.; LIMA, A. A. Simulação de eventos aplicada em uma indústria de café. Universidade Federal de Uberlândia, 2019.
- Miclo et al. 2019 MICLO, R.; LAURAS, M.; FONTANILI, F.; LAMOTHE, J.; MELNYK, S. A. Demand driven mrp: assessment of a new approach to materials management. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 57, n. 1, p. 166–181, 2019.
- Modi, Lowalekar e Bhatta 2019 MODI, K.; LOWALEKAR, H.; BHATTA, N. Revolutionizing supply chain management the theory of constraints way: A case study. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 57, n. 11, p. 3335–3361, 2019.
- Moellmann 2008 MOELLMANN, A. H. *Aplicação da teoria das restrições no gerenciamento da cadeia de suprimentos*. 2008.
- Moreira. 2011 MOREIRA., D. A. *Administração da produção e operações*. [S.l.]: CENGAGE, 2011.
- Myrelid e Olhager 2019 MYRELID, A.; OLHAGER, J. Hybrid manufacturing accounting in mixed process environments: A methodology and a case study. *International Journal of Production Economics*, Elsevier, v. 210, p. 137–144, 2019.
- Naor, Bernardes e Coman 2013 NAOR, M.; BERNARDES, E.; COMAN, A. Theory of constraints: is it a theory and a good one? *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 51, n. 2, p. 542–554, 2013.
- Nazari-Shirkouhi et al. 2010 NAZARI-SHIRKOUHI, S.; EIVAZY, H.; GHODSI, R.; REZAIE, K.; ATASHPAZ-GARGARI, E. Solving the integrated product mix-outsourcing problem using the imperialist competitive algorithm. *Expert Systems with Applications*, Elsevier, v. 37, n. 12, p. 7615–7626, 2010.
- Onofrejova et al. 2020 ONOFREJOVA, D.; JANEKOVA, J.; GRINCOVA, A.; SOLTYSOVA, Z. Simulation and evaluation of production factors in manufacturing of fireplaces. *Int. J. Simul. Model*, v. 19, n. 1, p. 77–88, 2020.
- Pacheco, Junior e Matos 2021 PACHECO, D. A. de J.; JUNIOR, J. A. V. A.; MATOS, C. A. de. The constraints of theory: What is the impact of the theory of constraints on operations strategy? *International Journal of Production Economics*, Elsevier, v. 235, 2021.
- Plenert 1993 PLENERT, G. Optimizing theory of constraints when multiple constrained resources exist. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 70, n. 1, p. 126–133, 1993.
- Puche et al. 2019 PUCHE, J.; COSTAS, J.; PONTE, B.; PINO, R.; FUENTE, D. de la. The effect of supply chain noise on the financial performance of kanban and drum-buffer-rope: An agent-based perspective. *Expert Systems with Applications*, Elsevier, v. 120, p. 87–102, 2019.
- Rahman 2002 RAHMAN, S.-u. The theory of constraints' thinking process approach to developing strategies in supply chains. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, MCB UP Ltd, 2002.

- Sabbadini et al. 2013 SABBADINI, F. S.; GONÇALVES, A. A.; OLIVEIRA, M. J. F. de; JR, A. H. de A.; BATISTA, R. Simulação, teoria das restrições (toc) e gestão da capacidade: Casos de aplicação na área de saúde. *Resende. X SEGeT*, 2013.
- Sarkar, Jha e Patel 2021 SARKAR, D.; JHA, K.; PATEL, S. Critical chain project management for a highway construction project with a focus on theory of constraints. *International Journal of Construction Management*, Taylor & Francis, v. 21, n. 2, p. 194–207, 2021.
- Schneider 2017 SCHNEIDER, T. M. Aplicação de princípios da teoria das restrições: um estudo de simulação em um sistema de produção arranjado por produtos. Universidade Federal de Santa Maria, 2017.
- Silva e Menezes 2005 SILVA, E. L. D.; MENEZES, E. M. Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação. *UFSC, Florianópolis, 4a. edição*, v. 123, 2005.
- Slack et al. 2018 SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. et al. *Administração da produção*. 8. ed. [S.l.]: Atlas São Paulo, 2018.
- Sordi 2017 SORDI, J. O. D. *Gestão por processos*. [S.l.]: Saraiva Educação SA, 2017.
- Spencer e Cox 1995 SPENCER, M. S.; COX, J. Optimum production technology (opt) and the theory of constraints (toc): analysis and genealogy. *The International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 33, n. 6, p. 1495–1504, 1995.
- Techt 2015 TECHT, U. *Goldratt and the theory of constraints. the quantum leap in management*. [S.l.]: Ibidem-Verlag, 2015. ISBN 9783838207377.
- Telles et al. 2020 TELLES, E. S.; LACERDA, D. P.; MORANDI, M. I. W. M.; PIRAN, F. A. S. Drum-buffer-rope in an engineering-to-order system: An analysis of an aerospace manufacturer using data envelopment analysis (dea). *International Journal of Production Economics*, Elsevier, v. 222, p. 107500, 2020.
- Tsai e Jhong 2019 TSAI, W.-H.; JHONG, S.-Y. Production decision model with carbon tax for the knitted footwear industry under activity-based costing. *Journal of cleaner production*, Elsevier, v. 207, p. 1150–1162, 2019.
- Verma 1997 VERMA, R. Management science, theory of constraints/optimized production technology and local optimization. *Omega*, Elsevier BV, v. 25, p. 189–200, 1997. ISSN 03050483.
- Watson, Blackstone e Gardiner 2007 WATSON, K. J.; BLACKSTONE, J. H.; GARDINER, S. C. The evolution of a management philosophy: The theory of constraints. *Journal of operations Management*, Elsevier, v. 25, n. 2, p. 387–402, 2007.
- WHO 2021 WHO, W. H. O. *TWeekly epidemiological update on COVID-19 - 28 December 2021*. 2021. Disponível em: <<https://www.who.int/publications/m/item/weekly-epidemiological-update-on-covid-19---28-december-2021>>. Acesso em: 20 de Janeiro de 2022.
- Wojakowski 2016 WOJAKOWSKI, P. Production economics with the use of theory of constraints. *Research in Logistics & Production*, v. 6, n. 1, p. 79–88, 2016.
- Wu, Zheng e Shen 2020 WU, K.; ZHENG, M.; SHEN, Y. A generalization of the theory of constraints: Choosing the optimal improvement option with consideration of variability and costs. *IIE Transactions*, Taylor & Francis, v. 52, n. 3, p. 276–287, 2020.