

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.**

ISIDORO RAYS FILHO

**ANÁLISE DE DIFERENTES TÉCNICAS DE SEQUENCIAMENTO DA
PRODUÇÃO EM UM AMBIENTE DE PRODUÇÃO PARA ESTOQUE
CONTROLADO PELO SISTEMA S-DBR**

BAURU/SP

2023

ISIDORO RAYS FILHO

**ANÁLISE DE DIFERENTES TÉCNICAS DE SEQUENCIAMENTO DA
PRODUÇÃO EM UM AMBIENTE DE PRODUÇÃO PARA ESTOQUE
CONTROLADO PELO SISTEMA S-DBR**

Dissertação de mestrado apresentada como exigência para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, UNESP, Campus de Bauru.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Bernardi de Souza.

BAURU

2023

R277a

Rays Filho, Isidoro

Análise de diferentes técnicas de sequenciamento da produção em um ambiente de produção para estoque controlado pelo sistema S-DBR / Isidoro Rays Filho. -- Bauru, 2023

100 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, Bauru

Orientador: Fernando Bernardi de Souza

1. Teoria das Restrições. 2. Sequenciamento. 3. Simulação. 4. Produzir para disponibilidade. 5. Gerenciamento do pulmão. I. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE ISIDORO RAYS FILHO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 26 dias do mês de julho do ano de 2023, às 09:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de ISIDORO RAYS FILHO, intitulada **ANÁLISE DE DIFERENTES TÉCNICAS DE SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO EM UM AMBIENTE DE PRODUÇÃO PARA ESTOQUE CONTROLADO PELO S-DBR**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. FERNANDO BERNARDI DE SOUZA (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Producao / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. MOACIR GODINHO FILHO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Produção / Universidade Federal de São Carlos, Prof^ª. Dr^ª. PAULA DE CAMARGO FIORINI (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Producao / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: APROVADO . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.


Prof. Dr. FERNANDO BERNARDI DE SOUZA

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fernando Bernardi de Souza, pela paciência, disponibilidade, ensinamentos, agendamento das reuniões e explicações sobre os assuntos referentes ao tema do trabalho. Além do apoio acadêmico, agradeço o apoio pessoal e confiança depositada à realização desse projeto.

Aos meus pais, que desde o início do curso de Engenharia de Produção me apoiaram e me apoiam a realizar meus estudos e me desenvolver profissional e academicamente.

À banca avaliadora que, através da análise do trabalho e comentários realizados durante a qualificação, permitiram a evolução do presente trabalho.

Aos professores do DEP que contribuíram para a minha formação e para a realização desta pesquisa

“Você pode saber o nome de um pássaro em todas as línguas do mundo, mas no fim das contas, você não saberá absolutamente nada sobre o que quer que seja o pássaro. Então, vamos observar o pássaro e ver o que ele faz — isso é o que conta. Eu aprendi bastante cedo a diferença entre saber o nome de algo e saber de algo”.

(Richard Feynman)

RESUMO

Em ambientes Make-to-Stock parte considerável das empresas enfrentam problemas tais como vendas perdidas, clientes insatisfeitos, baixa rotatividade, alto investimento e obsolescência do estoque. Para lidar com isto, a Teoria das Restrições (TOC) traz que se deve programar a produção conforme a restrição, focando no fluxo e subordinando os demais recursos. Em situações onde o recurso restritivo tem capacidade estritamente superior à demanda, a TOC propõe realizar o planejamento da produção através do Tambor-Pulmão-Corda Simplificado (S-DBR). O S-DBR aplicado à ambientes MTS tem como foco principal garantir a disponibilidade dos produtos. Mas seria o BM a forma de sequenciamento mais efetiva? Para responder a esta pergunta, construiu-se um modelo no software Anylogic representando uma linha de produção fictícia, comparando o desempenho do BM com outras regras tais como o RO (Round-Out Time), o FIFO (First-In-First-Out) e o SPTR (Sortest-Process-Time), através de indicadores Fill Rate e OTIF. Os resultados permitem concluir que o Buffer Management, cuja premissa é priorizar as ordens de reposição com base na penetração do Target Level, foi a melhor regra de sequenciamento. Além disso, a regra FIFO apresentou bons desempenhos, mostrando a efetividade do planejamento do SDBR. O RO apresentou o terceiro melhor desempenho, como a sua utilização é mais complexa que o FIFO, acaba não justificando sua escolha. As regras baseadas na lógica SPTR obtiverem o pior desempenho, devido a trabalharem em direção oposta ao método S-DBR/MTA, pois priorizam ordens com menor tempo de processamento, ou seja, justamente aqueles que abastecem estoques relativamente mais altos.

Palavras-chave: Teoria das Restrições. Sequenciamento. Simulação. Produzir para disponibilidade. Gerenciamento do pulmão.

ABSTRACT

In Make-to-Stock environments, a considerable part of companies faces problems such as lost sales, dissatisfied customers, low turnover, high investment, and inventory obsolescence. To deal with this, the Theory of Constraints (TOC) brings that production should be scheduled according to the constraint, focusing on the flow and subordinating the other resources. In situations where the constraining resource has a capacity strictly higher than the demand, TOC proposes to perform production planning through the Simplified Drum-Buffer-Rope (S-DBR). The S-DBR applied to MTS environments has as its main focus to guarantee the availability of products. But would BM be the most effective form of sequencing? To answer this question, a model was built in Anylogic software representing a fictitious production line, comparing the performance of BM with other rules such as RO (Round-Out Time), FIFO (First-In-First-Out), and SPTR (Shortest-Process-Time), through Fill Rate and OTIF indicators. The results allow us to conclude that Buffer Management, whose premise is to prioritize replenishment orders based on Target Level penetration, was the best sequencing rule. In addition, the FIFO rule performed well, showing the effectiveness of S-DBR planning. The RO presented the third best performance, as its use is more complex than FIFO, it ends up not justifying its choice. The rules based on SPTR logic obtained the worst performance, due to working in the opposite direction to the S-DBR/MTA method, as they prioritize orders with shorter processing time, i.e. precisely those that supply relatively higher stocks.

Keywords: Theory of Constraints. Sequencing. Simulation. Make-to-Availability. Buffer Management

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Algoritmos de Otimização para Sequenciamento	23
Figura 2 - Representação visual DBR	33
Figura 3- Relação entre tamanho do pulmão e esforço gerencial	35
Figura 4 – Representação do pulmão, datas de liberação e de entrega	38
Figura 5 - Representação do Pulmão de Pedido.....	40
Figura 6 - Síntese dos algoritmos e parâmetros de ajuste do TL do GDP	50
Figura 7 - Modelo de linha de produção	61
Figura 8 - Funcionamento modelo de simulação.....	61
Figura 9 - Funcionamento do Algoritmo do Gerenciamento Dinâmico do Pulmão	63
Figura 10 - Representação Demanda Não Sazonal	67
Figura 11- Representação Demanda Sazonal	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo benefícios DBR	52
Tabela 2 - Resumo cenários simulados	72
Tabela 3 - Resultados médios obtidos para o indicador Fill Rate.....	73
Tabela 4 - Resultados médios obtidos para o indicador On Time In Full (OTIF).....	74
Tabela 5 - Resultados do teste Shapiro Wilk para o indicador Fill Rate	74
Tabela 6 - Resultados do teste Shapiro Wilk para o indicador OTIF	75
Tabela 7 - Teste de Friedman	75
Tabela 8 - Teste de Nemenyi com ajuste de Bonferroni para o indicador Fill Rate...	76
Tabela 9 - Teste de Nemenyi com ajuste de Bonferroni indicador OTIF	78
Tabela 10 - Ranqueamento segundo o indicador Fill Rate para os cenários sem sazonalidade	80
Tabela 11 - Ranqueamento segundo o indicador Fill Rate para os cenários com sazonalidade	81
Tabela 12 - Ranqueamento segundo o indicador OTIF para os cenários sem sazonalidade	82
Tabela 13 - Ranqueamento segundo o indicador OTIF para os cenários com sazonalidade	83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BM – Buffer Management
CV – Coeficiente de Variação
FGI – Finished Goods Inventory
FIFO – First In First Out
FR – Fill Rate
DBM – Dynamic Buffer Management
BM – Buffer Management
RO – Run-Out Time
MTA – Make to Availability
MTO – Make to Order
MTS – Make to Stock
OTIF – On Time In Full
RRC – Recurso com Restrição de Capacidade
SPT - Shortest Process Time.
TL – Target Level
TMG – Too Much Green
TMR – Too Much Red
TOC – Theory of Constraints
TOCICO – Theory of Constraints International Certification Organization
DBR – *Drum Buffer Rope*
S-DBR – *Simplified Drum Buffer Rope*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 JUSTIFICATIVA, CONTRIBUIÇÃO, FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E OBJETIVOS DE PESQUISA.....	16
1.2 SÍNTESE DO MÉTODO DE PESQUISA EMPREGADO	17
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1. CARACTERÍSTICAS DAS OPERAÇÕES DE PRODUÇÃO	20
2.2. SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO	21
2.2.1. Métodos de otimização exatos	23
2.2.2. Métodos aproximados	24
2.2.3. Regras de sequenciamento da produção.....	25
2.3. TEORIA DAS RESTRIÇÕES BREVE HISTÓRICO	28
2.4. TEORIA DAS RESTRIÇÕES E SEUS PRINCÍPIOS	30
2.5. OS 5 PASSOS DE FOCALIZAÇÃO	31
2.6. DRUM BUFFER ROPE	31
2.6.1. Detalhamento do Algoritmo.....	34
2.6.2. Programação mais simples do RRC	36
2.7. SIMPLIFIED DRUM BUFFER ROPE MTO	37
2.7.1. Lidando com pedidos urgentes em ambientes planejados pelo S-DBR...39	
2.8. SIMPLIFIED DRUM BUFFER ROPE MTA	42
2.8.1. O ambiente MTA	42
2.8.2. SIMPLIFIED DRUM BUFFER ROPE EM AMBIENTES MTA.....	44
2.8.3. Gerenciamento Dinâmico do Pulmão.....	48
2.9. ESTUDOS RECENTES SOBRE O DBR E S-DBR	51
2.9.1 Estudos sobre o DBR.....	51
2.9.2 Estudos sobre o S-DBR	54

2.9.3 Estudos sobre outros tópicos relacionados ao DBR e/ou S-DBR	55
3. MÉTODO DE PESQUISA	58
3.1. SELEÇÃO DO SOFTWARE DE SIMULAÇÃO.....	59
3.2. CONSTRUÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL.....	60
3.3. VERIFICAÇÃO DO MODELO	64
3.4. PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO DOS CENÁRIOS	65
3.4.1. Demanda e tempo de processamento	66
3.4.2. Medidas de desempenho	68
3.4.3. Período de aquecimento, número de simulações e sua duração.....	69
3.4.4. Definição dos cenários a serem simulados	71
4. RESULTADOS	73
5. DISCUSSÕES.....	84
6. CONCLUSÃO.....	88
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90

1 INTRODUÇÃO

As operações de uma empresa podem ser realizadas, dentre outros, em dois sistemas distintos: Make-to-Stock (MTS), em que as empresas mantêm estoque de produtos acabados visando atender aos clientes, isto é, a produção antecede a venda, e Make-to-Order (MTO), em que a produção se inicia a partir de um pedido do cliente, ou seja, o lead time de produção da empresa é mais longo e deve tolerado pelo cliente. O sistema MTO se justifica em algumas situações, tais como necessidade técnica e customização desejada pelo usuário (KINGSMAN, et al., 1996; STEVESON; HENDRY; KINGSMAN, 2005; SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009; SOUZA; PIRES, 2014; GARMDARE; LOFTI; HONARVAR, 2018; SATO et al., 2023; COSTA et al., 2023).

Entretanto, quando algumas empresas operam em ambientes de demanda sazonal (com picos de vendas que superariam a capacidade do Recurso com Restrição de Capacidade - RRC) e/ou quando seus leads times são maiores que o “suportável” pelo cliente, elas são forçadas a operarem sob a lógica MTS. Nesses ambientes, contudo, as empresas se deparam com alguns problemas típicos, como baixa rotatividade, alto investimento, rupturas (vendas perdidas) e obsolescência dos seus estoques (SOUZA; PIRES, 2014; SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009; SATO et al., 2023; HAEUSSLER; NEUNER; THÜRER, 2023; COSTA et al., 2023; IKEZIRI et al., 2023).

Para mitigá-los, a Teoria das Restrições (Theory of Constraints - TOC) propõe que o principal objetivo das operações deve ser o fluxo e o planejamento da produção deve ser realizado explorando a restrição do sistema, subordinando os demais recursos a ela. A TOC propõe duas formas diferentes de planejamento da produção: Tambor Pulmão Corda clássico (Drum Buffer Rope – DBR) e Tambor Pulmão Corda Simplificado (Simplified Drum Buffer Rope - S-DBR) (E. SCHRAGENHEIM, 2013; SOUZA; BAPTISTA, 2010; GOLDRATT, 2009; SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009; TELLES et al., 2020, 2022; IKEZIRI et al., 2019; GOVONI et al., 2021; ORUE et al., 2021; COSTA et al., 2023; ORUE et al., 2023).

A principal diferença entre os métodos DBR e o S-DBR está no fato de o primeiro admitir - e até certo ponto almejar - que a principal restrição do sistema seja

uma restrição de capacidade interna (Recurso com Restrição de Capacidade – RRC). Assim sendo, deve-se planejar e programar a produção no RRC de maneira detalhada e condicionada às chegadas de novos pedidos. Além disso, o DBR estabelece uma proteção (pulmão ou buffer) ao planejamento no RRC contra as flutuações estatísticas presentes no sistema (pulmão de restrição) e outros dois tipos de pulmões: pulmão de montagem, para que as operações de montagem não sejam afetadas por faltas de componentes advindos de operações não restritivas; e pulmão de mercado (ou de expedição), visando minimizar atrasos nas entregas dos pedidos aos clientes (SRIKANTH, 2013; SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009; SOUZA; BAPTISTA, 2010; THÜRER et al., 2017; THÜRER; STEVENSON, 2018a; TELLES et al., 2020; ZUPANCIC; BUCHMEISTER; ALJAZ, 2017; ; IKEZIRI et al., 2019; LIU; SHEN; ZHANG, 2021; YUE et al., 2022).

Já o S-DBR admite que, para um bom número de empresas, a restrição principal do sistema está na demanda, ou seja, os recursos produtivos (inclusive o RRC) possuem capacidade para atender a demanda, com certa folga, na maior parte do tempo. Nesse cenário, portanto, todos os recursos da empresa possuem a assim chamada capacidade protetiva e há apenas um único pulmão (e não mais três), denominado pulmão de produção – que engloba desde a liberação de matéria-prima até a finalização do produto final - cujo objetivo é proteger as datas de embarque dos pedidos. Outro importante diferenciador é que no S-DBR a programação detalhada do RCC é substituída pelo monitoramento da sua carga de trabalho e de eventuais outros recursos – denominada carga planejada (SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009; SOUZA; BAPTISTA, 2010; E. SCHRAGENHEIM, 2013a; GOVONI, 2018; IKEZIRI et al., 2019; GOVONI et al., 2021; TELLES et al., 2022).

O método S-DBR é aplicado nos sistemas MTS e MTO de uma forma bastante distinta. Quando aplicado em ambientes MTS, recebe o nome de Make-to-Availability (MTA), o qual visa estabelecer um compromisso com o mercado, ou com alguns clientes específicos, para manter uma disponibilidade boa o suficiente de produtos e assim ser capaz de entregar imediatamente, mediante pedido, quase sempre (E. SCHRAGENHEIM, 2013b; GOVONI, 2018; IKEZIRI et al., 2019; GOVONI et al., 2021; CASTRO, GODINHO FILHO e TAVARES-NETO, 2022).

Também no S-DBR, o controle e sequenciamento da produção se dão exclusivamente por meio do método Buffer Management (BM). O BM trabalha com o

conceito de status do pulmão (buffer status - BS) que, basicamente, calcula quanto determinada ordem de produção consumiu do pulmão e, com base nisso, estabelece três zonas ou cores de priorização. Na zona verde estão as ordens que invadiram menos que $1/3$ do pulmão e, portanto, não devem receber atenção. Na zona amarela, a penetração está entre $1/3$ e $2/3$, indicando sinal de alerta. Já na zona vermelha, a penetração das ordens é superior a $2/3$ e devem ser apressadas para que não sejam embarcadas com atraso (em ambientes MTO) ou para que se evitem entregas não imediatas, a partir do estoque de produtos acabados, em ambientes MTA (E. SCHRAGENHEIM, 2013a; IKEZIRI et al., 2019; GOVONI et al., 2021; CASTRO, GODINHO FILHO e TAVARES-NETO, 2022).

Apesar de a TOC propor diferentes métodos de planejamento, o controle e sequenciamento pelo BM estão sempre presentes. Mas seria o BM uma forma efetiva de garantir a disponibilidade de produtos acabados em ambientes planejados pelo sistema S-DBR/MTA?

1.1 JUSTIFICATIVA, CONTRIBUIÇÃO, FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E OBJETIVOS DE PESQUISA

Costa et al. (2023), quando compararam os sistemas DBR e CONWIP, observaram a importância das regras de sequenciamento no desempenho do sistema produtivo. Além disso, o planejamento mais simples do S-DBR, comparado ao DBR, permite uma maior flexibilidade à fase de execução, aumentando a importância do sequenciamento e controle para o cumprimento das diretrizes do planejamento (E. SCHRAGENHEIM, 2013a). Logo, identificar as melhores formas de sequenciamento em um ambiente planejado pelo S-DBR é um assunto de grande relevância, pois seu desempenho é fortemente impactado pelas regras adotadas.

Ikeziri et. al. (2019), ao realizarem uma revisão da literatura sobre temas associados à TOC, destacam a importância de avaliar o desempenho do BM, mas ressaltam que pouco foi publicado a respeito, como: i) Castro, Godinho Filho e Tavares-Neto (2022) compararam as regras de sequenciamento das ordens de produção FIFO, BM e um método baseado na meta heurística *particle swarm optimization* (PSO) para avaliar o desempenho destas regras frente à presença de

setups dependentes, concluindo que a PSO teve a melhor performance; ii) Thürer e Stevenson (2018a) avaliaram o método de controle, proposto pela TOC, com outras regras de sequenciamento planejadas pelo DBR. Os autores concluíram que, em situações de alta carga, o desempenho do DBR pode ser aumentado sequenciando as ordens de produção pelo menor tempo de processamento.

Dada sua relevância e a carência de pesquisas que investiguem a eficiência do BM (principalmente em ambientes planejados pelo S-DBR), o presente trabalho busca responder a seguinte questão: “quão efetivo é o BM, em relação a algumas outras regras de sequenciamento e em termos de atendimento por pronta-entrega dos pedidos dos clientes, em um ambiente MTA planejado pelo método S-DBR?”.

Dessa forma, a presente pesquisa permite expandir o conhecimento do comportamento das regras de sequenciamento em um ambiente planejado pela TOC, ao avaliar seus desempenhos, compará-las e verificar em quais situações elas são mais efetivas.

Deriva-se como o objetivo geral do presente trabalho avaliar a efetividade do BM em garantir a disponibilidade de produtos acabados em ambientes MTA planejados pelo S-DBR. Como objetivos específicos, podem-se citar:

Identificar o desempenho do BM frente a outras regras de sequenciamento presentes na literatura, tais como o FIFO, RO, SPT.

Verificar em que cenários o desempenho do BM, em relação a outras regras, é mais afetado, tanto positiva quanto negativamente, utilizando indicadores típicos de ambientes MTS, tais como *Fill Rate* e *On-Time-In-Full*.

Apresentar explicações para os resultados obtidos, confrontando-as com a literatura pertinente.

1.2 SÍNTESE DO MÉTODO DE PESQUISA EMPREGADO

Davis, Eisenhardt e Bingham (2007) e Banks et al. (2004) afirmam que a simulação é um método de pesquisa que permite ampliar conhecimento sobre teorias já existentes, desenvolver novas e ampliar o conhecimento, uma vez que um modelo de simulação devidamente construído, testado e avaliado, permite

investigar, analisar e compreender as variáveis e comportamentos sobre os sistemas reais sob diferentes circunstâncias.

Assim sendo, a escolha do método de simulação justifica-se ao permitir cumprir os objetivos do trabalho, quais sejam, verificar o desempenho das diferentes regras de sequenciamento e fazer sua comparação em diferentes cenários, verificando aquelas que são mais afetadas por mudanças nas cargas e nas variabilidades internas e externas. Os detalhes sobre a construção do método são apresentados na Seção 3, que detalha a construção e verificação do modelo, bem como a definição dos parâmetros da simulação, tais como tempos de processamento, chegadas de pedidos, nível de variabilidade dos recursos e da demanda, número de replicações, *warm-up* e duração da simulação.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho foi dividido em 5 capítulos, formando uma estrutura lógica e simples para orientar e formalizar a pesquisa. O Capítulo 1 traz a Introdução, em que se apresentou a contextualização do tema, formulação do problema, dos objetivos, justificativa e contribuição da pesquisa.

No Capítulo 2 são apresentadas a revisão bibliográfica e fundamentação teórica das características das operações de produção, os princípios e os 5 passos de focalização da TOC, os métodos de planejamento da produção DBR e S-DBR (em ambientes MTO e MTA), o método BM e algumas regras clássicas de sequenciamento da produção.

No Capítulo 3 é trazido o método de pesquisa e a justificativa de sua escolha, as medidas de desempenho utilizadas, as etapas de construção e condução do método para investigar o desempenho das regras de sequenciamento.

No Capítulo 4 são trazidos os resultados obtidos, após a realização do método de pesquisa (simulação), dentro dos parâmetros definidos, analisando-os estatisticamente.

No Capítulo 5 são trazidas as discussões dos resultados obtidos no Capítulo 4, oferecendo uma análise dos resultados e comparação entre as regras de sequenciamento.

No Capítulo 6, por fim, é sintetizado o método de pesquisa e os resultados obtidos, trazendo conclusões que podem ser tiradas dos Capítulos 4 e 5, bem como as limitações desse trabalho e sugestões de pesquisas futuras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo realizar-se-á uma revisão bibliográfica para estabelecer uma base teórica à pesquisa. Para tanto, inicia-se com uma contextualização sobre as características das operações de produção (Seção 2.1), a fim de evidenciar os principais aspectos que permeiam as atividades das empresas. Em sequência, a Seção 2.2 apresenta o conceito de sequenciamento da produção, forma com que as empresas priorizam os trabalhos visando atender determinados objetivos de desempenho. As seções subsequentes trazem a Teoria das Restrições, abordagem gerencial centrada na identificação e decisão de como explorar as restrições da melhor maneira possível, subordinando os demais recursos a essa decisão. Para tanto, são apresentados um breve histórico (Seção 2.3) da TOC, seus princípios (Seção 2.4), seus passos de focalização (Seção 2.5), seus métodos de planejamento e controle aplicados em ambientes com restrições internas (Seção 2.6) e com restrição na demanda, em ambientes Make-to-Order (Seção 2.7) e Make-to-Stock (Seção 2.8). Finalizando o capítulo, são apresentados estudos recentes sobre os métodos de planejamento e controle da produção baseados na TOC (Seção 2.9).

2.1 CARACTERÍSTICAS DAS OPERAÇÕES DE PRODUÇÃO

Segundo Srikanth (2013), as operações de produção são caracterizadas por diferentes fatores. O primeiro deles é possuir um alto grau de dependência entre os recursos. Ou seja, uma determinada operação só pode ser realizada após outra operação ou etapa precedente ser realizada. Por exemplo, um produto só pode ser embalado após finalizado e inicia-se o processamento somente após finalizado o setup. Além disso, há um alto grau de variabilidade nas operações de produção. Tal fato é oriundo de eventos aleatórios e flutuações estatísticas. Os eventos aleatórios ocorrem em intervalos irregulares e são imprevisíveis (ocorrem em intervalos irregulares e o padrão é incompreensível) como exemplo temos o cancelamento de

um importante e grande pedido de um cliente. Já as flutuações estatísticas são as variabilidades inerentes do processo, por exemplo variação no tempo de setup. Por fim, as capacidades dos recursos são desequilibradas entre si e com a demanda. Isso é devido as capacidades serem providas com incrementos “inteiros” e não infinitesimais, ou seja, caso seja necessário adquirir 1,77 de capacidade de um recurso, tem-se que adquirir 2 de capacidade. Além disso, a presença de variabilidade e a dependência faz com que os recursos posteriores sejam afetados pelas variabilidades negativas dos recursos, isto é, caso algum recurso anterior seja alvo, por exemplo, de uma quebra o recurso posterior será afetado, entretanto variabilidade positiva dos recursos posteriores, como uma diminuição pontual em um processamento, não será contabilizado pelo sistema se os demais recursos não tiverem capacidade excedente. Logo, se os recursos forem balanceados entre si e com a demanda, o sistema não consegue superar o efeito das variabilidades, diminuindo o desempenho.

Goldratt (2009), após analisar a linha de montagem de Ford e o Sistema Toyota de Produção, concluiu que o objetivo de qualquer sistema de produção deve ser centrado na obtenção de um fluxo uniforme e suave (que é equivalente reduzir o tempo de atravessamento). Para tanto é necessário que haja um mecanismo que limite a produção (permitindo que somente o trabalho necessário seja realizado, evitando produção em excesso), as eficiências locais devem ser abolidas (garantindo que essa busca por ótimos locais não gere estoques desnecessários) e deve-se ter um processo focado na melhoria contínua e equilíbrio do fluxo.

2.2 SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO

Apesar de tanto o planejamento quanto o controle e sequenciamento da produção buscarem conciliar a produção e a operação dos recursos com a demanda de mercado, objetivando atendê-la da maneira mais efetiva possível, satisfazendo os clientes nas datas, quantidades e qualidades compromissadas, eles se diferenciam pelo fato de o primeiro ser uma atitude a ser realizada no futuro (por exemplo, dado que a demanda na semana passada foi de x unidades, deve-se produzir x unidades

essa semana para repor o estoque) e o segundo corresponde a uma ação para cumprir ou corrigir o primeiro. Ou seja, quando se faz um planejamento, pode-se ter erros de previsão, problemas de capacidade, quebras, ineficiências, mudanças na demanda e outras flutuações estatísticas que prejudicam até mesmo os melhores planejamentos, derrubando o desempenho (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2009; CORRÊA; CORRÊA, 2010; CORRÊA; GIANESI; CAON, 2019; SLACK et al., 2018).

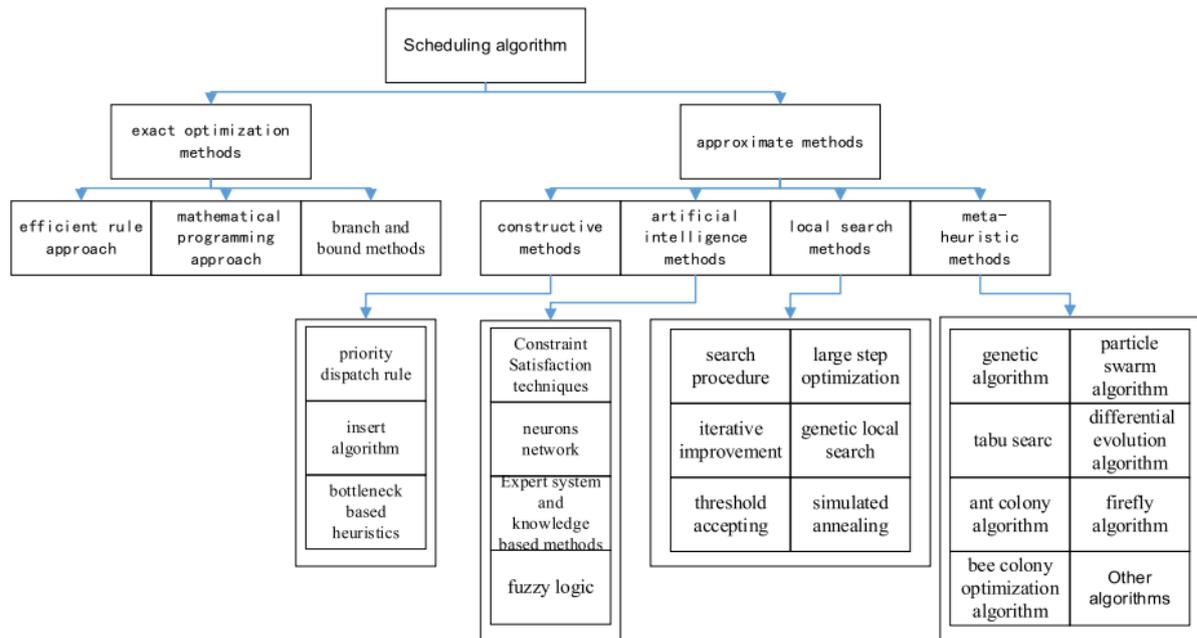
O sequenciamento, monitoramento e controle da produção visam, portanto, corrigir os desvios e atingir um elevado nível de confiabilidade, prazos atendidos, disponibilidade de produtos e aumento das vendas. Algumas dessas ações são priorizar ordens de produção nas filas (diminuindo o tempo de espera), fazer horas extras, processar as peças em mais de uma máquina análoga, diminuir os lotes de transferência e fazer uso de roteiros alternativos (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2009; CORRÊA; CORRÊA, 2010; CORRÊA; GIANESI; CAON, 2019; SLACK et al., 2018; SRIKANTH, 2013).

Para Pinedo (2005), o planejamento e sequenciamento de ordens de produção dependem fortemente do ambiente de produção em que a empresa está inserida. Ambientes de manufatura, basicamente, são caracterizados pela geração de ordens de trabalho com uma conclusão agendada, processamento em centros de trabalhos ou máquinas com uma determinada sequência, presença de filas e eventos aleatórios, tais como quebras de máquinas. Já uma empresa prestadora de serviços muitas vezes lida com reserva de recursos (vagas, horários, equipamento e etc), alocação e programação de equipamentos. Assim sendo, os ambientes de manufatura e serviços diferem fortemente entre si no planejamento e sequenciamento, devendo ser analisados de forma separada. Além disso, mesmo em ambientes de manufatura, há distinções no planejamento e sequenciamento. Os ambientes de projeto são caracterizados por restrições de precedência e um número limitado de máquinas, enquanto minimiza-se o tempo total de programação. Alguns dos métodos utilizados em tais ambientes são o CPM (*Critical Path Method*), o PERT (*Program Evaluation and Review Technique*).

Já os ambientes *job shop* são caracterizados por lidarem com n trabalhos e cada um passa por uma sequência de máquinas ou rota predeterminada, podendo ser reentrante ou não nas máquinas (PINEDO, 2005). Zhang et al. (2019) trazem que o sequenciamento depende fortemente da demanda, do número de máquinas,

complexidade do sistema de produção, medição de desempenho, característica do ambiente de produção, das operações de processamento e restrição dos recursos. Já os algoritmos de sequenciamento são divididos conforme Figura 1, sendo detalhada nas seções subsequentes.

Figura 1 - Algoritmos de Otimização para Sequenciamento



Fonte: Retirado de Zhang et al. (2019)

2.2.1 Métodos de otimização exatos

Métodos de otimização exatos empregam programação matemática e pesquisa operacional para obterem a solução ótima. Em 1954, foi desenvolvida um conjunto de regras, conhecidas como regras de Johnson, com o objetivo de diminuir o makespan de ordens de produção que passavam por duas máquinas. Já em 1959, Harvey Wagner apresentou um conjunto de técnicas de programação matemática para resolver problemas de programação em Job Shop de forma otimizada. Entretanto, outros pesquisadores concluíram que as programações matemáticas que visam obter a solução ótima, exigiam um alto tempo de processamento dos computadores e/ou péssimas qualidades de resolução. Assim sendo, os pesquisadores voltaram suas atenções para os métodos enumerativos para obter as

soluções ótimas, destacando-se o método Branch e Bound (B&B) (ZHANG et al., 2019).

Manne (1960) apresentou uma combinação de abordagens de programação discreta inteira e linear, propondo uma formulação matemática que inclui uma função objetivo linear, restrições lineares e variáveis inteiras binárias. Ela contém um número menor de variáveis e é mais eficiente do que o método proposto por Harvey Wagner. Em 1975, McMahon e Florian apresentaram uma aplicação do método B&B para identificar os trabalhos com datas de entregas críticas e, em seguida, determinar todos os outros trabalhos com prazos mais longos (ZHANG et al., 2019).

Estudos posteriores concentraram-se em aprimorar o método B&B. Vale a pena observar que os métodos de otimização exata trazem a solução ótima em um tempo viável para determinados problemas de sequenciamento. Entretanto, conforme se aumenta a complexidade, um maior tempo é exigido e, em muitos casos, torna-se inviável a utilização dos métodos exatos (ZHANG et al., 2019).

2.2.2 Métodos aproximados

Segundo Zhang et al. (2019), os métodos aproximados, a seguir apresentados, começaram a ser mais aplicados a partir da década de 80, devido aos avanços tecnológicos e dos algoritmos utilizados. Sendo classificados em:

- Métodos construtivos. São métodos que possibilitam identificar rapidamente a solução dos problemas de sequenciamento. São compostos por três métodos diferentes: regras de sequenciamento, algoritmos inseridos, heurísticas baseadas em gargalo. As regras de sequenciamento utilizam-se de “classificações” das ordens de produção com base em algum “indicador”, isto é, calculam-se valores para a ordem de produção de acordo com uma determinada regra e sequenciam-se as ordens de produção com base no ranqueamento. Alguns exemplos são a priorização pelo menor tempo de processamento (*Shortest Processing Time* - SPT), pela ordem de chegada (FIFO) etc. A vantagem das regras de sequenciamento consiste em fornecer boas soluções com um baixo custo computacional. Os estudos de regras de sequenciamento concentram-se em escolher as melhores regras para um

determinado problema ou objetivo. Por ser a técnica escolhida na presente pesquisa, a Seção 2.2.3 retomará o assunto. Já os algoritmos de inserção foram desenvolvidos para resolver o problema do caixeiro viajante. Por fim, os métodos de heurísticas baseadas em gargalo foram aplicados pela primeira em 1988, por Adams et al., relaxando e decompondo o problema em máquinas separadas, sendo escolhida uma máquina para ser o gargalo em cada iteração e a sequência do processamento de todos os trabalhos no gargalo foi corrigida, para que o processo possa ser repetido até que todos os pedidos sejam corrigidos.

- Métodos de inteligência artificial. Estes métodos têm como objetivo imitar a inteligência humana no computador. Dentre os estudos sobre tais métodos, destacam-se o de Simon e Takefuji (1988), que propuseram um modelo bidimensional de matriz de neurônios com estratégias de codificação para minimizar a soma de todos os tempos iniciais da última operação das ordens de produção.
- Métodos de pesquisa local. Esses métodos consistem em uma função ou um conjunto de funções a serem otimizadas, em uma estratégia de pesquisa das soluções e em um conjunto finito de soluções. Dentre os algoritmos utilizados, têm-se *greedy randomized adaptive search procedure (GRASP)*, *genetic local search (GLS)*, *large step optimization (LSO)*, *iterative improvement (IM)*, *threshold accepting (TA)* etc.
- Métodos de meta heurística. São algoritmos matemáticos que consistem em estratégias de buscar a solução em um conjunto de soluções viáveis, incorporando mecanismos para evitar máximos e mínimos locais. Dentre eles, destacam-se algoritmo de enxame de partículas, algoritmo de evolução diferencial e algoritmo do vagalume.

2.2.3 Regras de sequenciamento da produção

Conforme se aumenta o número de máquinas e ordens, o problema de sequenciamento fica mais complexo. Por exemplo, Corrêa e Corrêa (2017)

comentam que um computador que analise 100.000 sequências alternativas por segundo, levaria 33.791 milhões de anos para analisar todas as combinações de oito itens em cinco máquinas. Assim sendo, uma forma para resolver esse problema são as regras de sequenciamento, as quais buscam otimizar determinados objetivos de desempenho, tais como percentual de ordens completadas no prazo; tempo de atravessamento médio; níveis de estoque no sistema; e utilização dos recursos (CORRÊA; CORRÊA, 2017; WATANABE; IDA; GEN, 2005).

Respaldando-se em Pinedo (2005), Ribeiro e Cordeiro (2020), Gaither e Frazier (2002), Chan e Chan, (2004), Tubino (2007), Suresh e Sridharan (2007), Da Silva et al. (2012), Ahmed et al. (2016), Corrêa e Corrêa (2017), Thürer e Stevenson (2018 a), Soman, Van Donk e Gaalman (2006), Pool, Wijngaard; Van Der Zee (2011) e Hausman; Scudder (1982):

- FIFO (*First In First Out*). A prioridade de processamento da ordem de produção é dada em função da sua entrada, sendo a ordem mais antiga a primeira a ser processada. Esta regra busca minimizar o tempo de permanência das ordens no chão de fábrica.
- LIFO (*Last In First Out*). Assim como o FIFO, a prioridade está relacionada com a entrada da ordem no chão de fábrica. Entretanto, ela prioriza a ordem mais nova no chão de fábrica, ou seja, a “última ordem a entrar é a primeira a sair”. Sua utilização é rara, uma vez que ela não busca otimizar nenhum objetivo de desempenho da organização.
- SPT (*Shortest Processing Time*). Esta regra sequencia as ordens de produção do menor tempo de processamento para o maior, estes tempos de processamento podem ser o tempo de processamento em uma determinada máquina ou o tempo total nas máquinas restantes. Ela tem como objetivo reduzir o tamanho médio das filas e aumentar o fluxo, uma vez que ela processa as ordens “mais rápidas” primeiramente. Entretanto, ordens maiores e/ou mais demoradas normalmente aguardam mais tempo nas filas, o que pode prejudicar, por exemplo, a disponibilidade. Assim sendo, há variações dessa regra que incorporam limitantes para o tempo de espera dessas ordens.
- LPT (*Longest Process Time*). Seu sequenciamento também parte dos tempos de processamento. Entretanto, sequencia-se do maior tempo de

processamento para o de menor tempo de processamento. Uma das justificativas para utilização dessa regra consiste na redução dos Setups.

- EDD (*Earliest Due Data*). A prioridade é uma função das datas de entrega, isto é, as ordens com os prazos mais curtos de entrega (datas prometidas mais próximas) são priorizadas. Os objetivos principais dessa regra são reduzir o máximo atraso das ordens e o atraso médio no sistema.
- LS (*Least Slack*). Regra é baseada no cálculo da data de entrega menos o tempo de processamento das ordens de produção que estão na fila, priorizando a regra com menor valor. Ela objetiva reduzir os atrasos das ordens de produção.
- LWQ (*Least Work Next Queue*). A prioridade é dada às ordens que vão para as máquinas com a menor fila. O intuito é evitar que as máquinas fiquem paradas por falta de trabalho.
- CR (*Critical Ratio*). É calculado pela razão entre o tempo restante para entrega e o tempo total restante de produção, ou seja, quanto maior o CR, mais folga se tem para concluir o pedido. Logo, a prioridade é dada pelo menor valor obtido. Vale a pena observar que essa regra combina as regras EDD e SPT.
- RO (*Run-Out Time*). Todos os pedidos são priorizados de acordo com a relação entre o estoque de produtos acabados e a taxa de demanda.

$$RO = \frac{FGI}{demand\ rate} \quad (1)$$

Dentre as regras apresentadas, aquelas que encontram aplicação em ambientes MTS são aqueles que não trabalham com datas compromissadas de finalização em seus cálculos, como as regras FIFO, LIFO, LPT e SPT. Como o S-DBR/MTA busca explorar a demanda, um dos objetivos é aumentar o fluxo e reduzir o *lead time*, permitindo reagir as demandas e ter reposições mais frequentes. Logo, as regras que serão analisadas no presente trabalho serão o FIFO e as variações do SPT (dando prioridade máxima à ordens com estoque final igual a zero e uma outra variação, dando prioridade máxima quando o *target level* for menor que 1/3), uma vez que têm em comum esse mesmo objetivo.

Além das formas de sequenciamento dependerem do ambiente em que a empresa está inserida, Pinedo (2005) comenta que há diferença entre sequenciar as ordens de produção considerando somente as regras de sequenciamento e um contexto onde se tem o planejamento da produção, uma vez que o planejamento pode considerar múltiplos objetivos em sua programação inicial (que pode afetar o desempenho das regras de sequenciamento), necessitando de uma coordenação entre ambos.

2.3 TEORIA DAS RESTRIÇÕES: BREVE HISTÓRICO

A Teoria das Restrições foi criada pelo físico israelense Dr. Eliyahu Moshe Goldratt, tendo como antecessor o Optimized Production Technology (OPT), um software para otimização da produção baseado em programação finita. Uma das principais barreiras para a implementação desse software era a forma como as empresas mediam suas eficiências (de forma local), liberando trabalhos para que os operadores não ficassem “desocupados” (WATSON; BLACKSTONE; GARDINER, 2007, IKEZIRI, 2018; IKEZIRI et al., 2019). Watson, Blackstone, Gardiner (2007) apresentam as nove regras fundamentais do OPT:

- i) Não balancear as capacidades e, sim, o fluxo de produção;
- ii) O que define a capacidade dos recursos não é sua capacidade potencial e, sim, a restrição do sistema;
- iii) Ativação e utilização não são sinônimas;
- iv) Qualquer tempo perdido no gargalo é perdido no sistema como um todo;
- v) Uma hora economizada em um recurso não gargalo é uma ilusão.
- vi) O que determina o desempenho do sistema e os estoques é o gargalo.
- vii) Os lotes de transferência podem, e muitas vezes deveriam, ser diferentes do lote de processamento.
- viii) Os lotes de processamento deveriam ser variáveis e não fixos.
- ix) As programações devem ser estabelecidas analisando todas as restrições simultaneamente. Sendo o *lead time* resultados do planejamento e não predeterminado.

Os conceitos do OPT foram aprimorados e incorporados ao método de planejamento *Drum Buffer Rope* (DBR) e controle da TOC (BM). Tais métodos foram trazidos no livro “A meta” escrito por Goldratt e Cox em 1984. Algumas importantes contribuições da obra é a definição de restrição - tudo o que impede as organizações de alcançarem a meta organizacional - e a proposição de um processo estruturado de melhoria contínua de focalização baseado em 5 passos (identificar a restrição; decidir com explorá-la; subordinar os demais elementos à restrição; elevar a capacidade da restrição; e voltar ao passo 1, evitando a inércia) (WATSON; BLACKSTONE; GARDINER, 2007; IKEZIRI, 2018; GOLDRATT; COX, 2014; ; IKEZIRI et al., 2019).

Goldratt percebeu que a contabilidade de custos era uma grande vilã da produtividade das organizações e de seus conceitos, pois incentivaria a superprodução como forma de reduzir o custo do produto (WATSON; BLACKSTONE; GARDINER, 2007; GOLDRATT; COX, 2014; IKEZIRI et al., 2019). Como alternativa, Goldratt recomendou três medidas de desempenho que deveriam nortear as decisões gerenciais (ganho - taxa na qual a organização gera unidades da meta; inventário - todo o dinheiro investido na aquisição de elementos para possibilitar a venda; e despesa operacional - todo o dinheiro que é gasto para gerar unidades da meta (GOLDRATT; COX, 2014; BARNARD; IMMELMAN, 2013; IKEZIRI et al., 2019).

Em 1990, a TOC foi aplicada à gestão de projetos, entretanto, essa aplicação foi foco de estudo somente anos mais tarde quando Goldratt publicou o livro corrente crítica (WATSON; BLACKSTONE; GARDINER, 2007; GOLDRATT, 1997). O método “Corrente Crítica” prega que as proteções sejam incorporadas, na forma de pulmão de tempo, no projeto como um todo, além de considerar que a capacidade dos recursos é finita, isto é, um determinado recurso não pode realizar várias atividades em simultâneo (WALKER, 2013; BUDD; CERVENY, 2013; BLACKSTONE; GARDINER, 2007; GOLDRATT, 1997; IKEZIRI et al., 2019).

Em 1994, Goldratt publicou o livro “Não é Sorte” (GOLDRATT, 1984), que aborda os Processos de Raciocínio da TOC. Basicamente, eles buscam responder as perguntas “o que mudar?”, “para o que mudar?” e “como causar e sustentar a mudança?” (LOWALEKAR; RAVI, 2017; KIM; MABIN; DAVIES, 2008; GOLDRATT, 1990; IKEZIRI, 2018; IKEZIRI et al., 2019).

Em 2009 é publicado o livro “Não é óbvio?” (GOLDRATT, 2009), que discute a aplicação dos conceitos da TOC em ambientes de varejo e em cadeias de suprimentos para lidar com baixa acuracidade das previsões, estoques elevados, altos *lead times* e falta de alguns itens e sobra de outros, dentre outros problemas (GUPTA; ANDERSEN, 2018; HUANG et al., 2014; IKEZIRI et al., 2019).

2.4 TEORIA DAS RESTRIÇÕES E SEUS PRINCÍPIOS

A Teoria das Restrições (TOC) constitui-se em uma filosofia de gestão holística, a qual estabelece que por mais complexo que um sistema pareça, no fundo ele é simples, pois poucos ou até mesmo um recurso (denominado de restrição) governa o desempenho do sistema como um todo e limita sua capacidade de gerar unidades da meta (TOCICO Dictionary, 2012.). Goldratt (2014), traz que a TOC tem como princípios:

- 1) Simplicidade inerente. Por mais complexo que um determinado sistema pareça, no fundo ele é simples, uma vez que grande parte dos recursos tem capacidade superior à demandada. Logo, poucos fatores, ou até mesmo um único, afeta significativamente seu desempenho. Ou seja, um sistema simples é aquele em que “menos pontos têm de ser tocados” para que seu desempenho global seja impactado.
- 2) Harmonia. Baseia-se no princípio da física de que “a natureza é harmônica”, ou seja, um conflito entre duas partes, onde ambas visam o mesmo objetivo comum, é oriundo de um pressuposto errado e, se eliminado esse pressuposto, obtêm-se soluções do tipo ganha-ganha.
- 3) Respeito. As pessoas são inerentemente boas e seus maus comportamentos podem ser oriundos de pressupostos e interpretações erradas da realidade, e não de desvio de caráter.
- 4) Nunca diga “eu sei”. A acomodação e a busca contínua pela otimização de uma solução bloqueiam o processo de melhoria contínua. Ou seja, após implementar uma boa solução ou eliminar uma restrição, não se deve buscar, indefinidamente, o ótimo (“polir a solução”), pois os ganhos incrementais

diminuem. Deve-se, ao contrário, buscar novas oportunidades com potencial de melhorar significativamente o resultado da organização.

2.5 OS 5 PASSOS DE FOCALIZAÇÃO

Baseado no princípio de simplicidade inerente da TOC, onde a restrição limita o ganho do sistema, Goldratt e Cox (2014) trazem uma ferramenta que permite a focalização, subordinação dos demais recursos e eliminação da restrição. Os cinco passos de focalização (POOGI), conforme expõe Srikanth (2013), Bacelar-Silva et al. (2021), Liu, Shen e Zhang (2021) e Azaria, Ronen e Hamir (2023), são:

Passo 1. Identificar a restrição. A restrição é o elo mais fraco do sistema, ou seja, o que limita o ganho e impede melhoras significativas no sistema. Logo, o primeiro passo é identifica-la.

Passo 2. Decidir como explorar a restrição. Isto é, aproveitar esse recurso de tal forma que máxime o desempenho operacional, aumentando o ganho, diminuindo os estoques e despesas.

Passo 3. Subordinar tudo à decisão anterior. Consiste em “amarrar” todos os recursos à decisão de como explorar a restrição, para garantir a maximização dos desempenhos operacionais.

Passo 4. Elevar a capacidade da restrição do sistema.

Passo 5. Não deixe que a inércia se torne a restrição. Quando se a restrição for eliminada nesse processo, volte ao passo 1.

2.6 DRUM BUFFER ROPE

O Drum-Buffer-Rope clássico ou só DBR é um método de planejamento da produção proposto pela TOC. Ele parte de um dos princípios básicos da TOC, a simplicidade inerente, ou seja, por mais complexo que um determinado sistema pareça, no fundo ele é simples, uma vez que a maioria dos recursos têm capacidade

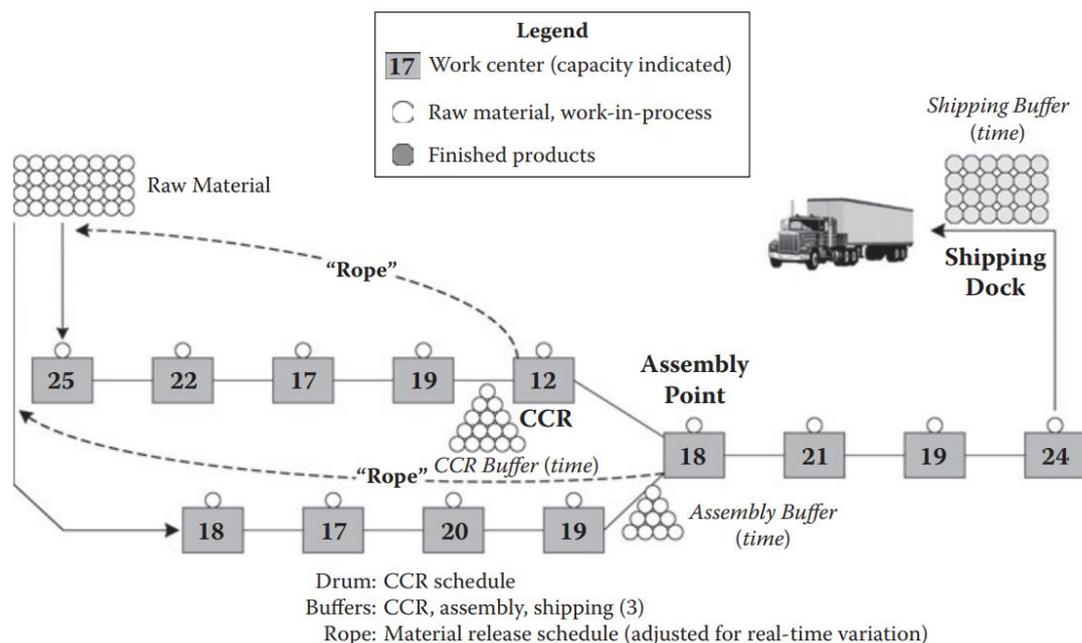
excedente e poucos, muitas vezes somente um elemento, é crítico e deve ser planejado “de perto”. Os demais por terem capacidade excessiva não precisam ser gerenciados detalhadamente e devem ser subordinados a restrição, que limita o desempenho do sistema. O DBR clássico, assume-se que principal restrição do sistema é um recurso interno, uma vez que ele possui uma capacidade inferior a demanda de mercado ou se não for programado detalhadamente pode se configurar um RRC ativo (gargalo). Logo, se se liberar material a uma taxa muito maior que a capacidade do RRC, haverá acúmulo de estoque desnecessário nas etapas anteriores, caso liberemos material a uma taxa inferior à sua capacidade estaremos perdendo capacidade e ganho no sistema. Assim sendo, ele regula o fluxo e dita o ritmo para o chão de fábrica. Portanto, o drum (tambor), que dita o ritmo para o sistema como um todo, é a programação detalhada do RRC. Devendo ser reprogramado sempre da entrada de novos pedidos de clientes, ele parte da demanda verifica a carga da produção da demanda sobre o RRC e determina o número de setups que será realizado, a sequência e volume de produção (SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009; SRIKANTH, 2013; SOUZA; BAPTISTA, 2010; THÜRER et al., 2017; THÜRER; STEVENSON, 2018a; TELLES et al., 2020; ZUPANCIC; BUCHMEISTER; ALJAZ, 2017; LIU; SHEN; ZHANG, 2021; YUE et al., 2022).

Entretanto, todo planejamento está sujeito a incertezas e flutuações estatísticas. Sendo fundamental a proteção contra variabilidades, para tanto a TOC propõe uma proteção na forma de tempo, denominado buffer (ou pulmão) (TOCICO Dictionary, 2012; SRIKANTH, 2013), que pode ser entendido como uma estimativa liberal do lead time de fabricação entre dois pontos de controle (SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009). Logo, em um fluxo de produção há quatro pontos fundamentais de controle, que são a liberação de materiais para o chão de fábrica, o RRC, recurso que deve ser cuidadosamente planejado e monitorado, a montagem (para garantir que peças que não passem pelo RRC cheguem na montagem para que esta não fique ociosa e possa comprometer as entregas) e a expedição. Portanto, há três tipos pulmões que podem ser considerados: pulmão de restrição (entre o RRC e a liberação de material), o pulmão de montagem (entre a liberação de materiais que não passam pelo RRC e a operação de montagem) e o pulmão de expedição (entre o RRC e a expedição ou entre a operação de montagem e a expedição) (SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009; SRIKANTH, 2013;

SOUZA; BAPTISTA, 2010; THÜRER et al., 2017; THÜRER ; STEVENSON, 2018a; TELLES et al., 2020; ZUPANCIC; BUCHMEISTER; ALJAZ, 2017; LIU; SHEN; ZHANG, 2021; YUE et al., 2022).

Por fim, a rope (corda) é o mecanismo que permite subordinar todos os recursos à decisão de como explorar melhor a restrição. “Amarrando” todos os recursos aos poucos pontos de controle, monitorando e controlando a liberação de material para o chão de fábrica, evitando o acúmulo de WIP desnecessário e permitindo estabelecer um fluxo mais fluído no sistema e a priorização correta das ordens de produção, uma vez que “somente o necessário” está no sistema e será processado (SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009; SRIKANTH, 2013; SOUZA; BAPTISTA, 2010; THÜRER et al., 2017; THÜRER ; STEVENSON, 2018a; TELLES et al., 2020; ZUPANCIC; BUCHMEISTER; ALJAZ, 2017; LIU; SHEN; ZHANG, 2021; YUE et al., 2022).

Figura 2 - Representação visual DBR



Fonte: Retirado de Schragenheim, Dettmer e Patterson (2009)

2.6.1 Detalhamento do Algoritmo

Respaldando-se em Thüerer et al., 2017; Thüerer e Stevenson (2018a), Telles et al. (2020), Zupancic, Buchmeister, Aljaz (2017), Liu; Shen; Zhang, (2021), Yue et al. (2022), Srikanth (2013), Schragenheim; Dettmer; Patterson (2009) e Schragenheim; Dettmer (2000), esta seção detalha o funcionamento do sistema DBR.

O processo inicia-se com a determinação do que será produzido e a quantidade, sendo por previsão (ambientes MTS) ou pela carteira de pedidos (ambientes MTO). Após isso, tem-se que definir o tambor (programação detalhada do RRC), o RRC pode ser obtido através do cálculo da carga necessária dos pedidos sobre os recursos, desconsiderando os setups, ou seja, para um determinado recurso m , que processa I diferentes itens, cada qual com uma quantidade necessária $Qtde_i$ pode ser expresso matematicamente por

$$carga\ no\ recurso\ m = \frac{\sum_{i=1}^I tpu_{it} \times Qtde_i}{T_{disponível}} = \frac{T_{necessário}}{T_{disponível}} \quad (2)$$

Sendo o RRC o recurso com maior carga. Além disso, vale a observação que caso tenhamos mais de um recurso m , o seu tempo disponível deve ser multiplicado pela quantidade de recursos.

Após isso, obtém-se o tempo que pode ser gasto com setups da seguinte forma:

$$T_{setup} = T_{disponível} - T_{necessário} \quad (3)$$

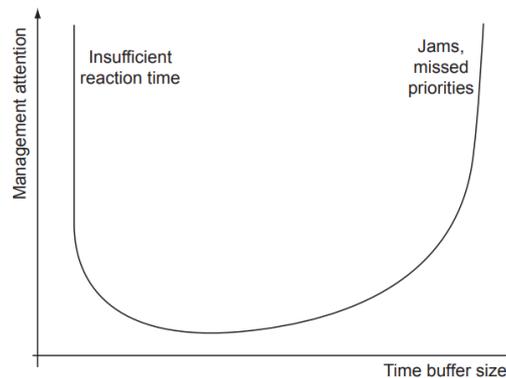
Em seguida, define-se o número de setups (N_{setup}) que poderão ser realizados através da divisão do tempo total que pode se gastar com setup pelo tempo de setup do recurso.

Com base na data de entrega, na quantidade, na carga sobre o RRC e no número de setups, elabora-se o tambor. Onde define-se qual a sequência e a quantidade que serão produzidos, sendo o início previsto de um determinado item dado pelo início previsto de seu predecessor adicionando a multiplicação entre a quantidade que será processada e o tempo de processamento. Já para os materiais

que não estão envolvidos com o RRC, a restrição é a demanda e sua programação deve ser realizada utilizando os pedidos dos clientes.

O próximo passo consiste no estabelecimento do pulmão. Níveis baixos (liberação das ordens “mais tarde do que se deveria”) faz com que o sistema aumente sua interdependência e tenha pouca proteção contra variabilidades, logo as ordens exigirão um monitoramento e controle mais intenso, pois o sistema fica mais sensível e qualquer flutuação estatística ou evento aleatório poderá prejudicar o desempenho do sistema como um todo. Ao passo que quando se mantém um WIP muito elevado (liberação das ordens “mais cedo que se deveria”), faz com que o sistema fique congestionado, as prioridades confundidas, as filas aumentam, há uma maior dificuldade de se identificar a causa raiz do problema e gerar melhorias. Entretanto, não há necessidade de se buscar o ótimo, somente manter o WIP ou o Lead Time em uma faixa relativamente ótima, como a Figura 3.

Figura 3- Relação entre tamanho do pulmão e esforço gerencial



Fonte: Retirado de Goldratt (2009)

Em situações práticas podemos defini-lo como metade do lead time de produção antes da implementação do DBR. Caso não haja uma referência, pode-se considerar de 10 a 20 vezes do tempo de processamento, ou seja, o tempo de processamento corresponde a cerca de 5 a 10% do pulmão.

Definidos os pulmões de montagem, expedição e restrição, o próximo passo é definir a corda (a liberação de material). Considerando DLB_m a data de liberação. Para os materiais processados pelo RRC, a sua liberação é obtida por

$$DLB = \text{Data Início de Processamento RRC} - \text{Pulmão Restrição} \quad (4)$$

Já para os materiais que não são processados pelo RRC, mas são montados em conjunto, a liberação pode ser obtida como

$$DLB = \text{Data Entrega do Pedido} - (\text{Pulmão Expedição} + \text{Pulmão Montagem}) \quad (5)$$

Por fim, para os materiais que não são tem nenhuma relação com o RRC, sua liberação é dada por

$$DLB = \text{Data Entrega do Pedido} - (\text{Pulmão Expedição}) \quad (6)$$

2.6.2 Programação mais simples do RRC

A programação do RRC pode ser feita programando o para trás, conforme visto anteriormente ou de uma forma mais simples, fundamentada em uma programação para frente. Ou seja, inicia-se com o pedido mais antigo a ser processado pelo RRC, atribui o tempo de setup e de processamento para todas unidades e prossegue-se com o algoritmo das datas mais urgentes de entrega para as menos urgentes avançando no tempo. Esse algoritmo normalmente é mais recomendado em implantações manuais, ou seja, onde não há um sistema de computação eficiente operando. Entretanto, ele apresenta um bom desempenho, uma vez que quando o RRC está sobrecarregado ele traz os mesmos resultados que o algoritmo mais complexo de carregamento para trás e quando o RRC não está sobrecarregado, o algoritmo mais simples só antecipa as produções um pouco mais que o necessário, aumentando o WIP (DETTEMER; SCRANGENHEIM, 2000).

2.7 SIMPLIFIED DRUM BUFFER ROPE MTO

Uma diferença fundamental entre o DBR clássico e o S-DBR está na consideração da restrição do sistema, para o DBR clássico era um recurso interno. Já para o S-DBR a principal restrição do sistema é a demanda, uma vez que em mercados onde se tem mais de 1 fornecedor, os clientes possuem fornecedores alternativos e caso um dos fornecedores não tenha capacidade para atendimento e/ou o cliente enxergue mais valor em outro fornecedor, ele irá trocar. Assim sendo, a restrição de curto prazo de capacidade torna-se uma restrição de mercado. Além disso, quando o potencial de mercado é superior a capacidade do fornecedor, ele pode optar por soluções que aumentem seu ganho sem aumentar a capacidade, por exemplo, terceirização e aumentos de preço. Outra premissa que o S-DBR assume é que pequenas mudanças na sequência de processamento no RRC não influenciam significativamente o desempenho do sistema, uma vez que a corda libera somente o trabalho “necessário” no chão de fábrica, evitando o processamento de materiais não necessários no curto prazo, o que pode comprometer as entregas e faz-se necessário a programação detalhada. Portanto, mesmo o RRC deve ser submetido as exigências do mercado. Logo, ao invés de 4 pontos de controle (liberação de material, RRC, montagem e mercado) passamos a ter somente 2 pontos de controle, liberação e mercado, trabalhando somente com 1 pulmão (de produção), que é uma previsão do tempo necessário entre a liberação de um pedido e sua conclusão (SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009; E. SCHRAGENHEIM, 2013a; TELLES et al., 2022).

Além disso, o planejamento detalhado do RRC é substituído pela carga planejada, onde monitora-se o acúmulo de carga oriundo do processamento de todos os pedidos (liberados ou esperando liberação) que serão processados pelo RRC em um determinado horizonte de tempo. Permitindo monitorarmos se o RRC está se tornando um gargalo (RRC ativo) e tomar medidas de curto prazo tais como horas extras e terceirização e de longo prazo como investimentos em capacidade e adicionar turnos extras. Matematicamente, considerando $tpurrc_{it}$ e $Qtde_{it}$, respectivamente o tempo de processamento unitário no RRC e a quantidade do produto i , sendo processado até um tempo T , ela pode ser expressa por

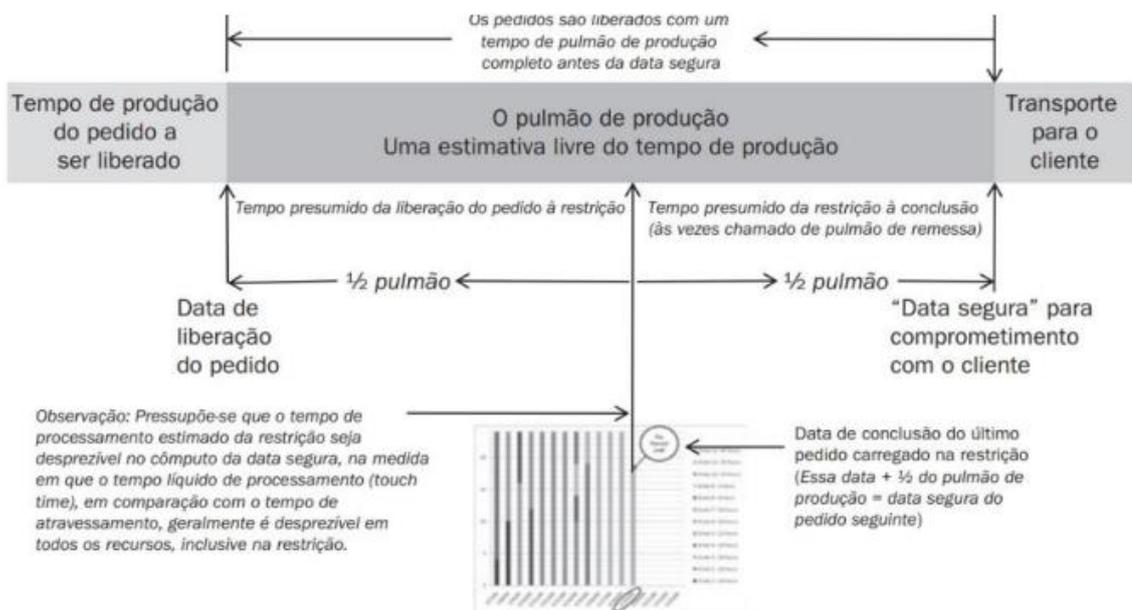
(SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009; SOUZA; BAPTISTA, 2010; E. SCHRAGENHEIM, 2013a; TELLES et al., 2022).

$$carga\ planejada\ (T) = \sum_{i=1}^I tpu\ rrc_{it} \times Qtde_{it}, \forall t \leq T \quad (7)$$

Além disso, a carga planejada permite avaliar as datas seguras de conclusão dos pedidos, que é a soma da carga planejada, do tempo de processamento necessário e ½ pulmão de produção (SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009; SOUZA; BAPTISTA, 2010; E. SCHRAGENHEIM, 2013a).

A liberação de materiais é realizada um pulmão de produção antes da data segura de entrega. Isto é “só libere a ordem de produção para o chão de fábrica um pulmão de produção para sua conclusão”. Esse mecanismo garante que tenhamos redução do WIP e que o RRC não fique sobrecarregado com “trabalhos não necessários no curto prazo” (SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009; SOUZA; BAPTISTA, 2010; E. SCHRAGENHEIM, 2013a; TELLES et al., 2022). A Figura 4 representa uma ilustração desse processo.

Figura 4 – Representação do pulmão, datas de liberação e de entrega



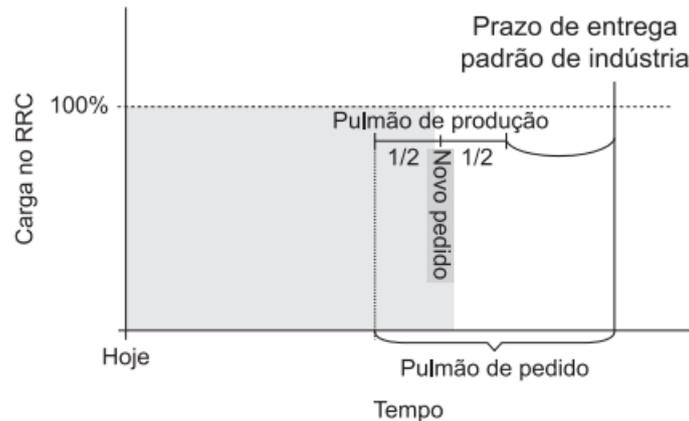
Fonte: Schragenheim (2013a)

2.7.1 Lidando com pedidos urgentes em ambientes planejados pelo S-DBR

Assim como no DBR, o primeiro passo na implantação do S-DBR é estabilizar as operações, permitindo um alto desempenho nas entregas em um curto intervalo de tempo. Ou seja, eliminar as prioridades conflitantes, as instruções contraditórias e pressões para produção de pedidos que a empresa não tem capacidade. Em suma, que as operações tenham ações coordenadas e busquem o mesmo objetivo. Para isso é fundamental que as empresas adequem o WIP (working-in-process), como visto anteriormente, níveis baixos implicam em pouca proteção contra variabilidades e aumento da interdependência e níveis altos de WIP, congestionam o sistema, as prioridades ficam confundidas, as filas aumentam, aumenta a complexidade de se identificar a causa raiz do problema e gerar melhorias. Além disso, é de suma importância a correta priorização, sendo proposto o Buffer Management (BM), que através da sua sequência de cores permite a todas as operações sequenciarem os pedidos e gerenciarem suas filas, que será detalhado posteriormente (SOUZA; BAPTISTA, 2010; GOLDRATT 2009; E. SCHRAGENHEIM, 2013a; SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009). Ambos permitem que haja uma redução no lead time e um aumento no desempenho de entrega, proporcionando um aumento no número dos pedidos, uma vez que os clientes ficarão mais satisfeitos, realizando outras compras com a empresa e indicando-a para outros consumidores. Além disso, a força de vendas ficará menos carregada acompanhando pedidos e lidando com clientes insatisfeitos e permitirá um maior foco em aumentar as vendas. Com a redução no lead time de produção proporcionada, muitas empresas passam a ter um pulmão de produção menor que o lead time do setor, havendo capacidade protetiva e a possibilidade de aceitar pedidos urgentes. Isto é, se a empresa para um determinado pedido prometer data de entrega igual ao prazo padrão no setor (que é maior que seu pulmão de produção), cria-se um pulmão de pedido, conforme Figura 5. Esse pedido certamente ficará na região verde por um período de tempo maior, permitindo que outros pedidos mais urgentes passem na sua frente, sem comprometer a sua entrega. Logo, tem-se duas vantagens, as quais são não desperdiçar capacidade no RRC, uma vez que não haja pedidos mais urgentes esse pedido será processado sem deixar o recurso ocioso e mantém-se as prioridades.

(SOUZA; BAPTISTA, 2010; GOLDRATT 2009; SCHRAGENHEIM, 2013a; SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009; SCHRAGENHEIM, 2006).

Figura 5 - Representação do Pulmão de Pedido



Fonte: Retirado de Souza e Batista (2010).

Para se trabalhar com pedidos urgentes Schragenheim (2006) estabeleceu um método fundamentado no dimensionamento de capacidade, calculando-se a carga planejada dos pedidos regulares como parte da capacidade total do RRC, por exemplo, 80%, o excedente é utilizado para os pedidos urgentes ou que exigem respostas rápidas. Para um melhor entendimento desse método, os conceitos serão trabalhados através do exemplo numérico trazido por Souza e Batista (2010), onde uma empresa trabalha um turno de oito horas, cinco dias por semana, sendo o prazo padrão do setor 160 horas (20 dias). Além disso, ela trabalha com entregas em 10 dias (80 horas) ou em 5 dias (40 horas) e seu pulmão de produção (*PP*) é de 5 dias. A carga atual sobre o RRC é 90 horas, considerando que 75% da capacidade é para pedidos regulares. Logo, um pedido regular poderia ser entregue em

$$Data entrega regular = Carga RRC \times \%Carga Regular + \frac{1}{2} PP \quad (8)$$

$$Data entrega regular = (90 \times 0,75) + \frac{1}{2} 5 = 15 + 2,5 = 17,5 dias \quad (9)$$

Isto é, a data de entrega é 2,5 dias menor que o prazo padrão do setor. Entretanto, como se trata de um pedido regular, é sugerido a empresa que siga as diretrizes mercadológicas e prometa 20 dias. Mas a data de liberação do pedido deve ser daqui 12,5 dias, ou seja, meio pulmão antes da carga planejada. Já os pedidos de resposta rápida (RR), de 10 dias ou 5 dias, serão aceitos baseados na capacidade de 25%. Sendo a liberação de material um PP antes da data de entrega. Para verificar se é factível atender aos pedidos RR, calcula-se a carga planejada do RRC dos pedidos a serem entregues na data desejada, para tanto a carga deve ser menor que a data almejada menos meio pulmão de produção. Por exemplo, se o RR analisado é para daqui a 5 dias, a carga planejada para todos os pedidos que tem que ser entregues até essa data, deve ser menor ou igual a $5 - 2,5 = 2,5$ dias. Isso garante a confiabilidade dos prazos, pois mantemos a proteção necessária (SOUZA; BATISTA, 2010).

Apesar desse método lidar com pedidos RR e ser simples, a aceitação destes pedidos é feita sem uma verificação prévia da capacidade, exigindo um maior controle do chão de fábrica do BM e uma maior gestão de capacidade de curto prazo para lidar com eles (SOUZA; BATISTA, 2010).

Souza e Batista (2010) sugerem uma outra abordagem, baseada no seguinte princípio: a aceitação dos pedidos RR, posterga o início e a conclusão dos pedidos com prazos posteriores. Isto implica que o pedido pode ser aceito, se, e somente se, sua carga não consumir a folga (ST) dos pedidos já aceitos. Assim sendo, o algoritmo inicia-se com o cálculo da folga dos pedidos regulares, dada pela seguinte fórmula.

$$ST_i = DD_i - CP - \frac{1}{2}PP \quad (10)$$

Onde, ST_i é a folga do pedido i , DD_i , CP é a carga planejada no RRC e PP o pulmão de produção.

Após isso, quando o setor de vendas receber um pedido com entrega rápida RR_j , deve-se verificar a carga imposta por este no RRC (C_j). Em seguida, para todos os pedidos aceitos e com prazos posteriores é subtraído da sua folga (ST_k) o C_j . Matematicamente, podemos calcular a folga do pedido com entrega rápida j em relação aos pedidos posteriores k ($STRR_{jk}$), da seguinte forma:

$$STRR_{jk} = ST_k - C_j, \forall 1 \leq k \leq m \quad (11)$$

Logo, o pedido com entrega rápida RR_j pode ser aceito se todos os $STRR_{jk} \geq 0$. Caso seja aceito, atualiza-se a folga dos pedidos subtraindo a carga que o RR_j impõe sobre o RRC, isto é, $ST_k = STRR_{jk}$.

E a folga do pedido RR_j tem seu valor dado por:

$$STRR_j = DD_j - CPQ_j - \frac{1}{2}PP \quad (12)$$

Sendo DD_j e CPH_j , respectivamente, a data de entrega e a carga planejada sobre o RRC que serão entregues em um horizonte de tempo Q inferior a DD_j . Vale a pena ressaltar que, segundo Souza e Batista (2010), o menor prazo a ser prometido deve ser o pulmão de produção, para proteger e ter alta confiabilidade da data de entrega. Entretanto, dado que o método DBR (proposto por Goldratt) recomenda que é possível entregar pedidos quando há somente metade do pulmão de expedição, o método do S-DBR estabelece que é possível entregar pedidos em $\frac{1}{4}$ do PP. Para tanto, é necessário que menos de 10% estejam nessa situação, haja uma gestão de capacidade de curto prazo e o cliente e a empresa estejam cientes dos riscos. Por fim, definidas as datas de entrega para os clientes, a liberação de material é realizada um PP.

2.8 SIMPLIFIED DRUM BUFFER ROPE MTA

2.8.1 O ambiente MTA

Como visto, seguir a estratégia make-to-order (MTO) representa inúmeros benefícios para a empresa, uma vez que ela permite oferecer uma variedade maior de produtos, ter flexibilidade, “adaptar-se” melhor às novas tendências de mercado,

operar com níveis de estoques e custos menores. Contudo, a escolha da estratégia de operação não é definida somente pela empresa. Quando os leads times de produção são maiores que o tempo de espera aceitável pelo consumidor ou quando a demanda apresenta picos superiores à capacidade do RRC de satisfazê-la no prazo, a empresa se vê obrigada a operar na forma make-to-stock (MTS) (SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009; SOUZA; PIRES, 2014; SATO et al., 2023; HAEUSSLER; NEUNER; THÜRER, 2023; COSTA et al., 2023; IKEZIRI et al., 2023).

Em suma, os ambientes MTS visam manter estoques de produtos acabados para atender o consumidor com base na disponibilidade de seus produtos, retirando o lead time de produção do tempo de espera dos clientes. Entretanto, um conflito típico desse ambiente é a necessidade de proteger as vendas (mantendo um alto nível de estoque no sistema), ao mesmo tempo em que se busca operar com baixos custos de manutenção de estoque (armazenagem) e de oportunidade (dinheiro investido em estoque que poderia ser utilizado para outros fins, como compra de equipamentos). Ademais, quando se produz para estoque, pode-se prejudicar as entregas de outros itens que seriam necessários no curto prazo, uma vez que se consome capacidade de produção dos recursos em itens desnecessários no presente, para previsões no futuro, atrasando e gerando rupturas de outros itens que seriam necessários no curto prazo (SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009; SOUZA; PIRES, 2014; SATO et al., 2023; HAEUSSLER; NEUNER; THÜRER, 2023; COSTA et al., 2023; IKEZIRI et al., 2023).

Logo, para a TOC o pressuposto de manter altos níveis de estoque para proteger as vendas é falso. Assim sendo, a direção da solução para esse conflito é focar no fluxo de produção e reagir às vendas (tão logo o produto for vendido, ele deve ser repostado). Em outras palavras, deve-se “produzir hoje o que foi vendido ontem”. A Teoria das Restrições propõe uma subdivisão do sistema Make-to-Stock: o Make-to-Available (MTA), onde estabelece-se um compromisso com o mercado, ou com alguns clientes específicos, para manter uma disponibilidade boa o suficiente de produtos sendo capaz de entregar imediatamente, mediante pedido, todas às vezes (SOUZA; PIRES, 2014; SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009; GOVONI et al., 2021; CASTRO; GODINHO FILHO; TAVARES-NETO, 2022).

2.8.2 SIMPLIFIED DRUM BUFFER ROPE EM AMBIENTES MTA

Conforme Schragenheim, Dettmer e Patterson (2009) e Govoni et al. (2021), o ambiente MTA pode ser fundamentado em 5 princípios, os quais são:

1. Há uma forte correlação entre tempo de reposição e estoque. Quanto mais rápidas e frequentes forem as reposições, menor é o nível de estoque necessário para assegurar a disponibilidade dos produtos e evitar rupturas.

2. O estoque em processo também é uma proteção contra a indisponibilidade. Embora os produtos finalizados sejam protetores diretos da disponibilidade, as ordens em processamento também contribuem para manter proteção no sistema. Uma vez que as ordens “quase prontas”, logo se tornaram produtos acabados. Assim sendo, deve-se manter o *Target Level* (TL) sempre constante.

3. No curto prazo, a demanda é constante. Isto é a demanda de amanhã será igual à de hoje, a menos que haja fortes indícios de que esteja ocorrendo uma mudança real na demanda. Logo, sempre que o consumidor retirar uma quantidade X de produtos acabados, deve-se abrir uma ordem de produção equivalente a essa retirada, de tal maneira que o TL permaneça constante.

4. As prioridades de produção devem ser ditadas pelo status do nível do estoque no sistema relativo ao estoque-alvo. Essa lógica de priorização permanece desde a liberação de novas ordens até o seu apressamento no chão de fábrica. Assim sendo, a prioridade de tais ordens é definida com base na penetração no *Target Level* do sistema.

5. Estagnação não deve ser tolerada. Logo, caso as ordens do sistema estejam permanecendo muito tempo na região vermelha ou verde, ações devem ser tomadas para ajustar o TL.

Decorrente destes princípios, e respaldando-se em Schragenheim, Dettmer e Patterson (2009), Narita, Ikeziri e de Souza (2021), Castro, Godinho Filho e Tavares-Neto (2022), têm-se quatro passos para implementação do planejado S-DBR em ambientes MTA:

1. Determinar os níveis iniciais do *Target Level*. O primeiro passo na implementação consiste em determinar um TL, tal que se possa atender as solicitações dos clientes, mas que não gere estoques excessivos de produto. O TL pode ser calculado como a demanda máxima sobre um tempo de reposição

confiável (este tempo apresenta uma alta probabilidade de os itens serem reabastecidos no prazo, sendo mais longo que a média, mas não o maior). Já quando não há uma maneira fácil de se obter uma demanda razoavelmente alta dentro de um período, mas se consegue obter sua média, pode-se calcular o TL como a demanda média durante o tempo de reposição acrescido de um fator de segurança contra as variabilidades. Vale observar que o TL não precisa ser definido de uma forma muito rigorosa, pois, como visto anteriormente, é necessário somente que ele esteja em uma faixa ótima, além disso ele será ajustado posteriormente com base no *Status do Buffer*.

2. As ordens de produção devem ser emitidas para manter o TL do sistema constante. Como visto anteriormente, o *Target Level* do sistema foi definido de tal forma que se garanta a disponibilidade dos produtos, sem ter estoques desnecessários. Assim sendo, sempre que o nível de estoque no sistema (o somatório de WIP e FGI) for menor que o TL do sistema, uma ordem de produção deve ser gerada para restabelecê-lo. Embora esse procedimento pareça simples, ele traz algumas implicações. Para manter a disponibilidade dos produtos, deve-se garantir o menor tempo de reposição das ordens, ao mesmo tempo que se deve ter capacidade protetiva no RRC. Assim sendo, temos um conflito, uma vez que para garantir uma alta disponibilidade dos produtos gera-se pequenas ordens de produção, aumentando-se o número de setups dos recursos e consumindo capacidade protetiva, inclusive do RRC, podendo torna-lo um gargalo e ao invés de garantir a disponibilidade estaríamos reduzindo-a. Para tanto, podemos proteger a capacidade protetiva do RRC de duas formas:

i) Determinar um lote mínimo de produção. Isto é, determinar a quantidade mínima que se deve produzir de cada FGI, para evitar setups excessivos no RRC e o consumo deliberado de capacidade protetiva. Logo, quando o nível de estoque do sistema (WIP+FGI) ficar abaixo do TL, deve-se ser emitida uma ordem de produção maior ou igual ao lote mínimo de produção (caso seja necessária uma quantidade menor que o lote mínimo de produção, a ordem deve ser aberta com a quantidade do lote mínimo, caso seja maior, deve ser aberta com a quantidade necessária). Dessa forma, objetiva-se manter capacidade protetiva no RRC para garantir a disponibilidade dos produtos finais. Esse sistema pode ser caracterizado como produção puxada, pois limita o estoque no sistema (HOPP; SPEARMAN, 2004).

Considerando uma fábrica que produz p itens diferentes, o estoque máximo no sistema é expresso pela Equação 11.

Estoque máximo no sistema

$$\leq \sum_{i=1}^p (TL_i + (\text{Lote mínimo de produção})_i - 1) \quad (13)$$

ii) A solução anterior, apesar de manter capacidade protetiva no RRC e limitar a produção, gera um impacto negativo na quantidade de itens em estoque. Tal situação agrava, em muitos casos, quando se aumenta a quantidade de produtos, pois mais setups serão requeridos e maior será o lote mínimo, aumentando o estoque no sistema. Assim sendo, uma segunda maneira é trabalhar com a possibilidade de uma nova ordem de produção esperar longos períodos até ser processada no RRC, note o seguinte: na geração das ordens e liberação no chão de fábrica, no passo 1, somente há a verificação se o estoque no sistema é menor que o TL e, caso seja, as ordens de produção são emitidas e liberadas para o chão de fábrica, não sendo verificado quando o RRC irá processá-las. Logo, pode-se atrasar a liberação do pedido e quando a ordem for liberada, a quantidade dela será maior que a anterior. A informação de quando o pedido será processado pode ser obtido através da carga planejada (conforme fórmula 6) e as ordens de produção devem ser liberada de tal forma que se mantenha uma carga máxima no RRC (por exemplo 80%). Portanto, em momentos em que a carga começar a aumentar e superar o limite, as ordens de produção não serão liberadas, aumentando suas quantidades e reduzindo o número de setups, protegendo a capacidade protetiva. Já em momentos em que a carga do RRC estiver baixa, mais ordens serão liberadas e em menores quantidades, aumentando os setups. Assim sendo, este algoritmo permite trabalharmos com um “ajustamento dinâmico” dos lotes de produção, mantendo a capacidade protetiva do RRC, trabalhando com o estoque menor que a solução anterior e sem acrescer o tempo de ressuprimento. Entretanto, este algoritmo somente considera os setups no RRC, desconsiderando o impacto em outros recursos, assim sendo, outro centro de trabalho com longos tempos de setup pode tornar-se um gargalo. Sendo necessário trabalhar com lotes mínimos de produção, mas se podem trabalhar com ambas as técnicas, uma vez que o monitoramento de cargas permite refinar o tamanho dos lotes para corresponder ao ritmo do RRC.

3. Gerenciamento do Pulmão (BM), controle e sequenciamento da produção. Dado que os passos anteriores cuidaram do nível de estoque e proteção no sistema (passo 1) e o planejamento, definindo quando e quanto uma ordem será produzida (passo 2), resta agora definir uma forma de controle e sequenciamento da produção. Para tanto, a TOC propõe o BM, que trabalha com a penetração na proteção do sistema. Como visto, o que protege a entrega no prazo e a disponibilidade de produtos é a proteção que a ordem de produção tem. Logo, quanto maior for a penetração da ordem na proteção, maior o risco de atraso e maior é sua urgência. Em ambientes MTA, o pulmão é expresso na forma de estoque e tanto o FGI quanto as ordens de produção posteriores configuram a proteção (princípio 2). Logo, para cada ordem de produção o *Status do Pulmão* (SP) pode ser calculado da seguinte forma:

$$SP = \frac{TL - \text{Estoque em Processo} - FGI}{\text{Target Level}} \quad (14)$$

O status do pulmão é classificado em 3 zonas diferentes, da seguinte forma: quando houver menos de 1/3 de penetração do TL, a zona é verde, tais ordens não há necessidade de monitorá-las uma vez que há proteção suficiente para que essas ordens sejam concluídas no prazo. Já a cor amarela é quando se tem uma penetração de 1/3 a 2/3, sendo necessário o monitorar as ordens de produção e verificar possíveis problemas que possam estar ocorrendo. E vermelho, representa uma penetração é superior a 2/3 do TL, deve-se tomar medidas para apressamento das ordens, caso contrário, podem ocorrer rupturas no estoque.

4. Manter o TL em um nível correto. Como visto o *target level* representa a proteção contra o sistema, logo se ele for insuficiente, haverá ruptura pois o sistema não conseguirá “amortecer” as variabilidades internas, externas ou outras flutuações estatísticas, ao passo que se ele for maior que o necessário, tem-se dinheiro investido em estoque, que poderia ser utilizado para outros investimentos que gerem mais valor para a empresa. O TL obtido no passo 1 pode ter sido definido de forma inadequada (por imprecisão de informações etc) ou por mudanças tanto internas quanto externas o TL se torna impreciso. Logo, ele deve ser ajustado, uma vez que se o TL está muito alto, as ordens de produção permanecem muito tempo no status verde, sinalizando que a proteção do sistema é maior que a necessária, devendo ser

reduzido. Em contrapartida, quando o TL está muito baixo, há pouca proteção no sistema, as ordens de produção passam muito tempo na região vermelha e há grandes riscos à disponibilidade dos produtos; sendo, portanto, necessário aumentá-lo.

Para a realização da simulação, vale destacar que o TL inicial foi obtido como a multiplicação entre o tempo médio de ressuprimento e a demanda média dos produtos, a proteção da capacidade protetiva, quando necessário, foi realizado através dos lotes mínimos de produção (por ser menos complicada a implementação que através da carga planejada) e a manutenção do TL em nível correto foi feita através do DBM.

2.8.3 Gerenciamento Dinâmico do Pulmão

Como visto, mudanças internas e/ou externas podem tornar o TL incorreto, podendo gerar faltas ou excessos de estoque. Uma das formas de corrigir o *target level* e mantê-lo em um nível correto é através do gerenciamento dinâmico do pulmão (GDP), que utiliza o SP (status do pulmão) no nível de produtos, calculado conforme a expressão abaixo. (SCHRANGENHEIM, 2013b; SOUZA; PIRES, 2014; IKEZIRI, 2018; IKEZIRI; et. al., 2023; CASTRO; GODINHO FILHO; TAVARES-NETO, 2022).

$$SP = \frac{TL - FGI}{Target Level} \quad (15)$$

Caso o TL esteja em um nível muito a cima do ideal para o sistema, o estoque de produtos acabados ficará alto, pois está sendo demandado um valor relativamente baixo dos produtos. Logo, tem-se uma baixa penetração no TL, ficando o estoque de produtos acabados alto quando comparado ao TL (sinalizando um status verde). Quando esta situação ocorre por um intervalo de tempo relativamente grande, tem-se verde em demasia (*Too Much Green* - TMG). Assim sendo, deve-se reduzir o TL, uma vez que se está mantendo estoques mais

estoques que o necessário no sistema. O TMG é oriundo, dentre outros fatores, por redução na demanda média, redução do *lead time* de produção, TL inicial superestimado, aumento de capacidade e redução das variabilidades internas ou externas (SCHRANGENHEIM, 2013b; SOUZA; PIRES, 2014; IKEZIRI, 2018, IKEZIRI et. al, 2023).

Entretanto, há situações onde o TL está muito baixo do ideal, o estoque de FGI ficará baixo, pois a demanda está relativamente alta dos produtos. Portanto, o FGI ficará muito baixo em comparação com o TL, sinalizando uma alta penetração no pulmão. Ocorrendo essa situação por um intervalo de tempo relativamente grande, tem-se uma situação vermelha em demasia (*Too Much Red* - TMR). Sendo decorrente de aumentos na variabilidade interna ou externa, no *lead time*, redução de capacidade, aumento da demanda ou TL inicial subestimado (SOUZA; PIRES, 2014; SCHRANGENHEIM, 2013b; IKEZIRI, 2018; NARITA; IKEZIRI; DE SOUZA, 2021; IKEZIRI et. al., 2023).

Assim sendo, devemos estabelecer qual é o tempo relativamente grande que justifique uma alteração no TL e em quanto alterá-lo. Na literatura existem diferentes respostas a estas perguntas. Ikeziri (2018) fez uma importante contribuição realizando uma síntese destas técnicas, sendo vistas na Figura 6.

Figura 6 - Síntese dos algoritmos e parâmetros de ajuste do TL do GDP

Condição do DBM	Algoritmo de Gatilho (Quando?)	Referências dos Algoritmos	Parâmetro de Ajuste do TL (Quanto?)	Referências dos Parâmetros de Ajuste do TL
TMG	Permanência na região verde durante um período completo de reposição	Souza e Pires (2010); Schragenheim, Dettmer e Patterson (2009) e Goldratt e Goldratt (2003)	Redução de 33%	Chang, Chang e Chang (2017); Chang, Chang e Sun (2015); Chang, Chang e Huang (2014); Souza e Pires (2014, 2010); Schragenheim, A. (2013, 2007); Schragenheim, E. (2013b); Cox III et al. (2012); Schragenheim, Dettmer e Patterson (2009) e Goldratt e Goldratt (2003)
	Permanência na região verde durante três períodos completos de reposição consecutivos	Schragenheim, A. (2013) e Cox III et al. (2012)	Redução de 15%	Souza e Pires (2014) e Schragenheim, E. (2013b)
TMR	Permanência na região vermelha durante um período completo de reposição	Goldratt e Goldratt (2003)	Aumento de 33%	Chang, Chang e Chang (2017); Chang, Chang e Sun (2015); Chang, Chang e Huang (2014); Souza e Pires (2014, 2010); Schragenheim, A. (2013, 2007); Schragenheim, E. (2013b); Cox III et al. (2012); Schragenheim, Dettmer e Patterson (2009) e Goldratt e Goldratt (2003)
	Permanência na região vermelha durante três períodos completos de reposição consecutivos	Schragenheim, A. (2013) e Cox III et al. (2012)	Aumento de 20%	Souza e Pires (2014) e Schragenheim, E. (2013b)
	Total de invasões na região vermelha durante um período completo de reposição for igual ao próprio tamanho da região vermelha	Souza e Pires (2014) e Schragenheim, Dettmer e Patterson (2009)		

Fonte: Ikeziri (2018).

Por fim, é necessário um período de congelamento do algoritmo sempre que se altera o TL. De fato, quando o algoritmo sinaliza um TMR, um aumento no TL é recomendado, gerando uma ordem de quantidade, em geral, maior que as anteriores para, além de reestabelecer o TL anterior e preencher a quantidade necessária para atingir o novo TL. Entretanto, enquanto essa ordem não se torna FGI, o SP aumenta, pois, a diferença entre o FGI e o TL aumenta e, conseqüentemente, sinaliza uma penetração maior nas reservas do sistema. Assim sendo, o algoritmo recomendaria outro aumento do TL. Logo, é necessário que se tenha um período de congelamento até que essa ordem gerada se torne FGI, para que não haja alterações indevidas do TL (SOUZA; PIRES, 2014; SCHRAGENHEIM, 2013; IKEZIRI, 2018; IKEZIRI; et. al., 2023).

Da mesma forma, quando o algoritmo sinaliza um TMG, uma redução no TL é necessária, assim sendo, a próxima ordem só será gerada quando o estoque do

sistema for menor que o novo TL. Entretanto, é necessário um período de congelamento, pois quando o TL é decrescido, o novo TL é menor que o anterior e, por consequência, o algoritmo recomendaria outra diminuição do TL. Tal período de congelamento no caso de um TMG é determinado até que o estoque do sistema fique menor que o novo TL (SOUZA; PIRES, 2014; SCHRAGENHEIM, 2013; IKEZIRI, 2018; IKEZIRI; et. al., 2023).

2.9 ESTUDOS RECENTES SOBRE OS SISTEMAS DBR E S-DBR

Respaldando-se em Ikeziri et al. (2019), foram utilizadas as seguintes palavras-chave na busca de temas relacionados com DBR e S-DBR em ambientes de produção, na base de dados scopus:

```
Title-abs-key("drum buffer rope") OR Title-abs-key("optimized Production technology") OR Title-abs-key("Theory of constrain*") OR Title-abs-key("goldratt") AND Title-abs-key("dbr" OR "opt" OR "sdb") AND PUBYEAR > 2009 AND PUBYEAR < 2024 AND PUBYEAR > 2009 AND PUBYEAR < 2024 AND ( LIMIT-TO ( PUBSTAGE,"final" ) ) AND ( LIMIT-TO ( LANGUAGE,"English" ) ) AND ( LIMIT-TO ( SUBJAREA,"ENGI" ) OR LIMIT-TO ( SUBJAREA,"BUSI" ) OR LIMIT-TO ( SUBJAREA,"DECI" ) ) AND ( LIMIT-TO ( DOCTYPE,"ar" ) ).
```

A busca foi realizada em agosto de 2023, e resultou em 55 artigos, os artigos obtidos foram lidos para verificar se estavam alinhados com o DBR e o S-DBR aplicados ao processo produtivo das organizações. A seguir é apresentada uma síntese dos artigos obtidos.

2.9.1 Estudos sobre o DBR

Thürer, Fernandes e Stevenson (2022) compararam o OPT (*Optimized Production Technology*, antecessor do DBR), com o Kanban, o MRP (*material*

requirement planning) e o DDMRP (*demand driven MRP*), concluindo que em cenários onde não há um gargalo o DDMRP e o Kanban apresentam melhores desempenhos. Já em cenários onde há gargalos, o OPT e o DDMRP maximizam o desempenho do sistema, indicando que mesmo o OPT trazia benefícios na sua implementação.

Com relação ao DBR, destacam-se estudos que mostraram que sua implementação e utilização promovem melhorias na organização de diferentes formas. A Tabela 1 traz um resumo dos seus principais benefícios.

Tabela 1 - Resumo benefícios DBR

RESULTADOS	REFERÊNCIAS
Aumento na eficiência operacional, planejamento e gestão das operações	TELLES et al., 2020; DARLINGTON et al. 2015; DE JESUS PACHECO; JUNIOR ANTUNES; DE MATOS, 2021; YUE et. al., 2022; KELLY; GERMAIN, 2020; BISOGNO et al., 2017; HUANG et al., 2018; OK; PARK, 2014; PONTE et al., 2016; COSTAS et al. 2015; DARLINGTON et al., 2015; HUANG et al., 2013
Diminuição na parada de setores críticos da organização	PRASETYANINGSIH; DEFERINANDA; AMARANTI, 2019
Aumento no desempenho financeiro	PUCHE et al., 2019; COSTAS, et. al. 2015; DARLINGTON et. al. 2015; DE JESUS PACHECO; JUNIOR ANTUNES; DE MATOS, 2021
Diminuição do efeito chicote em cadeias de suprimento	PONTE et al., 2016
Melhora global de toda a cadeia de suprimento	COSTAS et al., 2015; HUANG et al., 2013
Redução no WIP	DARLINGTON et al., 2015; LEE; SEO, 2016
Maior flexibilidade	HUANG et al., 2013; DE JESUS PACHECO; JUNIOR ANTUNES; DE MATOS, 2021
Aprimorar a gestão de projetos via PERT/CPM	LIU; SHEN; ZHANG, 2021

Fonte: Autor (2023)

Além disso, outros estudos concentram-se em comparar o DBR frente a outros métodos de planejamento. Punche et al. (2019), troque que o DBR se mostrou menos sensível a flutuações estatísticas que outros métodos tais como o Kanban, permitindo um planejamento mais robusto e menos sujeito a variabilidades. Isso é congruente com o pressuposto da TOC de aceitar certo nível de variabilidade no sistema, ou seja, que por mais que se deseje eliminar as flutuações estatísticas, é inviável e/ou impossível eliminá-las por completo, logo aceitar que elas existem e fornecer proteções e a atitude mais lúcida, diferentemente do Lean, que busca os “zeros” (SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009). Uma outra

comparação com o *Kanban* foi elaborada por Lee e Seo (2016), segundo os quais o DBR o superou tanto em uma menor necessidade de capacidade protetiva quanto de um nível menor de WIP. Além disso, Zupancic; Buchmeister e Aljaz (2017), ao comparar o DBR com os sistemas *Kanban* e MRP, mostraram que o DBR permitiu a empresa ter bons níveis de produtos acabados (consideravelmente melhor que o *Kanban*), com um WIP e um *lead time* menor que o MRP.

Já Costa et al. (2023) trouxeram que, em ambientes MTO, o DBR tem um desempenho significativamente superior ao CONWIP (*Constant Work In Process*) quando o gargalo está posicionado na primeira estação, mas quando ele está posicionado no meio do fluxo não é possível tirar conclusões e quando está no final do fluxo ambos têm o mesmo desempenho. Entretanto, eles trazem que as regras de sequenciamento têm um impacto muito maior no desempenho do sistema do que a escolha de um desses mecanismos de planejamento da produção e reforçam que mais estudos devem ser realizados para confirmar isto. Já Tošanović e Štefanić (2021) compararam os sistemas CONWIP, *Kanban*, DBR e um modelo híbrido *Kanban* e CONWIP, concluindo que não houve um método soberano a outro, pois diferentes configurações de linha geraram diferentes desempenhos relativos a cada um dos métodos.

Outro ponto abordado na literatura foi a influência da posição no gargalo para o controle do fluxo produtivo e melhora no desempenho. Conforme Thüerer et. al. (2017), quanto mais a montante o gargalo está posicionado, melhor o controle e maior o desempenho do sistema produtivo.

Algumas dificuldades e desafios são trazidos na literatura, tais como a capacidade protetiva dos recursos não RRC serem chaves para a subordinação à restrição (ORUE et al., 2021), necessidade de maior transparência das informações, principalmente em cadeias de suprimento (PUCHE et al., 2019). Mudanças no gargalo para um recurso posterior no fluxo prejudica o desempenho do sistema, mostrando que manter conhecimento sobre o RRC atual é fundamental, principalmente, se a mudança for para um recurso posterior ao atual (THÜRER; STEVENSON, 2018b). Lee e Seo (2016) afirmam que o DBR tem um desempenho inferior ao CONWIP em relação à capacidade protetiva e WIP, mas não avaliaram o impacto das taxas de saída. Além disso, quando há sequências de operações complexas e *setups* significantes e dependentes, a programação detalhada dos recursos não RCC também é importante (GOLMOHAMMADI, 2015).

Além disso, Telles et. al. (2022), mostraram, através de um estudo de caso em uma empresa ETO no Brasil, que implementações do DBR podem ser facilitadas pelo uso em conjunto dos métodos DBR e S-DBR, fazendo algumas adaptações nestes conceitos. Por exemplo, trabalhar com buffer de 5 cores ao invés de 3, a sequência do CCR ser definida com base no status do buffer.

2.9.2 Estudos sobre o S-DBR

Estudos mostraram uma melhora no sistema produtivo com o S-DBR (CHAKRAVORTY; HALES, 2016; BUESTÁN BENAVIDES; VAN LANDEGHEM, 2015), permitindo um maior fluxo (CHAKRAVORTY; HALES, 2016; BUESTÁN BENAVIDES; VAN LANDEGHEM, 2015) e reduções no tempo de resposta (CHAKRAVORTY; HALES, 2016).

Alguns empecilhos no S-DBR foram encontrados, como a suposição, na aplicação tradicional, de o RRC estar localizado no meio do fluxo ou poder ser aproximado em tal posição. Entretanto, em alguns casos essa aproximação não é confiável e gera queda no desempenho do sistema (BUESTÁN BENAVIDES; VAN LANDEGHEM, 2015; LEE et. al. 2010). Uma forma de resolver este problema é realizar a determinação das datas de entrega e as de liberação considerando a posição do RRC no fluxo (ao invés de considerar ele no meio), permitindo uma maior aplicabilidade do S-DBR e aumento do seu desempenho (LEE et. al. 2010).

Além disso, a existência de gargalos interativos se configura um empecilho na implementação do S-DBR (LEE et. al. 2010). Modificações na maneira de trabalhar com a carga planejada, a partir da consideração do número de reentradas no RRC, e adaptações na corda para trabalhar com a taxa de desvio entre o BS e uma camada ponderada do BS permitiram uma maior efetividade do S-DBR (CHANG; HUANG, 2014).

2.9.3 Estudos sobre outros tópicos relacionados ao DBR e/ou S-DBR

Gupta e Andersen (2012) mostraram, por simulação, que a adoção das medidas de desempenho da TOC possibilita que uma empresa não adepta a suas teorias se coloque no caminho da melhoria contínua, permitindo uma maior efetividade na implementação de práticas tais como o DBR. Tais práticas estão em consonância com o livro “A Meta”, cujo personagem Alex Rogo e sua equipe percebem que as medições tradicionais distorcem o enorme potencial que as práticas da TOC trazem, propondo mudanças na contabilidade e nas medições de desempenho (GOLDRATT; COX, 2014).

Thürer et al. (2023) mostraram, por simulação, que embora os lead times planejados de maneira dinâmica tenham um efeito prejudicial sobre o desempenho em sistemas MTO, não são os aumentos nos lead times planejados que levam a uma perda de desempenho, mas sim, a diminuição dos tempos de entrega em períodos de baixa carga que aumentam as cargas de trabalho nos próximos períodos de alta carga.

Millstein e Martinich (2014) propuseram uma metodologia, denominada Takt Time Grouping (TTG), para lidar com ambientes que tenham uma linha de produção desequilibrada, alta variação do tempo de ciclo das operações, setups consideráveis e restrição de movimentação. Tal metodologia incorpora os conceitos do DBR (tais como identificação da restrição do sistema e do RRC, subordinação à restrição, foco no fluxo e desbalanceamento de linha) ao Takt Time, permitindo definir lotes de produção e transferência. Mediante simulação de eventos discretos, os autores concluem que o TTG aumenta a taxa de produção (quando comparados ao fluxo de peça única) e, em relação ao CONWIP e DBR, permite trabalhar com WIP menores e com fluxo de produção mais rápido.

Souza e Baptista (2010) sugeriram, em ambientes MTO planejados pelo S-DBR, uma abordagem para lidar com pedidos urgentes, denominada de slack time. Tal abordagem verifica, na aceitação de um pedido com entrega rápida, o consumo da folga de pedidos com prazos maiores, que são deslocados para frente no tempo, atrasando seu início e conclusão. Assim sendo, o pedido pode ser aceito somente se a carga imposta ao RRC não consumir a folga (slack time) dos pedidos aceitos e com prazos de entrega maiores.

Govoni et al. (2021) avaliaram, também por simulação, seis métodos de melhoria (sendo três baseados na TOC) em ambientes MTA, planejados pelo S-DBR em diferentes configurações de linha, concluindo que em sistemas balanceados os processos de melhoria devem ser espalhados por todos os recursos, uma vez que, havendo múltiplos RRC, para melhorar o sistema deve-se melhorar todos os pontos. Já em ambientes desbalanceados, os métodos de melhoria focalizada da TOC permitiram o sistema alcançar um desempenho superior às outras abordagens. Como conclusão, os autores afirmam que diferentes configurações de linha exigem diferentes abordagens de melhoria. Em linha balanceada, deve-se melhorar todos os recursos e em processos desbalanceados, deve-se adotar uma abordagem focalizada, sendo o nível de utilização o melhor indicador de qual recurso deve ser melhorado quando há desbalanceamento.

Radovilsky e Frankel (2013) propuseram um método baseado em filas multisservidor finitas para identificar o tamanho ideal da fila antes do RRC, visando minimizar sua ociosidade e aumentar a lucratividade da empresa.

Outro tema de destaque Noé o target level (TL), importante parâmetro para o método S-DBR aplicado em ambientes MTA, uma vez que a quantidade de estoque, proteção do sistema contra variabilidade, geração de ordens e sequenciamento depende dele. Assim sendo, é fundamental mantê-lo em um nível correto. Para tanto, a TOC propõe o método DBM (Dynamic Buffer Management, ou Gerenciamento Dinâmico do Pulmão). Sobre o tema, destacam-se os trabalhos de Parsaei, Nahavandi e Elmekawy (2012), que mostraram a importância do TL no sequenciamento das ordens de produção e liberação de materiais e Narita, Ikeziri e de Souza (2021) que investigaram, via simulação computacional, o desempenho do DBM em diversos cenários, em termos de nível de atendimento da demanda e do estoque no sistema. Os autores concluíram que ele apresenta bons desempenhos em todos os cenários, entretanto, em alguns casos, o DBM recomenda mudanças desnecessárias no TL, o que pode afetar o desempenho do sistema. Essa desvantagem também foi trazida por Ikeziri et al. (2023), que apontaram que a desativação do DBM em cenários de demanda conhecida e sem tendência e a manutenção de um TL razoavelmente bom melhoram o desempenho do sistema, pois não permitem ajustes desnecessários. Entretanto, o DBM ainda se faz necessário em situações cujo comportamento da demanda é desconhecido.

Outro tema que merece destaque é a avaliação de desempenho da regra de sequenciamento recomendada pelos métodos DBR e S-DBR, baseada no BM, que prioriza as ordens com base no consumo do pulmão. A possibilidade de comparar diferentes regras de sequenciamento em ambientes planejados pelo DBR e S-DBR parece ser um tema relevante e promissor, pois permite verificar se o BM é mesmo a melhor forma de sequenciamento ou se haveria situações em que outras regras de sequenciamento poderiam ser recomendadas.

Apesar de sua relevância, esse tema tem sido pouco estudado (IKEZIRI et al., 2019). Além disso, Costa et al. (2023), quando compararam os sistemas DBR e CONWIP, observaram a importância das regras de sequenciamento no desempenho do sistema produtivo. Como estudos sobre o assunto, destacam-se: i) Castro, Godinho Filho e Tavares-Neto (2022) compararam as regras de sequenciamento das ordens de produção FIFO, BM e um método baseado na meta heurística particle swarm optimization (PSO) para avaliar o desempenho destas regras frente à presença de setups dependentes, concluindo que a PSO teve a melhor performance; e ii) Thüerer e Stevenson (2018 a) avaliaram o método de controle, proposto pela TOC, com outras regras de sequenciamento planejadas pelo DBR. Os autores concluíram que, em situações de alta carga, o desempenho do DBR pode ser aumentado sequenciando as ordens de produção pelo menor tempo de processamento.

Dada a relevância do assunto e a carência de pesquisas que o explorem, este trabalho explora o tema de sequenciamento de ordens de produção em ambientes de produção MTS, especificamente no contexto de aplicação do método MTA da TOC.

3 MÉTODO DE PESQUISA

O método de pesquisa deve ser o meio para atingir seus objetivos. Este trabalho visa avaliar a efetividade do BM em garantir a disponibilidade de produtos acabados em ambientes MTA planejados pelo S-DBR. Adicionalmente, objetiva verificar o desempenho das diferentes regras de sequenciamento, fazer sua comparação em diferentes cenários e verificar aquelas que são mais afetadas por mudanças nas cargas de trabalho e nas variabilidades dos tempos de processamento e da demanda. Nesse sentido, a simulação foi escolhida como método de pesquisa, pois um modelo de simulação devidamente construído, testado e avaliado permite investigar, analisar e compreender as variáveis e comportamentos em diferentes situações (variando os parâmetros do modelo), permitindo, assim, ampliar conhecimento sobre teorias já existentes, desenvolver novas teorias e ampliar o conhecimento (DAVIS; EISENHARDT; BINGHAM, 2007; BANKS et al., 2004).

Existem duas formas básicas de simulação: a computacional (que exige a utilização de computador para fazer seu processamento) e a não computacional (construção de protótipos). Dentre os modelos computacionais, têm-se os modelos matemáticos, que são construídos com um conjunto de fórmulas matemáticas, teoria das filas, programação linear etc. Entretanto, sistemas reais, e sua respectiva representação em um modelo, apresentam uma maior complexidade. Os modelos de simulação permitem capturar com maior fidelidade esses aspectos, sendo classificados em simulação de Monte Carlo (utiliza-se geradores de números aleatórios para simular sistemas físicos ou matemáticos, desconsiderando explicitamente o tempo), simulação contínua (utilizada para representar sistema nos quais seu estado varia continuamente no tempo) e simulação de eventos discretos (tem a finalidade de representar sistemas que variam no tempo de forma discreta, ou seja, através de eventos) (CHWIF; MEDINA, 2006).

Uma fábrica pode ser representada por um modelo computacional baseado em eventos discreto, pois há chegada de pedidos de clientes, emissão de ordens de produção para repor os estoques, movimentação no chão de fábrica, finalização do processamento de um pedido, início do processamento de outro etc. Ademais, a escolha da simulação como método para estudos de técnicas de planejamento e

controle da produção, como DBR e S-DBR, está em consonância com outros trabalhos publicados, tais como Thüerer e Stevenson (2018a), Ikeziri (2018), Narita, Ikeziri, De Souza (2021), Ikeziri et al. (2021), Ok e Park (2014), Lee e Seo (2016), Govoni et al. (2021), Costa et al. (2023), Castro, Godinho Filho e Tavares-Neto (2022) e Millstein e Martinich (2014).

3.1 SELEÇÃO DO SOFTWARE DE SIMULAÇÃO

Definido o método de pesquisa, o próximo passo é definir a ferramenta/software para realizar a simulação. Para construir o modelo de simulação, pode-se recorrer a uma linguagem de programação e desenvolvê-lo do zero, ou seja, construir elementos computacionais que emule as máquinas, a geração das ordens, a movimentação no chão de fábrica etc. Isso possibilita uma maior flexibilidade e adaptação do modelo à criatividade do desenvolvedor. Entretanto, essa estratégia apresenta duas grandes dificuldades. A primeira delas é o aumento do tempo para construir o modelo, uma vez que softwares especializados em simulação, como o AnyLogic e o Promodel, por exemplo, oferecem elementos tais como máquinas, estoque, passagem do tempo da simulação etc. A outra dificuldade reside na verificação do modelo, pois os softwares para simulação, normalmente, permitem visualização em 2D e 3D do modelo e o monitoramento em tempo real das variáveis, qualidades ausentes nos modelos construídos em linguagem de programação (BANKS et al., 2004).

Nesse sentido, optou-se pela de um software para construção do modelo computacional, mais especificamente o AnyLogic, desenvolvido pela empresa The AnyLogic Company. A escolha desse software se deve pelo fato de sua modelagem ser baseada em agentes, permitindo criar, testar e analisar modelos mais complexos e que tenham interação entre si. Além disso, o software permite analisar o comportamento do sistema ao longo do tempo em altos níveis de detalhes ou de forma mais resumida. Outro ponto do software é sua versatilidade, ou seja, apesar de ter elementos “nativos” do software, tais como *agent*, *delay*, *source* e *sink*, ele permite programar diversas funções e eventos dentro do modelo, além de modelar diversas situações e fenômenos reais. Somando-se a isso, ter visualizações 2D e 3D

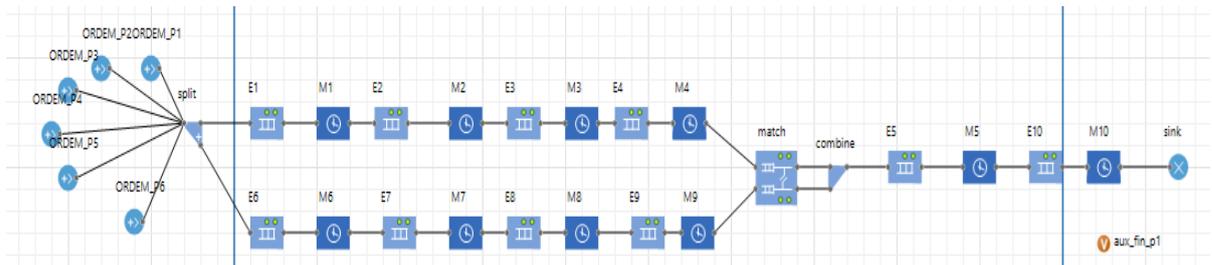
do modelo, possibilitando sua verificação e validação, evita *bugs* e outros comportamentos imprecisos devido a falhas de programação e/ou modelagem (AVDEEVA; UZUN; BORODKINA, 2020; TAYLOR, 2014; CHASANAH; SAKAKIBARA, 2022). Como trabalhos que utilizaram o AnyLogic para estudar os métodos de planejamento da TOC, destaca-se Mariz (2019) (utilizou o software AnyLogic para comparar o CONWIP e o DBR).

3.2 CONSTRUÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL

Como o objetivo principal do trabalho é avaliar quão efetivo o BM é em garantir a disponibilidade dos produtos acabados, comparando-o com algumas outras regras de sequenciamento, recorreu-se à simulação axiomática. Esta é direcionada a modelos idealizados do problema, onde o foco principal da pesquisa é investigar aspectos teóricos, ou seja, influência de parâmetros no modelo e comparação de desempenho de diferentes fatores – no caso as regras de sequenciamento (SUH, COCHRAN; LIMA, 1998; BERTRAND; FRANSOO, 2002; KULAK et al., 2010).

Assim sendo, o primeiro passo do experimento foi definir a linha de produção a ser simulada. Thüerer e Stevenson (2018a) comentam que em simulações do método DBR, normalmente, é utilizado um fluxo direto. A fim de tornar o modelo um pouco mais robusto que os modelos anteriormente abordados na literatura, definiu-se uma linha de produção com uma operação de montagem, baseando-se no modelo proposto por Khojasteh-ghamari (2009), representado na Figura 7. As máquinas, no software AnyLogic, foram representadas pelo elemento *Delay*, uma vez que, na entrada de um *agent* (representando a ordem de produção), este fica no *Delay* por um dado tempo (que pode ser uma função de variáveis do *agent* e distribuição estatística). As ordens de produção foram geradas pelo elemento *Source* que, após passarem por todo o fluxo de produção, são “retiradas” da simulação pelo elemento *Sink*.

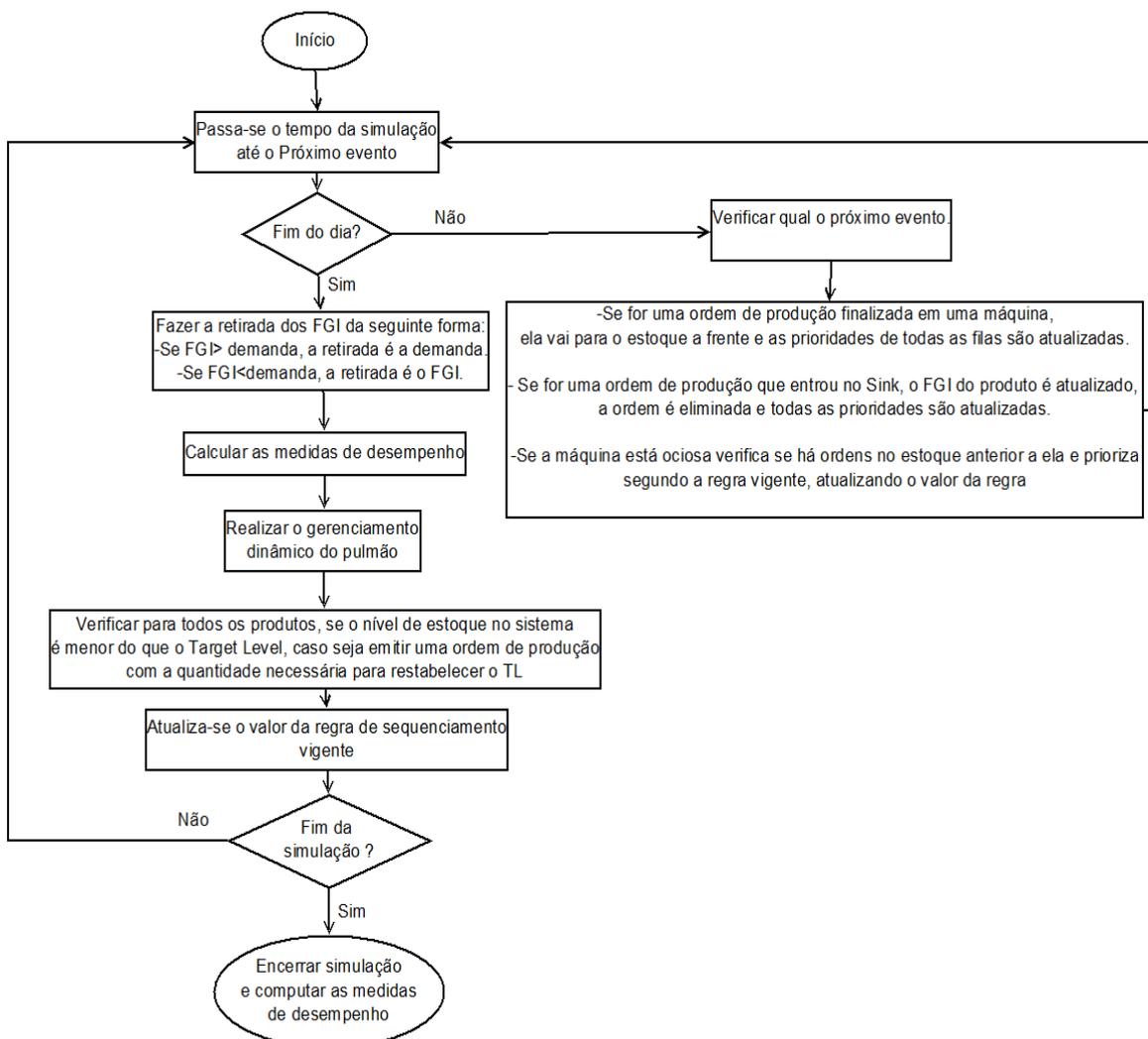
Figura 7 - Modelo de linha de produção



Fonte: Autor (2023)

Modelada a linha de produção, o próximo passo estabeleceu a lógica para a geração da demanda e das ordens de produção segundo a abordagem S-DBR, assim como para o sequenciamento das ordens de produção e para o cálculo dos indicadores. Tais lógicas estão ilustradas na Figura 8.

Figura 8 - Funcionamento modelo de simulação



Fonte: Autor (2023)

O software Anylogic, no bloco Queue, traz como Default as regras de sequenciamento FIFO e LIFO. Entretanto, nesse bloco há a opção de Priority-based, com a qual se pode sequenciar os agentes com base no valor de uma determinada variável. Para tanto, criou-se uma variável denominada valor_regra, que atribui o valor calculado pela regra de sequenciamento à ordem de produção. Esta variável é atualizada para todas as ordens no chão de fábrica, sempre que uma ordem entra no bloco Queue, no Delay ou quando uma ordem é gerada.

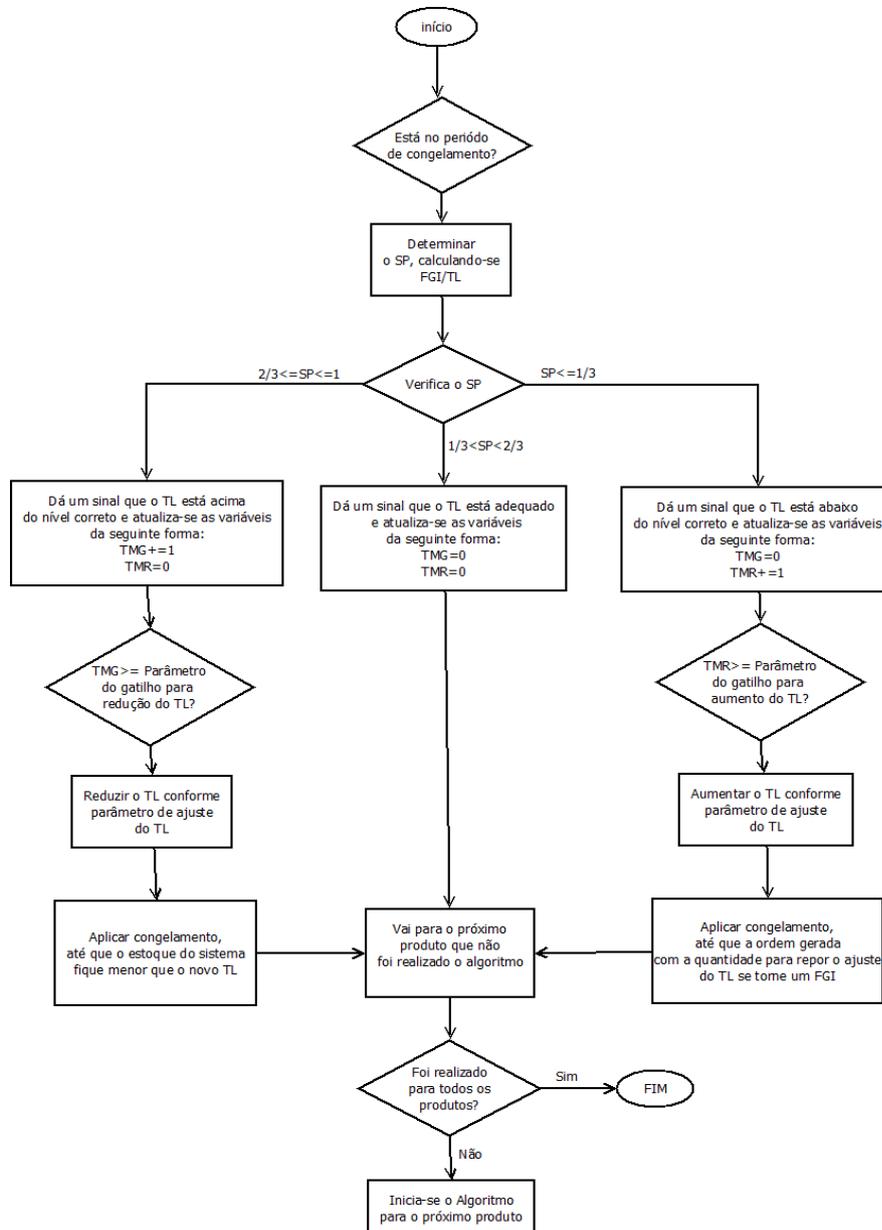
Como se trata de um ambiente de produção para estoque planejado e controlado pelo sistema S-DBR/MTA, as regras de sequenciamento selecionadas não devem trabalhar com datas prometidas para finalização. Assim sendo, as regras selecionadas foram: *Run-Out Time* (RO), que trabalha com estoque e a demanda média; *buffer management* (BM), cuja lógica está baseada na penetração no TL; *shortest process time* (SPTR), que prioriza as ordens com menores tempos de processamento; e *first-in-first-out* (FIFO), que prioriza as ordens de acordo com a sequência com que chegam nas estações de trabalho. A seguir, é detalhado como foi realizado o cálculo destas regras.

- RO. Para esta regra, necessitam-se das variáveis “estoque de produtos acabados” e “demanda média”. O seu valor é obtido pela razão entre eles e, quanto menor seu valor, maior é a prioridade.
- BM. No gerenciamento do pulmão, para seu cálculo foram utilizadas duas variáveis, que são o estoque à frente da ordem e o *target level* de cada um dos produtos.
- SPTR1. A prioridade é obtida pela multiplicação do tempo de processamento necessário na máquina pela quantidade de unidades referente à ordem. Quanto menor seu valor, maior é a prioridade. Caso o estoque do produto final seja zero, a ordem recebe prioridade máxima no chão de fábrica.
- SPTR2. Diferencia-se da anterior, uma vez que o seu valor é definido pelo tempo de processamento restante em toda a linha de produção. Quanto menor seu valor, maior é a prioridade. Caso o estoque do produto final seja zero, a ordem recebe prioridade máxima no chão de fábrica.

- SPTR1d e SPTR2d. Diferenciam-se, respectivamente, de SPTR1 e SPTR2, pelo fato de que se o estoque à frente da ordem for menor que 1/3 do TL, elas receberão prioridade máxima.
- RNG. A priorização das ordens de sequenciamento foi realizada de forma aleatória.

A lógica do gerenciamento dinâmico do pulmão é mostrada pelo fluxograma da Figura 9.

Figura 9 - Funcionamento do Algoritmo do Gerenciamento Dinâmico do Pulmão



3.3 VERIFICAÇÃO DO MODELO

A verificação constitui uma importante etapa do processo de modelagem, uma vez que visa analisar e garantir que o modelo está em correto funcionamento e que representa o modelo conceitual proposto. A verificação acontece concomitantemente ao desenvolvimento do modelo conceitual, evidenciando falhas e imprecisões que o modelo possa apresentar, para que se possa corrigi-las. Os erros de um modelo de simulação consistem em erros sintáticos (inserção - ou não - ou mau posicionamento de elementos da linguagem de programação, fazendo com que ele não seja executado de forma correta) e erros semânticos (falhas na lógica de programação, que causam um comportamento diferente do almejado) (BANKS et al., 2004; HARRELL; GHOSH; BOWDEN, 2000).

Para Bateman et al. (2013), a verificação do modelo pode ser feita mediante: animação, em velocidade lenta, permitindo analisar o comportamento do sistema; coleta do valor das variáveis e análise em tempo real; análise do modelo por outra pessoa; gravação das saídas e detalhes dos processos do modelo para posterior análise; ou comparação dos resultados do modelo computacional com o analítico.

Nesta pesquisa, a verificação do modelo foi realizada pelo autor em conjunto com seu orientador e com um doutorando especialista no tema, a fim de garantir que as funções e rotinas funcionassem de forma correta. A verificação foi realizada da seguinte forma:

1. Conforme o modelo computacional foi sendo construído, com suas rotinas e funções, ele foi sendo compilado no software AnyLogic para verificar se havia algum erro de sintaxe (se houver, o software acusa o erro). Além disso, assim que finalizada a construção de um bloco lógico, foram verificados suas saídas e seu comportamento, utilizando as animações 2D/3D do software, coleta das saídas e posterior análise e monitoramento das variáveis em tempo real de simulação. Avaliou-se, primeiramente, o comportamento das máquinas e das ordens de produção no fluxo, observando visualmente como foram criadas no modelo e o comportamento dos tempos de processamento dentro das máquinas (verificando se realmente elas aguardavam o tempo de processamento no bloco *Delay*).

2. Em um segundo passo, foi avaliada a geração de ordens segundo a lógica do S-DBR, para a qual se monitorou o valor das variáveis em tempo real, verificando

o nível de estoque no sistema, seu TL correspondente e a quantidade de produtos nessa ordem. Por animação visual, observou-se também se a ordem de produção era mesmo gerada e se, quando passava pelo *Sink*, tornava-se produtos finais (FGI), aumentando a quantidade de produtos daquele tipo.

3. No terceiro passo, foram avaliadas a demanda e as medidas de desempenho. Para isso, foram monitoradas suas variáveis em tempo real no fim de cada dia para verificar se a demanda era, de fato, gerada no fim do dia e se as quantidades eram retiradas de forma correta, conforme explicado na Figura 7.

4. No quarto passo foram analisadas as regras de sequenciamento modeladas, observando-se o valor calculado para a regra vigente na animação em tempo real e como as máquinas as estavam sequenciando as ordens de produção, pausando o modelo quando havia atualização do valor das regras ou quando determinada máquina terminava de processar uma ordem e iniciava o processamento de outra que estava no estoque anterior.

5. No quinto passo, foi testado o algoritmo de gerenciamento dinâmico do pulmão. Para isso, foi verificado se o *Status* do Pulmão no fim do dia estava: i) contabilizando corretamente as variáveis TMR e TMG; ii) alcançando o número de dias parametrizados para que houvesse ajuste no TL e qual era esse ajuste e iii) congelamento o DBM em função das regras para TMR e TMG comentadas no capítulo anterior.

Além dessas verificações, construiu-se um *Data Base* que armazena, para cada produto: os dados diários de estoque no sistema, o FGI anterior, o FGI do dia, o Status do Pulmão, o TL anterior, o TL do dia, o TMR, o TMG e as variáveis que marcavam o congelamento. Isso permitiu verificar novamente se as gerações de ordem e o DBM estavam corretos. Por fim, verificou-se se aumentos na variabilidade do modelo e na carga dos recursos reduziam o desempenho do sistema, conforme previsto pela literatura.

3.4 PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO DOS CENÁRIOS

Nessa etapa, foram definidos os parâmetros gerais do modelo e do planejamento do experimento, como a carga nos recursos, demanda, *warm-up*,

quantidades de replicações, e os parâmetros do DBM, o nível de variabilidade dos recursos e da demanda, dentre outros fatores.

3.4.1 Demanda e tempo de processamento

Com a finalidade de a simulação aproximar-se de um ambiente real, foram emuladas variabilidades e flutuações estatísticas (clientes mudam seus pedidos, mudam a quantidade comprada de um dia para outro, as máquinas quebram, operam em vazio, sua eficiência diminui, erros de operação, etc.). Assim, incorporou-se ao modelo a simulação estocástica. O Anylogic fornece inúmeras distribuições aleatórias, entre elas a triangular, normal, lognormal e uniforme.

A distribuição estatística Normal tem sido empregada em diferentes aspectos no chão de fábrica, tais como tempos de processamento, lead time e demanda (BAHROUN; BELGACE, 2019; XIANG, et. al., 2023; NASR; ELSHAR, 2018). A normal truncada também é uma alternativa a ser utilizada para modelagem de tempos de processamentos e demanda, tendo a vantagem de limitar a geração de números desnecessariamente grandes ou pequenos (MCFADDEN, 2022; CHHOR; LEETON; CHAYAKULKHEEREE, 2019; KRENEK; CHA; CHO, 2016; YANG, et. al., 2014; HORNG; LIN, 2012). Chhor, Leeton, Chayakulkheeree (2019) afirmam que as distribuições normalmente são truncadas em um, dois ou três desvios-padrão. Assim sendo, optou-se por truncar, à direita, em dois desvios-padrão para remover a possibilidade da existência de números deliberadamente grandes e em zero, à esquerda, para evitar o surgimento de números negativos.

O desvio-padrão dessas distribuições foi obtido considerando o coeficiente de variação (CV), expresso pela razão entre o desvio padrão (σ) e a média (μ) (Fórmula 16).

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \quad (16)$$

Segundo Hopp, Spearman e Migliavacca (2013), um $CV < 0,75$ representa uma baixa variabilidade, enquanto que um $CV > 1,33$ retrata situações em que se tem uma alta variabilidade. Assim sendo, foi escolhido um CV de 0,5 para representar

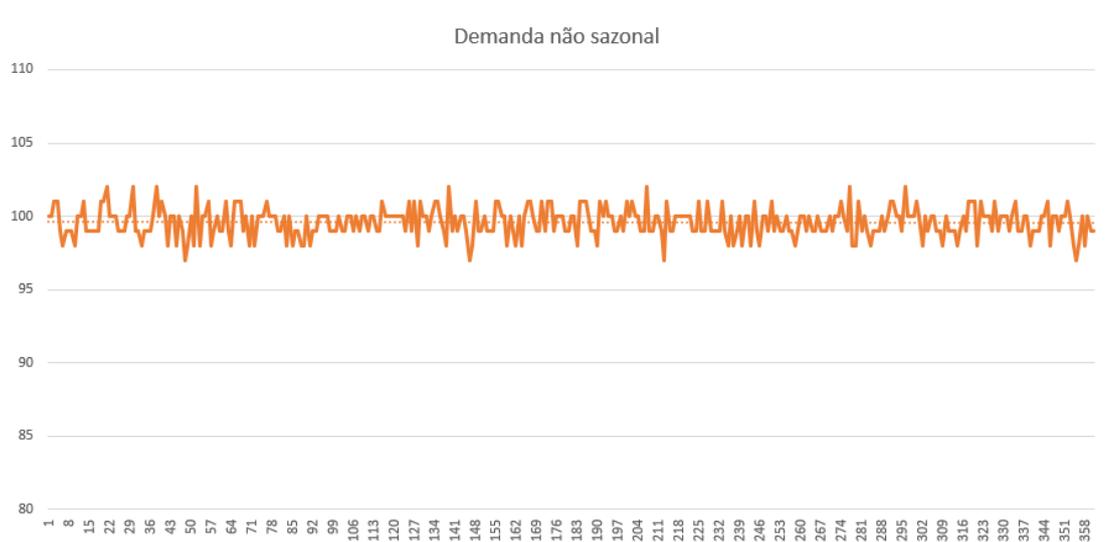
cenários de baixa variabilidade e um CV de 1,5 para representar alta variabilidade, tanto para a demanda quanto para os tempos de processamento.

Foi simulada a produção de seis produtos, sendo que dois deles representam demandas baixas (10 e 20 unidades diárias médias), dois representam demandas moderadas (30 e 50) e, outros dois, demandas altas (70 e 100), resultando em uma demanda diária média de 280 unidades. Já os tempos de processamentos médios foram obtidos multiplicando o tempo disponível diário pelo nível desejado de utilização dos recursos dividido pela demanda média diária.

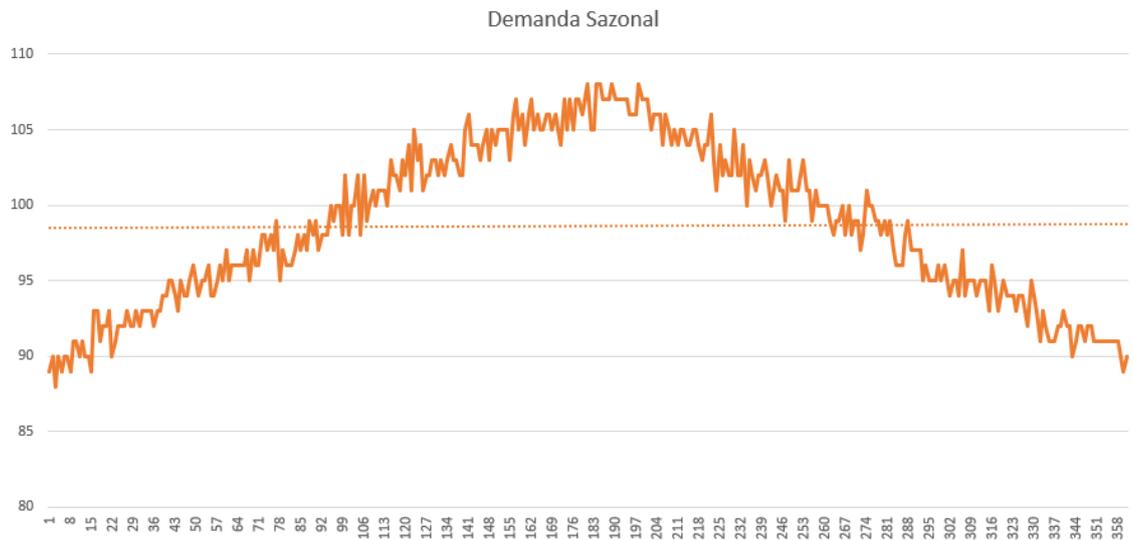
Além disso, foram simuladas demandas sazonais e não sazonais, aproximando-se da realidade deste tipo de ambiente. Os cenários de demanda sazonal foram obtidos com um fator de sazonalidade de 20% em seis meses, isto é, o valor no final dos primeiros seis meses do ano é 20% maior que o inicial, reduzindo-se nos seis meses subsequentes até retornar ao valor inicial do ano. Para tanto, emulou-se um crescimento diário na demanda, arredondando-a para o inteiro mais próximo do valor obtido. Além disso, a demanda inicial foi obtida de tal forma que a média da demanda anual fosse igual à demanda do cenário não sazonal. Dessa forma, começou-se a simulação com um valor menor da demanda, atingindo o valor dos cenários sem tendência por volta da metade do período.

As Figuras 10 e 11 ilustram, respectivamente, a demanda não sazonal e sazonal para um dos produtos simulados.

Figura 10 - Representação Demanda Não Sazonal



Fonte: Autor (2023)

Figura 11- Representação Demanda Sazonal

Fonte: Autor (2023)

3.4.2 Medidas de desempenho

O *Fill Rate* (FR) mensura o nível de serviço da empresa e possibilita a avaliação da organização frente ao atendimento da demanda. Ele é importante, por exemplo, para avaliar cadeias de suprimentos e fábricas que operam em ambientes MTS, como gerenciar armazéns que abastecem múltiplos varejistas (BERLING; JOHANSSON; MARKLUND, 2023), localização de instalações de testes de COVID-19 para atender uma determinada taxa de *Fill Rate* (LIU et al., 2023), avaliação de diferentes métodos de melhoria em ambientes MTA (GOVONI et al., 2021) e o gerenciamento dinâmico do pulmão (NARITA; IKEZIRI; DE SOUZA, 2021; IKEZIRI et al., 2021). Ele é expresso pela porcentagem da demanda que foi atendida imediatamente devido à presença de estoques. Em termos matemáticos, tem-se:

$$FR = \frac{\sum_{t=1}^T DAPt}{\sum_{t=1}^T Dt} \quad (17)$$

Onde $DAPt$ é a demanda atendida no prazo no dia t e Dt é a demanda observada no dia t (LARSEN; THORSTENSON, 2014; KLEIJNEN; SMITS, 2003).

Já o indicador *On Time In Full* (OTIF) mensura a qualidade das entregas da empresa, isto é, retrata a pontualidade das entregas (*On Time*) e se o pedido foi completamente atendido (*In Full*). Dentre suas aplicações, pode-se destacar a avaliação de melhorias ocasionadas pela implementação de ferramentas *Lean Production* em indústrias têxteis (CARRILLO-CORZO et al., 2020; THOMAS et al., 2016) e se alinhamentos em métricas entre parceiros de uma cadeia de suprimento geram melhorias no desempenho dela como um todo (NARAYANAN; ISHFAQ, 2022). Matematicamente, ele pode ser expresso da seguinte forma:

$$OTIF_t = \frac{OE_t}{TO_t} \times \frac{OC_t}{TO_t} \quad (18)$$

Onde OE_t e OC_t são, respectivamente, o número de ordens entregues no prazo e o número de ordens completas no período t (KLEIJNEN; SMITS, 2003).

Como objetivo principal do sistema S-DBR/MTA é garantir uma disponibilidade de produtos acabados boa o suficiente, de tal forma que sempre que o cliente for retirar um determinado produto, a empresa o tenha em estoque, este objetivo pode ser traduzido na avaliação do nível do serviço da empresa e do atendimento à demanda (retratado pelo FR), assim como da qualidade e pontualidade das entregas (retratado pelo OTIF).

3.4.3 Período de aquecimento, número de simulações e sua duração

Para a efetiva realização da simulação, três parâmetros foram definidos: *warm-up*, duração da simulação propriamente dita e número de replicações a serem executadas.

O *warmu-up* é o período de “aquecimento” do sistema, ou seja, é um tempo de rodagem da simulação que não é considerado na apuração dos resultados, sendo destinado a estabilizar o sistema (ROBINSON, 2004). Dentre outras formas de calculá-lo, a utilizada no trabalho foi a *Marginal Standard Error Rule* (MSER). Para tanto, o modelo foi simulado inicialmente 20 vezes para cada cenário, coletando o OTIF e o FR diário para cada uma das regras (Expressão 19).

$$\sum_{i=1}^{n=20} FR_{ij}, \forall j \in \{1, 2, \dots, 360\}. \quad (19)$$

Após isto, calculou se o MSER, como:

$$MSER(d) = \frac{1}{(m - d^2)} \sum_{j=d+1}^m (FR_j - \overline{FR}(m, d))^2. \quad (20)$$

Onde, d é o período de *warm-up* proposto, m é o número de observações de cada simulação e $\overline{FR}(m, d)$ é a média das observações de $d+1$ até m . para mais detalhes sobre o cálculo, consultar robinson (2004).

Com relação à medida *Fill Rate*, o maior tempo de *warm-up* foi a regra RO no cenário 8, requerendo 115 dias. Já para a medida OTIF foram necessários 252 dias. Portanto, o tempo de *warm-up* foi definido em 360 dias (ou um ano), superando o maior valor de *warm-up* encontrado.

Para definição do tempo de simulação, não há uma forma rigorosa para sua definição. Por exemplo, Robison (2004) recomenda que o tempo de simulação após o período de *warm-up* deve ser relativamente maior que ele. Assim sendo, foi-se definido o tempo de simulação efetiva de dois anos (720 dias).

O número de replicações foi obtido do método de intervalo de confiança, que consiste em realizar simulações até que o intervalo de confiança da medida da simulação tenha o nível de significância desejado (ROBINSON, 2004). Nessa pesquisa, optou-se por um nível de significância de 5%, em conformidade com Montgomery e Runger (2021), Narayanan e Adorisio (1983). Para tanto, foi realizada uma simulação inicial de 150 amostras. Após isso, verificou-se o intervalo de confiança para cada regra em cada cenário. A situação que demandou um maior número de replicações, nos cenários não sazonal, foi a regra RO no Cenário 8 com o indicador OTIF, necessitando de 31 replicações para atingir esse critério. Já nos cenários sazonais, a que exigiu o maior número de replicações foi a RNG no Cenário 16 para o indicador *Fill Rate*, demandando um número mínimo de 98 replicações para atingir esse critério. Com base nesses resultados, optou-se por manter as 150 replicações para coleta de dados, uma vez que quanto maior o

número de replicações menor é o intervalo de confiança e, conseqüentemente, há uma maior precisão da média dos resultados.

3.4.4 Definição dos cenários a serem simulados

Um outro importante fator a ser considerado é o nível de utilização dos recursos, respaldando-se em Govoni et. al. (2021), foi-se definido dois níveis de utilização para o RRC, 85% e 95% (alta utilização), já para os recursos foram definidos níveis de utilização de 70% e 85%, representando uma configuração de linha desbalanceada. Além disso, respaldando-se em Hopp, Spearman e Migliavacca (2013), definiu-se dois níveis de variabilidade, alta ($CV = 1,5$) e baixa ($CV = 0,3$), tanto para os recursos quanto para a demanda. Outro ponto que foi considerado é a presença ou não de sazonalidade na demanda, nos cenários de demanda sazonal foi considerado um índice de sazonalidade de 20% em 6 meses. Isto é, no final dos 6 primeiros meses do ano a demanda cresceu 20% em relação ao 1º dia do 1º mês e no término do 12º mês do ano a demanda retorna para o valor inicial do 1º mês.

Assim sendo, foram simulados 16 cenários diferentes, buscando emular situações contrastantes das variáveis escolhidas, como dois níveis de variabilidades na demanda, dois níveis de variabilidade dos tempos de processamento dos recursos, dois níveis de utilização média dos recursos com restrição de capacidade, cada um deles modelados com e sem demanda sazonal. Um resumo dos cenários simulados pode ser visto na Tabela 2, na coluna carga, o primeiro valor representa a utilização do RRC e o segundo valor para os outros recursos, nas colunas CV RECURSOS e CV DEMANDA, temos o coeficiente de variação atribuídos, respectivamente, para os recursos e a demanda, demonstrando os níveis de variabilidade para estes. Já na última coluna (SAZONALIDADE), é trazido se os cenários simulados estavam ou não sujeitos a ação da sazonalidade, isto é, se a demanda apresentava variação em sua média ao longo da simulação.

Tabela 2 - Resumo cenários simulados

PARÂMETROS				
CENÁRIO	CARGA	CV RECURSOS	CV DEMANDA	SAZONALIDADE
1	85/70	0,5	0,5	
2	85/70	0,5	1,5	
3	85/70	1,5	0,5	
4	85/70	1,5	1,5	
5	95/85	0,5	0,5	NÃO SAZONAL
6	95/85	0,5	1,5	
7	95/85	1,5	0,5	
8	95/80	1,5	1,5	
9	85/70	0,5	0,5	
10	85/70	0,5	1,5	
11	85/70	1,5	0,5	
12	85/70	1,5	1,5	
13	95/85	0,5	0,5	SAZONAL
14	95/85	0,5	1,5	
15	95/85	1,5	0,5	
16	95/85	1,5	1,5	

Fonte: Autor (2023)

4 RESULTADOS

Após realizar a simulação com um tempo total de 1080 dias, dos quais 360 correspondem ao *warm-up*, e efetuar 150 replicações, os resultados obtidos foram compilados em uma planilha para posterior análise. As Tabelas 3 e 4 trazem os resultados médios obtidos nas simulações, respectivamente, para os indicadores *Fill Rate* e OTIF.

Tabela 3 - Resultados médios obtidos para o indicador Fill Rate

CENÁRIO	RO	BM	RNG	FIFO	SPTR1	SPTR2	SPTR1	SPTR2
1	97,411	99,380	97,270	98,016	88,629	89,146	91,654	92,063
2	96,897	99,012	95,846	97,850	86,087	85,482	89,098	89,473
3	96,848	98,674	96,442	97,415	86,736	87,460	91,160	91,544
4	96,225	98,335	95,649	96,239	85,632	85,150	88,182	88,992
5	96,984	98,967	96,801	97,357	84,475	84,951	89,478	89,510
6	95,893	98,349	93,759	96,124	81,868	80,979	85,471	84,744
7	95,408	98,531	91,583	93,342	80,930	80,930	87,398	88,337
8	91,546	96,684	91,086	93,229	76,811	77,623	84,539	83,305
9	92,913	97,454	91,045	94,069	79,884	80,477	84,238	83,244
10	88,473	94,135	87,745	91,057	75,296	74,453	79,404	78,332
11	92,214	96,769	89,732	93,718	76,013	75,718	81,815	81,795
12	86,736	94,474	85,738	89,805	72,104	71,728	75,401	75,942
13	85,781	92,452	84,449	90,037	71,784	71,784	74,318	73,606
14	79,807	85,457	79,563	83,606	69,518	70,110	70,836	71,359
15	84,552	91,871	83,978	87,255	69,113	68,182	73,693	70,219
16	81,689	86,989	78,333	82,708	67,248	67,347	70,957	69,759

Fonte: Autor (2023)

Tabela 4 - Resultados médios obtidos para o indicador On Time In Full (OTIF)

CENÁRIO	RO	BM	RNG	FIFO	SPTR1	SPTR2	SPTR1	SPTR2
1	96,899	99,173	96,0739	97,798	80,802	81,276	89,168	89,385
2	95,823	98,821	94,5540	97,693	78,486	77,671	86,651	86,848
3	95,337	98,247	94,9918	95,912	78,601	79,255	88,308	88,548
4	94,741	97,545	94,458	94,809	77,531	77,359	85,774	86,696
5	95,716	98,364	96,124	95,847	74,536	75,388	88,577	88,907
6	95,452	97,512	93,321	94,727	71,336	70,087	84,267	83,850
7	95,153	97,852	90,809	93,264	69,734	69,734	86,908	87,230
8	91,185	96,109	90,498	93,091	64,130	64,560	83,382	82,458
9	91,388	96,278	89,633	92,120	69,991	70,541	82,718	82,070
10	87,465	92,797	86,304	88,958	64,665	64,372	79,057	78,048
11	90,622	95,640	88,359	91,899	65,200	64,885	80,558	80,734
12	85,486	93,138	84,478	88,067	61,224	60,910	74,818	75,673
13	83,924	91,042	83,587	87,932	58,103	58,103	71,783	70,646
14	79,266	83,716	77,836	81,102	56,633	56,919	66,573	67,190
15	83,779	90,456	81,815	85,380	55,535	54,564	71,321	67,160
16	81,352	85,420	77,009	80,395	53,983	54,030	67,464	65,676

Fonte: Autor (2023)

O próximo passo para analisar efetivamente os dados é a realização de testes estatísticos e, para tanto, foi utilizado o software R. O primeiro teste foi verificar se há uma normalidade dos dados. Para tanto foi realizado o teste de Shapiro-Wilk, conforme Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 - Resultados do teste Shapiro Wilk para o indicador Fill Rate

CENÁRIO	RO	BM	RANDOM	FIFO	SPTR1	SPTR2	SPTR1d	SPTR2d
1	2,20E-16	2,20E-16	2,20E-16	2,20E-16	2,77E-07	5,38E-08	5,90E-10	3,68E-09
2	2,20E-16	2,20E-16	3,31E-15	2,20E-16	2,62E-05	6,63E-16	6,54E-06	2,25E-06
3	2,20E-16	3,62E-15	5,84E-16	2,57E-11	9,04E-13	7,96E-13	0,000949	2,48E-11
4	4,13E-16	1,66E-12	5,04E-14	2,20E-16	2,77E-06	3,40E-10	2,93E-06	1,09E-05
5	2,20E-16	3,37E-15	3,00E-16	1,03E-13	5,26E-08	4,36E-07	1,04E-11	2,03E-11
6	2,20E-16	2,20E-16	2,20E-16	4,49E-15	1,03E-05	2,82E-14	6,58E-06	0,000195
7	7,96E-15	2,20E-16	8,33E-14	2,20E-16	4,90E-09	4,90E-09	1,22E-05	1,87E-07
8	3,84E-15	2,20E-16	2,63E-12	2,20E-16	3,49E-08	0,01367	1,98E-07	2,15E-08
9	1,06E-13	2,22E-12	8,69E-12	8,96E-12	1,25E-12	3,61E-11	2,47E-07	7,40E-08
10	6,54E-09	9,65E-10	6,10E-09	2,95E-10	9,72E-10	6,68E-06	0,003419	0,001839
11	1,26E-11	3,99E-16	3,64E-12	2,67E-15	7,87E-07	4,47E-06	2,85E-06	0,000287
12	6,44E-06	1,07E-12	1,50E-07	2,29E-09	6,46E-07	9,61E-05	0,001086	0,03151
13	1,10E-04	8,59E-07	2,51E-06	8,31E-11	0,000523	0,000523	0,002556	0,06008
14	7,68E-06	9,19E-08	4,53E-08	1,13E-09	0,103	0,000176	0,1692	0,116
15	6,86E-10	3,66E-12	6,97E-11	9,30E-13	0,002552	0,7173	0,1151	0,003774
16	5,07E-07	4,05E-06	4,67E-07	1,04E-02	0,001019	1,72E-04	0,4507	0,01277

Fonte: Autor (2023)

Tabela 6 - Resultados do teste Shapiro Wilk para o indicador OTIF

CENÁRIO	RO	BM	RNG	FIFO	SPTR1	SPTR2	SPTR1d	SPTR2d
1	2,20E-16	2,20E-16	1,18E-14	2,20E-16	2,19E-04	3,61E-04	2,24E-09	3,57E-09
2	2,20E-16	2,20E-16	5,06E-10	2,20E-16	4,53E-02	8,13E-09	1,79E-02	1,34E-01
3	2,20E-16	2,20E-16	1,09E-10	4,04E-04	2,80E-09	3,50E-08	0,05411	9,63E-08
4	4,29E-13	1,94E-05	1,23E-11	1,60E-15	1,41E-01	4,73E-07	1,14E-04	4,28E-04
5	5,21E-13	1,30E-11	2,20E-16	4,39E-10	1,14E-02	2,89E-05	5,01E-08	3,73E-06
6	1,32E-12	1,86E-14	2,20E-16	2,26E-11	2,27E-03	1,89E-10	6,62E-06	8,92E-07
7	4,92E-15	8,79E-11	9,69E-14	2,94E-16	1,08E-03	1,08E-03	5,93E-05	1,69E-08
8	2,45E-15	2,20E-16	3,22E-12	2,20E-16	8,60E-04	0,202	3,54E-08	4,45E-09
9	1,80E-08	2,64E-08	2,15E-08	3,61E-08	4,13E-09	3,48E-04	2,56E-04	3,89E-03
10	1,79E-08	2,64E-08	2,15E-08	3,61E-08	4,13E-09	3,48E-04	0,000256	0,003886
11	1,59E-13	1,99E-14	2,28E-11	8,38E-14	2,10E-02	1,68E-04	8,94E-07	0,000125
12	1,52E-08	4,58E-11	3,76E-07	1,47E-07	1,89E-04	2,72E-02	0,06761	0,02342
13	1,37E-04	2,65E-05	3,26E-05	4,60E-06	0,8581	0,8581	0,000137	0,02616
14	3,78E-07	2,68E-10	1,55E-05	7,47E-09	0,6045	0,3183	0,008416	0,03592
15	1,08E-08	3,38E-11	6,53E-09	4,55E-12	0,9423	0,01706	0,3918	0,002855
16	4,09E-09	1,66E-08	6,50E-09	1,65E-05	0,06301	1,92E-02	0,05012	0,000396

Fonte: Autor (2023)

Analisando-se as Tabelas 5 e 6, verifica-se, para um nível de 5% de significância, que em todos os cenários ao menos uma das regras não apresenta normalidade, sendo necessária a utilização de testes não paramétricos. Nesse sentido, para verificar se há diferença estatística nos cenários, foi realizado o teste de Friedman. Conforme Tabela 7, em todos os cenários e para ambos os indicadores há ao menos duas regras que se diferem estatisticamente.

Tabela 7 - Teste de Friedman

CENÁRIOS	1	2	3	4	5	6	7	8
FILL RATE	2,20E-16							
OTIF	2,20E-16							
CENÁRIOS	9	10	11	12	13	14	15	16
FILL RATE	2,20E-16							
OTIF	2,20E-16							

Fonte: Autor (2023)

Dados esses resultados, na sequência, realizou-se o teste post-hoc de Nemenyi com ajuste de Bonferroni (SHANG,2015; RIBEIRO,2021), para verificar

quais regras se diferem estatisticamente em amostras não normais, após verificada diferença entre as medianas (Tabelas 8 e 9).

Tabela 8 - Teste de Nemenyi com ajuste de Bonferroni para o indicador Fill Rate

CENÁRIO 1								CENÁRIO 2							
	IFA	BM	RNG	FIFO	SPTR1	SPTR2	SPTR1d		IFA	BM	RNG	FIFO	SPTR1	SPTR2	SPTR1d
BM	9E-10	-	-	-	-	-	-	BM	0,000012	-	-	-	-	-	-
RNG	1	7E-09	-	-	-	-	-	RNG	0,74561	7E-10	-	-	-	-	-
FIFO	0,0089	0,044	0,025	-	-	-	-	FIFO	0,18251	0,183	9E-04	-	-	-	-
SPTR1	2E-16	2E-16	2E-16	2E-16	-	-	-	SPTR1	2E-16	2E-16	8E-14	2E-16	-	-	-
SPTR2	2E-16	2E-16	2E-16	2E-16	0,99	-	-	SPTR2	2E-16	2E-16	6E-14	2E-16	1	-	-
SPTR1d	5E-14	2E-16	8E-14	2E-16	0,0046	0,0756	-	SPTR1d	7,8E-14	2E-16	6E-14	2E-16	0,491	0,3813	-
SPTR2d	1E-13	2E-16	8E-14	2E-16	0,0002	0,0066	0,99514	SPTR2d	6,3E-14	2E-16	2E-13	2E-16	0,0756	0,0472	0,98627
CENÁRIO 3								CENÁRIO 4							
	IFA	BM	RNG	FIFO	SPTR1	SPTR2	SPTR1d		IFA	BM	RNG	FIFO	SPTR1	SPTR2	SPTR1d
BM	0,0012	-	-	-	-	-	-	BM	0,00091	-	-	-	-	-	-
RNG	0,4272	2E-08	-	-	-	-	-	RNG	0,99413	2E-05	-	-	-	-	-
FIFO	1	0,0005	0,573	-	-	-	-	FIFO	1	0,003	0,968	-	-	-	-
SPTR1	2E-16	2E-16	2E-16	2E-16	-	-	-	SPTR1	2E-16	2E-16	2E-16	2E-16	-	-	-
SPTR2	2E-16	2E-16	2E-16	2E-16	0,9999	-	-	SPTR2	2E-16	2E-16	2E-16	2E-16	0,9997	-	-
SPTR1d	8E-14	2E-16	8E-14	7E-14	0,0042	0,0179	-	SPTR1d	7,2E-14	2E-16	7E-14	8E-14	0,5893	0,2711	-
SPTR2d	7E-14	2E-16	2E-13	9E-14	0,0003	0,0018	0,9987	SPTR2d	9,2E-14	2E-16	6E-14	7E-14	0,0973	0,0226	0,98148
CENÁRIO 5								CENÁRIO 6							
	IFA	BM	RNG	FIFO	SPTR1	SPTR2	SPTR1d		IFA	BM	RNG	FIFO	SPTR1	SPTR2	SPTR1d
BM	0,0017	-	-	-	-	-	-	BM	0,01405	-	-	-	-	-	-
RNG	0,7528	0,0009	-	-	-	-	-	RNG	0,08585	1E-08	-	-	-	-	-
FIFO	0,4194	9E-05	1	-	-	-	-	FIFO	0,98827	5E-04	0,507	-	-	-	-
SPTR1	2E-16	2E-16	2E-16	2E-16	-	-	-	SPTR1	2E-16	2E-16	8E-14	2E-16	-	-	-
SPTR2	2E-16	2E-16	2E-16	2E-16	1	-	-	SPTR2	2E-16	2E-16	2E-14	2E-16	0,9983	-	-
SPTR1d	2E-14	2E-16	6E-14	1E-13	0,0012	0,0024	-	SPTR1d	2E-16	2E-16	8E-14	7E-14	0,4748	0,1388	-
SPTR2d	8E-14	2E-16	9E-14	7E-14	0,0002	0,0005	0,99992	SPTR2d	2E-16	2E-16	8E-14	1E-14	0,9371	0,6057	0,99159
CENÁRIO 7								CENÁRIO 8							
	IFA	BM	RNG	FIFO	SPTR1	SPTR2	SPTR1d		IFA	BM	RNG	FIFO	SPTR1	SPTR2	SPTR1d
BM	0,0001	-	-	-	-	-	-	BM	0,000061	-	-	-	-	-	-
RNG	0,0021	7E-14	-	-	-	-	-	RNG	0,968	2E-07	-	-	-	-	-
FIFO	0,8852	8E-08	0,155	-	-	-	-	FIFO	0,8	0,028	0,173	-	-	-	-
SPTR1	2E-16	2E-16	9E-14	2E-16	-	-	-	SPTR1	2E-16	2E-16	8E-14	2E-16	-	-	-
SPTR2	2E-16	2E-16	9E-14	2E-16	1	-	-	SPTR2	2E-16	2E-16	8E-14	2E-16	1	-	-
SPTR1d	7E-14	2E-16	1E-04	2E-11	9E-05	1E-04	-	SPTR1d	2,7E-10	2E-16	2E-07	9E-14	3E-05	3E-05	-
SPTR2d	2E-13	2E-16	0,002	1E-09	3E-06	4E-06	0,99834	SPTR2d	4E-13	2E-16	7E-10	9E-14	0,002	0,002	0,986

CENÁRIO 9								CENÁRIO 10							
	IFA	BM	RNG	FIFO	SPTR1	SPTR2	SPTR1d		IFA	BM	RNG	FIFO	SPTR1	SPTR2	SPTR1d
BM	1E-07	-	-	-	-	-	-	BM	1,7E-06	-	-	-	-	-	-
RNG	0,147	8E-14	-	-	-	-	-	RNG	0,9979	3E-08	-	-	-	-	-
FIFO	0,999	3E-06	0,028	-	-	-	-	FIFO	0,1552	0,091	0,024	-	-	-	-
SPTR1	2E-16	2E-16	8E-14	2E-16	-	-	-	SPTR1	7,2E-14	2E-16	6E-14	2E-16	-	-	-
SPTR2	2E-16	2E-16	9E-14	2E-16	1	-	-	SPTR2	2,3E-14	2E-16	7E-14	2E-16	0,9997	-	-
SPTR1d	6E-14	2E-16	8E-09	7E-14	0,051	0,066	-	SPTR1d	3,1E-11	2E-16	3E-09	9E-14	0,0093	0,0014	-
SPTR2d	8E-14	2E-16	4E-10	7E-14	0,164	0,202	1	SPTR2d	1E-13	2E-16	1E-12	7E-14	0,213	0,062	0,9595
CENÁRIO 11								CENÁRIO 12							
	IFA	BM	RNG	FIFO	SPTR1	SPTR2	SPTR1d		IFA	BM	RNG	FIFO	SPTR1	SPTR2	SPTR1d
BM	8E-05	-	-	-	-	-	-	BM	1,4E-09	-	-	-	-	-	-
RNG	0,1166	4E-12	-	-	-	-	-	RNG	0,998	2E-11	-	-	-	-	-
FIFO	0,9595	0,0078	0,004	-	-	-	-	FIFO	0,147	0,002	0,024	-	-	-	-
SPTR1	2E-16	2E-16	7E-14	2E-16	-	-	-	SPTR1	8,1E-14	2E-16	9E-14	2E-16	-	-	-
SPTR2	2E-16	2E-16	9E-14	2E-16	1	-	-	SPTR2	7,5E-14	2E-16	8E-14	2E-16	1	-	-
SPTR1d	6E-14	2E-16	3E-08	7E-14	0,0029	0,002	-	SPTR1d	7,8E-14	2E-16	2E-13	4E-14	0,507	0,213	-
SPTR2d	9E-14	2E-16	3E-09	9E-14	0,011	0,0078	1	SPTR2d	1,5E-13	2E-16	6E-12	8E-14	0,213	0,062	1
CENÁRIO 13								CENÁRIO 14							
	IFA	BM	RNG	FIFO	SPTR1	SPTR2	SPTR1d		IFA	BM	RNG	FIFO	SPTR1	SPTR2	SPTR1d
BM	0,0003	-	-	-	-	-	-	BM	0,012	-	-	-	-	-	-
RNG	0,9979	1E-05	-	-	-	-	-	RNG	1000	0,031	-	-	-	-	-
FIFO	0,0152	0,9787	0,001	-	-	-	-	FIFO	0,259	0,955	0,427	-	-	-	-
SPTR1	9E-14	2E-16	6E-14	2E-16	-	-	-	SPTR1	3,1E-11	8E-14	4E-12	7E-14	-	-	-
SPTR2	7E-14	2E-16	6E-14	2E-16	1	-	-	SPTR2	2,6E-09	7E-14	4E-10	6E-14	0,998	-	-
SPTR1d	7E-14	2E-16	2E-13	2E-16	0,6856	0,701	-	SPTR1d	5,6E-09	8E-14	9E-10	6E-14	0,995	1	-
SPTR2d	9E-14	2E-16	8E-14	2E-16	0,9595	0,9641	0,9987	SPTR2d	2,5E-07	9E-14	5E-08	1E-13	0,87	0,996	0,999
CENÁRIO 15								CENÁRIO 16							
	IFA	BM	RNG	FIFO	SPTR1	SPTR2	SPTR1d		IFA	BM	RNG	FIFO	SPTR1	SPTR2	SPTR1d
BM	0,0006	-	-	-	-	-	-	BM	0,04716	-	-	-	-	-	-
RNG	100000	0,0005	-	-	-	-	-	RNG	0,95455	8E-04	-	-	-	-	-
FIFO	0,7738	0,1237	0,76	-	-	-	-	FIFO	100000	0,066	0,923	-	-	-	-
SPTR1	9E-14	2E-16	7E-14	2E-16	-	-	-	SPTR1	7,7E-14	2E-16	9E-14	7E-14	-	-	-
SPTR2	7E-14	2E-16	8E-14	2E-16	1	-	-	SPTR2	5,9E-14	2E-16	3E-13	5E-14	0,9997	-	-
SPTR1d	3E-12	2E-16	3E-12	5E-14	0,0914	0,0409	-	SPTR1d	2,2E-11	7E-14	4E-08	9E-12	0,352	0,6856	-
SPTR2d	7E-14	2E-16	7E-14	2E-16	1	0,9992	0,18251	SPTR2d	1,5E-13	5E-14	2E-10	1E-13	0,8598	0,9863	0,99295

Fonte: Autor (2023)

Tabela 9 - Teste de Nemenyi com ajuste de Bonferroni indicador OTIF

CENARIO 1								CENARIO 2							
	IFA	BM	RNG	FIFO	SPTR1	SPTR2	SPTR1d		IFA	BM	RNG	FIFO	SPTR1	SPTR2	SPTR1d
BM	0,0209	-	-	-	-	-	-	BM	0,0004	-	-	-	-	-	-
RNG	0,0048	6E-11	-	-	-	-	-	RNG	0,1685	2E-10	-	-	-	-	-
FIFO	1	0,06	0,0012	-	-	-	-	FIFO	0,3307	0,4194	4E-05	-	-	-	-
SPTR1	2E-16	2E-16	2E-16	2E-16	-	-	-	SPTR1	2E-16	2E-16	2E-16	2E-16	-	-	-
SPTR2	2E-16	2E-16	2E-16	2E-16	1	-	-	SPTR2	2E-16	2E-16	2E-16	2E-16	1	-	-
SPTR1d	8E-14	2E-16	1E-09	8E-14	7E-08	3E-07	-	SPTR1d	1E-13	2E-16	3E-11	2E-16	2E-06	1E-05	-
SPTR2d	7E-14	2E-16	2E-09	8E-14	4E-08	2E-07	1	SPTR2d	9E-14	2E-16	9E-10	2E-16	1E-07	8E-07	0,9998
CENARIO 3								CENARIO 4							
	IFA	BM	RNG	FIFO	SPTR1	SPTR2	SPTR1		IFA	BM	RNG	FIFO	SPTR1	SPTR2	SPTR1
BM	5E-05	-	-	-	-	-	-	BM	4E-05	-	-	-	-	-	-
RNG	0,87	2E-08	-	-	-	-	-	RNG	1	2E-05	-	-	-	-	-
FIFO	1	3E-05	0,92	-	-	-	-	FIFO	1	0,0002	0,9995	-	-	-	-
SPTR1	2E-16	2E-16	2E-16	2E-16	-	-	-	SPTR1	2E-16	2E-16	2E-16	2E-16	-	-	-
SPTR2	2E-16	2E-16	2E-16	2E-16	1	-	-	SPTR2	2E-16	2E-16	2E-16	2E-16	0,9999	-	-
SPTR1	1E-13	2E-16	3E-13	5E-14	1E-08	8E-08	-	SPTR1	6E-14	2E-16	7E-14	7E-14	6E-05	7E-06	-
SPTR2	6E-14	2E-16	1E-12	6E-14	2E-09	2E-08	1	SPTR2	7E-14	2E-16	8E-14	5E-14	2E-07	2E-08	0,97021
CENARIO 5								CENARIO 6							
	IFA	BM	RNG	FIFO	SPTR1	SPTR2	SPTR1		IFA	BM	RNG	FIFO	SPTR1	SPTR2	SPTR1
BM	7E-07	-	-	-	-	-	-	BM	0,006	-	-	-	-	-	-
RNG	0,259	0,028	-	-	-	-	-	RNG	0,819	7E-06	-	-	-	-	-
FIFO	1	6E-07	0,247	-	-	-	-	FIFO	0,912	2E-05	1000	-	-	-	-
SPTR1	2E-16	2E-16	2E-16	2E-16	-	-	-	SPTR1	2E-16	2E-16	2E-16	2E-16	-	-	-
SPTR2	2E-16	2E-16	2E-16	2E-16	1000	-	-	SPTR2	2E-16	2E-16	2E-16	2E-16	1000	-	-
SPTR1	8E-14	2E-16	8E-14	9E-14	1E-10	9E-10	-	SPTR1	8E-14	2E-16	9E-14	7E-14	2E-07	6E-08	-
SPTR2	2E-13	2E-16	8E-14	2E-13	6E-12	4E-11	1	SPTR2	8E-14	2E-16	8E-14	7E-14	2E-07	7E-08	1
CENARIO 7								CENARIO 8							
	IFA	BM	RNG	FIFO	SPTR1	SPTR2	SPTR1		IFA	BM	RNG	FIFO	SPTR1	SPTR2	SPTR1
BM	0,1552	-	-	-	-	-	-	BM	0,0031	-	-	-	-	-	-
RNG	0,0011	6E-10	-	-	-	-	-	RNG	0,7086	1E-06	-	-	-	-	-
FIFO	0,9304	0,004	0,0755	-	-	-	-	FIFO	0,8598	0,2184	0,0455	-	-	-	-
SPTR1	2E-16	2E-16	2E-16	2E-16	-	-	-	SPTR1	2E-16	2E-16	2E-16	2E-16	-	-	-
SPTR2	2E-16	2E-16	2E-16	2E-16	10000	-	-	SPTR2	2E-16	2E-16	2E-16	2E-16	0,9999	-	-
SPTR1	1E-13	8E-14	0,0022	3E-10	1E-13	1E-13	-	SPTR1	1E-09	8E-14	2E-05	1E-13	4E-12	2E-13	-
SPTR2	2E-13	7E-14	0,0029	4E-10	1E-13	1E-13	1	SPTR2	5E-11	8E-14	2E-06	8E-14	1E-10	5E-12	0,9998

CENÁRIO 9								CENÁRIO 10							
	IFA	BM	RNG	FIFO	SPTR1	SPTR2	SPTR1d		IFA	BM	RNG	FIFO	SPTR1	SPTR2	SPTR1d
BM	0,0002	-	-	-	-	-	-	BM	0,0002	-	-	-	-	-	-
RNG	0,9916	3E-06	-	-	-	-	-	RNG	0,9916	3E-06	-	-	-	-	-
FIFO	0,9641	0,013	0,5565	-	-	-	-	FIFO	0,9641	0,013	0,5565	-	-	-	-
SPTR1	2E-16	2E-16	2E-16	2E-16	-	-	-	SPTR1	2E-16	2E-16	2E-16	2E-16	-	-	-
SPTR2	2E-16	2E-16	2E-16	2E-16	1	-	-	SPTR2	2E-16	2E-16	2E-16	2E-16	1	-	-
SPTR1d	2E-09	5E-14	4E-07	1E-12	1E-13	8E-14	-	SPTR1d	2E-09	5E-14	4E-07	1E-12	1E-13	8E-14	-
SPTR2d	1E-10	2E-16	3E-08	1E-13	4E-13	1E-13	0,99984	SPTR2d	1E-10	2E-16	3E-08	1E-13	4E-13	1E-13	0,99984
CENÁRIO 11								CENÁRIO 12							
	IFA	BM	RNG	FIFO	SPTR1	SPTR2	SPTR1d		IFA	BM	RNG	FIFO	SPTR1	SPTR2	SPTR1d
BM	0,0003	-	-	-	-	-	-	BM	9E-09	-	-	-	-	-	-
RNG	0,2295	3E-10	-	-	-	-	-	RNG	0,9979	1E-10	-	-	-	-	-
FIFO	0,996	0,006	0,0342	-	-	-	-	FIFO	0,4748	0,0005	0,131	-	-	-	-
SPTR1	2E-16	2E-16	2E-16	2E-16	-	-	-	SPTR1	2E-16	2E-16	2E-16	2E-16	-	-	-
SPTR2	2E-16	2E-16	2E-16	2E-16	100000	-	-	SPTR2	2E-16	2E-16	2E-16	2E-16	1	-	-
SPTR1d	1E-13	2E-16	2E-07	6E-14	1E-11	6E-12	-	SPTR1d	1E-09	2E-16	9E-08	7E-14	1E-10	8E-12	-
SPTR2d	9E-14	2E-16	2E-07	5E-14	2E-11	8E-12	100000	SPTR2d	9E-08	2E-16	4E-06	2E-13	8E-13	2E-13	0,9979
CENÁRIO 13								CENÁRIO 14							
	IFA	BM	RNG	FIFO	SPTR1	SPTR2	SPTR1d		IFA	BM	RNG	FIFO	SPTR1	SPTR2	SPTR1d
BM	0,0008	-	-	-	-	-	-	BM	0,524	-	-	-	-	-	-
RNG	100000	8E-04	-	-	-	-	-	RNG	0,972	0,062	-	-	-	-	-
FIFO	0,1237	0,813	0,1237	-	-	-	-	FIFO	0,999	0,89	0,731	-	-	-	-
SPTR1	2E-16	2E-16	2E-16	2E-16	-	-	-	SPTR1	2E-16	2E-16	8E-14	2E-16	-	-	-
SPTR2	2E-16	2E-16	2E-16	2E-16	100000	-	-	SPTR2	2E-16	2E-16	8E-14	2E-16	1000	-	-
SPTR1d	2E-11	2E-16	2E-11	8E-14	3E-09	3E-09	-	SPTR1d	5E-11	5E-14	5E-08	6E-13	2E-05	4E-05	-
SPTR2d	9E-13	2E-16	9E-13	8E-14	5E-08	5E-08	0,99989	SPTR2d	5E-10	7E-14	3E-07	6E-12	4E-06	8E-06	1
CENÁRIO 15								CENÁRIO 16							
	IFA	BM	RNG	FIFO	SPTR1	SPTR2	SPTR1d		IFA	BM	RNG	FIFO	SPTR1	SPTR2	SPTR1d
BM	0,0193	-	-	-	-	-	-	BM	0,678	-	-	-	-	-	-
RNG	0,9233	1E-04	-	-	-	-	-	RNG	0,63	0,011	-	-	-	-	-
FIFO	1	0,066	0,731	-	-	-	-	FIFO	1	0,331	0,912	-	-	-	-
SPTR1	2E-16	2E-16	2E-16	2E-16	-	-	-	SPTR1	2E-16	2E-16	2E-16	2E-16	-	-	-
SPTR2	2E-16	2E-16	2E-16	2E-16	1	-	-	SPTR2	2E-16	2E-16	3E-14	2E-16	1000	-	-
SPTR1d	1E-10	7E-14	4E-07	8E-12	2E-10	2E-11	-	SPTR1d	2E-11	6E-14	2E-06	9E-10	3E-08	2E-07	-
SPTR2d	1E-13	2E-16	2E-13	7E-14	9E-05	1E-05	0,36649	SPTR2d	3E-13	7E-14	7E-08	1E-11	1E-06	6E-06	0,999

Fonte: Autor (2023)

Com a finalidade de melhorar a visualização e comparação entre as regras de sequenciamento, foi realizado o ranqueamento dessas regras. A construção dele é feito primeiramente ordenando as regras de sequenciamento com base nos valores médios dos indicadores obtidos. Após isso, verifica-se a presença de diferença estatística entre esta regra com as outras que deram um valor inferior, caso haja diferença estatística, a primeira regra recebe uma letra, por exemplo, “a” e a outra regra “b”, caso não haja diferença estatística entre as regras, ambas recebem a mesma letra. O ranqueamento é uma poderosa ferramenta de visualização e interpretação dos dados, pois permite verificar qual foi a regra com melhor desempenho em cada cenário e se houve diferença estatística, permitindo realizar

comparações e interpretações entre os desempenhos (PIMENTEL, 2000). O ranqueamento realizado pode ser visto Tabelas 10, 11, 12 e 13.

Tabela 10 - Ranqueamento segundo o indicador Fill Rate para os cenários sem sazonalidade

RANQUEAMENTO INDICADOR FILL RATE SEM SAZONALIDADE					
CENARIO 1			CENARIO 2		
REGRA	MÉDIA	SIGNIFICÂNCIA	REGRA	MÉDIA	SIGNIFICÂNCIA
BM	99,38	a	BM	99,01	a
FIFO	98,02	b	FIFO	97,85	ab
RO	97,41	bc	RO	96,90	b
RNG	97,27	c	RNG	95,85	b
SPTR2 (1/3 TL)	92,06	d	SPTR2 (1/3 TL)	89,47	c
SPTR1 (1/3 TL)	91,65	de	SPTR1 (1/3 TL)	89,10	cd
SPTR2 (FGI=0)	89,15	e	SPTR1 (FGI=0)	86,09	cd
SPTR1 (FGI=0)	88,63	e	SPTR2 (FGI=0)	85,48	d
CENARIO 3			CENARIO 4		
REGRA	MÉDIA	SIGNIFICÂNCIA	REGRA	MÉDIA	SIGNIFICÂNCIA
BM	98,67	a	BM	98,34	a
FIFO	97,42	b	FIFO	96,24	b
RO	96,85	b	RO	96,22	b
RNG	96,44	b	RNG	95,65	b
SPTR2 (1/3 TL)	91,54	c	SPTR2 (1/3 TL)	88,99	c
SPTR1 (1/3 TL)	91,16	c	SPTR1 (1/3 TL)	88,18	cd
SPTR2 (FGI=0)	87,46	d	SPTR1 (FGI=0)	85,63	cd
SPTR1 (FGI=0)	86,74	d	SPTR2 (FGI=0)	85,15	c
CENARIO 5			CENARIO 6		
REGRA	MÉDIA	SIGNIFICÂNCIA	REGRA	MÉDIA	SIGNIFICÂNCIA
BM	98,97	a	BM	98,35	a
FIFO	97,36	b	FIFO	96,12	b
RO	96,98	b	RO	95,89	b
RNG	96,80	b	RNG	93,76	b
SPTR2 (1/3 TL)	89,51	c	SPTR1 (1/3 TL)	85,47	c
SPTR1 (1/3 TL)	89,48	c	SPTR2 (1/3 TL)	84,74	c
SPTR2 (FGI=0)	84,95	d	SPTR1 (FGI=0)	81,87	c
SPTR1 (FGI=0)	84,48	d	SPTR2 (FGI=0)	80,98	c
CENARIO 7			CENARIO 8		
REGRA	MÉDIA	SIGNIFICÂNCIA	REGRA	MÉDIA	SIGNIFICÂNCIA
BM	98,53	a	BM	96,68	a
RO	95,41	b	FIFO	93,23	b
FIFO	93,34	bc	RO	91,55	b
RNG	91,58	c	RNG	91,09	b
SPTR2 (1/3 TL)	88,34	d	SPTR1 (1/3 TL)	84,54	c
SPTR1 (1/3 TL)	87,40	d	SPTR2 (1/3 TL)	83,31	c
SPTR1 (FGI=0)	80,93	e	SPTR2 (FGI=0)	77,62	d
SPTR2 (FGI=0)	80,93	e	SPTR1 (FGI=0)	76,81	d

Fonte: Autor (2023)

Tabela 11 - Ranqueamento segundo o indicador Fill Rate para os cenários com sazonalidade

RANQUEAMENTO INDICADOR FILL RATE COM SAZONALIDADE					
CENARIO 9			CENARIO 10		
REGRA	MÉDIA	SIGNIFICÂNCIA	REGRA	MÉDIA	SIGNIFICÂNCIA
BM	97,4542	a	BM	94,13504	a
FIFO	94,06886	b	FIFO	91,056847	ab
RO	92,913393	bc	RO	88,473227	b
RNG	91,044587	c	RNG	87,744773	b
SPTR1 (1/3 TL)	84,237693	d	SPTR1 (1/3 TL)	79,404407	c
SPTR2 (1/3 TL)	83,244227	d	SPTR2 (1/3 TL)	78,3323	cd
SPTR2 (FGI=0)	80,47736	d	SPTR1 (FGI=0)	75,296073	d
SPTR1 (FGI=0)	79,8844	d	SPTR2 (FGI=0)	74,4529	d
CENARIO 11			CENARIO 12		
REGRA	MÉDIA	SIGNIFICÂNCIA	REGRA	MÉDIA	SIGNIFICÂNCIA
BM	96,76902	a	BM	94,47378	a
FIFO	93,718253	b	FIFO	89,80498	b
RO	92,213713	bc	RO	86,73604	bc
RNG	89,732393	c	RNG	85,737607	c
SPTR1 (1/3 TL)	81,8149	d	SPTR2 (1/3 TL)	75,94198	d
SPTR2 (1/3 TL)	81,79516	d	SPTR1 (1/3 TL)	75,401213	d
SPTR1 (FGI=0)	76,01318	e	SPTR1 (FGI=0)	72,10372	d
SPTR2 (FGI=0)	75,717567	e	SPTR2 (FGI=0)	71,728067	d
CENARIO 13			CENARIO 14		
REGRA	MÉDIA	SIGNIFICÂNCIA	REGRA	MÉDIA	SIGNIFICÂNCIA
BM	92,45194	a	BM	85,457313	a
FIFO	90,037493	a	FIFO	83,605527	ab
RO	85,780773	b	RO	79,806687	b
RNG	84,4491	b	RNG	79,56256	b
SPTR1 (1/3 TL)	74,318047	c	SPTR2 (1/3 TL)	71,35854	c
SPTR2 (1/3 TL)	73,605813	c	SPTR1 (1/3 TL)	70,83552	c
SPTR1 (FGI=0)	71,783593	c	SPTR2 (FGI=0)	70,11	c
SPTR2 (FGI=0)	71,783593	c	SPTR1 (FGI=0)	69,518113	c
CENARIO 15			CENARIO 16		
REGRA	MÉDIA	SIGNIFICÂNCIA	REGRA	MÉDIA	SIGNIFICÂNCIA
BM	91,871007	a	BM	86,988673	a
FIFO	87,255367	ab	FIFO	82,70846	ab
RO	84,55206	b	RO	81,6885	b
RNG	83,97782	b	RNG	78,333073	b
SPTR1 (1/3 TL)	73,692787	c	SPTR1 (1/3 TL)	70,957493	c
SPTR2 (1/3 TL)	70,219353	cd	SPTR2 (1/3 TL)	69,758613	c
SPTR1 (FGI=0)	69,11318	cd	SPTR2 (FGI=0)	67,346773	c
SPTR2 (FGI=0)	68,181927	d	SPTR1 (FGI=0)	67,247773	c

Fonte: Autor (2023)

Tabela 12 - Ranqueamento segundo o indicador OTIF para os cenários sem sazonalidade

RANQUEAMENTO INDICADOR ON-TIME-IN-FULL SEM SAZONALIDADE					
CENARIO 1			CENARIO 2		
REGRAS	MÉDIA	SIGNIFICÂNCIA	REGRAS	MÉDIA	SIGNIFICÂNCIA
BM	99,173113	a	BM	98,820727	a
FIFO	97,797753	ab	FIFO	97,693427	a
RO	96,89874	b	RO	95,823127	b
RNG	96,07394	c	RNG	94,55404	b
SPTR2 (1/3 TL)	89,384733	d	SPTR2 (1/3 TL)	86,848127	c
SPTR1 (1/3 TL)	89,1678	d	SPTR1 (1/3 TL)	86,650673	c
SPTR2 (FGI=0)	81,276347	e	SPTR1 (FGI=0)	78,48584	d
SPTR1 (FGI=0)	80,801527	e	SPTR2 (FGI=0)	77,671393	d
CENARIO 3			CENARIO 4		
REGRAS	MÉDIA	SIGNIFICÂNCIA	REGRAS	MÉDIA	SIGNIFICÂNCIA
BM	98,246707	a	BM	97,545433	a
FIFO	95,911893	b	FIFO	94,808573	b
RO	95,336513	b	RO	94,740913	b
RNG	94,991847	b	RNG	94,458047	b
SPTR2 (1/3 TL)	88,54812	c	SPTR2 (1/3 TL)	86,696133	c
SPTR1 (1/3 TL)	88,308367	c	SPTR1 (1/3 TL)	85,773747	c
SPTR2 (FGI=0)	79,255493	d	SPTR1 (FGI=0)	77,530573	d
SPTR1 (FGI=0)	78,60072	d	SPTR2 (FGI=0)	77,359447	d
CENARIO 5			CENARIO 6		
REGRAS	MÉDIA	SIGNIFICÂNCIA	REGRAS	MÉDIA	SIGNIFICÂNCIA
BM	98,3642	a	BM	97,51246	a
RNG	96,123613	b	RO	95,452273	b
FIFO	95,846707	b	FIFO	94,72686	b
RO	95,715793	b	RNG	93,32092	b
SPTR2 (1/3 TL)	88,906733	c	SPTR1 (1/3 TL)	84,266767	c
SPTR1 (1/3 TL)	88,577327	c	SPTR2 (1/3 TL)	83,849947	c
SPTR2 (FGI=0)	75,38792	d	SPTR1 (FGI=0)	71,336053	d
SPTR1 (FGI=0)	74,53588	d	SPTR2 (FGI=0)	70,086747	d
CENARIO 7			CENARIO 8		
REGRAS	MÉDIA	SIGNIFICÂNCIA	REGRAS	MÉDIA	SIGNIFICÂNCIA
BM	97,852313	a	BM	96,109287	a
RO	95,152587	ab	FIFO	93,09104	bc
FIFO	93,26398	bc	RO	91,184653	cd
RNG	90,80892	c	RNG	90,497687	d
SPTR2 (1/3 TL)	87,230027	d	SPTR1 (1/3 TL)	83,382133	e
SPTR1 (1/3 TL)	86,9076	d	SPTR2 (1/3 TL)	82,45758	e
SPTR1 (FGI=0)	69,733813	e	SPTR2 (FGI=0)	64,560407	f
SPTR2 (FGI=0)	69,733813	e	SPTR1 (FGI=0)	64,13016	f

Fonte: Autor (2023)

Tabela 13 - Ranqueamento segundo o indicador OTIF para os cenários com sazonalidade

RANQUEAMENTO INDICADOR ON-TIME-IN-FULL COM SAZONALIDADE					
CENARIO 9			CENARIO 10		
REGRAS	MÉDIA	SIGNIFICÂNCIA	REGRAS	MÉDIA	SIGNIFICÂNCIA
BM	96,277833	a	BM	92,797253	a
FIFO	92,119607	b	FIFO	88,958113	b
RO	91,387773	b	RO	87,46526	b
RNG	89,63264	b	RNG	86,304013	b
SPTR1 (1/3 TL)	82,718353	c	SPTR1 (1/3 TL)	79,057473	c
SPTR2 (1/3 TL)	82,07046	c	SPTR2 (1/3 TL)	78,047553	c
SPTR2 (FGI=0)	70,541187	d	SPTR1 (FGI=0)	64,665333	d
SPTR1 (FGI=0)	69,990907	d	SPTR2 (FGI=0)	64,372393	d
CENARIO 11			CENARIO 12		
REGRAS	MÉDIA	SIGNIFICÂNCIA	REGRAS	MÉDIA	SIGNIFICÂNCIA
BM	95,639913	a	BM	93,137727	a
FIFO	91,898887	b	FIFO	88,067287	ab
RO	90,62166	b	RO	85,486153	b
RNG	88,358867	b	RNG	84,47802	b
SPTR2 (1/3 TL)	80,733787	c	SPTR2 (1/3 TL)	75,6732	c
SPTR1 (1/3 TL)	80,55798	c	SPTR1 (1/3 TL)	74,8184	c
SPTR1 (FGI=0)	65,20044	d	SPTR1 (FGI=0)	61,223733	d
SPTR2 (FGI=0)	64,884507	d	SPTR2 (FGI=0)	60,910347	d
CENARIO 13			CENARIO 14		
REGRAS	MÉDIA	SIGNIFICÂNCIA	REGRAS	MÉDIA	SIGNIFICÂNCIA
BM	91,042147	a	BM	83,716093	a
FIFO	87,931513	ab	FIFO	81,101567	a
RO	83,924013	b	RO	79,266367	a
RNG	83,586867	b	RNG	77,836	a
SPTR1 (1/3 TL)	71,7827	c	SPTR2 (1/3 TL)	67,19026	b
SPTR2 (1/3 TL)	70,646173	c	SPTR1 (1/3 TL)	66,572527	b
SPTR1 (FGI=0)	58,102627	d	SPTR2 (FGI=0)	56,91926	c
SPTR2 (FGI=0)	58,102627	d	SPTR1 (FGI=0)	56,632807	c
CENARIO 15			CENARIO 16		
REGRAS	MÉDIA	SIGNIFICÂNCIA	REGRAS	MÉDIA	SIGNIFICÂNCIA
BM	90,455513	a	BM	85,420253	a
FIFO	85,379507	ab	RO	81,352087	ab
RO	83,779287	b	FIFO	80,39458	ab
RNG	81,814553	b	RNG	77,008753	b
SPTR1 (1/3 TL)	71,32096	c	SPTR1 (1/3 TL)	67,4642	c
SPTR2 (1/3 TL)	67,16046	c	SPTR2 (1/3 TL)	65,675807	c
SPTR1 (FGI=0)	55,534993	d	SPTR2 (FGI=0)	54,029953	d
SPTR2 (FGI=0)	54,56388	d	SPTR1 (FGI=0)	53,98276	d

Fonte: Autor (2023)

5 DISCUSSÕES

Analisando-se as Tabela 3 e 4, observam-se que o aumento de variabilidade, tanto externa (demanda) quanto interna (recursos internos), diminui o desempenho de todas as regras de sequenciamento e de ambas as medidas de desempenho. Isso está em consonância com a lei das variabilidades apresentada em Hopp, Spearman e Migliavacca (2013), segundo a qual qualquer aumento de variabilidade, com tudo mais mantido constante, diminui o desempenho do sistema como um todo. Para contornar essa situação, as empresas podem investir em manutenções preventivas e preditivas, projetos *Lean Six Sigma* para reduzir problemas de qualidade que podem ocasionar reprocessamento ou descarte etc.

Outro ponto que merece ser destacado é que os resultados ilustram que o aumento da utilização dos recursos diminui o desempenho do sistema. Vale lembrar que, segundo a TOC, deve-se manter certo nível de capacidade excedente, ou protetiva, para lidar com as incertezas internas e externas ao sistema (GOLDRATT, 2014).

Das Tabelas 10 e 11, observa-se que, em relação ao indicador *fill rate*, a regra BM apresenta o melhor resultado em relação a todas as outras regras, com diferença estatística em todos os cenários. Nos cenários 2, 10, 14, 15 e 16, contudo, não houve diferença estatística com a regra FIFO. A regra FIFO apresenta o 2º melhor desempenho, entretanto, empata estatisticamente com o RO, que foi a 3ª melhor regra. Por fim, os piores desempenhos foram observados com a regra SPT e suas variações, com urgência definida quando $FGI=0$. Vale a pena observar que quando a regra de urgência foi $TL = 1/3$, o desempenho melhorou, diferenciando-se estatisticamente em alguns cenários (1, 3, 5, 7, 8 e 11).

Em relação ao indicador OTIF (Tabelas 12 e 13), o BM ainda se manteve com os melhores resultados em todos os cenários e com diferença estatística em relação a todas as outras regras nos cenários 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10 e 11. A regra FIFO permaneceu na 2ª posição na maioria dos cenários, empatando com o RO, que foi a 3ª melhor regra. As regras baseadas na lógica SPT, com urgência $FGI=0$, continuaram apresentando os piores desempenhos em termos do indicador OTIF.

Como trazido por Pinedo 2005, há uma diferença entre analisar o desempenho das regras de sequenciamento por si só e em um contexto com

planejamento da produção. Na presença do planejamento, definem-se certos objetivos a serem seguidos e cria-se uma ordem de processamento inicial, cabendo às regras de sequenciamento lidarem com as variabilidades presentes e cumprirem o planejamento. Quando se analisa o método de planejamento S-DBR aplicado em ambiente MTA, seu foco é garantir a disponibilidade dos produtos, ou seja, a geração das ordens é realizada para preencher os estoques e garantir que não haja rupturas de fornecimento, cabendo às regras de sequenciamento cumprir com o objetivo de maximizar a disponibilidade dos produtos.

À luz dessa consideração, o BM apresentou o melhor desempenho para garantir a disponibilidade dos produtos e cumprir com a proposta do S-DBR em ambientes MTA. Uma vez que as ordens de produção são emitidas para repor o TL, quanto maior a penetração, mais rápidas as ordens de produção devem ser finalizadas para reporem os estoques e garantirem o atendimento da demanda. Esta é a própria lógica do BM, que prioriza as ordens de acordo com a porcentagem de penetração no TL (SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009; NARITA, IKEZIRI; SOUZA, 2021, CASTRO; GODINHO FILHO; TAVARES-NETO, 2022; IKEZIRI et al., 2023).

A regra FIFO trabalha com a prioridade de processamento em função da sua entrada, buscando minimizar o tempo de permanência das ordens no chão de fábrica (DA SILVA et al., 2012; AHMED et al., 2016; THÜRER; STEVENSON, 2018a), ou seja, ela segue à risca o planejamento. Logo, os bons resultados da regra FIFO, mostram a efetividade do planejamento do S-DBR, ou seja, seguir estritamente seu planejamento já possibilitaria um bom desempenho em termos de FR e OTIF. Assim sendo, em implantações do Simplified Drum Buffer Rope, a empresa pode optar em um primeiro momento em utilizar o sequenciamento através do FIFO, que é mais simples e traz resultados satisfatórios. Entretanto, os avanços tecnológicos trazem uma facilidade cada vez maior em utilizar o BM. Por exemplo, as etiquetas RFID e a internet das coisas permitem identificar a posição da ordem no chão de fábrica, armazenar informações sobre elas e sobre seu estoque à jusante, facilitando calcular o Status do Pulmão (DE MENENDEZ et al., 2020; MELO et al., 2022).

A regra RO, por sua vez, dá prioridade para as ordens de produção que tiverem o menor resultado da razão entre FGI e a taxa da demanda e sua prioridade só é recalculada quando houver retirada de produtos ou conclusão de ordens de

produção (SOMAN; VAN DONK; GAALMAN, 2006; POOL; WIJNGAARD; VAN DER ZEE, 2011; HAUSMAN; SCUDDER, 1982). Logo, a regra RO em um ambiente S-DBR/MTA pode levar a decisões equivocadas. Por exemplo, se o *lead time* for de quatro dias e ordens são emitidas visando repor o estoque do dia anterior, ter-se-iam 24 ordens de produção no chão de fábrica (quatro ordens abertas para cada um dos seis produtos). Considere adicionalmente que em um dado dia a relação FGI/taxa da demanda é de 0,21; 0,20; 0,19; 0,18; 0,17 e 0,16 para P1, P2, P3, P4, P5 e P6, respectivamente, e que há capacidade para produzir 12 ordens nesse dia. A priorização seria quatro ordens de P6, quatro de P5 e quatro de P4, com riscos evidentes de ruptura do estoque de produtos acabados de P3, P2 e P1. Ademais, o valor da regra RO é atualizado somente quando as ordens de produção são concluídas ou após retirada de produtos pelos clientes, ou seja, pode haver uma priorização incorreta das ordens até que a última operação seja concluída e o estoque de FGI atualizado. Isso explica seu desempenho inferior às regras FIFO e BM em termos de FR e OTIF.

As regras SPTR sequenciam as ordens de produção do menor tempo de processamento para o maior, tendo como objetivo reduzir o tamanho médio das filas e aumentar o fluxo (DA SILVA et al., 2012; AHMED et al., 2016; THÜRER; STEVENSON, 2018a). Entretanto, estas regras tiveram o pior desempenho entre as regras de sequenciamento. Uma vez que as ordens de produção no sistema S-DBR/MTA são emitidas para repor o TL. Assim, ordens de produção maiores tendem a ser mais urgentes, pois seu nível de estoque à jusante está baixo, expondo uma probabilidade maior de ruptura nos estoques. Já as regras SPTRs trabalham em uma direção oposta, uma vez que eles priorizam as ordens com menor tempo de processamento. Logo, para essas regras, quanto menor uma ordem de produção, menor seu tempo de processamento e maior sua prioridade. Para ilustrar essa situação, considere o seguinte exemplo. Em uma determinada linha de produção a última máquina tem seis ordens de produção aguardando processamento: P1 com 80 unidades, FGI = 2 e TL = 250; P2 com 60 unidades, FGI = 20 e TL = 80, P3 com 10 unidades, FGI = 190 e TL = 210; P4 com 5 unidades, FGI = 300 e TL = 330; P5 com 15 unidades, FGI = 400 e TL = 500 e P6 com 40 unidades, FGI = 800 e TL = 1000 unidades. Considere, por simplificação, que todos os produtos tenham o mesmo tempo de processamento e essa máquina consiga processar 130 unidades no fim desse dia. A regra SPTR irá recomendar a seguinte sequência: P4 (5

unidades), P3 (10 unidades), P5 (15 unidades), P6 (40 unidades) e P2 (60 unidades). Assim sendo, nesse dia provavelmente haverá ruptura do estoque de P1, enquanto os demais itens estarão com estoques, relativamente ao TL, elevados. Por fim, como já comentado, a utilização de 1/3 do TL como urgência possibilitou melhorar o desempenho das regras SPTRs, pois prioriza aquelas ordens que alimentam estoques mais baixos. Entretanto, e ainda assim, seu desempenho continua inferior às outras regras de sequenciamento.

Evidentemente, isso não significa que as regras baseadas na lógica SPT devem ser consideradas ruins. Novamente, respaldando-se em Pinedo (2005), as regras derivadas da lógica SPT foram avaliadas no contexto de aplicação do método S-DBR/MTA, cujo foco é a disponibilidade dos produtos. Tais regras SPTs visam reduzir o tamanho das filas e aumentar o fluxo, que não é foco de interesse dos indicadores *Fill Rate* e OTIF, centrados na disponibilidade dos produtos.

6 CONCLUSÃO

Por meio de um modelo computacional construído no software AnyLogic, o presente trabalho avaliou o desempenho de diferentes regras de sequenciamento em um ambiente de produção planejado e controlado pelo método S-DBR/MTA, cujo foco principal é garantia da disponibilidade de produtos (SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009; SOUZA; PIRES, 2014). Assim sendo, os indicadores *Fill Rate* e o OTIF foram selecionados para traduzirem esse objetivo.

Os resultados permitem concluir que a melhor regra de sequenciamento para atingir esse objetivo é o *Buffer Management*, cuja premissa é priorizar as ordens de reposição com base na penetração do *Target Level*. Vale a pena observar que a regra FIFO apresentou bons desempenhos, mostrando a efetividade do planejamento do S-DBR. O RO apresentou o terceiro melhor desempenho entre as regras de sequenciamento, entretanto, como seu resultado foi inferior ao FIFO em quase todos os cenários e devido a sua utilização ser mais complexa, acaba não justificando sua utilização em cenários que refletem os modelos aqui simulados.

As regras baseadas na lógica SPTR, por seu turno, obtiveram o pior desempenho entre as pesquisadas, pois priorizam ordens com menor tempo de processamento, ou seja, justamente aqueles que abastecem estoques relativamente mais altos. Novamente, isso não significa tratar-se de regra ruim, mas que cujas premissas são contrárias às assumidas pelo método S-DBR/MTA.

Esta pesquisa apresenta contribuições para a literatura, pois demonstrou que a melhor forma de realizar o sequenciamento em ambientes MTA planejados pelo S-DBR é com base na penetração do TL (a forma com que o S-DBR trabalha). Além disso, a escolha de técnicas de sequenciamento deve levar em consideração a forma de planejamento e estar congruente a ele, pois, do contrário, poderá piorar os níveis de serviço, como ocorreu com as regras SPTR.

Como contribuições práticas, destacam-se que em implementações do sistema S-DBR/MTA em um primeiro momento podem utilizar a regra FIFO, uma vez que, devido à sua simplicidade e aliado ao seu bom desempenho constatado na pesquisa, possibilita focar esforços em outros aspectos da implementação do sistema, como treinamento dos colaboradores e mudança cultural necessária. Após sua implementação, pode-se oportunamente migrar para a regra baseada no BM.

Embora forneça importantes insights, esta pesquisa apresenta algumas limitações metodológicas. A primeira delas é que tanto a demanda quanto os tempos de processamento foram obtidos de forma fictícia. Além disso, a simplicidade do sistema produtivo simulado, com apenas seis produtos, sete máquinas. Além disso, a escolha de indicadores não permite avaliar outros fatores, tais como tempos médios de resposta, estoque médio no sistema etc.

Assim, estudos futuros poderiam avaliar a efetividades das regras estudadas em um sistema produtivo real planejado e controlado pelo método S-DBR/MTA e com base em outros indicadores de desempenho.

REFERÊNCIAS

- AHMED, R.; KHAN, M.; HAQUE, H.; RAHMAN, H. An approach to develop a dynamic job shop scheduling by fuzzy rule-based system and comparative study with the traditional priority rules. **Am. J. Eng. Applied Sci**, v. 9, p. 202-212, 2016.
- AKYOL, D. E.; BAYHAN, G. M. A review on evolution of production scheduling with neural networks. **Computers & Industrial Engineering**, v. 53, n. 1, p. 95-122, 2007.
- AVDEEVA, M.; UZUN, O.; BORODKINA, Y. Simulation of the evacuation process at various economic facilities using the Anylogic software product. In: **E3S Web of Conferences**. EDP Sciences, 2020. p. 11031.
- AZARIA, Shany; RONEN, Boaz; SHAMIR, Noam. Justice in time: A theory of constraints approach. 2023.
- BACELAR-SILVA, G. M.; COX, J. F.; BAPTISTA, H. R.; RODRIGUES, P. Identifying and Addressing the Underlying Core Problems in Healthcare Environments: An Illustration Using an Emergency Department Game. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, n. 19, p. 10083, 2021.
- BAHROUN, Z.; BELGACEM, N. Determination of dynamic safety stocks for cyclic production schedules. **Operations Management Research**, v. 12, n. 1, p. 62-93, 2019.
- BANKS, J.; CARSON II, J. S.; NELSON, B. L.; NICOL, D. M. Discrete-event system simulation. Prentice Hall, 2004.
- BARNARD, A. Melhoria contínua e auditoria. In: COX III, J. F.; SCHLEIER, J. G. (Orgs.). **Handbook da Teoria das Restrições**. Tradução de Beth Honorato, revisão técnica de Daniel Pacheco Lacerda et al. 1 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. cap. 15, p. 413-46.
- BATEMAN, R. E.; BOWDEN, R. G.; GOGG, T. J.; HARRELL, C. R.; MOTT, J. R. A.; MONTEVECHI, J. A. B. **Simulação de sistemas: aprimorando processos de logística, serviços e manufatura**. 1 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.
- BERGMAN, Elaine M. Lasda. Finding citations to social work literature: The relative benefits of using Web of Science, Scopus, or Google Scholar. **The journal of academic librarianship**, v. 38, n. 6, p. 370-379, 2012.
- BERLING, P.; JOHANSSON, L.; MARKLUND, J. Controlling inventories in omni/multi-channel distribution systems with variable customer order-sizes. **Omega**, v. 114, p. 102745, 2023.
- BERTRAND, J. Will M.; FRANSOO, Jan C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International journal of operations & production management**, v. 22, n. 2, p. 241-264, 2002.

BISOGNO, S.; CALABRESE, A.; GHIRON, N. L.; PACIFICI, A. Theory of constraints applied to scheduled and unscheduled patient flows: does it improve process performance ?. **International Journal of Services and Operations Management**, v. 26, n. 3, p. 365-385, 2017.

BUDD, C. S.; CERVENY, J. **A Cartilha de Gerenciamento de Projetos pela Corrente Crítica**. In: COX III, J. F.; SCHLEIER, J. G. (Orgs.). Handbook da Teoria das Restrições. Tradução de Beth Honorato, revisão técnica de Daniel Pacheco Lacerda et al. 1 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013b. cap. 3, p. 45-77.

BUESTÁN BENAVIDES, Marcos; VAN LANDEGHEM, Hendrik. Implementation of S-DBR in four manufacturing SMEs: a research case study. **Production Planning & Control**, v. 26, n. 13, p. 1110-1127, 2015.

CARRILLO-CORZO, A.; TARAZONA-GONZALES, E.; QUIROZ-FLORES, J.; VIACAÑA-CAMPOS, G. Lean Process Optimization Model for Improving Processing Times and Increasing Service Levels Using a Deming Approach in a Fishing Net Textile Company. In: Brazilian Technology Symposium. **Springer**, Cham, 2020. p. 443-451.

CASTRO, Robson Flavio; GODINHO-FILHO, Moacir; TAVARES-NETO, Roberto Fernandes. Dispatching method based on particle swarm optimization for make-to-availability. **Journal of Intelligent Manufacturing**, p. 1-10, 2022.

CHAKRAVORTY, Satya S.; HALES, Douglas N. Improving labour relations performance using a Simplified Drum Buffer Rope (S-DBR) technique. **Production Planning & Control**, v. 27, n. 2, p. 102-113, 2016.

Chan, F. T. S.; Chan, H. K. (2004). Analysis of dynamic control strategies of an FMS under different scenarios. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, n. 20, p. 423–437.

CHANG, Yung-Chia; HUANG, Wen-Tso. An enhanced model for SDBR in a random reentrant flow shop environment. **International Journal of Production Research**, v. 52, n. 6, p. 1808-1826, 2014.

CHASANAH, F.; SAKAKIBARA, H. Implication of Mutual Assistance Evacuation Model to Reduce the Volcanic Risk for Vulnerable Society: Insight from Mount Merapi, Indonesia. **Sustainability**, v. 14, n. 13, p. 8110, 2022.

CHHOR, U.; LEETON, U.; CHAYAKULKHEEREE, K. Probabilistic Optimal Power Dispatch Considering Price-Based Real-Time Demand Response. **International Journal of Intelligent Engineering and Systems**, v. 12, n. 1, p. 201-210, 2019.

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e simulação de eventos discretos**. Afonso C. Medina, 2006.

CONWAY, R. W.; MAXWELL, W. L.; MILLER, L. W. **Theory of scheduling**. New York: Courier Corporation, 2012.

CORRÊA, Henrique L.; CORRÊA, Carlos A. **Administração de Produção e de Operações - O Essencial, 3ª edição**. [Digite o Local da Editora]: Grupo GEN, 2017.

9788597013788. Disponível em:

<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788597013788/>. Acesso em: 28 mar. 2022.

CORRÊA, Henrique L.; GIANESI, Irineu GN; CAON, Mauro. **Planejamento, programação e controle da produção**. São Paulo: Atlas, v. 6, 2019.

CORRÊA, Henrique Luiz; CORRÊA, Carlos Alberto. **Administração de produção e operações: manufatura e serviços: uma abordagem estratégica**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

COSTA, F.; KUNDU, K.; ROSSINI, M.; PORTIOLI-STAUDACHER, A. Comparative study of bottleneck-based release models and load-based ones in a hybrid MTO-MTS flow shop: an assessment by simulation. **Operations Management Research**, v. 16, n. 1, p. 33-48, 2023.

COSTAS, J.; PONTE, B.; de la FUENTE, D.; PINO, R.; PUCHE, J. Applying Goldratt's Theory of Constraints to reduce the Bullwhip Effect through agent-based modeling. **Expert systems with Applications**, v. 42, n. 4, p. 2049-2060, 2015.

Cox III, James F., Lynn H. Boyd, Timothy T. Sullivan, Richard A. Reid, and Brad Cartier, 2012, **The Theory of Constraints International Certification Organization Dictionary**, Second Edition, URL = <http://www.tocico.org>

DA SILVA, E. B.; COSTA, M. G.; DA SILVA, M. F.; PEREIRA, F. H. Evaluation of Production Sequencing Rules in Job Shop and Flow Shop Environment through Computer Simulation. In: **International Conference on Industrial and Engineering and operations Management, July**. 2012. p. 9-11.

DARLINGTON, John et al. Design and implementation of a Drum-Buffer-Rope pull-system. **Production Planning & Control**, v. 26, n. 6, p. 489-504, 2015.

DAVIS, J. P.; EISENHARDT, K. M.; BINGHAM, C. B. Developing theory through simulation methods. *Academy of Management Review*, v. 32, n. 2, p. 480-499, 2007.

DE JESUS PACHECO, D. A.; JUNIOR ANTUNES, J. A. V.; DE MATOS, C. A.; The constraints of theory: What is the impact of the Theory of Constraints on Operations Strategy?. **International Journal of Production Economics**, v. 235, p. 107955, 2021.

DETTMER, H. Willam; SCHRAGENHEIM, Eli. **Manufacturing at Warp Speed**. RC St. Lucie Press, 2000.

DIGLIO, A., PEIRÓ, J., PICCOLO, C., & SALDANHA-DA-GAMA, F. (2021). Solutions for districting problems with chance-constrained balancing requirements. **Omega**, 103, 102430.

GAITHER, N.; FRAZIER, G. (2002). **Administração da Produção e Operações**. 8. ed. São Paulo, Pioneira.

GARMDARE, H.S.; LOFTI, M.M; HONARVAR, M. Integrated model for pricing, delivery time setting and scheduling in make-to-order environments. **Journal of Industrial Engineering International**, v.14, n.1, p. 55-64,2018.

GOLDRATT, E. M. **Critical Chain**. 1. ed. Great Barrington: North River Press, 1997.

GOLDRATT, E. M. **What is this thing called theory of constraints and how should it be implemented?**. Great Barrington: North River Press, 1990.

GOLDRATT, E. M.; COX, J. **A Meta**. 3. ed. São Paulo: Nobel, 2014.

GOLDRATT, Eliyahu M. Standing on the shoulders of giants: production concepts versus production applications. The Hitachi Tool Engineering example. **Gestão & produção**, v. 16, p. 333-343, 2009.

GOLMOHAMMADI, Davood. A study of scheduling under the theory of constraints. **International Journal of Production Economics**, v. 165, p. 38-50, 2015.

GOVONI, H.; SOUZA, F. B. D.; CASTRO; R. F.; RODRIGUES, J. D. S.; PIRES, S. R. Analysis of production resources improvement strategies in make-to-stock environments managed by the simplified drum-buffer-rope system. **Gestão & Produção**, v. 28, 2021.

GOVONI, Humberto. **Análise de estratégias de melhorias de recursos produtivos em ambientes MTS gerenciados pelo método S-DBR**. Tese (Mestrado em Engenharia de Produção) - Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Bauru, 2018.

GUPTA, M. C.; ANDERSEN, S. Throughput/inventory dollar-days: TOC-based measures for supply chain collaboration. **International Journal of Production Research**, p. 1-17, 2018.

GUPTA, M.; ANDERSEN, S. Revisiting local TOC measures in an internal supply chain: A note. **International Journal of Production Research**, v. 50, n. 19, p. 5363-5371, 2012.

HAEUSSLER, S.; NEUNER, P.; THÜRER, M. Balancing earliness and tardiness within workload control order release: an assessment by simulation. **Flexible Services and Manufacturing Journal**, v. 35, n. 2, p. 487-508, 2023.

HARRELL, C.; GHOSH, B. K.; BOWDEN, R. **Simulation Using Promodel**. Mc Graw Hill, 2000.

HAUSMAN, W. H.; SCUDDER, G. D. Priority scheduling rules for repairable inventory systems. **Management Science**, v. 28, n. 11, p. 1215-1232, 1982.

HERNANDEZ-DE-MENENDEZ, M.; MORALES-MENENDEZ, R.; ESCOBAR, C. A.; MCGOVERN, M. Competencies for Industry 4.0. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)**, Vol. 14, No. 4, pp.1511-1524, 2022.

- HOPP, Wallace J.; SPEARMAN, Mark L. To pull or not to pull: what is the question?. **Manufacturing & service operations management**, v. 6, n. 2, p. 133-148, 2004.
- HOPP, Wallace J.; SPEARMAN, Mark L.; MIGLIAVACCA, Paulo Norberto. **A ciência da fábrica**. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- HORNG, Shih-Cheng; LIN, Shin-Yeu. Multi-stage ordinal optimization-based approach for job shop scheduling problems. **Applied Mathematics and Computation**, v. 219, n. 3, p. 1125-1134, 2012.
- HUANG, C. L.; LI, R. K.; TSAI, C. H.; CHUNG, Y. C.; SHIH, C. H. A Comparative Study of Pull and Push Production Methods for Supply Chain Resilience. **International Journal of Operations and Logistics Management**, v. 3, n. 1, p. 1-15, 2014.
- HUANG, Hsiang-Hsi et al. A research on problems of mixed-line production and the re-scheduling. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 29, n. 3, p. 64-72, 2013.
- HUANG, W. T.; CHEN, P. S.; LIU, J. J.; CHEN, Y. R.; CHEN, Y. H. (2018). Dynamic configuration scheduling problem for stochastic medical resources. **Journal of biomedical informatics**, 2018, 80: 96-105.
- HWANG, Y. J.; HUANG, C.L.; LI, R. K. Using Simplified Drum-Buffer-Rope to Rapidly Improve Operational Performance: A Case Study in China. **Production and Inventory Management Journal**, vol. 47, no. 1, pp. 80-93, 2011 2011.
- IKEZIRI, Lucas Martins. **Simulação e análise do método Gerenciamento Dinâmico do Pulmão para ajuste de estoque de produtos destinados à entrega imediata**. Tese (Mestrado em Engenharia de Produção) - Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Bauru, 2018.
- IKEZIRI, L. M.; DE SOUZA, F. B.; DA SILVA MEYER, A.; GUPTA, M. C. Pulling the distribution in supply chains: simulation and analysis of Dynamic Buffer Management approach. **International Journal of Systems Science: Operations & Logistics**, v. 10, n. 1, p. 1981480, 2023.
- IKEZIRI, Lucas Martins et al. Theory of constraints: review and bibliometric analysis. **International Journal of Production Research**, v. 57, n. 15-16, p. 5068-5102, 2019.
- JONES, M.L., 2004. **Application of systematic review methods to qualitative research: practical issues**. *J. Adv. Nurs.* 48, 271 e 278.
- KELLY, M. C.; GERMAIN, R. H. Applying Theory of Constraints to timber harvesting: a case study from the Northeast USA. **Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering**, v. 41, n. 1, p. 59-69, 2020.
- KHOJASTEH-GHAMARI, Yaghoub. A performance comparison between Kanban and CONWIP controlled assembly systems. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 20, n. 6, p. 751-760, 2009.

KIM, S.; MABIN, V. J.; DAVIES, J. The theory of constraints thinking processes: retrospect and prospect. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 28, n. 2, p. 155-184, 2008.

KINGSMAN, Brian et al. Responding to customer enquiries in make-to-order companies Problems and solutions. **International Journal of Production Economics**, v. 46, p. 219-231, 1996.

KLEIJNEN, J. P. C.; SMITS, M. T. Performance metrics in supply chain management. **Journal of the Operational Research Society**, v. 54, n. 5, p. 507-514, 2003.

KRENEK, R.; CHA, J.; CHO, B. R. Development of the convolutions of truncated normal random variables with three different quality characteristics in engineering applications. **Computers & Industrial Engineering**, v. 94, p. 125-137, 2016.

KULAK, O; CEBI, S.; KAHRAMAN, C. Applications of axiomatic design principles: A literature review. **Expert systems with applications**, v. 37, n. 9, p. 6705-6717, 2010.

LARSEN, C.; THORSTENSON, A. The order and volume fill rates in inventory control systems. **International Journal of Production Economics**, v. 147, p. 13-19, 2014.

LEE, Hochang; SEO, Dong-Won. Performance evaluation of WIP-controlled line production systems with constant processing times. **Computers & Industrial Engineering**, v. 94, p. 138-146, 2016.

LEE, Jun-Huei et al. Research on enhancement of TOC Simplified Drum-Buffer-Rope system using novel generic procedures. **Expert Systems with Applications**, v. 37, n. 5, p. 3747-3754, 2010.

LIU, K.; LIU, C.; XIANG, X.; TIAN, Z. Testing facility location and dynamic capacity planning for pandemics with demand uncertainty. **European Journal of Operational Research**, v. 304, n. 1, p. 150-168, 2023.

LIU, X.; SHEN, L.; ZHANG, K. Estimating the Probability Distribution of Construction Project Completion Times Based on Drum-Buffer-Rope Theory. **Applied Sciences**, v. 11, n. 15, p. 7150, 2021.

LOWALEKAR, H.; RAVI, R. R. Revolutionizing blood bank inventory management using the TOC thinking process: An Indian case study. **International Journal of Production Economics**, v. 186, p. 89-122, 2017.

MANNE, A. S. On the job-shop scheduling problem. **Operations Research**, p. 219–223, 1960.

MARIZ, Fernanda Barreto de Almeida Rocha. **Análise comparativa dos modelos Drum-Buffer-Rope e Constant Work-In-Process em um ambiente com montagem e produção contra pedido**. 2019. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MCFADDEN, D. Instability in mixed logit demand models. **Journal of Choice Modelling**, v. 43, p. 100353, 2022.

MCCMAHON, G.; FLORIAN, M. On scheduling with ready times and due dates to minimize maximum lateness. **Operations Research**, p. 475–482.

MELO, J. C.; RAYS FILHO, I.; GUERRA, B. F.; MUNIZ JUNIOR, J. Preparação dos trabalhadores para a I4. 0: revisão sistemática da literatura. **Exacta**, 2022.

MILLSTEIN, M. A.; MARTINICH, J. S. Takt Time Grouping: implementing kanban-flow manufacturing in an unbalanced, high variation cycle-time process with moving constraints. **International Journal of Production Research**, v. 52, n. 23, p. 6863-6877, 2014.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. [Digite o Local da Editora]: Grupo GEN, 2021. E-book. ISBN 9788521637448. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521637448/>. Acesso em: 15 dez. 2022.

NARAYANAN, A.; ISHFAQ, R. Impact of metric-alignment on supply chain performance: a behavioral study. **The International Journal of Logistics Management**, 2022.

NARAYANAN, R.; ADORISIO, D. Model studies on plate girders. **The Journal of Strain Analysis for Engineering Design**, v. 18, n. 2, p. 111-117, 1983.

NARITA, T. V.; IKEZIRI, L. M.; DE SOUZA, F. B.; Evaluation of dynamic buffer management for adjusting stock level: A simulation-based approach. **Journal of Industrial and Production Engineering**, v. 38, n. 6, p. 452-465, 2021.

NASR, W. W.; ELSHAR, I. J. Continuous inventory control with stochastic and non-stationary Markovian demand. **European Journal of Operational Research**, v. 270, n. 1, p. 198-217, 2018.

OK, C.; PARK, J. A conceptual approach for managing production in consideration of shifting electrical loads. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 30, n. 5, p. 499-507, 2014.

ORUE, A.; LIZARRALDE, A.; AMORROTU, I.; APAOLAZA, U. Theory of constraints case study in the make to order environment. **Journal of Industrial Engineering and Management**, v. 14, n. 1, p. 72-85, 2021.

ORUE, A.; LIZARRALDE, A.; APAOLAZA, U.; AMORRORTU, I. Designing the process of implementing step three of the theory of constraints in a make-to-order environment: Integrating sales and operation planning. **Journal of Industrial Engineering and Management**, v. 16, n. 2, p. 205-214, 2023.

PARSAEI, Zhaleh; NAHAVANDI, Nasim; ELMEKKAWY, Tarek. Buffer size determination for drum-buffer-rope controlled supply chain networks. **International Journal of Agile Systems and Management**, v. 5, n. 2, p. 151-163, 2012.

PIMENTEL, G. Frederico. **Curso de Estatística Experimental**, 14^oed. Editora F. Pimentel-Gomes, 2000.

PINEDO, Michael. **Planning and scheduling in manufacturing and services**. Springer (New York), 2005.

PONTE, Borja et al. Holism versus reductionism in supply chain management: An economic analysis. **Decision Support Systems**, v. 86, p. 83-94, 2016.

POOL, A.; WIJNGAARD, J.; VAN DER ZEE, D. Lean planning in the semi-process industry, a case study. **International Journal of Production Economics**, v. 131, n. 1, p. 194-203, 2011.

PRASETYANINGSIH, Endang; DEFERINANDA, Citra Awalia; AMARANTI, Reni. Bottleneck Reduction at The Shoes Production Line using Theory of Constraints Approach. In: **2019 International Conference on Sustainable Engineering and Creative Computing (ICSECC)**. IEEE, 2019. p. 170-175.

PUCHE, Julio et al. The effect of supply chain noise on the financial performance of Kanban and Drum-Buffer-Rope: An agent-based perspective. **Expert Systems with Applications**, v. 120, p. 87-102, 2019.

RADOVILSKY, Z.; FRANKEL, M. Identifying buffer size in front of capacity-constrained resource with parallel processes. **International Journal of Business Research**, v. 13, n. 4, p. 189-198, 2013.

RIBEIRO, Gabriel Trierweiler et al. Novel hybrid model based on echo state neural network applied to the prediction of stock price return volatility. **Expert Systems with Applications**, v. 184, p. 115490, 2021.

RIBEIRO, Vanessa; CORDEIRO, Nelly H. Marques. Sequenciamento da produção: uma proposta para o sistema make to order. **Revista Produção Online**, v. 20, n. 2, p. 720-746, 2020.

ROBINSON, Stewart. **Simulation: the practice of model development and use**. Chichester: Wiley, 2004.

SAIF, Ullah et al. Drum buffer rope-based heuristic for multi-level rolling horizon planning in mixed model production. **International Journal of Production Research**, v. 57, n. 12, p. 3864-3891, 2019.

SATO, Y.; MAEDA, H.; TOSHIMA, R.; NAGASAWA, K.; MORIKAWA, K.; TAKAHASHI, K. Switching decisions in a hybrid MTS/MTO production system comprising multiple machines considering setup. **International Journal of Production Economics**, 2023.

SCHRAGENHEIM, E. **Do TPC ao TPC simplificado na produção sob encomenda**. In: COX III, J. F.; SCHLEIER, J. G. (Orgs.). *Handbook da Teoria das Restrições*. Tradução de Beth Honorato, revisão técnica de Daniel Pacheco Lacerda et al. 1 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013a. cap. 9, p. 218-245.

SCHRAGENHEIM, E. **Gerenciamento da produção para estoque e o conceito de produção sob disponibilidade**. In: COX III, J. F.; SCHLEIER, J. G. (Orgs.). Handbook da Teoria das Restrições. Tradução de Beth Honorato, revisão técnica de Daniel Pacheco Lacerda et al. 1 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013b. cap. 10, p. 246-273.

SCHRAGENHEIM, Eli. Using SDBR in rapid response projects. **Goldratt group**, 2006.

SCHRAGENHEIM, Eli; DETTMER, H. William; PATTERSON, J. Wayne. **Supply chain management at warp speed: Integrating the system from end to end**. Boca Raton: CRC Press, 2009.

SHANG, Han Lin. Statistically tested comparisons of the accuracy of forecasting methods for age-specific and sex-specific mortality and life expectancy. **Population Studies**, v. 69, n. 3, p. 317-335, 2015.

SLACK, Nigel; BRANDON-JONES, Alistair; JOHNSTON, Robert. **Administração da Produção, 8ª edição**. [Digite o Local da Editora]: Grupo GEN, 2018. 9788597015386. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788597015386/>. Acesso em: 27 mar. 2022.

SOMAN, C. A.; VAN DONK, D. P.; GAALMAN, G. Comparison of dynamic scheduling policies for hybrid make-to-order and make-to-stock production systems with stochastic demand. **International Journal of Production Economics**, v. 104, n. 2, p. 441-453, 2006.

SOUZA, F. B.; BAPTISTA, H. R. Proposta de avanço para o método Tambor-PulmãoCorda Simplificado aplicado em ambientes de produção sob encomenda. **Gestão & Produção**, v. 17, n. 4, p. 735-746, 2010.

SOUZA, F. B.; PIRES, S. R. I. Produzindo para disponibilidade: uma aplicação da Teoria das Restrições em ambientes de produção para estoque. **Gestão & Produção**, v. 21, p. 65-76, 2014.

SRIKANTH, M.Y. **TPC, gerenciamento de pulmões e classificação de fluxo VATI**. In: COX III, J. F.; SCHLEIER, J. G. (Orgs.). Handbook da Teoria das Restrições. Tradução de Beth Honorato, revisão técnica de Daniel Pacheco Lacerda et al. 1 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. cap. 8, p. 199-216.

STEVENSON, M.; HENDRY, L.C.; KINGSMAN, B.G. A review of production planning and control: the applicability of key concepts to the make-to-order industry. **International Journal of Production Research**, v. 43, n.5, p.869-898, 2005.

SUH, N. P.; COCHRAN, D. S.; LIMA, P. C. Manufacturing system design. **CIRP Annals**, v. 47, n. 2, p. 627-639, 1998.

SURESH, K.N.; Sridharan, R. Simulation modeling and analysis of tool sharing and part Scheduling decisions in single-stage multimachine flexible manufacturing systems. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, n. 23, p. 361-370, 2007.

TAYLOR, S.J. **Agent-Based Modeling and Simulation**; Palgrave Macmillan: Jakarta, Indonesia, 2014.

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**, v. 222, p. 107500, 2020.

TELLES, E. S.; LACERDA, D. P.; MORANDI, M. I. W.; ELLWANGER, R., DE SOUZA, F. B.; PIRAN, F. S. Drum-Buffer-Rope in an engineering-to-order productive system: a case study in a Brazilian aerospace company. **Journal of Manufacturing Technology Management**, n. ahead-of-print, 2022.

THOMAS, A. J.; FRANCIS, M.; FISHER, R.; BYARD, P. Implementing Lean Six Sigma to overcome the production challenges in an aerospace company. **Production Planning & Control**, v. 27, n. 7-8, p. 591-603, 2016.

THÜRER, M.; FERNANDES, N. O.; STEVENSON, M.; Production planning and control in multi-stage assembly systems: an assessment of Kanban, MRP, OPT (DBR) and DDMRP by simulation. **International Journal of Production Research**, v. 60, n. 3, p. 1036-1050, 2022.

THÜRER, M.; STEVENSON, M. Bottleneck-oriented order release with shifting bottlenecks: An assessment by simulation. **International Journal of Production Economics**, v. 197, p. 275-282, 2018 b.

THÜRER, M.; STEVENSON, M. On the beat of the drum: improving the flow shop performance of the Drum-Buffer-Rope scheduling mechanism. **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 9, p. 3294-3305, 2018 a.

THÜRER, M.; QU, T.; STEVENSON, M.; LI, C. D.; HUANG, G. Q. Deconstructing bottleneck shiftiness: the impact of bottleneck position on order release control in pure flow shops. **Production Planning & Control**, v. 28, n. 15, p. 1223-1235, 2017.

TOŠANOVIĆ, N.; ŠTEFANIĆ, N. Evaluation of Pull Production Control Mechanisms by Simulation. **Processes**, v. 10, n. 1, p. 5, 2021.

TUBINO, D. F. (2007). **Planejamento e Controle da Produção: Teoria e Prática**. São Paulo, Atlas.

WAGNER, H. M. An integer linear-programming model for machine scheduling. **Naval research logistics quarterly**, v. 6, n. 2, p. 131-140, 1959.

WALKER, E. **O problema com o gerenciamento de projetos**. In: COX III, J. F.; SCHLEIER, J. G. (Orgs.). **Handbook da Teoria das Restrições**. Tradução de Beth Honorato, revisão técnica de Daniel Pacheco Lacerda et al. 1 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013b. cap. 2, p. 13-41.

- WATANABE, M.; Ida, K.; Gen, M. A. (2005). genetic algorithm with modified crossover operator and search area adaptation for the job-shop scheduling problem. **Computers & Industrial Engineering**, n. 48 p. 743-752.
- XIANG, M.; ROSSI, R.; MARTIN-BARRAGAN, B.; TARIM, S. A. A mathematical programming-based solution method for the nonstationary inventory problem under correlated demand. **European Journal of Operational Research**, v. 304, n. 2, p. 515-524, 2023.
- YANG, H. A.; LV, Y.; XIA, C.; SUN, S.; WANG, H. Optimal computing budget allocation for ordinal optimization in solving stochastic job shop scheduling problems. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2014, 2014.
- YUE, L.; XU, G.; MUMTAZ, J.; CHEN, Y.; ZOU, T. Order Releasing and Scheduling for a Multi-Item MTO Industry: An Efficient Heuristic Based on Drum Buffer Rope. **Applied Sciences**, v. 12, n. 4, p. 1925, 2022.
- ZHANG, J.; DING, G.; ZOU, Y.; QIN, S.; FU, J. Review of job shop scheduling research and its new perspectives under Industry 4.0. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 30, p. 1809-1830, 2019.
- ZUPANCIC, D.; BUCHMEISTER, B.; ALJAZ, T. Reducing the time of task execution with existing resources—comparison of approaches. **International journal of simulation modelling**, v. 16, n. 3, p. 484-496, 2017.