



De 11 a 14 - NOVEMBRO DE 2024

**Inteligência Artificial
na Gestão de Operações:
Limitações e possibilidades**



USO DO JOGO DE DADOS PARA SIMULAÇÃO E ANÁLISE DOS MÉTODOS SIMPLIFIED DRUM- BUFFER-ROPE E BUFFER MANAGEMENT

JOÃO KENNEDY RODRIGUES LEITÃO FILHO – joao.kennedy@unesp.br
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP - BAURU-FEB

FERNANDO BERNARDI DE SOUZA - fernando.bernardi@unesp.br
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP - BAURU-FEB

LUCAS MARTINS IKEZIRI - lucas.ikeziri@unesp.br
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP - BAURU-FEB

ISIDORO RAYS FILHO - isidoro.rays@unesp.br
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP - BAURU-FEB

ÁREA: 1 - ENGENHARIA DE OPERAÇÕES E PROCESSOS DA PRODUÇÃO
SUBÁREA: 1.2 - PLANEJAMENTO, PROGRAMAÇÃO E CONTROLE DA PRODUÇÃO

RESUMO: O PRESENTE ARTIGO AVALIOU A EFETIVIDADE DOS MÉTODOS SIMPLIFIED DRUM-BUFFER-ROPE (S-DBR) E BUFFER MANAGEMENT (BM) A PARTIR DO USO DE UM JOGO DE DADOS (DICE GAME) INICIALMENTE APRESENTADO NO LIVRO “A META”. O JOGO E OS MÉTODOS S-DBR E BM FORAM EMULADOS EM UMA LINHA DE PRODUÇÃO CONTENDO CINCO ESTAÇÕES DE TRABALHO E UMA DEMANDA. ELES FORAM MODELADOS NO SIMULADOR ANYLOGIC, O QUAL PERMITIU ANALISAR DIVERSOS CENÁRIOS, VARIANDO-SE OS TAMANHOS DOS PULMÕES, A PRESENÇA OU NÃO DO MÉTODO BM E DE RESTRIÇÕES INTERATIVAS, ASSIM COMO ADOÇÃO DE NÍVEIS DISTINTOS DE CAPACIDADE PROTETIVA DO SISTEMA. A PARTIR DOS DADOS COLETADOS, ANÁLISES DE VARIÂNCIA FORAM REALIZADAS, AS QUAIS PERMITIRAM GERAR DIVERSOS INSIGHTS QUE CONTRIBUÍRAM PARA UMA MELHOR COMPREENSÃO DOS MÉTODOS ESTUDADOS. OS RESULTADOS CONFIRMARAM A NECESSIDADE DO MÉTODO BM PARA A MAXIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DA LINHA, A RELEVÂNCIA DE SE TER PULMÕES BEM DIMENSIONADOS E O IMPACTO NEGATIVO NO DESEMPENHO DO SISTEMA DEVIDO À PRESENÇA DE RESTRIÇÕES INTERATIVAS.

PALAVRAS-CHAVES: DICE GAME; TEORIA DAS RESTRIÇÕES; RESTRIÇÕES INTERATIVAS; SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.

1. INTRODUÇÃO

A Teoria das Restrições (Theory of Constraints – TOC) é uma abordagem de gerenciamento de toda uma cadeia de produção. Ela foi concebida pelo físico israelense Dr. Eliyahu M. Goldratt, com grande destaque para o seu best-seller “A Meta” (GOLDRATT; COX, 2014) que, por meio de um romance, introduziu o tema e toda a ideia por trás dessa filosofia. Este livro, assim como suas primeiras contribuições, focou na área de planejamento e controle da produção ao apresentar os métodos Tambor-Pulmão-Corda (Drum-Buffer-Rope – DBR) e Gerenciamento do Pulmão (Buffer Management – BM). Quase duas décadas depois, foi introduzida a versão simplificada do DBR, chamada Simplified Drum-Buffer-Rope (S-DBR) (SCHRAGENHEIM; DETTMER, 2000). Todos esses métodos visam melhorar o fluxo de produção e reduzir os prazos de entrega (SOUZA; PIRES, 2014).

O princípio básico da TOC é normalmente descrito a partir de uma analogia de uma corrente, em que seu elo mais fraco é o que determina a resistência de toda a corrente. Para torná-la mais forte, não há sentido tentar melhorar algum outro elo, senão o mais fraco. Da mesma forma, melhorias em empresas devem focar no elo mais fraco para de fato ter uma melhora de performance. Em um ambiente de manufatura, o elo mais fraco é definido como recurso com restrição de capacidade (Capacity Constrained Resource - CCR) (GOLDRATT; COX, 2014). Assim, o primeiro passo na gestão de operações deve ser identificar o CCR do sistema, que se torna o Tambor, pois dita o ritmo da produção. O Pulmão é utilizado para proteger os elos fracos do sistema contra as flutuações estatísticas dos demais elos, enquanto a Corda é utilizada para controlar a liberação de insumos no sistema, subordinando toda a produção ao CCR (GOLDRATT; COX, 2014, SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009). Schragenheim e Dettmer (2000) introduziram o S-DBR, que é uma variação simplificada do DBR. Sua premissa fundamental é que a principal restrição deve ser a demanda de mercado (SCHRAGENHEIM, 2013b). O S-DBR será explicado em mais detalhes na seção 2.2.

O DBR e o S-DBR, não devem ser aplicados sozinhos. O BM é um mecanismo de controle da TOC e deve ser visto como inseparável desses métodos. O BM impõe um conjunto claro de prioridades que não devem ser ignorados, sendo uma condição necessária para a efetividade daqueles métodos (GOLDRATT; COX, 2014, SCHRAGENHEIM; DETTMER, 2009, SCHRAGENHEIM, 2013b).

O dicionário da TOC (COX III et al., 2012) especifica um caso especial em que há

restrições interativas, ou seja, em que dois ou mais fatores, internos ou externos, possuem capacidades próximas. Devido às imprevisibilidades inerentes aos sistemas organizacionais, a restrição principal pode variar, levando a uma complexidade dinâmica que torna difícil a execução de planejamentos, resultando em perdas produtivas.

Conceitos e técnicas de planejamento e controle da produção, como partes da gestão de operações, são de difícil assimilação. No livro “A Meta” (GOLDRATT; COX, 2014), são apresentados alguns conceitos de gestão de operações usando uma abordagem socrática, como jogos experimentais (por exemplo, um jogo com dados - Dice Game) e metáforas (por exemplo, uma caminhada de escoteiros emulando uma linha de montagem). Mais especificamente, o Dice Game foi utilizado em “A Meta” como uma forma de representar os efeitos das flutuações estatísticas e da dependência dos recursos sobre o desempenho de um sistema produtivo.

No presente trabalho, são feitas algumas adaptações de suas regras para, por meio de simulação computacional, emular alguns conceitos associados aos métodos DBR, S-DBR e BM em diversas configurações de cenários, como, por exemplo, com restrições interativas. Com isso, o propósito desse artigo é apresentar uma aplicação do Dice Game desenvolvido no simulador AnyLogic, que permite comparar alguns princípios operacionais subjacentes ao método S-DBR, enfatizando o papel do BM para sua efetividade. Mais especificamente, o artigo apresenta dados coletados de diversos tratamentos simulados de um sistema com restrição de mercado - variando-se a existência e posição de uma restrição física secundária, os tamanhos dos pulmões e a aplicação do BM - e os analisa estatisticamente.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A próxima seção aborda a lógica de funcionamento do *Dice Game*. Em seguida, são apresentados os sistemas DBR, S-DBR e BM e, por fim, um detalhamento técnico sobre os diferentes tipos de conceitos relacionados a restrições.

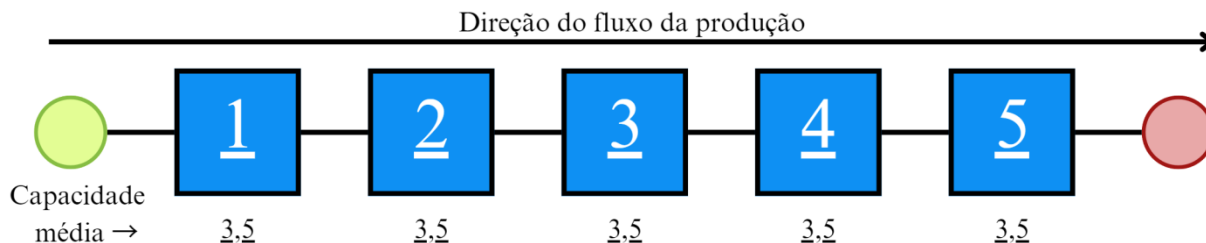
2.1 Dice Game

Em “A Meta” (GOLDRATT; COX, 2014), o jogo de dados é desenvolvido com cinco jogadores, cada um com uma tigela representando a sua estação de trabalho para o processamento dos fósforos, conforme ilustrado pela Figura 1.

Cada estação de trabalho possui uma diferente capacidade de produção momentânea, indicada pelo número obtido ao rolar um dado convencional. Esse número representa o

número máximo de fósforos que a estação de trabalho (tigela) correspondente pode processar e transferir para a próxima tigela nessa rodada (GOLDRATT; COX, 2014).

FIGURA 1 – Representação do Dice Game.



Fonte: Os autores (2024).

Ao iniciar o jogo, o primeiro jogador pega a quantidade de fósforos equivalente ao número obtido no dado da caixa de fósforos (quantidade ilimitada) e coloca na tigela do próximo jogador. O segundo jogador, no entanto, possui uma limitação, pois só poderá passar para a próxima tigela o menor valor entre o número no dado e a quantidade de fósforos presentes em sua tigela. Esse processo se repete para todas as próximas estações de trabalho. Se o número obtido no dado for menor que a quantidade de fósforos recebida, o jogador passará a ter estoque para a próxima rodada. O jogador na última estação é responsável por movimentar o inventário para fora do sistema, removendo os fósforos do jogo e representando a entrega do produto final ao consumidor, cuja demanda é equivalente à produção. O jogo deve ser repetido por várias rodadas, enfatizando o efeito das flutuações estatísticas, com cada estação experimentando momentos de grandes acúmulos de estoques e momentos de perda de produção devido à falta dele (GOLDRATT; COX, 2014).

A produção total de fósforos em cada rodada deve ser registrada. Um jogador sem conhecimento dos conceitos envolvidos poderia esperar que a produção total se mantivesse em torno de uma média de 3,5 fósforos por rodada. No entanto, durante o jogo, percebe-se que a produção média das últimas estações tende a diminuir enquanto os estoques começam a se acumular. Dessa forma, o jogo permite compreender visualmente como pequenas variações em uma etapa do processo podem impactar o desempenho global do sistema. Neste artigo, tais regras serviram como base para a modelagem e simulação de uma linha de produção, conforme seção 3.1 (GOLDRATT; COX, 2014).

Este jogo foi abordado em trabalhos como Gupta e Boyd (2011), que utilizaram o Dice Game para reforçar e complementar conceitos da administração da produção, também utilizando técnicas da TOC. Manikas, Gupta e Boyd (2015) utilizaram o jogo para explicar os

conceitos do DBR, MRP, JIT e CONWIP. Mais recentemente, Gupta et al. (2024) aplicaram o Dice Game como ferramenta de ensino, evidenciando a importância dos sistemas DBR e S-DBR, e principalmente, trazendo uma série de implicações pedagógicas, ressaltando metodologias de ensino com a aprendizagem experiencial e inteligência artificial.

2.2 Simplified-DBR e Buffer Management

Introduzido por Schragenheim e Dettmer (2000), o sistema S-DBR considera que, na maior parte do tempo, as restrições estão no mercado (fluxo de chegada de pedidos inferior à capacidade de atendê-los). Esta é a principal diferença entre os métodos DBR e S-DBR, pois este último adota como pressuposto que a demanda de mercado é a principal restrição do sistema. Isso implica que todos os recursos da linha devem possuir capacidade em excesso (denominada de protetiva) em relação à demanda de mercado, incluindo o CCR, e, portanto, não deve haver gargalos de produção permanentes nesse tipo de ambiente (GOLDRATT; COX, 2014; SCHRAGENHEIM, 2013b; SCHRAGENHEIM; DETTMER, 2009; CHAKRAVORTY; HALES, 2016).

Sem um CCR ativo, não há necessidade de gerar programações detalhadas do CCR e os três tipos de pulmões geralmente presentes em implementações do DBR (pulmão de recurso, de montagem e de mercado) são substituídos por um único pulmão de produção, voltado a proteger a restrição (de mercado) da empresa. Isso acelera o processo de implantação e permite diminuir o estoque em processo e o *lead time* de produção. A corda é responsável por mandar um sinal para o começo da operação, a fim de ajustar a liberação de matéria-prima para o sistema, dentro do ritmo estabelecido pelo tambor (SCHRAGENHEIM, 2013b; SCHRAGENHEIM; DETTMER, 2009; COX III et al., 2012; LEE et al., 2010).

Ademais, o sistema S-DBR coloca maior importância no trabalho do BM, pois o planejamento é feito de forma menos detalhada, aumentando a responsabilidade da etapa de execução e controle (SCHRAGENHEIM, 2013b). O BM visa monitorar e controlar o inventário encaminhado para a restrição, a fim de protegê-la das incertezas dos recursos que a abastecem. A situação do pulmão é um indicador da efetividade do cumprimento do plano de produção (SCHRAGENHEIM, 2013b). Para isto, Schragenheim e Dettmer (2009) recomendam um sistema de gerenciamento por cores, no qual o pulmão é dividido em três regiões, cada uma contendo um terço de sua capacidade, e cada terço correspondendo a uma cor (verde, amarelo e vermelho), representando seu status atual. Havendo mais que 67% do pulmão disponível para proteção da restrição, seu status é verde, o que significa que nenhuma

ação deve ser tomada. De 67% até 33% de sua capacidade, o status é amarelo, exigindo alguma atenção. Abaixo dos 33% de capacidade, seu status é vermelho, com riscos de não atendimento das necessidades da restrição, o que requer apressamentos das ordens de produção (SCHRAGENHEIM, 2013a).

De acordo com Lee et al. (2010), o BM tem três funções: priorizar e apressar as ordens de produção que estão na zona vermelha; fomentar um processo de melhoria contínua mediante registro e combate aos motivos que fizeram com que algumas ordens se tornassem vermelhas; e fornecer feedback para o processo de planejamento de modo que o tamanho dos pulmões seja constantemente reavaliado e, eventualmente, ajustado. Em um estudo de caso da implementação da TOC na maior empresa de cadeados e fechaduras da Índia, Modi, Lowalekar e Bhatta (2019) mostram como essas regiões do pulmão indicam a importância das tarefas no sistema de produção e logística.

2.3 Conceitos relacionados a restrições

Mesmo entre praticantes e acadêmicos, é comum haver confusões no entendimento de alguns conceitos associados à TOC. A seguir, com base no dicionário da “*Theory of Constraints International Certification Organization*” (TOCICO) (COX III et al., 2012), alguns desses termos – os quais serão oportunamente modelados e explorados - são definidos.

Restrição é o fator que limita o desempenho de uma empresa, assim, se fosse possível melhorar seu desempenho, o desempenho do sistema estaria mais próximo de sua meta ou propósito global. Restrições podem se manifestar na forma de recursos escassos, caminhos mais longos de tarefas em projetos, demanda de mercado, políticas e comportamentos empresariais, entre outros (COX III et al., 2012; SOUZA; PIRES, 2010). De acordo com Goldratt e Cox (2014), se não existisse restrição em uma organização, tudo que se deseja poderia ser feito.

Recurso com restrição de capacidade (Capacity Constrained Resource - CCR) é qualquer elo da produção que, se não for administrado corretamente, é provável que comprometa a eficiência global, ou seja, o Ganho (*Throughput*) do sistema (COX III et al., 2012). Possuir uma restrição interna é não conseguir produzir o suficiente para atender as necessidades do mercado, ou seja, pelo menos uma etapa da produção é um CCR ativo (COX III et al., 2012; GOLDRATT; COX, 2014). Restrição externa existe quando a demanda do mercado está abaixo da capacidade produtiva do CCR e de entrega da empresa. Ou seja, o mercado se torna a restrição do sistema (COX III et al., 2012).

Embora possam parecer sinônimos, os termos “gargalos” e “restrições” não são iguais. Gargalo é “qualquer recurso cuja capacidade é menor ou igual à demanda colocada nele em um determinado período de tempo” (COX III et al., 2012), ou seja, um sistema de produção não necessariamente terá um gargalo e, se tiver, não será, necessariamente, somente um.

Restrições interativas ocorrem quando dois ou mais fatores, internos ou externos à organização, por possuírem capacidades muito próximas, e devido às incertezas dos sistemas, dificultam a identificação da restrição principal. Nesse cenário, há uma complexidade dinâmica que torna difícil a execução de planejamentos, o que resulta em perda produtiva. Restrições interativas são, via de regra, mais facilmente gerenciadas pelo sistema S-DBR (COX III et al., 2012; SCHRAGENHEIM; DETTMER, 2009; SCHRAGENHEIM, 2013b).

Capacidade protetiva é a capacidade excedente de produção que os recursos possuem para proteger o ganho do sistema. Ela equivale à capacidade acima da capacidade produtiva necessária para explorar a restrição, permitindo que recursos não restritivos se recuperem dos atrasos quando houver interrupções, ou seja, recursos não restritivos necessitam de capacidade protetiva para reconstruírem os estoques em frente à restrição (COX III et al., 2012).

3. MÉTODO DE PESQUISA

Esta pesquisa adota o método de simulação computacional, o qual permite desenvolver novas teorias e ampliar o conhecimento sobre teorias existentes. A simulação permite responder uma variedade de questões “e se” sobre sistemas reais, de forma acessível (BANKS et al., 2010). Neste estudo, a simulação auxiliou na geração em massa de dados, reduzindo a imperícia humana e evitando trabalhos manuais ao jogar os dados milhares de vezes, além de permitir uma futura animação da simulação (DAVIS; EISENHARDT; BINGHAM, 2007). O software escolhido foi o AnyLogic, que utiliza modelagem baseada em agentes. Dessa forma, permite a criação, teste e análise de modelos complexos e que tenham interações entre os componentes. Além disso, o AnyLogic possibilita uma análise do comportamento do sistema ao longo do tempo, oferecendo detalhamentos e resumos dos dados gerados (AVDEEVA; UZUN; BORODKINA, 2020).

3.1 Modelo de simulação

Nesta seção é abordada a lógica conceitual adotada no modelo computacional, e, posteriormente, o planejamento do experimento e a validação no AnyLogic.

3.1.1 LÓGICA CONCEITUAL

Para aplicar a técnica S-DBR no jogo de dados, a “Demanda do Mercado” é emulada por um sexto elo, mas que, para fins práticos, funciona como uma sexta estação de produção. Nesta estação, o dado é jogado e o número obtido representa a demanda do mercado, ou seja, quantas unidades serão então removidas do sistema, representando sua disponibilização para o cliente final. Para que essa estação emule uma restrição de mercado, o usuário deve escolher um nível de capacidade protetiva para todas as outras estações, com exceção da própria restrição de mercado. Desta forma, o simulador soma essa capacidade protetiva com o valor obtido no dado, representando o valor que define quantas unidades poderão ser “processadas” naquela rodada, sempre limitando o valor do dado em 6. Assim, a restrição principal terá um valor médio no dado inferior às outras estações.

Em relação à corda e à liberação de matéria-prima, no início da simulação é liberada a quantidade de matéria-prima equivalente ao tamanho do pulmão, sendo então mantida constante durante toda a simulação por meio da corda. Para isto, conforme as unidades passam pela restrição principal e são movidas para fora do sistema, o sistema libera a quantidade de matéria prima equivalente às processadas para a estação 1.

Ativando a opção do BM, é verificado o status do pulmão da restrição principal; se estiver em sua zona vermelha, todas as estações anteriores adicionarão uma unidade ao valor do dado jogado, inclusive para a restrição secundária, podendo alcançar o valor de 7 unidades.

Para as restrições interativas, o usuário tem a opção de ativar um CCR no sistema, representando uma restrição secundária, podendo escolher qual estação terá sua capacidade reduzida - isso é realizado ao não se somar o valor da capacidade protetiva ao dado desta estação. Nesse caso, o mercado continua sendo a restrição principal, pois como comentado, o BM ainda consegue “apressar” a restrição secundária, mas não a restrição principal (SCHRAGENHEIM, 2013b).

3.1.2 CONFIABILIDADE DOS RESULTADOS

A lógica foi então traduzida para o software AnyLogic, com cada simulação possuindo 100 rodadas do jogo. Algumas funções foram introduzidas para melhor confiabilidade dos resultados:

- *Warm-Up*: Para se eliminar o viés do início de simulação, no qual o sistema ainda não está com unidades em processamento, assim como não há nenhum estoque gerado de rodadas anteriores, foi estabelecido um período de *warm-up* de 10 dias. Portanto, a

coleta de dados começa na 11ª rodada de simulação e é interrompida após conclusão da rodada 110.

- Replicações: para calcular a média de cada tratamento, foram coletados dados de 100 simulações. De modo a permitir comparações precisas entre cenários, utilizou-se o mesmo ciclo de números aleatórios entre cada tratamento, ou seja, cada dado de cada uma das 11000 rodadas (110 x 100) de cada tratamento gerará sempre os mesmos números.

3.1.3 VALIDAÇÃO DO MODELO

Uma vez que não há uma referência direta, foi necessário adotar estratégias alternativas para validação do modelo. Por se tratar de uma simulação por eventos discretos, a abordagem escolhida foi congelar cada avanço do processo, comparando-se os resultados em diferentes estágios e avaliando se estavam em linha com as expectativas teóricas. Isso ajudou a identificar e corrigir vários problemas e discrepâncias que surgiram durante a implementação do modelo no simulador AnyLogic. Além disso, os dados foram exportados em tabelas para uma segunda verificação do modelo.

A validação final do modelo foi feita comparando os dados do Dice Game apresentados por Goldratt e Cox (2014) com o modelo atual. Para isso, o modelo foi levemente ajustado para seguir as regras originais do jogo, permitindo a reprodução exata da partida descrita no livro. Os resultados foram comparados e o modelo foi validado com sucesso.

3.2 Parâmetros e medidas de desempenho

Em relação à configuração de cada tratamento, foram escolhidos quatro parâmetros que o modelo permite ajustar. São eles:

- Restrições Interativas: Para tornar presente as restrições interativas na simulação, deve-se escolher uma segunda restrição dentro da linha de produção, que se tornará o CCR. Dessa forma, visando avaliar se a posição do CCR impacta o desempenho do sistema, o usuário pode escolher entre as estações 1, 3 e 5 como possíveis locais para a segunda restrição. Além dessas configurações, há também os casos em que não há restrições interativas, mantendo somente a restrição principal.
- Capacidade Protetiva: São permitidos três níveis de capacidade protetiva,

somando-se uma, duas ou três unidades no valor gerado pelo dado das estações não-restritivas.

- **Tamanho do Pulmão:** Como a restrição principal é o último elo da linha, necessita-se de um pulmão que considere todo o sistema produtivo. Dois valores para o Tamanho do Pulmão foram considerados: 9 e 15 unidades.
- **Buffer Management (BM):** Para cada combinação de tratamento, o BM pode estar ativado ou desligado.

Assim, foram considerados 48 tratamentos e sete indicadores de desempenho: produção, rupturas, *fill rate*, porcentagem de penetração na região vermelha do BM, estoque médio, utilização das estações não restritivas e utilização das estações restritivas. Para fins de apresentação e adequação às limitações de espaço permitidas, os dados foram sintetizados e as seguintes medidas de desempenho foram escolhidas:

Fill Rate: Para todos os tratamentos, a média das 100 replicações correspondente à soma da produção e entrega dos produtos, com a parcela não atendida (vendas perdidas por falta de estoque), foi sempre 349,2, devido ao uso de uma mesma semente entre tratamentos. Sempre que o valor do dado da restrição principal é maior do que o estoque disponível na estação, tem-se uma ruptura e uma queda no nível de serviço ou *fill rate*. O *fill rate* é diretamente impactado pela quantidade de unidades que o sistema deixou processar devido à falta de recursos na restrição principal e corresponde à porcentagem atendida da demanda gerada.

Estoque Médio: Ao fim de cada rodada, quando a 6ª estação (demanda) termina de processar todas as suas unidades, é somada a esta variável todo o estoque restante em cada estação. Ao fim da simulação, esse dado é apresentado como uma média do estoque no sistema ao fim de cada rodada.

Utilização média das estações restritivas: Para a restrição primária, e nos tratamentos nos quais a restrição secundária existe, é utilizado o número de unidades processadas pela estação dividido pelo valor final do dado. Por fim, é feita uma média entre todos os valores encontrados, de ambas as restrições. Esse número é equivalente à efetividade da exploração da restrição e, conseqüentemente, à utilização da capacidade da linha.

Por fim, para melhor visualização e comparação do efeito da posição da restrição secundária, os dados da perda para cada posição do CCR foram inseridos na Tabela 2, associados às possibilidades de ativação ou não do BM.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 1 e a Tabela 2 trazem os dados evidenciados conforme a seção anterior. Foram aplicados testes ANOVA nos números de perda do sistema, primeiramente para a análise de variância com dois fatores, verificando se o BM possui diferentes desempenhos em diferentes posições da restrição secundária. Após, para cada parâmetro separadamente, foi aplicada a análise de variância simples, para se testar a existência de diferenças significativas de perda observada, com foco principal na posição da restrição secundária.

TABELA 1 – Média dos dados coletados.

Buffer Management	Fill Rate	Estoque Médio	Utilização das Restrições
Ativado	97,97%	8,6	95,8%
Desligado	91,78%	8,8	94,2%
Restrição Secundária	Fill Rate	Estoque Médio	Utilização das Restrições
Desativada	98,29%	8,6	98,9%
Estação 1	93,84%	8,7	93,7%
Estação 3	93,66%	8,7	93,6%
Estação 5	93,71%	8,7	93,8%
Tamanho do Pulmão	Fill Rate	Estoque Médio	Utilização das Restrições
9 Unidades	93,07%	5,7	93,5%
15 Unidades	96,67%	11,6	96,5%
Capacidade Protetiva	Fill Rate	Estoque Médio	Utilização das Restrições
+1	92,81%	8,8	93,4%
+2	95,65%	8,7	95,6%
+3	96,16%	8,6	96,0%

Fonte: Os autores (2024).

TABELA 2 – Fill Rate em função da posição da restrição secundária e BM.

Fill Rate - BM / Restrição secundária	Desativada	Estação 1	Estação 3	Estação 5
BM Desligado	97,16%	90,08%	89,98%	89,91%
BM Ativado	99,42%	97,59%	97,44%	97,41%

Fonte: Os autores (2024).

Os dados inseridos no teste tendem a ser próximos devido à falta de aleatoriedade no sistema e, dessa forma, o p-valor resultante tende a ser maior. Portanto, quando o p-valor aceita a diferença entre configurações, não há motivos para desconfiança, mas quando o p-valor rejeita a existência de diferença entre parâmetros, pode ter ocorrido um falso-negativo.

Com um nível de significância de 5%, os seguintes resultados podem ser destacados:

- a) O p-valor obtido da interação entre a ativação do BM e possuir ou não uma restrição secundária aponta que o BM se comporta de maneira diferente quando o sistema possui um CCR. Utilizando-se de números absolutos de perdas de produção por ruptura de estoque, obtém-se que sem a restrição secundária, o BM reduz essas perdas em aproximadamente cinco vezes, enquanto que, com restrições secundárias, essa redução cai para aproximadamente quatro vezes.
- b) O aumento do pulmão de 9 para 15 unidades aumentou o valor observado do *fill rate*, assim como o mesmo efeito foi observado quando se aumentam os níveis de capacidade protetiva. No último caso, contudo, o p-valor obtido para a perda foi de 0,099.
- c) O método BM possui o impacto mais evidente no desempenho do sistema, considerando os parâmetros testados. Isso ajuda a entender o que foi afirmado por Schragenheim (2013b), de que o BM é essencial para a efetividade do S-DBR.
- d) Visualmente, nota-se uma tendência de maior *fill rate* conforme a restrição secundária se desloca para a esquerda, porém, o teste ANOVA não validou essa observação. Dois tratamentos, com o CCR na primeira estação, nível 2 de capacidade protetiva, pulmões com tamanhos 9 e 15 e BM ativado, apresentaram resultados levemente superiores aos tratamentos que se diferem por possuir nível 3 de capacidade protetiva, mas com o CCR na quinta estação. Portanto, parece haver alguma evidência, ainda que não comprovada estatisticamente, que possuir a restrição secundária no começo da linha pode ser benéfico para o ganho do sistema. Há algumas possíveis explicações para isso: a restrição secundária está mais longe do consumidor final; a restrição secundária está mais longe da restrição principal; ou simplesmente o acaso, com o teste ANOVA estando correto sobre a rejeição de diferenças.
- e) Comparando-se os tratamentos com restrições interativas, com pulmão igual a 9 unidades e BM ativado com os tratamentos com pulmão em 15 unidades e sem BM, obtém-se que as perdas de produção nesses tratamentos sem BM são em média 87,4% maiores. Isso também pode ser percebido ao comparar, na Tabela 1, o efeito de ativar o BM com o efeito de aumentar para 15 o Tamanho do Pulmão. Dessa forma, ativar o BM e acelerar a produção quando necessário tiveram um papel mais significativo no desempenho do sistema do que aumentar a quantidade de inventário em processo.
- f) No tratamento sem restrição interativa, com nível 3 de capacidade protetiva, 15 unidades de pulmão e com BM ativo houve uma baixa taxa de penetração na região

vermelha do pulmão (0,4%). Para casos como esse, o gerenciamento dinâmico do pulmão - método voltado para ajustar dinamicamente o pulmão - poderia ser efetivo na redução da quantidade de estoque mantida no sistema.

- g) Comparando-se a ativação do BM com o aumento da capacidade protetiva - o efeito prático de ambos é somar algumas unidades no valor gerados pelos dados em algumas estações -, percebe-se que o primeiro é mais efetivo. Esse resultado é explicado pelo fato de o BM ser capaz de acelerar a restrição secundária. Caso não fosse possível, haveria duas restrições com capacidades próximas, o que, de acordo com Schragenheim (2013b), exigiria a presença de um pulmão especial.
- h) Quanto maior a proteção para as restrições, seja pela ativação do BM ou devido ao provimento de mais pulmão ou capacidade protetiva no sistema, maior também foi a utilização das restrições e, conseqüentemente, o *fill rate*. Esse resultado corrobora a importância de se permitir que os recursos não restritivos se subordinem às necessidades da restrição, explorando-a mais efetivamente.
- i) A perda média por ruptura de estoques de todos os tratamentos foi de 1,94 unidades. Isso significa que, para cada ruptura, o sistema deixou de entregar, em média, 1,94 unidades, afetando o *throughput* do sistema.
- j) Ao aumentar o pulmão de 9 para 15 unidades, observou-se que o estoque médio aumentou proporcionalmente em unidades. Isso significa que o crescimento marginal do estoque médio, para cada unidade de aumento do pulmão, possui rendimento constante, ou seja, para cada unidade adicional do pulmão, o estoque médio dos tratamentos aumenta em aproximadamente uma unidade. Esse é um dado que gestores devem levar em consideração, pois poderia representar um custo extra com estoques que poderia passar despercebido, caso esse número possuísse crescimento marginal crescente.
- k) O único parâmetro que permitiu uma diferença significativa no estoque médio foi o tamanho do pulmão - o estoque médio variou do intervalo entre 5,5 e 6,1 unidades, para o pulmão equivalente a 9 unidades, para 11,5 a 11,8, para o pulmão de 15 unidades. Houve uma leve contribuição com a ativação do BM e mínimas diferenças quanto aos demais parâmetros.

Devido à natureza de simulação do modelo e às simplificações adotadas em comparação aos ambientes reais de produção, esses resultados devem ser vistos com cautela. Deve ser destacado que os dados gerados, assim como as análises realizadas, têm o propósito de proporcionar comparações entre tratamentos e parâmetros em um ambiente fictício de

aplicação dos métodos S-DBR e BM.

5. CONCLUSÕES

Esta pesquisa avaliou os métodos S-DBR e BM sob diversos tratamentos, com diferentes parâmetros, com o objetivo de comparar princípios operacionais subjacentes a esses métodos, enfatizando o papel do BM para sua efetividade. Foi simulada uma linha de produção com cinco estações e com restrição de mercado, variando-se a existência e posição de uma restrição secundária, tamanhos distintos de pulmões e capacidade protetiva, e aplicação - ou não - de BM.

A ativação do BM foi o fator que mais contribuiu para a melhoria do desempenho do sistema, ao reduzir de forma mais significativa as perdas de produção. Isso está em linha com Schragenheim (2013b) que afirma que o BM é essencial para a eficácia do S-DBR. Os dados também permitiram atestar que possuir restrições interativas impacta negativamente no desempenho do BM.

Pôde-se observar que níveis maiores de capacidade protetiva permitem maior exploração das restrições, aumentando o ganho do sistema. O tamanho do pulmão foi o único parâmetro que, quando variado, impactou de forma significativa o estoque médio, com um aumento constante do estoque médio para cada unidade adicional no Tamanho do Pulmão.

O teste aplicado não identificou diferenças estatísticas significativas entre as posições do CCR na linha. Por outro lado, os dados indicam uma tendência de aumento na perda conforme o CCR se desloca para o final da linha. Pesquisas futuras poderiam avaliar se esse aumento se deve ao acaso, ao fato de o CCR estar mais perto do final da linha de produção ou se foi por causa da restrição secundária estar próxima da restrição principal.

Esta pesquisa reconhece suas limitações metodológicas, com destaque para a simplicidade do sistema de produção simulado, uma vez que utilizou como base um jogo simples de dados, com distribuições estatísticas dos números gerados uniformemente distribuídos e sem as complexidades típicas de ambientes reais de manufatura. O modelo também não quantifica os custos de cada cenário, não permitindo avaliar *trade-offs* entre as alternativas testadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo apoio, sem o qual esta pesquisa não seria possível (Processo: [2023/05412-7](#)).

REFERÊNCIAS

- AVDEEVA, Marina; UZUN, Oleg; BORODKINA, Yulia. Simulation of the evacuation process at various economic facilities using the Anylogic software product. In: **E3S Web of Conferences**. EDP Sciences, 2020. p. 11031.
- BANKS, J.; CARSON II, J. S.; NELSON, B. L.; NICOL, D. M. **Discrete-event system simulation**. Prentice Hall, 2004.
- CHAKRAVORTY, S. S.; HALES, D. 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.
- COX III, J. F.; BOYD, L. H.; SULLIVAN, T. T.; REID, R. A.; CARTIER, B. **The Theory of Constraints International Certification Organization Dictionary**. 2 ed. 2012.
- 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.
- GOLDRATT, E. M.; COX, J. **A meta: um processo de melhoria contínua**. Tradução de Thomas Corbett. 3 ed (Edição comemorativa 30 anos). São Paulo: Nobel, 2014.
- GUPTA, M.; BOYD, L. An Excel-based dice game: an integrative learning activity in operations management. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 31, n. 6, p. 608-630, 2011.
- GUPTA, M.; GUPTA, A.; DE SOUZA, F. B.; IKEZIRI, L. M.; DATT, M. Synergizing ChatGPT and experiential learning: unravelling TOC based production planning and control variants through the dice game. **International Journal of Production Research**, p. 1-26, 2024.
- LEE, J. H.; CHANG, J. G.; TSAI, C. H.; LI, R. K. 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.
- MANIKAS, A.; GUPTA, M.; BOYD, L. Experiential exercises with four production planning and control systems. **International Journal of Production Research**, v. 53, n. 14, p. 4206-4217, 2015.
- MODI, Kartik; LOWALEKAR, Harshal; BHATTA, N. M. K. Revolutionizing supply chain management the theory of constraints way: A case study. **International Journal of Production Research**, v. 57, n. 11, p. 3335-3361, 2019.
- SCHRAGENHEIM, A. Gerenciamento da cadeia de suprimentos. In: COX III, J. F.; SCHLEIER, J. G. (Orgs.). **Handbook da Teoria das Restrições**. Porto Alegre: Bookman, 2013a. cap. 11, p. 274-311.

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**. Porto Alegre: Bookman, 2013b. cap. 9, p. 217-245.

SCHRAGENHEIM, E.; DETTMER, H. W. **Manufacturing at Warp Speed**: Optimizing Supply Chain Financial Performance. Boca Raton: St. Lucie Press, 2000.

SCHRAGENHEIM, E.; DETTMER, H. W.; PATTERSON, J. Wayne. **Supply chain management at warp speed**: Integrating the system from end to end. Auerbach Publications, 2009.

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.

SOUZA, F. B.; PIRES, S. R. I. Theory of constraints contributions to outbound logistics. **Management Research Review**, v. 33, n. 7, p. 683-700, 2010.

WATSON, K. J.; BLACKSTONE, J. H.; GARDINER, S. C. The evolution of a management philosophy: The theory of constraints. **Journal of Operations Management**, v. 25, n. 2, p. 387-402, 2007.