

CENTRO UNIVERSITÁRIO SAGRADO CORAÇÃO

GIOVANA APARECIDA LEME IKEZIRI

**SISTEMAS DE PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO
APLICADOS NO EXCEL COM ÊNFASE NO SISTEMA S-DBR**

BAURU

2021

GIOVANA APARECIDA LEME IKEZIRI

**SISTEMAS DE PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO
APLICADOS NO EXCEL COM ÊNFASE NO SISTEMA S-DBR**

Monografia de Iniciação Científica do curso de Engenharia de Produção apresentado ao Programa Voluntário de Iniciação Científica (PIVIC) do Centro Universitário Sagrado Coração.

BAURU

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com
ISBD

I26s

Ikeziri, Giovana Aparecida Leme

Sistemas de Planejamento e Controle da Produção aplicados no Excel com ênfase no sistema S-DBR / Giovana Aparecida Leme Ikeziri. -- 2021.

47f. : il.

Orientador: Prof. M.e Lucas Martins Ikeziri

Monografia (Iniciação Científica em Engenharia de Produção) - Centro Universitário Sagrado Coração - UNISAGRADO - Bauru - SP

1. Teoria das Restrições. 2. Carga Planejada. 3. Sistema Empurrado. 4. Sistema Puxado. 5. Simulação. I. Ikeziri, Lucas Martins. II. Título.

RESUMO

Esta pesquisa tem como objetivo geral desenvolver uma plataforma didática no software Microsoft Excel que mostre as similaridades e diferenças entre os fundamentos de quatro sistemas de Planejamento e Controle da Produção (PCP) aplicados em um ambiente de produção para estoque, sendo eles: Material Requirements Planning (MRP), Kanban (Just in Time), Constant Work in Process (CONWIP) e Simplified Drum Buffer Rope / Make to Availability (S-DBR/MTA), para que estudantes e profissionais da área de gestão de operações possam compreendê-los. Para tanto, uma pesquisa teórico-conceitual foi realizada, visando a compreensão dos conceitos fundamentais dos quatro sistemas de PCP. A partir da fundamentação teórica, os processos e as lógicas de cada sistema de PCP foram modelados conceitualmente, viabilizando o desenvolvimento da plataforma que foi apresentada como principal resultado desta pesquisa. Por fim, um cenário padrão foi gerado, simulado e discutido sob os pontos de vista dos desempenhos dos quatro sistemas de PCP, enfatizando um aspecto único do S-DBR/MTA.

Palavras-chave: Teoria das Restrições. Carga Planejada. Sistema Empurrado. Sistema Puxado. Simulação.

ABSTRACT

This research aims to develop a didactic platform in Microsoft Excel software that shows the similarities and differences between the fundamentals of four Production Planning and Control (PPC) systems applied in a make-to-stock environment, namely: Material Requirements Planning (MRP), Kanban (Just in Time), Constant Work in Process (CONWIP) and Simplified Drum Buffer Rope / Make to Availability (S-DBR/MTA), so that students and professionals in the field of operations management can understand them. Therefore, theoretical-conceptual research was carried out, aiming to understand the fundamental concepts of the four PPC systems. From the theoretical foundation, the processes and logic of each PPC system were conceptually modeled, enabling the development of the platform that was presented as the main result of this research. Finally, a standard scenario was generated, simulated, and discussed from the point of view of the performances of the four PPC systems, emphasizing a unique aspect of the S-DBR/MTA.

Keywords: Theory of Constraints. Planned Load. Push System. Pull System. Simulation.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	6
1.1	OBJETIVOS DA PESQUISA	8
1.2	JUSTIFICATIVA.....	8
1.3	ESTRUTURA DO RELATÓRIO.....	9
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	10
2.1	MATERIAL REQUIREMENTS PLANNING.....	10
2.2	SISTEMA KANBAN (JUST IN TIME).....	11
2.3	CONSTANT WORK IN PROCESS.....	12
2.4	SIMPLIFIED DRUM BUFFER ROPE / MAKE TO AVAILABILITY	14
3	MÉTODO DE PESQUISA.....	18
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA	18
3.2	ETAPAS DA PESQUISA	18
4	RESULTADOS	25
5	DISCUSSÃO	37
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
	REFERÊNCIAS.....	43
	ANEXO A – CARTA DE DISPENSA DE APRESENTAÇÃO AO CEP OU CEUA ...	47

1 INTRODUÇÃO

A Revolução Industrial é um marco para a produção de bens de consumo, pois refere-se ao período responsável por grandes mudanças que viabilizaram a fabricação e o consumo em massa. Tal evolução revelou a necessidade de um novo campo de estudo dirigido para o planejamento das operações industriais, visto que, devido às ondas de avanços tecnológicos, a complexidade para gerenciar as cadeias produtivas tem se tornado cada vez maior (BLOK, 2021; LUSTOSA; DE MESQUITA; OLIVEIRA, 2008).

Assim, a criação de uma ciência administrativa na primeira década do século XX, inicialmente baseada nos estudos de Frederick Taylor e Henri Fayol, serviu como fundamento para outros trabalhos que levaram ao desenvolvimento dos sistemas de Planejamento e Controle da Produção (PCP) (LUSTOSA; DE MESQUITA; OLIVEIRA, 2008).

Em síntese, um sistema de PCP coordena e aplica os recursos produtivos visando o atendimento dos planos estabelecidos em níveis estratégico, tático e operacional da melhor forma possível (MOLINA; RESENDE, 2006). A eficácia e a eficiência são, portanto, aspectos que devem conduzir as decisões do PCP sobre a forma de utilização dos recursos e a definição do que, quanto e quando produzir e comprar (CHIAVENATO, 2008; FERNANDES; GODINHO FILHO, 2007). Diante do impacto de tais decisões, diversos sistemas de PCP foram desenvolvidos e são utilizados na prática e estudados por acadêmicos (MANIKAS; GUPTA; BOYD, 2015).

Um importante avanço na história do desenvolvimento dos sistemas de PCP ocorreu no início dos anos 80, pois com a publicação do livro “A Meta”, o Dr. Eliyahu Moshe Goldratt introduziu alguns conceitos da Teoria das Restrições (*Theory of Constraints – TOC*), apresentando um modo inovador de como utilizar o conceito de eficiência dentro de uma indústria (IKEZIRI et al., 2019). No livro, Goldratt e Cox (1984) elucidam o conceito de gargalo como qualquer recurso cuja capacidade é menor ou igual do que a demanda colocada sobre ele em um horizonte de tempo específico. Para incrementar os níveis de produção, os autores propõem uma ferramenta baseada em cinco passos de focalização: 1) Identificar a restrição do sistema; 2) decidir como explorar a restrição do sistema; 3) subordinar o resto à decisão anterior;

4) elevar a restrição; 5) retornar ao primeiro passo, mas sem permitir que a inércia gere uma restrição no sistema (GOLDRATT; COX, 1984).

O sistema explorado pela TOC é conhecido como *Drum Buffer Rope* (DBR) e seus fundamentos derivam da aplicação dos três primeiros passos mencionados acima (GOLDRATT; FOX, 1986). Por ser classificado como um sistema de coordenação de ordens, o DBR protagoniza a função de controlar a liberação das ordens de produção e programar a sequência das tarefas nas máquinas (FERNANDES; GODINHO FILHO, 2007).

Recentemente, o sistema DBR recebeu uma versão simplificada intitulada de *Simplified Drum Buffer Rope* (S-DBR), a qual possui uma nova abordagem em seu sistema de coordenação de ordens (SOUZA; PIRES, 2014; SOUZA; BAPTISTA, 2010; SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009; SCHRAGENHEIM; DETTMER, 2000). Desde então, poucos estudos foram realizados sobre a funcionalidade desse sistema, principalmente quando aplicado em um ambiente de produção para estoque, onde é chamado de *Make to Availability* (MTA), resultando em um cenário no qual não há comparações entre o desempenho do S-DBR/MTA com a performance de outros sistemas de PCP (IKEZIRI et al., 2019).

De acordo com Manikas, Gupta e Boyd (2015) instaura-se uma situação em que estudantes e profissionais da área de gestão de operações possuem dificuldades em compreender as diferenças fundamentais entre os sistemas de PCP mais clássicos, sendo eles, o *Material Requirements Planning* (MRP), o sistema *Kanban* (*Just in Time*), o *Constant Work in Process* (CONWIP) e o DBR, os quais já foram alvos de pesquisas anteriores (JODLBAUER; HUBER, 2008). No entanto, ainda há uma lacuna sobre tais diferenças ao ser considerada a atualização do sistema DBR para sua versão simplificada, S-DBR/MTA, que é o foco desta pesquisa.

Pelo fato do desenvolvimento do S-DBR/MTA ser mais atual e ainda não ter sido comparado aos demais, o seu conhecimento pode ser prejudicado e a compreensão das especificidades de cada sistema pode ficar comprometida, resultando em um problema que pode ser traduzido na seguinte questão de pesquisa: “como fazer para que estudantes e profissionais da área de gestão de operações compreendam com clareza as diferenças fundamentais entre os principais sistemas de PCP, incluindo a versão S-DBR/MTA proposta pela TOC”?

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

A partir da questão formulada o objetivo geral desta pesquisa consiste em desenvolver uma plataforma didática no *software* Microsoft Excel que mostre as similaridades e diferenças entre os fundamentos de quatro sistemas de PCP aplicados em um ambiente de produção para estoque, sendo eles: o MRP, *Kanban*, CONWIP e S-DBR/MTA, para que estudantes e profissionais da área de gestão de operações possam compreendê-los.

O alcance do objetivo geral está subordinado ao cumprimento dos seguintes objetivos específicos:

1. Demonstrar teoricamente e didaticamente o funcionamento dos sistemas MRP, *Kanban*, CONWIP e S-DBR/MTA por meio da plataforma desenvolvida.
2. Expor os aspectos positivos e negativos de cada um dos quatro sistemas de PCP.
3. Trazer à tona as novidades do método S-DBR/MTA quando comparado aos outros sistemas de PCP.

1.2 JUSTIFICATIVA

A importância desta pesquisa está fundamentada na necessidade da correta compreensão dos sistemas de PCP por estudantes e profissionais da área de gestão de operações, visto que, apesar de alguns desses sistemas serem amplamente conhecidos e consolidados na literatura acadêmica, ainda há dúvidas quanto aos seus conceitos e diferenças em relação aos demais sistemas durante as aplicações (MANIKAS; GUPTA; BOYD, 2015).

Dessa forma, com o auxílio de ferramentas computacionais, como o *software* Microsoft Excel, uma plataforma didática pode ser elaborada para proporcionar uma melhor visualização das similaridades, diferenças, vantagens e desvantagens dos sistemas de PCP.

Vale destacar que a contribuição desta pesquisa está no avanço do trabalho feito por Manikas, Gupta e Boyd (2015) ao considerar um ambiente de produção para estoque e o mercado como um agente do sistema. Esses autores desenvolveram modelos para aprendizagem em Excel sobre os sistemas MRP, *Kanban*, CONWIP e

DBR aplicados em um ambiente sem estoque de produtos acabados (*finished goods inventory* – FGI), isto é, o mercado consome o que for produzido, assim como ocorre nos ambientes de produção sob encomenda.

De acordo com Souza e Pires (2014), os sistemas DBR e S-DBR foram desenvolvidos para implementações em ambientes de produção sob encomenda e, posteriormente, o sistema S-DBR/MTA foi apresentado por Schragenheim, Dettmer e Patterson (2009) para lidar com ambientes de produção para estoque. Portanto, esta pesquisa contempla um sistema de produção que sustenta um FGI para consumo posterior por parte do mercado e, por isso, o sistema DBR tradicional não foi incluído no seu escopo.

1.3 ESTRUTURA DO RELATÓRIO

O presente relatório está estruturado em seis capítulos, conforme o que se segue:

O Capítulo 1 mostra a contextualização do tema, a questão problema, os objetivos e a justificativa da pesquisa.

No Capítulo 2, são apresentados os conceitos fundamentais dos sistemas de PCP compreendidos pela pesquisa.

O Capítulo 3 mostra a classificação, a descrição do método de pesquisa utilizado e as etapas da pesquisa.

No Capítulo 4, os resultados do desenvolvimento da plataforma didática são apresentados.

No Capítulo 5, são feitas as discussões sobre um cenário padrão proposto para comparação dos desempenhos dos quatro sistemas de PCP.

Por fim, no Capítulo 6, são apresentadas as considerações finais.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os conceitos fundamentais dos sistemas de Planejamento e Controle da Produção (PCP) compreendidos pela pesquisa.

2.1 MATERIAL REQUIREMENTS PLANNING

O *Material Requirements Planning* (MRP) foi criado após a segunda Guerra Mundial, período em que o grande avanço tecnológico aumentou a complexidade dos bens produzidos, chegando ao ponto de serem exigidos cálculos cada vez mais difíceis para realizar o planejamento da produção sem o apoio de máquinas (LUSTOSA; DE MESQUITA; OLIVEIRA, 2008).

Na década de 1960, Joseph Orlicky, Oliver Wight, George Plossl e outros colaboradores desenvolveram um sistema chamado MRP (HOPP; SPEARMAN, 2004). Apesar das poucas e lentas implementações nos períodos iniciais, a adoção de computadores no ambiente de produção e o apoio promocional da *American Production and Inventory Control Society* (APICS), na década de 1970, elevaram o MRP como o principal paradigma na área de PCP nos Estados Unidos (HOPP; SPEARMAN, 2013; LUSTOSA; DE MESQUITA; OLIVEIRA, 2008).

O modo operacional do sistema MRP utiliza como base um *software* específico que gera as necessidades de compra e de produção de materiais para que os processos de produção sempre estejam abastecidos e funcionando, visando a eficiência máxima de todas as estações (MANIKAS; GUPTA; BOYD, 2015). No entanto, a ênfase sobre a eficiência revela diversos aspectos negativos do MRP, sendo um deles o não atendimento das necessidades da programação por contar com *lead times* fixos em seus cálculos e não considerar a carga presente no chão de fábrica (CORRÊA; GIANESI; CAON, 2019; GIACON; DE MESQUITA, 2011).

Sendo assim, o MRP é classificado como um sistema empurrado de produção, isto é, os materiais programados são liberados para o chão de fábrica sem que haja uma verificação do *status* do sistema ou que seja estabelecido um limite específico de estoque em processo (*work in process* – WIP) (CORRÊA; GIANESI; CAON, 2019; HOPP; SPEARMAN, 2004).

2.2 SISTEMA KANBAN (JUST IN TIME)

No Japão, a abordagem do Sistema Toyota de Produção foi descrita como a produção de bens, tanto quanto possível, em um fluxo contínuo (OHNO, 1997). Logo, o *Kanban*, como um componente do *Just in Time*, caracterizou a marca do Sistema Toyota de Produção e também ficou conhecido como o próprio sistema de produção puxada (HOPP; SPEARMAN, 2013, 2004).

O *Kanban* é um sistema criado por Taiichi Ohno e a sua inspiração surgiu após uma visita de Ohno aos Estados Unidos, em meados de 1950, na qual ele ficou mais impressionado com os supermercados americanos do que com as próprias fábricas. Ele visualizou o supermercado como o primeiro processo de uma linha de produção. O processo posterior, no caso os consumidores finais, vão até o processo anterior (supermercado) e adquirem os produtos necessários no momento certo e na quantidade necessária. Imediatamente, o processo anterior repõe a quantidade que foi retirada pelos consumidores, reabastecendo as prateleiras (DE MESQUITA; DE CASTRO, 2008; HOPP; SPEARMAN, 2004; OHNO, 1997).

Na operação, os *Kanbans* funcionam a partir de sinalizadores de produção representados por etiquetas, cartões, luzes ou outros tipos de mecanismos, os quais são enviados para a linha de produção a fim de iniciar o processo de reposição de um material utilizado, acionando, também, os processos anteriores. Logo, assim que o WIP da próxima estação a jusante fica abaixo de um determinado nível, o *Kanban* indica a necessidade de a estação anterior iniciar sua produção, garantindo a sincronia entre as estações anteriores e posteriores, e mantendo o sistema de produção funcionando com baixos níveis de estoque (IKEZIRI et al., 2020; NAKANDAKARI; IKEZIRI, 2020; MANIKAS; GUPTA; BOYD, 2015; RAHMAN; SHARIF; ESA, 2013).

Existem duas escolas de pensamento para o projeto de um sistema *Kanban*. A primeira sugere que a quantidade de cartões *Kanban* seja superestimada e que os *Kanbans* sejam retirados um de cada vez da linha de produção para a identificação das restrições do sistema. A segunda requer o cálculo da quantidade ótima de *Kanbans*, considerando variáveis conhecidas do sistema de produção e um fator de segurança (MUKHOPADHYAY; SHANKER, 2005). Para fins didáticos, a plataforma

desenvolvida no *software* Microsoft Excel utiliza a fórmula para o dimensionamento da quantidade de cartões *Kanban*, conforme a Equação 1 adaptada de Tubino (2017).

$$N_k = \frac{D}{Q} \cdot N_d \cdot (1 + S) \quad (1)$$

Em que:

N_k é o número total de cartões *Kanban*.

D é a taxa de demanda média diária da próxima estação a jusante por dia.

Q é o tamanho do lote do cartão *Kanban*.

N_d é o número de dias de cobertura da demanda pela estação (tempo de reposição).

S é o fator de segurança calculado como a razão entre a variação máxima em torno da média (capacidade máxima da estação subtraída pela capacidade média) e a capacidade média da estação.

O *Kanban* é classificado como um sistema puxado e a quantidade de cartões *Kanban* estabelece um limite fixo de WIP entre as estações, permitindo baixos níveis de estoque em toda a planta de produção (MANIKAS; GUPTA; BOYD, 2015; HOPP; SPEARMAN, 2004).

2.3 CONSTANT WORK IN PROCESS

As origens do *Constant Work in Process* (CONWIP) remetem a meados de 1980 (SPEARMAN; WOODRUFF; HOPP, 2021), mas ele foi oficialmente apresentado por Spearman, Woodruff e Hopp (1990) como uma alternativa ao sistema *Kanban* para assegurar o fluxo puxado de produção em ambientes cuja variabilidade de volume ou de mix de produtos seja maior.

A principal diferença entre o CONWIP e o *Kanban* é que o segundo requer a definição de mais parâmetros do que o primeiro, por exemplo, uma contagem (controle) de cartões para cada estação. O CONWIP, em contraste, necessita de apenas uma contagem (controle) de cartões em toda a linha de produção (HOPP; SPEARMAN, 2013; SPEARMAN; WOODRUFF; HOPP, 1990).

Uma segunda diferença importante é que em um ambiente multiprodutos, cada cartão *Kanban* representa apenas um *stock keeping unit* (SKU), enquanto os cartões

CONWIP são genéricos para a linha e passam a representar um determinado SKU somente quando são liberados para o início da produção junto com a próxima ordem que estava aguardando no *backlog* (HOPP; SPEARMAN, 2013; SPEARMAN; WOODRUFF; HOPP, 1990).

Assim, o CONWIP é caracterizado como um sistema de controle de produção híbrido, sendo orientado para “puxar a produção” pelo final da linha e “empurrar a produção” do início ao fim da linha, mantendo a quantidade de WIP constante no sistema (SERENO et al., 2011; SPEARMAN; WOODRUFF; HOPP, 1990). O seu princípio de funcionamento baseia-se na seguinte lógica: quando um cliente faz um pedido, o produto é enviado de imediato, o cartão CONWIP é retirado desse produto e retorna para o início do processo, autorizando a produção de um novo produto na linha (não necessariamente o mesmo SKU) (HOPP; SPEARMAN, 2013). Portanto, o sistema funciona como se fosse um *Kanban* único que inicia toda a cadeia produtiva (SERENO et al., 2011).

Spearman, Woodruff e Hopp (2021) apontam que a configuração do CONWIP (limite máximo de WIP da linha) não deve ser tão baixa ao ponto de afetar a taxa de produção da linha, nem muito alta para causar tempos de ciclo excessivos. Logo, segundo Hopp e Spearman (2013), se o CONWIP estiver sendo implementado em uma linha existente, deve-se manter o nível de WIP atual e avaliar a oportunidade para redução da quantidade de cartões com base nas filas e no desempenho da estação gargalo. Por outro lado, para a implementação do CONWIP em uma linha nova, deve-se modelar e simular as relações entre WIP, tempo de ciclo e taxa de produção para que seja estabelecido um limite máximo de WIP equilibrado (MARIZ, 2018).

O WIP crítico (W_0) de uma linha é o nível de WIP para o qual uma linha sem variabilidade atinge a taxa máxima de produção [taxa do gargalo (*bottleneck rate* – r_b)] com o tempo de ciclo mínimo [tempo bruto de processamento (T_0)]. A Equação 2 mostra que W_0 é obtido a partir da seguinte relação entre r_b e T_0 (HOPP; SPEARMAN, 2013):

$$W_0 = r_b \cdot T_0 \quad (2)$$

Com o intuito de simplificar a obtenção do parâmetro do CONWIP, isto é, o limite máximo de WIP da linha ($WIP_{m\acute{a}x}$), a plataforma desenvolvida no *software* Microsoft Excel calcula este valor considerando W_0 e o fator de segurança do gargalo (S_b), que é igual ao fator de segurança utilizado no dimensionamento da quantidade de cartões *Kanban* apenas da estação gargalo, conforme a Equação 3.

$$WIP_{m\acute{a}x} = W_0 \cdot (1 + S_b) \quad (3)$$

Portanto, o CONWIP recebe a classificação de sistema puxado, pois ele estabelece um limite fixo de WIP na linha de produção por cartões de forma semelhante ao sistema *Kanban* (HOPP; SPEARMAN, 2004).

2.4 SIMPLIFIED DRUM BUFFER ROPE / MAKE TO AVAILABILITY

As raízes da Teoria das Restrições (*Theory of Constraints* – TOC) surgiram no final da década de 70, quando o *software Optimized Production Technology* (OPT) foi criado pelo físico israelense Dr. Eliyahu Moshe Goldratt (IKEZIRI et al., 2019; COX III; SCHLEIER, 2013). Em 1984, o livro “A Meta” foi publicado por Goldratt e Cox (1984) e nele, o sistema *Drum Buffer Rope* (DBR) foi conceituado pela primeira vez (NARITA; IKEZIRI; SOUZA, 2021; WATSON; BLACKSTONE; GARDINER, 2007).

Em 2000, o sistema *Simplified Drum-Buffer-Rope* (S-DBR) foi introduzido no livro “*Manufacturing at Warp Speed*” como uma abordagem simplificada do método DBR tradicional. O S-DBR se diferencia do seu antecessor por adotar o pressuposto de que a demanda não utiliza toda a capacidade disponível de produção na maior parte do tempo. Logo, os gargalos deixam de existir e o mercado torna-se a nova restrição do sistema (CHAKRAVORTY; HALES, 2016; SOUZA; PIRES, 2014; SOUZA; BAPTISTA, 2010; SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009; SCHRAGENHEIM; DETTMER, 2000).

É importante ressaltar que apesar da linha não possuir gargalos, ela pode apresentar Recursos com Restrição de Capacidade (RRC). Para Cox et al. (2012), um RRC é qualquer recurso que, se a sua capacidade não for gerenciada adequadamente, poderá comprometer o desempenho da organização, tornando-se um gargalo.

A princípio, o método S-DBR pressupunha que as implementações ocorressem em ambientes de produção sob encomenda, assim como o seu antecessor. Assim, para lidar com ambientes de produção para estoque, os conceitos do S-DBR foram expandidos e a TOC vem difundindo o método *Make to Availability* (MTA) há pouco mais de uma década (SOUZA; PIRES, 2014). MTA é a declaração de que a fábrica tem um compromisso com o mercado e tem a disponibilidade de produtos sempre que for necessário. Esta definição difere-se de um sistema de produção para estoque tradicional, onde nenhum compromisso de disponibilidade é firmado com o mercado (SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009).

Schragenheim, Dettmer e Patterson (2009) detalharam os procedimentos para a operação do processo de produção no modo S-DBR/MTA em quatro passos:

- **Passo 1: Definir os Níveis Iniciais de Estoque Alvo (*Target Level* – TL)**

O TL a ser mantido para cada SKU no sistema S-DBR/MTA é definido pela demanda máxima prevista dentro do tempo médio de reposição multiplicada por um fator de segurança (NARITA; IKEZIRI; SOUZA, 2021; MODI; LOWALEKAR; BHATTA, 2019; SOUZA; PIRES, 2010; GOLDRATT; GOLDRATT, 2003). A Equação 4 mostra a fórmula utilizada pela plataforma do *software* Microsoft Excel para o dimensionamento do TL.

$$TL = D_m \cdot TR \cdot (1 + S_m) \quad (4)$$

Em que:

D_m é a taxa de demanda média do mercado.

TR é o tempo médio de reposição.

S_m é o fator de segurança do sistema calculado como a razão entre a variação máxima em torno da média da demanda de mercado (demanda máxima subtraída pela demanda média) e a demanda média de mercado.

- **Passo 2: Gerar a Ordem de Produção**

Depois que o TL é definido, é de responsabilidade da produção mantê-lo sempre constante no sistema. Isso implica que, se o estoque de produtos acabados (*finished goods inventory* – FGI) somado ao WIP for menor do que o TL, então uma nova ordem de produção com o tamanho exato dessa diferença deve ser gerada para estabilizar o sistema. Em determinados ambientes, algumas políticas de lotes mínimos

precisam ser atendidas para que os recursos (principalmente os RRCs) não se sobrecarreguem devido ao excesso de *setups*.

A liberação de uma nova ordem de produção deve ser autorizada, segundo a sua prioridade e conforme o carregamento sobre a carga planejada, evitando o surgimento de gargalos no sistema.

Schragenheim (2013) define a carga planejada regular como a soma da carga sobre o RRC de todas as ordens de produção liberadas para o chão de fábrica, mas que ainda não foram processadas pelo RRC. O horizonte de tempo considerado para a carga planejada é igual ao tempo médio de reposição e Schragenheim, Dettmer e Patterson (2009) recomendam que a carga máxima fique sempre abaixo de 80% desse horizonte de tempo. A Equação 5 mostra a fórmula utilizada pela plataforma do *software* Microsoft Excel para o cálculo da carga máxima planejada sobre o RRC. Logo, as ordens de produção são liberadas para o chão de fábrica até que esse limite seja alcançado. Caso novas ordens cheguem no sistema, elas ficarão no *backlog* aguardando a autorização de liberação pela carga planejada.

$$CP_{\text{máx}} = 0,8 \cdot TP_{\text{RRC}} \cdot TR \quad (5)$$

Em que:

$CP_{\text{máx}}$ é a carga máxima planejada da linha.

TP_{RRC} é a taxa de produção do RRC.

TR é o tempo médio de reposição.

No modo S-DBR/MTA, a prioridade é definida pelo *status* do pulmão, calculado através do TL subtraído da soma das quantidades de FGI e WIP, divididos pelo próprio TL. Quanto maior o *status* do pulmão, maior é a prioridade para a liberação da ordem de produção.

- **Passo 3: Gerenciamento do Pulmão**

O Gerenciamento do Pulmão é uma ferramenta da TOC que ajuda no estabelecimento de prioridades e alerta os operadores quando uma determinada ordem precisa ser apressada (WATSON; BLACKSTONE; GARDINER, 2007).

No DBR tradicional e no S-DBR aplicado em ambientes de produção sob encomenda, os pulmões são estabelecidos na forma de tempo. Já no método S-DBR/MTA, os pulmões são formados pelos estoques. Um pulmão é dividido em três

diferentes regiões, cada uma correspondendo a uma cor (verde, amarela e vermelha) que representa o *status* do pulmão.

O *status* verde indica que mais de dois terços do TL se encontra no FGI, logo a proteção é suficiente. O *status* amarelo significa que o FGI contém entre um terço e dois terços do TL, nesse momento é importante monitorar este item e verificar se a ordem de produção já está a caminho. O *status* vermelho alerta que a proteção é inferior a um terço do TL, portanto, a reposição deve ocorrer imediatamente ou o sistema estará exposto a sofrer rupturas de estoque (SCHRAGENHEIM, 2013).

- **Passo 4: Manter os corretos níveis de TL**

Os sinais fornecidos pelo *status* do pulmão permitem o ajuste do TL. Se o pulmão permanecer por muito tempo na região verde, significa que o TL atual é muito grande e, nesse caso, existe uma oportunidade de reduzi-lo. Por outro lado, se o pulmão invadir frequentemente a zona vermelha, esse é um alerta para aumentar o TL (NARITA; IKEZIRI; SOUZA, 2021).

Para efeito de comparação com os demais sistemas de PCP apresentados neste capítulo, os passos 3 e 4 não foram implementados na plataforma do *software* Microsoft Excel, pois por representar um ambiente controlado com apenas um SKU e com lotes de processamento e de transferência unitários, as ferramentas para sequenciamento e priorização de ordens de produção (passo 3) e redimensionamento do TL (passo 4) não foram consideradas como fatores críticos para o cumprimento dos objetivos da presente pesquisa, além de não permitirem comparações adequadas com os demais sistemas.

Em consequência de as ordens de produção serem geradas com base no consumo real e do limite máximo de WIP ser determinado pela carga máxima planejada sobre o RRC, o S-DBR/MTA classifica-se como um sistema de produção puxado. Sendo assim, os trabalhos são programados de acordo com a demanda de mercado e suas respectivas autorizações são controladas por meio de um mecanismo de comunicação entre o início da linha e o RRC.

3 MÉTODO DE PESQUISA

Neste capítulo são apresentadas as características da pesquisa e as etapas trilhadas para o desenvolvimento da plataforma didática no *software* Microsoft Excel.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

Do ponto de vista de sua abordagem, esta pesquisa tem caráter quantitativo, pois baseia-se em métodos lógico-dedutivos, possibilita replicações e busca explicar as relações de causa e efeito, por exemplo, “por que um sistema de Planejamento e Controle da Produção (PCP) possui desempenho superior, segundo as características de um determinado ambiente?” (BERTO; NAKANO, 1999).

Com relação à sua natureza, a pesquisa é caracterizada como aplicada ao visar a geração de novos conhecimentos direcionados para a solução de problemas específicos, no caso, estabelecer uma compreensão precisa das similaridades e diferenças entre quatro sistemas de PCP identificados na literatura acadêmica (GERHARDT; SILVEIRA, 2009).

Quanto aos seus objetivos, ela é explicativa, pois a partir do registro, análise e interpretação dos fatos, foi possível identificar as suas causas. Assim, esta pesquisa explica o porquê da ocorrência de determinados fenômenos através dos resultados oferecidos (MARCONI; LAKATOS, 2011; GERHARDT; SILVEIRA, 2009).

Por fim, esta pesquisa adotou o método de simulação, pois trata-se de um método que tem se tornado cada vez mais relevante para o desenvolvimento de novas teorias ou ampliar o conhecimento sobre teorias já existentes (DAVIS; EISENHARDT; BINGHAM, 2007). Modelos de simulação desenvolvidos e validados são capazes de responder uma grande variedade de questões “e se” sobre os sistemas reais (BANKS et al., 2004). Sendo assim, a simulação propiciou o desenvolvimento e estudo de modelos no *software* Microsoft Excel fundamentados nos princípios dos quatro sistemas de PCP selecionados para esta pesquisa.

3.2 ETAPAS DA PESQUISA

Este projeto de Iniciação Científica iniciou com uma pesquisa teórico-conceitual a partir da leitura de artigos científicos nacionais e internacionais recentes, assim

como os já consolidados na literatura acadêmica. Além disso, também foram consultados livros significativos da área de PCP para a compreensão dos sistemas *Material Requirements Planning* (MRP), *Kanban (Just in Time)*, *Constant Work in Process* (CONWIP) e *Simplified Drum Buffer Rope / Make to Availability* (S-DBR/MTA), apresentados no Capítulo 2.

Após o desenvolvimento da fundamentação teórica, esta serviu de base para a elaboração do modelo conceitual, de forma que as características fundamentais de cada sistema de PCP fossem capturadas. A Figura 1 mostra o ambiente modelado composto pelo *backlog* de ordens de produção (BL), cinco estações (círculos numerados de 1 a 5) e o mercado (M). Entre cada círculo há um ponto de estoque que pode ser matéria-prima liberada para a estação 1, estoque em processo (*work in process* – *WIP*) entre as estações 1 e 2, 2 e 3, 3 e 4 e 4 e 5, ou produto acabado (*finished goods inventory* – *FGI*) finalizado pela estação 5.

O modelo conceitual evidencia que o fluxo da autorização de produção é a principal diferença entre os sistemas compreendidos por esta pesquisa. Esse modelo é semelhante ao que foi proposto por Manikas, Gupta e Boyd (2015), mas avança o conhecimento ao considerar o mercado como um agente do sistema e viabilizar a compreensão dos sistemas de PCP em um ambiente de produção para estoque, que é essencial para a implementação do sistema S-DBR/MTA.

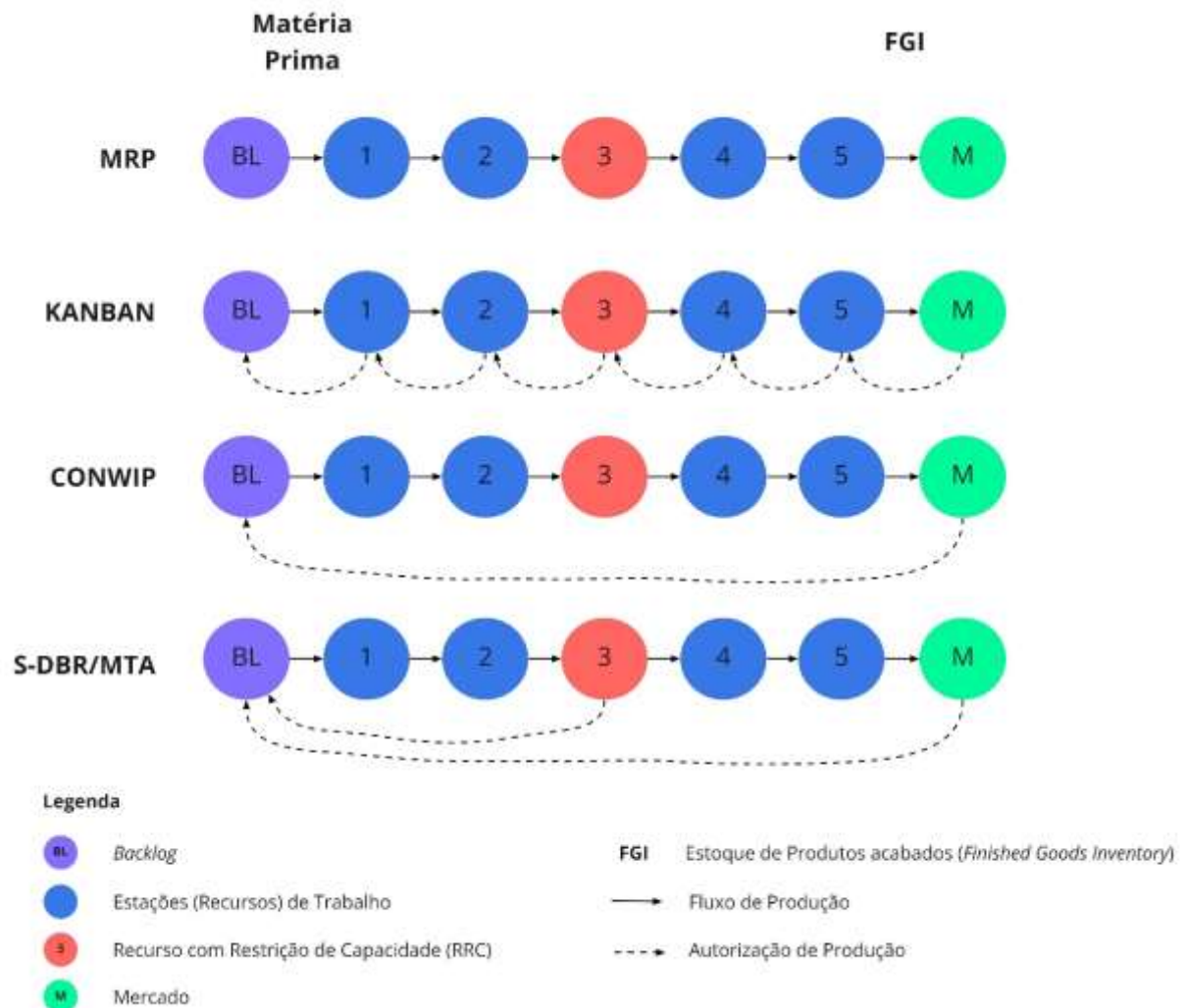
De acordo com a Figura 1, observa-se que o MRP não possui um mecanismo de autorização de produção, sendo o único sistema desta pesquisa classificado como empurrado. Assim, os materiais são liberados pelo BL de acordo com a capacidade máxima da estação 1 e, depois, são empurrados até o FGI para serem consumidos pelo M, visando a maior eficiência da linha.

O sistema *Kanban* faz a sincronização entre cada conjunto de estações imediatas a montante e a jusante, autorizando a produção somente quando houver necessidade de repor um item para a estação a jusante. A autorização é feita quando uma estação fornecedora recebe o cartão *Kanban*, devendo produzir apenas o item representado pelo cartão na quantidade estabelecida. Dessa forma, o *WIP* entre cada estação nunca excede a quantidade definida pelos cartões *Kanban*.

O CONWIP, como o próprio nome explica, tem o objetivo de manter o *WIP* constante no sistema. Em vista disso, O BL autoriza novos trabalhos para a linha na forma de matéria-prima até um certo limite. Após o alcance do limite máximo de *WIP*,

novas ordens ficam aguardando no BL até que o nível de estoque da linha (da matéria-prima liberada para a estação 1 até o FGI após a estação 5) diminua e novos trabalhos sejam autorizados.

Figura 1 - Modelo conceitual da pesquisa



Fonte: Adaptado de Manikas, Gupta e Boyd (2015).

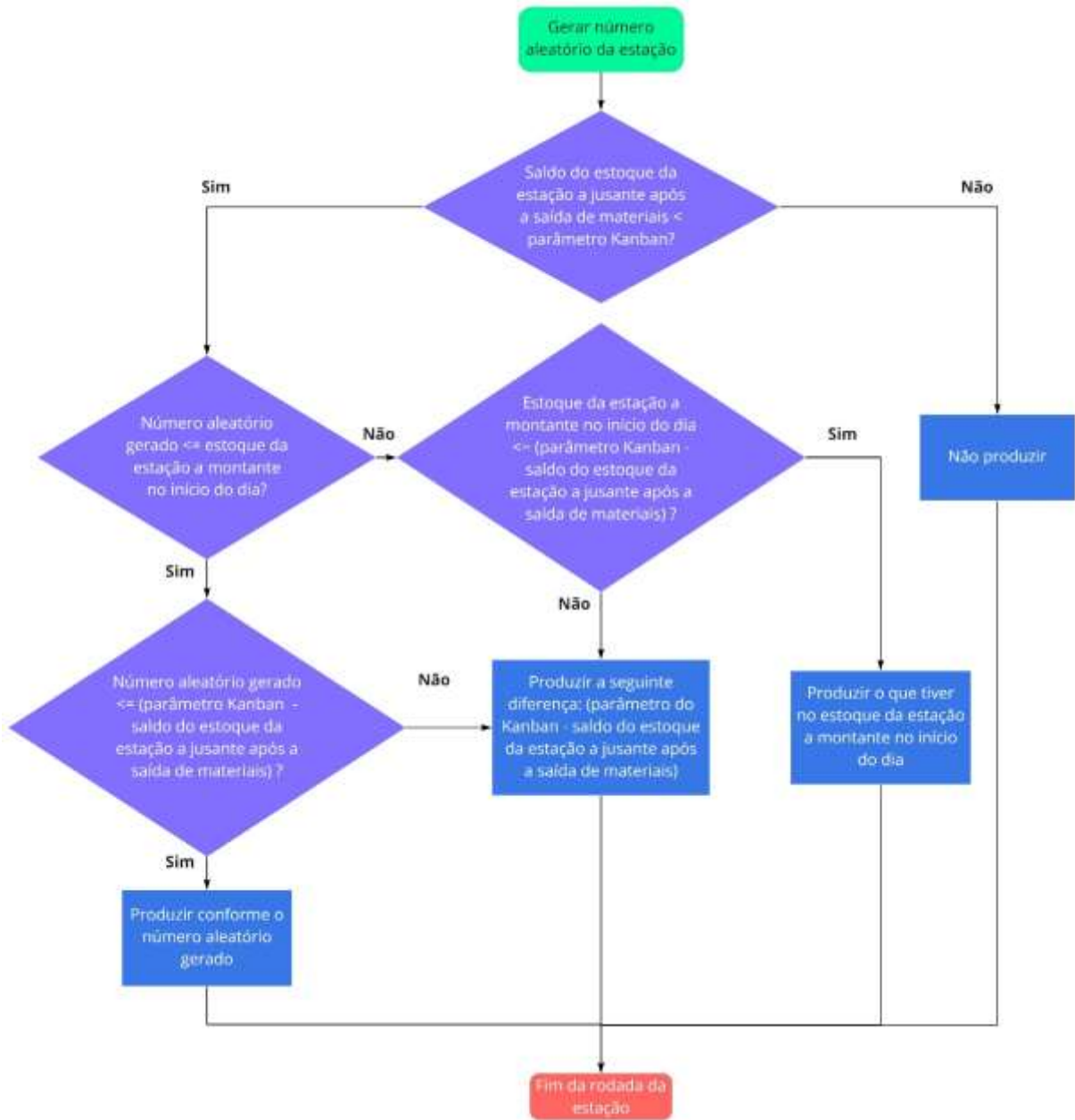
O sistema S-DBR/MTA estabelece um nível de estoque alvo (*Target Level – TL*) para o produto que deve ser mantido constante em todo o processo, seja na forma de uma ordem que aguarda no BL, matéria-prima liberada para a estação 1, WIP ou como FGI. Sendo assim, uma ordem de produção só é gerada quando houver a necessidade de repor os produtos que foram consumidos pelo mercado (seta tracejada que conecta o M ao BL na Figura 1).

Sob esse ponto de vista, o S-DBR/MTA seria um sistema semelhante ao CONWIP. Contudo, ressalta-se que o S-DBR tem o pressuposto de que a demanda de mercado deve ser a principal restrição do sistema e que todos os recursos devem possuir capacidade protetiva ou em excesso, inclusive o Recurso com Restrição de Capacidade (RRC), representado na Figura 1 pela estação 3 (círculo laranja). Para evitar a sobrecarga da linha e o surgimento de gargalos, o S-DBR/MTA considera a carga planejada sobre o RRC como um mecanismo que autoriza novos trabalhos até um determinado limite que, quando alcançado, retém as ordens de produção no BL até que mais materiais tenham sido processados pelo RRC e novas liberações sejam autorizadas para a estação 1 (seta tracejada que conecta a estação 3 (RRC) ao BL na Figura 1).

Para complementar o modelo conceitual apresentado na Figura 1, foi feita a modelagem dos processos de autorização de produção para cada sistema puxado de PCP (setas tracejadas da Figura 1). As Figuras 2, 3 e 4 mostram, respectivamente, os fluxogramas desenvolvidos para os sistemas *Kanban*, CONWIP e S-DBR/MTA que foram incorporados na plataforma elaborada no *software* Microsoft Excel.

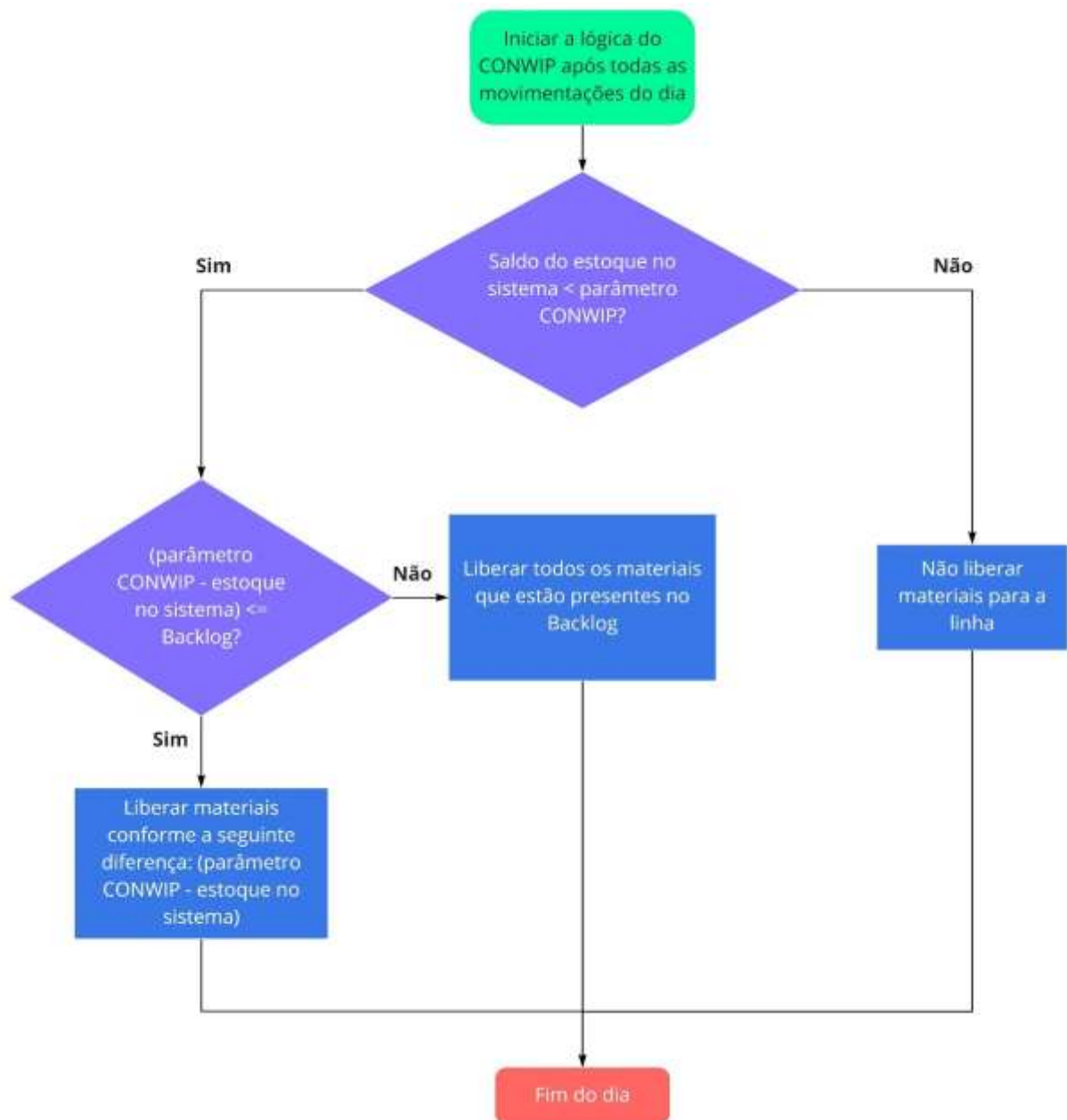
Com base no modelo conceitual e nos fluxogramas dos processos de autorização de produção, a plataforma foi desenvolvida no *software* Microsoft Excel com o uso de fórmulas, conexões entre planilhas, gráficos para análise de resultados e macros para a concepção de uma interface automatizada. O Capítulo 4 mostra os resultados da presente pesquisa de Iniciação Científica.

Figura 2 - Fluxograma do processo de autorização de produção pelo sistema Kanban



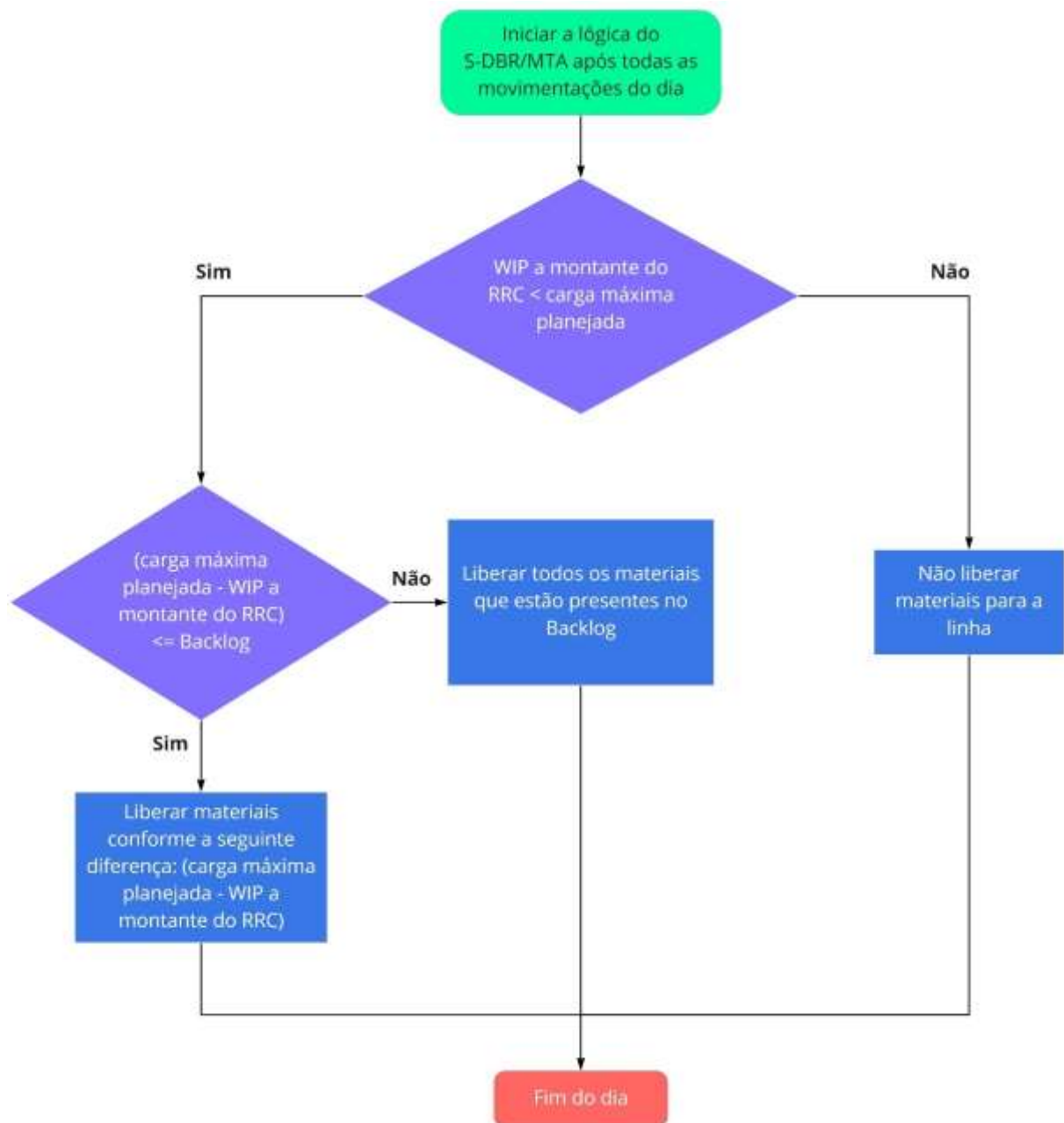
Fonte: Autora (2021).

Figura 3 - Fluxograma do processo de autorização de produção pelo sistema CONWIP



Fonte: Autora (2021).

Figura 4 - Fluxograma do processo de autorização de produção pelo sistema S-DBR/MTA



Fonte: Autora (2021).

4 RESULTADOS

A plataforma conta com uma tela inicial de *setup*, na qual o usuário tem a opção de parametrizar os níveis iniciais de matéria-prima (MP), estoque em processo (*work in process* – WIP) (WIP 1-2, WIP 2-3, WIP 3-4 e WIP 4-5) e estoque de produtos acabados (*finished goods inventory* – FGI). Além disso, o usuário pode parametrizar os limites mínimos e máximos de capacidade produtiva para cada uma das cinco estações e os limites mínimo e máximo para a demanda de mercado.

A Figura 5 mostra a tela de *setup* com o ambiente parametrizado com valores arbitrários. Nota-se que, para os valores mínimos e máximos inseridos em cada estação e para o mercado, a plataforma calcula a capacidade média e a variação máxima em torno da média (capacidade máxima da estação subtraída pela capacidade média).

Por exemplo, a estação 1 tem capacidade para processar no mínimo uma peça e no máximo seis peças por dia (é como se a estação 1, diariamente, lançasse um dado de seis lados e produzisse o valor do dado, desde que ela estivesse autorizada a produzir pelo sistema de PCP utilizado). Sendo assim, a capacidade média da estação 1 é de 3,5 peças por dia com variação máxima em torno da média de 2,5 peças por dia.

Ainda na tela inicial de *setup*, conforme o usuário insere os parâmetros do ambiente, a plataforma indica se o mercado é a principal restrição do sistema e aponta qual é a estação caracterizada como Recurso com Restrição de Capacidade (RRC) (estação com a menor capacidade média de produção), sua capacidade média e a sua variação máxima em torno da média. A plataforma ainda calcula os parâmetros do *Kanban* (número de cartões *Kanban* das estações – Equação 1), do *Constant Work in Process* (CONWIP) (limite máximo de WIP da linha – Equações 2 e 3) e do *Simplified Drum Buffer Rope / Make to Availability* (S-DBR/MTA) [nível de estoque alvo (*Target Level* – TL) – Equação 4 e a carga máxima planejada da linha – Equação 5]. A Figura 6 mostra as informações adicionais fornecidas pela plataforma na tela inicial de *setup*.

O Quadro 1 mostra a aplicação das cinco equações a partir das informações da Figura 5 cujos resultados são apresentados como parâmetros na Figura 6.

Figura 5 - Tela inicial de setup



Fonte: Autora (2021).

Figura 6 - Informações adicionais da tela inicial de setup

Parâmetros definidos para a Simulação

Estação RRC	1
Média RRC	3,5
Variação RRC	2,5
Mercado é a restrição do sistema?	Sim

Sistema KANBAN	
Cartões	
Backlog	6
1	6
2	8
3	7
4	7
5	4

Sistema CONWIP	
Cartões	36

Sistema S-DBR/MTA	
Target Level (TL)	30
Carga Planejada	17

Fonte: Autora (2021).

Quadro 1 – Aplicação das Equações

Parâmetros	Equação	Cálculo
Kanban Backlog	$Nk = \frac{D}{Q} \cdot Nd \cdot (1 + S)$	$Nk_{BL} = \frac{3,5}{1} \cdot 1 \cdot \left(1 + \frac{2,5}{3,5}\right) = 6$
Kanban 1		$Nk_1 = \frac{3,5}{1} \cdot 1 \cdot \left(1 + \frac{2,5}{3,5}\right) = 6$
Kanban 2		$Nk_2 = \frac{5,5}{1} \cdot 1 \cdot \left(1 + \frac{1,5}{3,5}\right) = 8$
Kanban 3		$Nk_3 = \frac{4,5}{1} \cdot 1 \cdot \left(1 + \frac{2,5}{5,5}\right) = 7$
Kanban 4		$Nk_4 = \frac{4,5}{1} \cdot 1 \cdot \left(1 + \frac{2,5}{4,5}\right) = 7$
Kanban 5		$Nk_5 = \frac{2,5}{1} \cdot 1 \cdot \left(1 + \frac{1,5}{4,5}\right) = 4$
Cartões CONWIP	$W_0 = r_b \cdot T_0$ $WIP_{m\acute{a}x} = W_0 \cdot (1 + S_b)$	$W_0 = 3,5 \cdot 6 = 21$ $WIP_{m\acute{a}x} = 21 \cdot \left(1 + \frac{2,5}{3,5}\right) = 36$
Target Level S-DBR/MTA	$TL = D_m \cdot TR \cdot (1 + S_m)$	$TL = 2,5 \cdot 6 \cdot \left(1 + \frac{2,5}{2,5}\right) = 30$
Carga Planejada S-DBR/MTA	$CP_{m\acute{a}x} = 0,8 \cdot TP_{RRC} \cdot TR$	$CP_{m\acute{a}x} = 0,8 \cdot 3,5 \cdot 6 = 17$

Fonte: Autora (2021).

Por padrão, as variáveis Q e Nd do cálculo do número de cartões Kanban foram estabelecidas como 1, pois os lotes de produção e de transferência são unitários e o tempo de reposição de cada estação é de um dia. Além disso, os tempos T0 e TR foram estabelecidos como 6, pois corresponde ao tempo necessário para uma peça ser processada entre o estoque de MP e o FGI.

As Figuras 7, 8, 9 e 10 mostram, respectivamente, as linhas de produção configuradas com as lógicas dos sistemas *Material Requirements Planning* (MRP),

Kanban, CONWIP e S-DBR/MTA. Após a parametrização do ambiente, o usuário deve pressionar o botão “Simular” da tela inicial de *setup* para que cada linha de produção seja simulada por 90 dias e, ao final, a plataforma calcule os seguintes indicadores: nível de serviço (*Fill Rate*), as quantidades de demanda atendida e demanda perdida, os níveis médios de estoque [WIP, FGI e estoque no sistema (ES) (soma entre WIP e FGI)], a rotatividade de estoque (*Inventory Turnover*), e as médias das medidas de eficiência e eficácia por estação.

A eficácia é calculada a partir da razão entre a capacidade utilizada pela estação no dia e a sua capacidade média de produção em porcentagem (eficácia de 100% significa que a estação produziu de acordo com a sua capacidade média). Por outro lado, a eficiência é calculada pela razão entre a capacidade utilizada pela estação no dia e a capacidade real do dia obtida de um número aleatório gerado entre os limites mínimo e máximo parametrizados para cada estação na tela inicial de *setup* em porcentagem (eficiência de 100% significa que a estação produziu de acordo com a sua capacidade real do dia, não sendo bloqueada por falta de material ou por não estar autorizada a produzir).

Nota-se que os parâmetros específicos de cada linha aparecem nas células laranjadas das Figuras 8, 9 e 10.

Figura 8 - Linha de produção com o sistema Kanban

Sistema Kanban

← Volta																												
Cartões Kanban		6		6		8		7		7		4																
Dia	Backlog		Matéria Prima		Estação 1		WIP 1-2		Estação 2		WIP 2-3		Estação 3		WIP 3-4		Estação 4		WIP 4-5		Estação 5		FGI		Demanda de Mercado			
	Início dia	Final dia	Início dia	Final dia	Real	Utiliz.	Início dia	Final dia	Real	Utiliz.	Início dia	Final dia	Real	Utiliz.	Início dia	Final dia	Real	Utiliz.	Início dia	Final dia	Real	Utiliz.	Início dia	Final dia	Demanda	Atendida	Perdida	
0			8	6			3	3			4	6			6	7			8	8			10	8	2	2	0	
1	0	0	6	6	3	3	3	3	4	7	6	8	6	0	8	8	3	0	8	4	8	4	4	4	4	0	0	
2	0	0	0	0	4	1	3	0	5	0	8	8	4	0	7	7	0	0	8	0	8	0	4	4	0	0	0	
3	0	0	0	0	2	1	6	6	5	1	8	8	3	1	7	7	4	1	8	7	5	2	4	4	2	2	0	
4	0	0	6	6	2	1	6	6	5	1	8	8	3	1	7	7	2	1	7	7	5	1	4	4	1	1	0	
5	0	0	6	6	2	2	6	5	4	1	8	8	7	3	7	7	5	3	7	7	8	3	4	4	3	3	0	
6	0	0	6	6	2	1	5	3	5	1	8	8	6	3	7	7	1	3	7	7	3	3	4	4	3	3	0	
7	0	0	6	6	1	1	3	3	2	1	8	8	6	1	7	7	7	1	7	7	3	1	4	4	1	1	0	
8	0	0	6	6	3	3	3	6	2	0	8	8	5	0	7	7	2	0	7	7	6	0	4	4	0	0	0	
9	0	0	6	6	3	1	6	4	5	1	8	7	8	4	7	7	6	4	7	7	8	4	4	4	4	5	4	1
10	0	0	6	6	3	2	6	6	2	1	8	8	1	3	7	6	7	4	7	7	5	4	4	4	5	4	1	
90	0	0	6	6	3	2	6	6	2	1	8	8	1	3	7	6	7	4	7	7	5	4	4	4	5	4	1	
1					Eficiência Eficácia				Eficiência Eficácia				Eficiência Eficácia				Eficiência Eficácia		WIP FGI		Eficiência Eficácia		ES = WIP + FGI		252	229	23	
2					100% 86%				80% 86%				25% 18%				0% 0%		30 8		0% 0%		38					
3					100% 87%				50% 57%				0% 0%				0% 0%		32 4		0% 0%		36					
4					50% 29%				0% 0%				0% 0%				0% 0%		35 4		0% 0%		39					
5					50% 29%				20% 29%				33% 18%				25% 22%		34 4		40% 44%		38		Fill Rate	91%		
6					50% 29%				30% 29%				33% 18%				50% 22%		34 4		20% 22%		38		Inventory Turnover	6,35		
7					100% 57%				75% 89%				41% 55%				60% 67%		33 4		50% 67%		37					
8					100% 39%				80% 86%				50% 59%				100% 67%		31 4		100% 67%		35					
9					100% 39%				50% 29%				17% 18%				14% 22%		31 4		33% 22%		35					
10					80% 48%				0% 0%				0% 0%				0% 0%		34 4		0% 0%		38					
90					100% 79%				100% 86%				100% 50%				57% 89%		33 4		80% 89%		37					
Total		-		-		-		-		-		-		-		-		2868 355		-		-		3225				
Média				81% 79%				77% 72%				49% 45%				61% 55%		51,87 5,94		57% 55%		35,81						

Fonte: Autora (2021).

Figura 9 - Linha de produção com o sistema CONWIP

Sistema CONWIP

← Voltar

Cenário CONWIP - 36

Dia	Backlog		Matéria Prima		Estação 1		WIP 1-2		Estação 2		WIP 2-3		Estação 3		WIP 3-4		Estação 4		WIP 4-5		Estação 5		FGI		Demanda de Mercado				
	Início dia	Fim dia	Início dia	Fim dia	Real	Utiliz.	Início dia	Fim dia	Real	Utiliz.	Início dia	Fim dia	Real	Utiliz.	Início dia	Fim dia	Real	Utiliz.	Início dia	Fim dia	Real	Utiliz.	Início dia	Fim dia	Demanda	Atendida	Perdida		
0	-	-	8	5	3	3	3	3	4	3	4	3	6	5	4	4	8	5	6	6	10	14	2	2	0				
1	0	0	5	6	2	2	3	2	3	2	3	2	6	5	4	4	6	7	3	3	14	13	4	4	0				
2	0	1	6	0	4	6	2	6	5	2	3	2	4	3	5	3	6	5	7	6	6	6	13	19	0	0	0		
3	1	1	0	2	2	0	6	1	5	3	2	5	3	3	2	4	3	6	4	6	4	19	22	2	2	0			
4	1	1	2	1	2	2	1	2	5	1	2	5	3	3	3	2	2	4	2	5	4	22	25	1	1	0			
5	1	1	1	3	2	1	2	1	4	2	3	3	2	7	2	3	3	5	3	2	3	25	24	3	3	0			
6	1	1	3	5	1	1	1	1	5	1	2	1	0	0	2	2	3	3	3	3	3	24	24	3	3	0			
7	1	1	5	5	1	1	1	1	2	1	1	1	0	1	2	1	7	2	3	2	3	24	26	1	1	0			
8	1	1	5	0	5	5	1	5	2	1	1	1	5	1	1	1	2	1	2	1	6	2	26	28	0	0	0		
9	1	1	0	5	1	0	5	2	3	1	1	3	8	1	1	1	6	1	1	1	6	1	28	24	5	5	0		
10	1	1	3	5	5	3	6	6	2	1	4	4	1	1	3	3	7	3	3	3	5	3	17	15	5	5	0		
90	3	3	3	5	5	3	6	6	2	1	4	4	1	1	3	3	7	3	3	3	5	3	17	15	5	5	0		
					Eficiência Eficácia				Eficiência Eficácia				Eficiência Eficácia				Eficiência Eficácia				WIP FGI				Eficiência Eficácia				ES = WIP + FGI
1					100%	86%			80%	86%			100%	72%			100%	85%	23	14	100%	133%			252	250	2		37
2					100%	57%			75%	86%			100%	55%			100%	85%	23	13	100%	67%							36
3					100%	171%			40%	57%			75%	55%			83%	111%	17	19	100%	133%							36
4					0%	0%			100%	143%			67%	86%			75%	67%	14	22	100%	111%							36
5					100%	57%			30%	29%			100%	55%			100%	44%	11	25	80%	89%							36
6					50%	39%			50%	57%			41%	52%			60%	67%	12	24	33%	44%							36
7					100%	29%			30%	29%			33%	36%			100%	57%	12	24	100%	67%							36
8					100%	23%			50%	29%			17%	18%			29%	44%	10	26	100%	67%							36
9					100%	143%			50%	29%			20%	18%			50%	22%	8	28	33%	44%							36
10					0%	0%			100%	86%			11%	18%			17%	22%	12	24	17%	22%							36
90					86%	86%			100%	86%			100%	50%			43%	67%	21	15	60%	67%							36
					-	-			-	-			-	-			-	-	1752	1489	-	-			3241				
					83%	79%			86%	78%			58%	50%			70%	62%	19,47	16,54	65%	65%			36,01				

Fonte: Autora (2021).

Figura 10 - Linha de produção com o sistema S-DBR/MTA

Sistema S-DBR/MTA

← **Volta**

Carga Planejada 17 **TI 30**

Dia	Backlog		Matéria Prima		Estação 1		WIP 1-2		Estação 2		WIP 2-3		Estação 3		WIP 3-4		Estação 4		WIP 4-5		Estação 5		FGI		Demanda de Mercado				
	Início dia	Fim dia	Início dia	Fim dia	Real	Utilz.	Início dia	Fim dia	Real	Utilz.	Início dia	Fim dia	Real	Utilz.	Início dia	Fim dia	Real	Utilz.	Início dia	Fim dia	Real	Utilz.	Início dia	Fim dia	Demanda	Atendida	Perdida		
0	0	0	8	5	3	3	3	3	4	3	4	3	6	5	4	4	6	5	8	5	6	6	10	14	2	2	0		
1	0	0	5	3	2	2	3	2	3	3	3	2	6	3	6	5	4	4	6	7	3	3	14	13	4	4	0		
2	0	0	3	0	4	3	2	3	5	2	3	2	4	3	5	3	6	5	7	6	6	6	13	19	0	0	0		
3	0	0	0	0	2	0	3	0	5	3	2	3	3	2	3	2	4	3	6	4	5	5	19	22	2	2	0		
4	0	0	0	0	2	0	0	0	5	0	0	0	3	3	2	3	2	2	4	2	5	4	22	25	1	1	0		
5	0	0	0	3	2	0	0	0	4	0	0	0	7	0	3	0	5	3	2	3	6	2	25	24	3	3	0		
6	0	0	3	5	1	1	0	1	5	0	0	0	0	0	0	0	1	0	3	0	3	3	24	24	3	3	0		
7	0	0	5	5	1	1	1	1	2	1	0	1	0	0	0	0	7	0	0	0	3	0	24	23	1	1	0		
8	0	0	5	0	5	5	1	5	2	1	1	1	5	1	0	1	2	0	0	0	6	0	23	23	0	0	0		
9	0	0	0	5	1	0	5	2	3	1	1	3	8	1	1	1	6	1	0	1	6	0	23	18	5	5	0		
10	0	0	3	5	5	3	6	6	2	1	4	4	1	1	3	3	7	3	3	3	5	3	11	9	5	5	0		
90	0	0	3	5	5	3	6	6	2	1	4	4	1	1	3	3	7	3	3	3	5	3	11	9	5	5	0		
					Eficiência Eficácia				Eficiência Eficácia				Eficiência Eficácia				Eficiência Eficácia				WIP FGI		Eficiência Eficácia		ES = WIP + FGI		252 344 8		
1					100%	88%			80%	86%			100%	72%			100%	85%	23	14	100%	133%			37				
2					100%	57%			75%	86%			10%	55%			100%	85%	20	13	100%	67%			33				
3					50%	88%			80%	57%			75%	55%			83%	111%	14	19	100%	133%			33				
4					0%	0%			80%	88%			67%	88%			75%	67%	8	22	100%	111%			31				
5					0%	0%			0%	4%			100%	55%			100%	44%	5	25	80%	89%			30				
6					0%	0%			0%	0%			60%	67%			60%	67%	6	24	33%	44%			30				
7					100%	29%			0%	0%			0%	0%			0%	0%	6	24	100%	67%			30				
8					100%	29%			50%	29%			0%	0%			0%	0%	7	23	0%	0%			30				
9					100%	143%			50%	29%			20%	18%			0%	0%	7	23	0%	0%			30				
10					0%	0%			100%	86%			13%	18%			17%	22%	12	18	0%	0%			30				
90					80%	86%			100%	86%			100%	59%			43%	67%	21	9	60%	67%			30				
Total					-	-			-	-			-	-			-	-	1595	1119	-	-			2714				
Média					79%	76%			80%	75%			54%	47%			66%	59%	17,72	12,43	62%	60%			30,16				

Fonte: Autora (2021).

Após a conclusão da simulação, a plataforma exibe um *dashboard* com gráficos comparativos entre os desempenhos dos sistemas de PCP para cada indicador apresentado anteriormente. A Figura 11 mostra um exemplo do *dashboard* gerado com a síntese dos resultados da simulação.

Uma dificuldade encontrada durante a análise dos primeiros resultados gerados pela plataforma foi a independência das amostras de cada sistema de PCP. Inicialmente, os números aleatórios gerados para a demanda de mercado e as capacidades reais de cada linha de produção foram distintos, inviabilizando as comparações entre os desempenhos de cada sistema. Por exemplo, a Figura 12 indica que os quatro sistemas de PCP receberam demandas diferentes que se comportaram de forma independente durante a simulação (demanda MRP < demanda *Kanban* < demanda CONWIP < demanda S-DBR/MTA). Neste caso, é arriscado afirmar que um sistema de PCP teve desempenho superior ou inferior aos outros, visto que os números aleatórios gerados tanto para a demanda quanto para as capacidades reais das estações não foram comuns.

Essa dificuldade foi superada com o uso de uma planilha base comum que gera os mesmos números aleatórios para os quatro sistemas de PCP, tornando as amostras dependentes. O gráfico “Comparação de Demanda Atendida vs Perdida” da Figura 11 mostra que as quatro linhas de produção receberam a mesma quantidade de demanda e enfrentaram o mesmo nível de variabilidade.

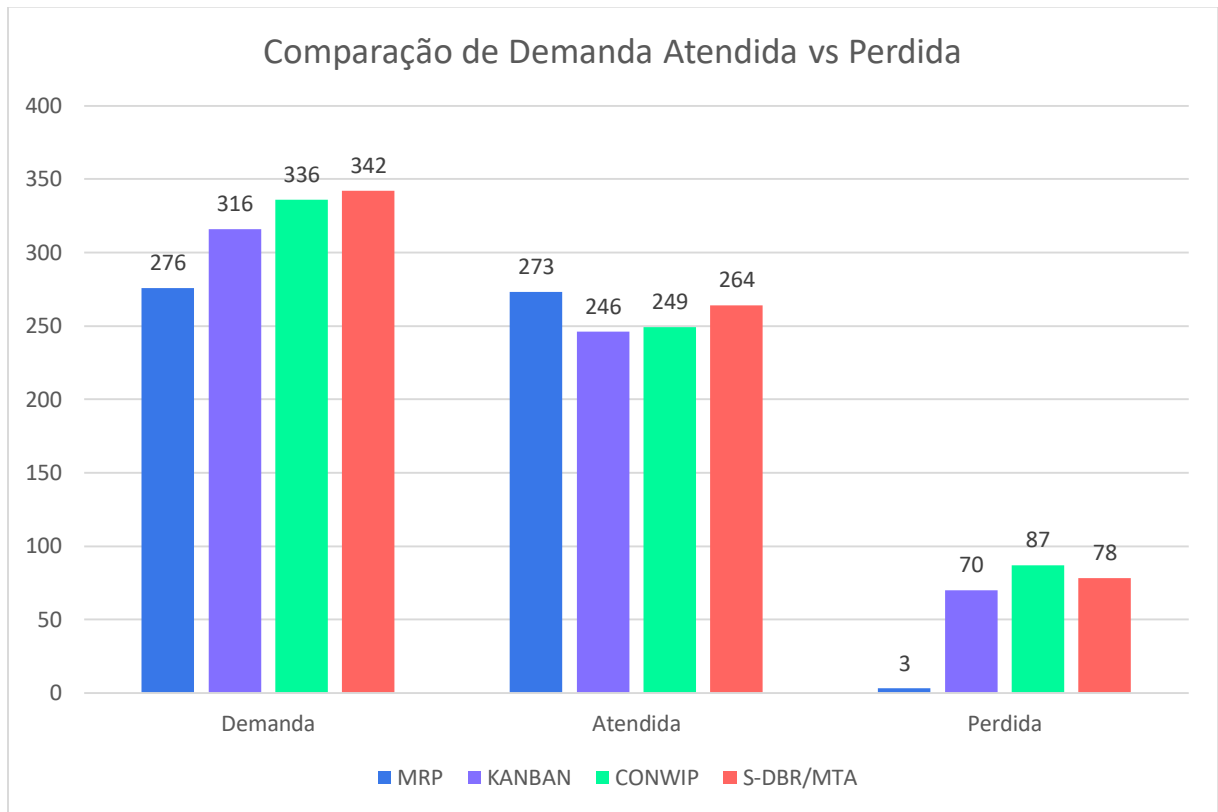
Figura 11 - Dashboard com os resultados da simulação

Dashboard



Fonte: Autora (2021).

Figura 12 - Resultados impróprios para serem comparados devido à independência entre as amostras



Fonte: Autora (2021).

5 DISCUSSÃO

No intuito de atender aos objetivos da presente pesquisa, um cenário padrão para o ambiente da plataforma foi proposto de modo que viabilizasse a comparação entre os quatro sistemas de Planejamento e Controle da Produção (PCP) e a identificação de aspectos únicos do sistema *Simplified Drum Buffer Rope / Make to Availability* (S-DBR/MTA).

Foi criado o botão “Cenário Padrão” na tela inicial de *setup* que, ao ser pressionado, parametriza o ambiente com o cenário padrão. Depois, deve-se pressionar o botão “Simular” para que uma rodada de simulação seja executada e os resultados sejam exibidos no *dashboard*. A Figura 13 mostra a tela de *setup* com os parâmetros do cenário padrão. Nota-se que as estações 1, 2, 4 e 5 possuem os mesmos parâmetros de capacidade, a estação 3 é o Recurso com Restrição de Capacidade (RRC) (mas não é um gargalo) e o mercado é a restrição do sistema.

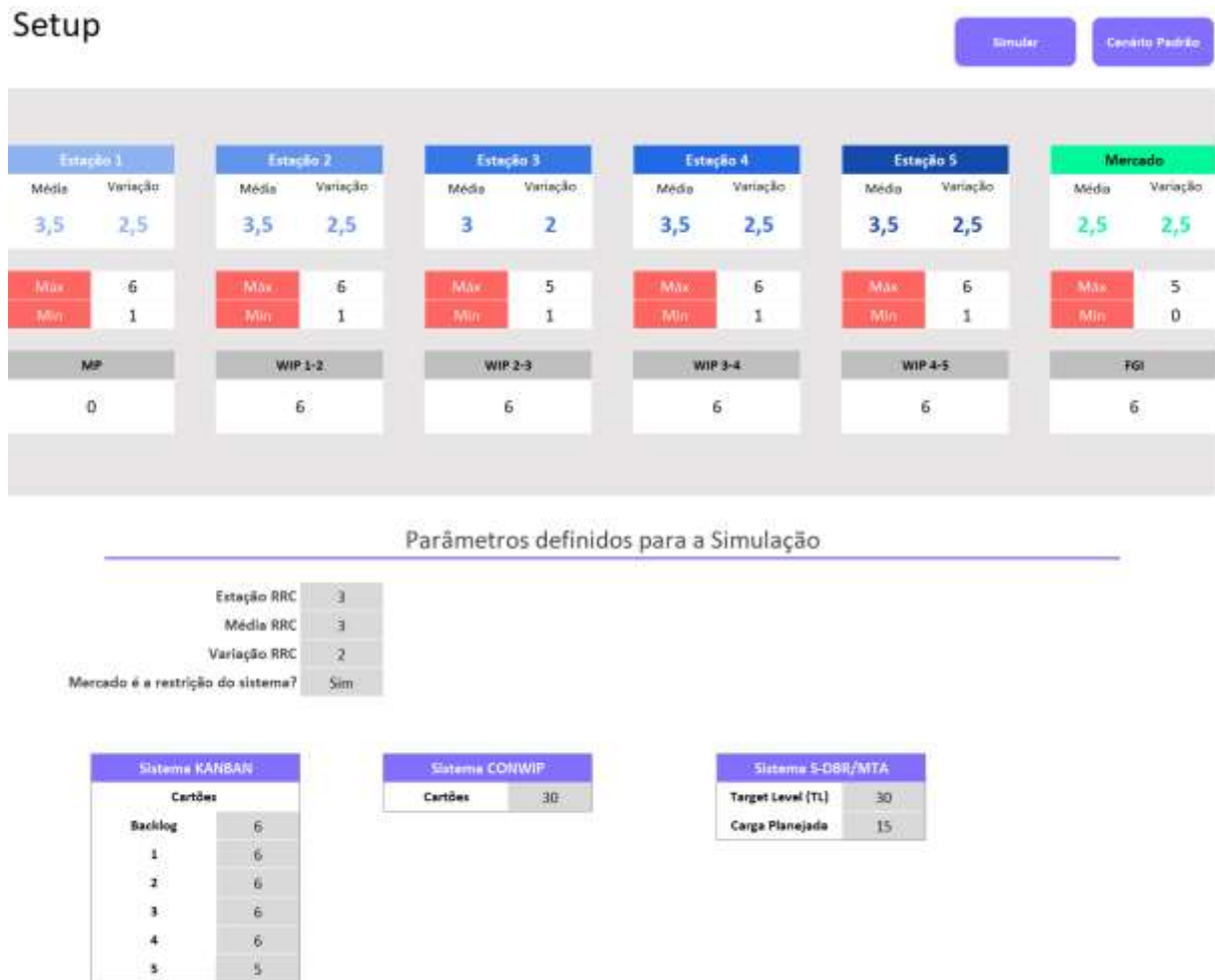
Os resultados do cenário padrão são apresentados na Figura 14. Nota-se que, para essa configuração, o *Material Requirements Planning* (MRP) foi capaz de atender a demanda com um nível de serviço (*Fill Rate*) levemente superior (94%) em relação aos demais sistemas. Em contrapartida, o MRP manteve os maiores níveis médios de estoque em processo (*work in process – WIP*) e estoque de produtos acabados (*finished goods inventory – FGI*) [o estoque no sistema (ES) é a soma entre o WIP e o FGI]. Sendo assim, por tratar-se de um sistema empurrado com a intenção de manter altos níveis de eficiência e eficácia da linha, o MRP consegue produzir mais e atender a demanda relativamente melhor, mas paga com níveis elevados de estoque e, conseqüentemente, mantém grandes filas entre as estações e longos tempos de ciclo.

O *Kanban* preza pelo fluxo contínuo de produção a partir da autorização de trabalho entre cada par de estações, apresentando as menores variações dos níveis de eficiência e eficácia. No entanto, o *Kanban* é um sistema que é facilmente afetado pela variabilidade. Assim, como o cenário padrão apresenta valores altos de variação máxima em torno da média, o *Kanban* resultou no pior desempenho em nível de serviço e manteve o menor nível de FGI.

O *Constant Work in Process* (CONWIP) é um sistema de produção puxado que lida melhor com as variabilidades do que o *Kanban*, pois o bloqueio é feito apenas no

início da linha e não entre as estações. Portanto, a linha apenas recebe autorização para fabricar um novo produto quando o mercado consome uma unidade do FGI. O CONWIP proporcionou um nível de serviço próximo ao do sistema MRP com menos da metade da quantidade de ES. Vale destacar que o valor do ES igual a 30 para o CONWIP já era esperado, já que esse foi o limite máximo de WIP calculado pela plataforma.

Figura 13 - tela inicial de setup parametrizada com o cenário padrão



Fonte: Autora (2021).

O S-DBR/MTA teve um desempenho semelhante ao do CONWIP no cenário padrão, mantendo o mesmo nível de serviço e resultados parecidos para as medidas de eficiências e eficácias das estações. Logo, o S-DBR/MTA é um sistema que tem capacidade para suportar um ambiente de alta variabilidade, garantindo um nível de

serviço próximo ao do MRP com a menor quantidade de ES (ligeiramente menor que o do CONWIP).

Figura 14 - Dashboard com os resultados do cenário padrão

Dashboard



Fonte: Autora (2021).

A diferença na quantidade de estoque médio no sistema entre o S-DBR/MTA e o CONWIP repercutiu na medida de Rotatividade de Estoque (*Inventory Turnover*), que é obtida por meio da razão entre a demanda atendida e o ES. Portanto, essa

medida de desempenho pode ser utilizada como critério de desempate, inferindo-se que o S-DBR/MTA supera a performance do CONWIP diante dessa simulação feita no cenário padrão.

O motivo pelo qual o S-DBR/MTA conseguiu manter menos WIP do que o CONWIP pode ser atribuído ao uso da carga planejada, que é um aspecto único do S-DBR/MTA. Assim, as matérias-primas são liberadas pelo *backlog* em função da carga sobre o RRC, mantendo níveis mais baixos de WIP e, por consequência, filas menores e tempos de ciclo mais curtos.

Um ponto que requer atenção no uso do sistema S-DBR/MTA é a posição do RRC na linha. Como a carga planejada envolve todos os materiais que ainda não foram processados pelo RRC, se o RRC estiver no final da linha, por exemplo, na estação 5, a quantidade de WIP do sistema será igual à carga máxima planejada para a linha, gerando mais bloqueios na liberação de materiais e diminuindo a eficiência e a eficácia de todas as estações, inclusive do RRC. Em um ambiente como esse, o CONWIP deve apresentar um desempenho superior ao do S-DBR/MTA em nível de serviço oferecido ao mercado.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa teve o objetivo de desenvolver uma plataforma didática no *software* Microsoft Excel que mostre as similaridades e diferenças entre os fundamentos de quatro sistemas de Planejamento e Controle da Produção (PCP) aplicados em um ambiente de produção para estoque para que estudantes e profissionais da área de gestão de operações possam compreendê-los. Os sistemas de PCP compreendidos pela pesquisa foram: *Material Requirements Planning* (MRP), *Kanban (Just in Time)*, *Constant Work in Process* (CONWIP) e *Simplified Drum Buffer Rope / Make to Availability* (S-DBR/MTA).

A plataforma desenvolvida conta com uma interface amigável, na qual o usuário pode parametrizar o ambiente com níveis iniciais de estoque [matéria-prima (MP), estoque em processo (work in process – WIP) (WIP 1-2, WIP 2-3, WIP 3-4 e WIP 4-5) e estoque de produtos acabados (finished goods inventory – FGI)], limites mínimos e máximos de capacidade produtiva para cada uma das cinco estações da linha de produção e os limites mínimo e máximo para a demanda de mercado. Após a parametrização do ambiente, a plataforma exibe para o usuário a forma como alguns parâmetros específicos de cada sistema de PCP são calculados, simula os comportamentos dos quatro sistemas em um mesmo cenário com números aleatórios comuns e mostra os resultados sintetizados em um *dashboard*.

A partir desta plataforma, estudantes e profissionais da área de gestão de operações podem testar diversas questões “e se” sobre os sistemas de PCP explorados, promovendo a geração de *insights* sobre a operacionalização de cada sistema na prática e desenvolvendo o conhecimento a partir de uma ferramenta dinâmica que pode complementar uma aula que seria exclusivamente teórica.

Em razão da simplicidade da proposta desta pesquisa, algumas limitações do modelo devem ser evidenciadas, por exemplo, a consideração de uma linha de produção simples com cinco estações com uma máquina por estação, lotes unitários de processamento e de transferência com a fabricação de apenas um tipo de produto sem a necessidade de *setups*.

Sob o ponto de vista dos resultados do cenário padrão analisados no Capítulo 5, as discussões foram feitas apenas sobre uma replicação aleatória de 90 dias para cada sistema de PCP. Assim, pesquisas futuras poderiam melhorar essas análises,

considerando métodos de estatística experimental com mais replicações, diferentes cenários e diferentes níveis para o fator de segurança dos parâmetros do CONWIP, *Kanban* e S-DBR/MTA.

REFERÊNCIAS

- BANKS, J.; CARSON II, J. S.; NELSON, B. L.; NICOL, D. M. **Discrete-event system simulation**. Prentice Hall, 2004.
- BERTO, R. M. V.; NAKANO, D. N. A produção científica nos anais do Encontro Nacional de Engenharia de Produção: um levantamento de métodos e tipos de pesquisa. **Production**, v. 9, n. 2, p. 65-75, 1999.
- BLOK, V. What Is Innovation?: Laying the Ground for a Philosophy of Innovation. **Techne: Research in Philosophy and Technology**, v. 25, n. 1, p. 72-96, 2021.
- 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.
- CHIAVENATO, I. **Planejamento e controle da produção**. 2 ed. Manole, 2008.
- CORRÊA, H. L.; GIANESI, I. G. N.; CAON, M. **Planejamento, Programação e Controle da Produção: MRP II / ERP**. 6 ed. São Paulo: Atlas, 2019.
- 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.
- 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.
- 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 MESQUITA, M. A.; DE CASTRO, R. L. Análise das práticas de planejamento e controle da produção em fornecedores da cadeia automotiva brasileira. **Gestão & Produção**, v. 15, p. 33-42, 2008.
- FERNANDES, F. C. F.; GODINHO FILHO, M. Sistemas de coordenação de ordens: revisão, classificação, funcionamento e aplicabilidade. **Gestão & Produção**, v. 14, p. 337-352, 2007.
- GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. (Orgs.) **Métodos de Pesquisa**. 1 ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.
- GIACON, E.; DE MESQUITA, M. A. Levantamento das práticas de programação detalhada da produção: um survey na indústria paulista. **Gestão & Produção**, v. 18, p. 487-498, 2011.
- GOLDRATT, E. M.; COX, J. **The Goal: Excellence in Manufacturing**. Croton-on-Hudson: North River Press, 1984.

GOLDRATT, E. M.; FOX, R. E. **The Race**. Croton-on-Hudson: North River Press, 1986.

GOLDRATT, E. M.; GOLDRATT, R. TOC insights into distribution and supply chain. **Goldratt's Marketing Group**, 2003.

HOPP, W. J.; SPEARMAN, M. L. To pull or not to pull: what is the question?. **Manufacturing & Service Operations Management**, v. 6, n. 2, p. 133-148, 2004.

HOPP, W. J.; SPEARMAN, M. L. **A Ciência da Fábrica**. 3 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

IKEZIRI, L. M.; MELO, J. C.; CAMPOS, R. T.; OKIMURA, L. I.; GOBBO JUNIOR, J. A. A perspectiva da indústria 4.0 sobre a filosofia de gestão Lean Manufacturing. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 1, p. 1274-1289, 2020.

IKEZIRI, L. M.; SOUZA, F. B.; GUPTA, M. C.; FIORINI, P. C. Theory of Constraints: Review and Bibliometric Analysis. **International Journal of Production Research**, v. 57, n. 15-16, p. 5068-5102, 2019.

JODLBAUER, H.; HUBER, A. Service-level performance of MRP, kanban, CONWIP and DBR due to parameter stability and environmental robustness. **International Journal of Production Research**, v. 46, n. 8, p. 2179-2195, 2008.

LUSTOSA, L. J.; DE MESQUITA, M. A.; OLIVEIRA, R. J. **Planejamento e controle da produção**. Elsevier Brasil, 2008.

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.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Metodologia científica**. 6 ed. São Paulo: Atlas, 2011.

MARIZ, F. B. A. R. **Análise comparativa dos modelos Drum-Buffer-Rope e Constant Work-In-Process em um ambiente com montagem e produção contra pedido**. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 139, 2018.

MODI, K.; LOWALEKAR, H.; 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.

MOLINA, C. C.; RESENDE, J. B. Atividades do planejamento e controle da produção (PCP). **Revista Científica Eletrônica de Administração**, n. 11, 2006.

MUKHOPADHYAY, S. K.; SHANKER, S. Kanban implementation at a tyre manufacturing plant: a case study. **Production Planning & Control**, v. 16, n. 5, p. 488-499, 2005.

NAKANDAKARI, G. C. B. R.; IKEZIRI, L. M. Análise do uso de práticas do Lean Manufacturing: aplicação de questionário em uma fábrica de vidros temperados. *In: XXVII SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 27.*, 2020, Bauru. **Anais...** Bauru: SIMPEP, 2020. p. 1-14.

NARITA, V. T.; IKEZIRI, L. M.; 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.

OHNO, T. **O sistema Toyota de produção além da produção**. Bookman, 1997.

RAHMAN, N. A. A.; SHARIF, S. M.; ESA, M. M. Lean manufacturing case study with Kanban system implementation. **Procedia Economics and Finance**, v. 7, p. 174-180, 2013.

SCHRAGENHEIM, E. Gerenciamento da produção para estoque e o conceito de 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, 2013. cap. 10, p. 246-273.

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. W. **Supply Chain Management at Warp Speed**: Integrating the System From End to End. Boca Raton: Taylor & Francis, 2009.

SERENO, B.; DA SILVA, D. S. A.; LEONARDO, D. G.; SAMPAIO. Método híbrido CONWIP/KANBAN: um estudo de caso. **Gestão e Produção**, v. 18, n. 3, p. 651-672, 2011.

SOUZA, F. B.; BAPTISTA, H. R. Proposta de avanço para o método Tambor-Pulmão-Corda 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. Theory of constraints contributions to outbound logistics. **Management Research Review**, v. 33, n. 7, p. 683-700, 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.

SPEARMAN, M. L.; WOODRUFF, D. L.; HOPP, W. J. CONWIP: a pull alternative to kanban. **International Journal of Production Research**, v. 28, n. 5, p. 879-894, 1990.

SPEARMAN, M. L.; WOODRUFF, D. L.; HOPP, W. J. CONWIP Redux: reflections on 30 years of development and implementation. **International Journal of Production Research**, p. 1-7, 2021.

TUBINO, D. F. **Planejamento e controle da produção**: teoria e prática. 3 ed. São Paulo: Atlas, 2017.

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.

ANEXO A – Carta de Dispensa de Apresentação ao CEP ou CEUA**CARTA DE DISPENSA DE APRESENTAÇÃO AO CEP OU CEUA**

À

COORDENADORIA DO PROGRAMA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA USC

Informo que não é necessária a submissão do projeto de pesquisa intitulado "SISTEMAS DE PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO APLICADOS NO EXCEL COM ÊNFASE NO SISTEMA S-DBR" ao Comitê de Ética em Pesquisa com Seres Humanos (CEP) ou à Comissão de Ética no Uso de Animais (CEUA) devido ao seu escopo não abordar pesquisa com seres humanos e não fazer uso de animais.

Atenciosamente,

A handwritten signature in blue ink, which appears to read 'Lucas Martins Ikeziri', is written over a horizontal line.

Lucas Martins Ikeziri

Bauru, 28 de março de 2019