

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU – FEB  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO - DEP

TIAGO DA CUNHA JORGE

**AVALIANDO A HEURÍSTICA DE SEQUENCIAMENTO DA  
PRODUÇÃO DOS MÉTODOS TAMBOR-PULMÃO-CORDA  
SIMPLIFICADO E GERENCIAMENTO DO PULMÃO EM UM  
AMBIENTE DE PRODUÇÃO PARA ESTOQUE**

Bauru  
2017

TIAGO DA CUNHA JORGE

**AVALIANDO A HEURÍSTICA DE SEQUENCIAMENTO DA  
PRODUÇÃO DOS MÉTODOS TAMBOR-PULMÃO-CORDA  
SIMPLIFICADO E GERENCIAMENTO DO PULMÃO EM UM  
AMBIENTE DE PRODUÇÃO PARA ESTOQUE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” – UNESP, Campus de Bauru (SP) como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

**Orientador:** Professor Dr. Fernando Bernardi De Souza

Bauru  
2017

Jorge, Tiago da Cunha.

Avaliando a heurística de sequenciamento da produção dos métodos Tambor-Pulmão-Corda Simplificado e gerenciamento do pulmão em um ambiente de produção para estoque / Tiago da Cunha Jorge, 2017

66 f.

Orientador: Fernando Bernardi de Souza

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2017

1. Planejamento e controle da produção. 2. Tambor-Pulmão-Corda Simplificado. 3. Make-To-Availability.  
I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado de TIAGO DA CUNHA JORGE, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.**

Aos 30 dias do mês de novembro do ano de 2017, às 09:30 horas, no(a) Anfiteatro da Seção Técnica de Pós-graduação da FEB, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. FERNANDO BERNARDI DE SOUZA - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia de Produção / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. ROBERTO FERNANDES TAVARES NETO do(a) Departamento de Engenharia de Produção / Universidade Federal de São Carlos, Profa. Dra. ANDREIA DA SILVA MEYER do(a) Departamento de Ciências Exatas / FCAV / UNESP - Jaboticabal, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE Mestrado de TIAGO DA CUNHA JORGE, intitulada **AVALIANDO A HEURÍSTICA DE SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO DOS MÉTODOS TAMBOR-PULMÃO-CORDA SIMPLIFICADO E GERENCIAMENTO DO PULMÃO EM UM AMBIENTE DE PRODUÇÃO PARA ESTOQUE**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

  
Prof. Dr. FERNANDO BERNARDI DE SOUZA

  
Prof. Dr. ROBERTO FERNANDES TAVARES NETO

  
Profa. Dra. ANDREIA DA SILVA MEYER

Aos meus Pais Ademir e Ligia e a minha esposa  
Karine pela paciência e apoio dedicados durante  
este período de estudos. Dedico.

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, amigo e conselheiro Prof. Dr. Fernando Bernardi de Souza, pela oportunidade, incentivo e por ter acreditado e me apoiado na concretização deste trabalho.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, funcionários da pós-graduação e do departamento de Engenharia de Produção, que sempre me auxiliaram em minha caminhada com muita alegria e disposição em ajudar.

Ao amigo Robson Flávio Castro pelas discussões científicas, amizade e contribuição.

Aos amigos do Programa que conheci em disciplinas, eventos e afins, obrigado pelos ensinamentos e momentos prazerosos que passamos juntos.

À CAPES pelo apoio financeiro.

Enfim, a todos os amigos e familiares que, direta ou indiretamente, contribuíram para minha formação não só como cientista, mas principalmente como cidadão consciente, meus sinceros agradecimentos.

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar, por meio de simulação computacional, a regra de sequenciamento de ordens de produção recomendada pelo método Tambor-Pulmão-Corda Simplificado/Gerenciamento do Pulmão (*Simplified Drum-Buffer-Rope / Buffer Management* - S-DBR/BM) aplicado em ambientes de produção para estoque. Esta aplicação recebe o nome de *Make to Availability* (MTA), pois visa a um compromisso de atendimento da demanda baseado na pronta-entrega de produtos acabados. Para tanto, tal regra será comparada com as regras de sequenciamento da produção SPT (*Shortest Processing Time*), FIFO (*First in First Out*) e *random*. Para cumprir tal objetivo, será simulada uma fábrica real de manufatura contendo diferentes níveis de demanda e diferentes níveis de coeficiente de variação (CV) da demanda. A variável dependente utilizada para comparação dos desempenhos é o *fill rate*, que mensura o atendimento da demanda a partir do estoque de produtos acabados. Os resultados indicam que a regra S-DBR/MTA supera os demais métodos em todos os cenários simulados e também que cenários com menor CV da demanda apresentaram melhor *fill rate* médio que aqueles com maior CV.

**Palavras-chave:** TOC, Tambor-Pulmão-Corda Simplificado, Gerenciamento do Pulmão, sequenciamento da produção

## ABSTRACT

This dissertation evaluated by computer simulation the production order sequencing rule recommended by the Simplified Drum-Buffer-Rope (S-DBR) applied in make-to-stock environments, called Make to Availability (MTA). MTA method aims at a commitment to meet demand based on the finished products prompt delivery. For this purpose, we compared it with SPT (Shortest Processing Time) sequencing heuristic, FIFO (First In First Out) and random sequencing rules, through demand patterns variations of a real factory. *Fill rate* was the dependent variable used to compare performances, which is the percentage of demand that is fulfilled directly out of the finished product stock. We show that S-DBR / MTA sequencing rule overcame all other sequencing rules and SPT had the worst *fill rate*.

**Keywords:** Theory of Constraints; S-DBR; Make to Availability; MTA; SPT



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gráfico de Gantt sequenciamento 1.....	22
Figura 2 - Gráfico de Gantt sequenciamento 2.....	22
Figura 3 - Relação entre os diferentes ambientes e quantidades de máquinas.....	26
Figura 4 - Conceito dos níveis do Estoque Alvo.....	32
Figura 5 - Fluxograma produção de quadros de madeira da empresa simulada.....	39
Figura 6 - Layout da linha de produção simulada.....	47
Figura 7 - Comparativo demanda total com a curva normal para a média de 10 replicações..	50
Figura 8 - Comparativo demanda total com a curva normal para a média de 50 replicações..	51
Figura 9 - Demanda média em cada um dos cenários.....	52

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais notações de sequenciamento da produção.....	24
Quadro 2 - Abreviações de restrições que podem ocorrer em ambientes de sequenciamento da produção. ....	26
Quadro 3 - Regras de sequenciamento que serão utilizadas para avaliar a performance do S-DBR/MTA.....	28
Quadro 4 - Parâmetros e funções utilizadas para a geração de variabilidade.....	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Cenários estudados.....	17
Tabela 2 - Demanda média diária para os quadros de madeira nos três níveis de demanda utilizados na simulação.....	41
Tabela 3 - Tempos de processamento unitário por estação de trabalho por produto em horas. ....	42
Tabela 4 - Carga média diária de trabalho dos quadros para os três níveis de demanda. ....	43
Tabela 5 - Carga de trabalho nas estações para cada um dos três níveis de demanda (8 horas disponíveis).....	44
Tabela 6 - Estoque Alvo inicial para cada produto e nível de demanda. ....	45
Tabela 7 - Comparativos dos resultados da simulação com os resultados obtidos pela teoria das filas.....	49
Tabela 8 - Diferença absoluta e percentual dos resultados obtidos com a simulação e a teoria das filas.....	49
Tabela 9 - Comparativo dos resultados obtidos na simulação com os resultados obtidos pela Lei de Little. ....	49
Tabela 10 - Estoque alvo fixo para os cenários de demanda baixa. ....	53
Tabela 11 - Estoque alvo fixo para os cenários de demanda média. ....	53
Tabela 12 - Estoque alvo fixo para os cenários de demanda alta. ....	54
Tabela 13 - Valores médios de <i>fill rate</i> . ....	56
Tabela 14 - ANOVA dos cenários de demanda baixa e média. ....	57
Tabela 15 - Teste de Tukey dos cenários de demanda baixa e média.....	57
Tabela 16 - ANOVA dos cenários de demanda alta.....	58
Tabela 17 - ANOVA dos desdobramentos para a demanda alta. ....	58
Tabela 18 - Teste de Tukey dos desdobramentos para a demanda alta. ....	59

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

BS	<i>Buffer Status</i>
DBR	<i>Drum-Buffer-Rope</i>
DWIP	<i>Downstream Work-In-Process</i>
EA	Estoque Alvo
FGI	<i>Finished Goods Inventory</i>
FIFO	<i>First In First Out</i>
FS	Fator de Segurança
GDP	Gerenciamento Dinâmico do Pulmão
MRP	<i>Material Requirement Planning</i>
MTA	<i>Make To Availability</i>
MTO	<i>Make To Order</i>
MTS	<i>Make To Stock</i>
OP	Ordem de Produção
RRC	Recurso com Restrição de Capacidade
S-DBR	<i>Simplified Drum-Buffer-Rope</i>
SCO	Sistemas de Coordenação de Ordens
SP	Status do Pulmão
SPT	<i>Shortest Processing Time</i>
TOC	<i>Theory Of Constraints</i>
TR	Tempo de Reposição
WIP	<i>Work In Process</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1	Justificativa e originalidade .....	15
1.2	Questão de pesquisa e objetivo .....	16
1.3	Método de pesquisa.....	17
1.4	Estrutura do trabalho.....	17
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO CONCEITUAL .....</b>	<b>19</b>
2.1	Planejamento e controle da produção e sistemas de coordenação de ordens.....	19
2.2	Produção para o estoque (MTS).....	20
2.3	Sequenciamento da produção .....	21
2.3.1	ESTRUTURA E NOTAÇÃO.....	23
2.4	Teoria das restrições .....	28
2.5	Tambor-Pulmão-Corda simplificado na produção para estoque.....	30
2.5.1	SEQUENCIANDO E PRIORIZANDO AS ORDENS DE PRODUÇÃO NO SISTEMA S-DBR/MTA .....	31
2.5.1.1	Priorizando as ordens de produção no S-DBR/MTA .....	32
2.5.1.2	Gerando Ordens de produção no S-DBR/MTA.....	34
<b>3</b>	<b>MÉTODO DE PESQUISA .....</b>	<b>37</b>
3.1	Formulação do problema e planejamento do estudo.....	38
3.2	Definição do modelo lógico conceitual .....	38
3.3	Validação do modelo lógico conceitual .....	40
3.4	Coleta dos dados e programação do sistema no software computacional .....	40
3.5	Execução de rodadas piloto para determinar os parâmetros e executar a verificação e validação do modelo .....	44
3.6	Definição dos cenários a serem simulados.....	51
3.7	Análise dos resultados .....	54
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>56</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>61</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>63</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com a alta competitividade e concorrência atual, as empresas são pressionadas cada vez mais a obterem e sustentarem vantagens competitivas no atendimento às necessidades dos clientes. Com isto, definir o que, quando e como produzir toma grande importância no processo de decisão das organizações já que somente produzindo o produto certo, no momento certo e com os recursos corretos é possível atender aos clientes com qualidade, produtividade, confiabilidade, flexibilidade e rapidez (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2002).

Neste cenário, o planejamento e controle da produção (PCP) adquire importância cada vez maior. As atividades básicas exercidas pelo PCP podem ser divididas em 3 níveis, o primeiro nível é composto pelas atividades de planejamento, ou seja, avaliação da carteira de pedidos, previsão de vendas, planejamento agregado da produção, programa mestre da produção e planejamento das necessidades de materiais. No segundo nível são exercidas as atividades de programação da produção contendo atividades da programação, planejamento e controle da capacidade produtiva. O último nível contém as atividades de controle da produção e dos estoques (PIRES, 1995). Em 2007 foi proposta a nomenclatura de sistemas de coordenação de ordens de produção e compra (SCO) para um sistema que realize o terceiro nível das atividades do PCP, ou seja, organizar e explodir as necessidades de componentes e materiais, controlar a emissão e liberação das ordens de produção e compra, programar e sequenciar as tarefas das máquinas (sequenciamento da produção) (FERNANDES; GODINHO FILHO, 2007).

As atividades de sequenciamento da produção possuem grande quantidade de soluções possíveis. Por exemplo, em um problema com uma máquina e 20 tarefas (*jobs*) para serem sequenciadas existem  $20! = 2,4 * 10^{18}$  possibilidades de sequenciamento destas tarefas (SIPPER; BULFIN, 1997). Devido a esta complexidade, para se obter um resultado ótimo são desenvolvidos algoritmos heurísticos para então exigir menor poder computacional na resolução destes problemas (PINEDO, 2008). Problemas de sequenciamento da produção geralmente visam maximizar ou minimizar um ou mais objetivos da produção (TAVARES NETO; GODINHO FILHO; DA SILVA, 2015).

Existem várias abordagens disponíveis para lidar com os ambientes *Make-To-Stock* (MTS). Uma dessas abordagens, baseada na Teoria de Restrições (*Theory Of Constraints* - TOC), é chamada de *Make To Availability* (MTA). Esta abordagem é

relativamente nova e, sem dúvida por esse motivo, tem recebido pouca atenção acadêmica, pelo menos em termos de quantidade de trabalhos publicados em revistas importantes.

O MTA é derivado dos princípios que constituem o método *Simplified Drum-Buffer-Rope* (S-DBR) (LEE et al., 2010; SCHRAGENHEIM; DETTEMER, 2001). De acordo com o S-DBR, a empresa deve assegurar estrategicamente que cada estação de trabalho - incluindo a mais carregada - tenha excesso de capacidade e que a única restrição do sistema seja a demanda do mercado. Desta forma, os três pulmões de tempo clássicos do *Drum-Buffer-Rope* (DBR) (recurso, montagem e envio) são substituídos por apenas um. A presença de excesso de capacidade no sistema remove a necessidade de agendamento do recurso com restrição de capacidade (RRC) e o tambor da fábrica torna-se basicamente as necessidades do mercado. A Corda, o mecanismo de controle do controle de aberturas de ordens de produção, é baseada no Tambor, mas ponderada pela carga do RRC. O perfil de carga do RRC também fornece informações básicas para identificação e prevenção através de decisões de gerenciamento de capacidade de um gargalo emergente. Além disso, o S-DBR não presume pulmões de tempo quando aplicado em ambientes MTS.

Neste trabalho será realizada uma simulação computacional do modelo S-DBR/MTA objetivando comparar o desempenho de sua heurística de sequenciamento da produção com as regras de sequenciamento da produção *First In First Out* (FIFO), *Shortest Processing Time* (SPT) e *random* em um ambiente produtivo real, o qual produz quadros de madeira. Este ambiente real foi escolhido para poder transmitir maior credibilidade aos resultados obtidos na comparação.

## 1.1 Justificativa e originalidade

Com as constantes alterações da economia mundial, a gestão empresarial vem sofrendo alterações em sua forma de administração. Uma das áreas que mais está contribuindo para isso é a administração da produção, devido a alguns fatores como o perfil do consumidor, o qual está mais atento a qualidade e valor dos produtos, ao crescente desenvolvimento de novas tecnologias para processo e gestão das manufaturas, alterações na organização do trabalho nos sistemas produtivos visando à redução do tamanho dos lotes, conseqüentemente do *lead-time* e do aumento das parcerias entre os mercados, o que gera reestruturações na economia mundial

(CAIÇARA JUNIOR, 2008). Devido a esta alta competitividade, torna-se altamente importante escolher a estratégia de sequenciamento da produção adequada e para tal as pesquisas realizadas nas bases Scopus e ISI Web of Knowledge, retornaram algumas avaliações do sistema S-DBR nos trabalhos de Chakravorty e Hales (2016), Buestán Benavides e Van Landeghem (2015), Chang e Huang (2014), Souza e Pires (2014), Chang e Huang (2011), Souza e Baptista (2010), Lee et al. (2010), Kim, Cox, e Mabin (2010), porém, em nenhum destes há estudos com simulação computacional visando avaliar o desempenho do S-DBR aplicado em ambiente de produção para estoque (*Make-to-Stock* - MTS), denominado *Make to Availability* (MTA) (SOUZA; PIRES, 2014). Como houve um aumento das produções científicas sobre S-DBR nos últimos anos, porém não foi possível encontrar trabalhos que avaliem a performance de sua heurística de sequenciamento da produção em um ambiente de produção para o estoque através de simulação computacional, tais fatos ressaltam a importância e ineditismo desta pesquisa.

## 1.2 Questão de pesquisa e objetivo

Com a presente lacuna no estudo do método de sequenciamento da produção associado ao S-DBR/MTA, o presente trabalho visa avaliar tal método e compará-lo com outras regras de sequenciamento da produção para poder averiguar seu desempenho, derivando assim a questão de pesquisa:

Qual o desempenho da heurística de sequenciamento da produção do sistema S-DBR/MTA medido em termos do atendimento imediato da demanda?

Para se responder a esta questão de pesquisa, foram simulados seis cenários distintos obtidos através da variação da demanda média e da variabilidade da demanda, conforme consta na Tabela 1 e comparar os resultados obtidos pela heurística de sequenciamento da produção do S-DBR/MTA com as outras três regras de sequenciamento, visando assim atingir o objetivo geral do trabalho:

Avaliar o desempenho da heurística de sequenciamento da produção do sistema S-DBR/MTA quando comparada com outras regras de sequenciamento da produção.



Tabela 1 - Cenários estudados

<b>Demanda</b>	<b>Estoque Alvo (médio)</b>	<b>Variabilidade da demanda</b>
Baixa	72	0,25
		1,40
Média	82,5	0,25
		1,40
Alta	92,25	0,25
		1,40

Fonte: Autor

A partir destes cenários, podem-se obter alguns objetivos específicos:

1. Construir um modelo de simulação que contenha a heurística de sequenciamento da produção associadas ao sistema S-DBR/MTA.
2. Construir um modelo de simulação que contenha a regra de sequenciamento FIFO.
3. Construir um modelo de simulação que contenha a heurística SPT.
4. Construir um modelo de simulação que contenha a regra de sequenciamento *random*.
5. Comparar o desempenho do modelo que utiliza as regras de sequenciamento da produção do S-DBR/MTA com as demais nos seis cenários estudados.

### 1.3 Método de pesquisa

Esta pesquisa utilizou o método de modelagem e simulação, o qual é um dos métodos mais utilizados em pesquisas de engenharia de produção e gestão de operações (CAUCHICK MIGUEL, 2011). Este método foi selecionado, pois para o atendimento dos objetivos do projeto, é necessária uma abordagem quantitativa que possibilite controlar as variáveis em estudo e avaliar o impacto da técnica de sequenciamento da produção do S-DBR/MTA no ambiente produtivo. Tal método será melhor descrito na seção 3 deste trabalho.

### 1.4 Estrutura do trabalho

Esta dissertação foi estruturada em cinco capítulos divididos da seguinte forma:

- Capítulo 1 – Introdução: contém a apresentação do trabalho; justificativa e originalidade; questão de pesquisa e objetivo; método de pesquisa; e estrutura do trabalho.
- Capítulo 2 – Fundamentação conceitual: são apresentados conceitos pertinentes sobre planejamento e controle da produção, sequenciamento da produção, produção para estoque, teoria das restrições e tambor-pulmão-corda simplificado na produção para estoques.
- Capítulo 3 – Método: é apresentada a metodologia do trabalho.
- Capítulo 4 – Resultados e discussões: são apresentados os principais resultados obtidos com a pesquisa.
- Capítulo 5 – Conclusões: comentários sobre os resultados e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO CONCEITUAL

O objetivo deste capítulo é apresentar conceitos pertinentes ao planejamento e controle da produção (PCP), sistemas de coordenação de ordens (SCO), o ambiente de produção para estoque (*Make to stock* – MTS), sequenciamento da produção, teoria das restrições (*Theory of Constraints* – TOC) e Tambor-Pulmão-Corda simplificado no ambiente de produção para estoque (S-DBR/MTA). A subdivisão deste capítulo foi feita de maneira que cada seção aborde um dos temas mencionados acima.

### 2.1 Planejamento e controle da produção e sistemas de coordenação de ordens

O planejamento e controle da produção, em 1979, foi definido como o conjunto de funções inter-relacionadas que objetivam controlar o processo produtivo para uma melhor coordenação entre o processo produtivo e os demais setores da empresa (ZACCARELLI, 1979).

Burbidge (1988) afirma que o objetivo do PCP é planejar e controlar o uso dos recursos de maneira adequada produzindo produtos específicos com métodos para atender as metas da organização e dos planos de vendas.

Para Sipper e Bulfin (1997) o PCP é visto como um sistema que integra o fluxo de material e informação de maneira que suas funções consistem em gerenciar a produção para manter o atendimento das metas da empresa como um todo e não somente de um elemento do sistema.

Uma visão hierárquica e departamental é acrescentada ao conceito de PCP em 2007, na qual o PCP coordena os recursos produtivos para atender da melhor forma possível os planos determinados nos níveis estratégico, tático e operacional da empresa (TUBINO, 2007).

Com isto, as atividades de PCP visam definir o que, quanto e quando produzir e também definir o que comprar e entregar. Devido a estas definições, cabe ao PCP saber com quem e como produzir (FERNANDES; GODINHO FILHO, 2010).

As atividades básicas exercidas pelo PCP podem ser divididas em três níveis, o primeiro nível é composto pelas atividades de planejamento, ou seja, avaliação da carteira de pedidos, previsão de vendas, planejamento agregado da produção, programa mestre da produção e planejamento das necessidades de materiais. No segundo nível são exercidas as atividades de programação da produção contendo atividades da

programação, planejamento e controle da capacidade produtiva. O último nível contém as atividades de controle da produção e dos estoques (PIRES, 1995).

Em 2007, foi proposta a nomenclatura de sistemas de coordenação de ordens de produção e compra (SCO) para um sistema que realize o terceiro nível das atividades do PCP, ou seja, organizar e explodir as necessidades de componentes e materiais, controlar a emissão e liberação das ordens de produção e compra, programar e sequenciar as tarefas das máquinas (sequenciamento da produção) (FERNANDES; GODINHO FILHO, 2007).

## **2.2 Produção para o estoque (MTS)**

Custos de inventário são muito substanciais dentre os custos na maior parte das manufaturas, no entanto somente é possível obter eficiência em termos de estoques e processos se ambos forem pensados e gerenciados de maneira conjunta (GÜNALAY, 2011).

O desenvolvimento das indústrias nos últimos séculos nos possibilitou subdividir em duas formas de atender aos clientes. Historicamente a primeira a surgir foi a produção sob encomenda (*Make to Order – MTO*), que inicialmente detinha a lógica de produzir conforme as promessas no momento da venda ao cliente. Com o surgimento da produção em massa e a necessidade de atender as demandas crescentes, foi consolidada a segunda maneira, a produção para o estoque (*Make to Stock – MTS*), na qual produtos padronizados são produzidos para atender uma demanda futura (SOUZA; PIRES, 2014). A partir da década de 1990, com a gestão por processos de negócios, a maneira de produzir e vender ganharam maior importância e foi denotada uma forma mais simples e objetiva de definir os ambientes produtivos: quando o processo de venda ocorre anteriormente à produção, o ambiente produtivo é considerado um MTO, quando ocorre o contrário, ou seja, o produto é produzido anteriormente ao processo de venda, o ambiente produtivo é um MTS (PIRES, 2009).

Ambientes MTO no geral possuem estoques menores, são mais flexíveis a mudanças da demanda, no entanto são mais difíceis de gerenciar e coordenar as ordens de produção, ocasionando problemas com relação a acuracidade da data de entrega dos pedidos, pois não possuem estoques para proteger-se de problemas na produção (GÜNALAY, 2011). A seleção entre possuir um ambiente produtivo MTS ou MTO não cabe a empresa e sim a tolerância dos clientes com relação ao tempo de entrega, quando

a tolerância do cliente é menor que o *lead-time* de produção, o ambiente produtivo é obrigado a produzir para o estoque, no caso oposto, a empresa pode optar pelo MTO (SPEARMAN; HOPP, 2011). Em grande parte dos casos, a empresa é obrigada a utilizar o MTS para não perder vendas, nestes casos gerir os estoques em processamento (*Work-in-process* - WIP) e estoques de produto acabado tornam-se ainda mais importantes, pois deve-se possuir o menor estoque possível para manter disponibilidade dos produtos aos clientes, ao mesmo tempo que controla-se os custos de manutenção destes estoques.

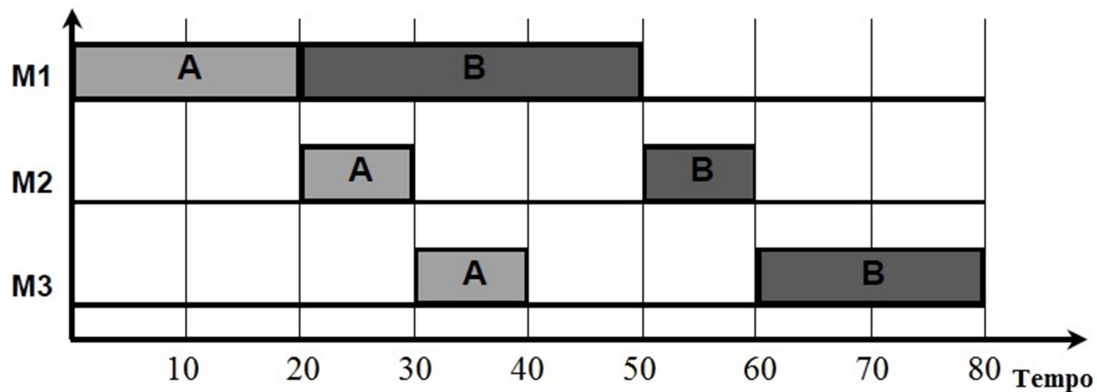
### 2.3 Sequenciamento da produção

Na atividade de sequenciamento da produção. Inicialmente, somente era listado quando o trabalho deveria começar e terminar, não contendo informações sobre seu tempo de execução ou tempos de processamento das operações individuais (HERRMANN, 2006). Com a globalização e o aumento da competitividade, são necessárias mais informações para atender as necessidades dos clientes (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2002).

Os trabalhos de Henry Gantt exibem os primeiros gráficos, que continham uma lista detalhada e organizada de todos os trabalhos que deveriam ser feitos em um determinado período, possibilitando notar rapidamente se a produção estava atrasada ou adiantada com relação a sua programação inicial (GANT, 1916 apud HERRMANN, 2006).

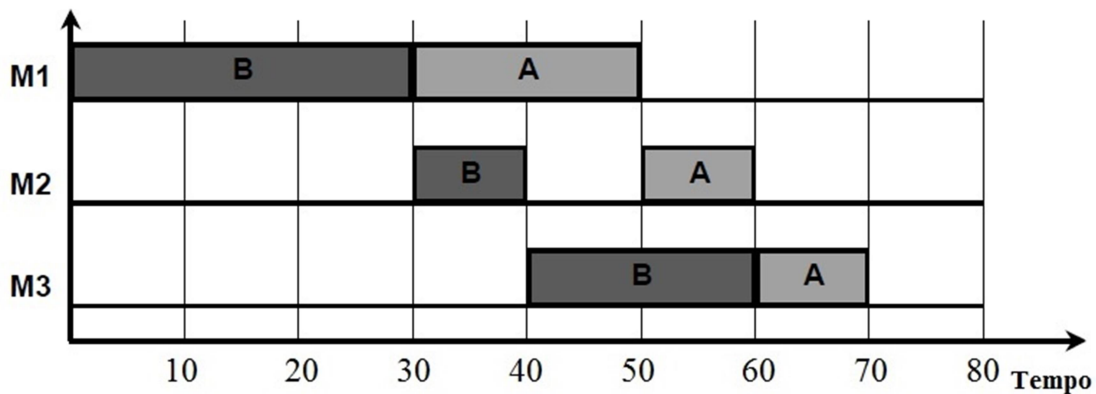
Com os gráficos de Gantt visualiza-se os tempos que as atividades levarão para serem concluídas e não quantidades. Nas figuras 1 e 2 pode-se visualizar estes gráficos aplicados na produção de dois produtos A e B em um *flow shop*, sem setup. Ambos produtos precisam ser processados por três máquinas M1, M2 e M3 nesta sequência e com tempos de processamento:  $p_{A1} = 20$ ;  $p_{A2} = 10$ ;  $p_{A3} = 10$ ;  $p_{B1} = 30$ ;  $p_{B2} = 10$ ;  $p_{B3} = 20$ . Verifica-se a diferença de 10 unidades de tempo entre as duas figuras, demonstrando a importância do sequenciamento da produção.

Figura 1 - Gráfico de Gantt: sequenciamento 1.



Fonte: adaptado de Dauzere-Peres e Lasserre (2002).

Figura 2 - Gráfico de Gantt: sequenciamento 2.



Fonte: adaptado de Dauzere-Peres e Lasserre (2002).

Scheduling é um importante processo de tomada de decisão nos sistemas produtivos, pois ele envolve a programação de recursos e tarefas com os objetivos a serem otimizados (PINEDO, 2008).

O sequenciamento de operações pode ser utilizado nos mais diferentes processos, como no controle de decolagens e aterrissagens nas pistas de aeroportos, em fábricas de semicondutores, no planejamento da produção de uma fábrica de sacos de papel, em sistemas de aluguel de carros, controlando o número de enfermeiras necessárias em um hospital, entre outros (PINEDO, 2005, 2015). Em cada uma destas aplicações pode-se estar objetivando otimizar uma ou mais medidas de desempenho, podendo ser, por exemplo, minimizar atrasos (PINEDO, 2015).

Nota-se a importância dada ao sequenciamento da produção a partir dos anos 50 com muitos livros e artigos científicos sendo publicados sobre o assunto, dentre estes, Jackson (1955), Smith (1956), Liu e Layland (1973), Lenstra, Kan e Brucker (1977), French (1982), Leung (2004), Conway, Maxwell e Miller (2012) e Pinedo (2005, 2015).

Somente na década de 60 surgiu a técnica *branch-and-bound*, na qual os cenários possíveis são enumerados e a solução é encontrada a partir do descarte de resultados piores que o limite inferior, que é obtido a partir de resultados anteriores, restando somente o resultado ótimo (PINEDO, 2015).

Com o surgimento da teoria da complexidade, na década de 1970, os pesquisadores perceberam que muitos problemas são inerentemente difíceis de resolver. Com isso, vários problemas de sequenciamento da produção eram apresentados como sendo do tipo *NP-hard* (NP-difícil ou NP-complexo), e por um bom tempo não existiram algoritmos capazes de achar soluções ótimas para estes. Os avanços em TI e sistemas baseados em computador tornaram possível a adoção de algoritmos inovadores que permitem a redução de custos do processo produtivo das empresas, permitindo que as mesmas se mantenham competitivas (LEUNG, 2004).

Nas décadas de 1980 e 1990, foram desenvolvidos algoritmos de busca local como *simulated annealing* e *tabu search*. Além deles foram desenvolvidos algoritmos genéticos, modelos de programação matemática e inteligência artificial. Com isso criou-se um conjunto grande de algoritmos poderosos que podem ser aplicados para gerar o sequenciamento da produção (HERRMANN, 2006; LEUNG, 2004; PINEDO, 2005).

### 2.3.1 ESTRUTURA E NOTAÇÃO

Pode-se dizer que os problemas de sequenciamento da produção podem ser resumidos em: O que deve ser feito primeiro e por quem. Para tal são considerados finitos os número de trabalhos e de máquinas.

É adotada uma notação com quatro parâmetros para identificar problemas de sequenciamento da produção (CONWAY; MAXWELL; MILLER, 2012): A/B/C/D.

- A: número de tarefas e respectivas operações que serão realizadas. Em problemas dinâmicos, ele identifica a probabilidade dos tempos entre chegadas. Em problemas estáticos, especifica o número de trabalhos, assumindo chegadas simultâneas.
- B: número de máquinas disponíveis.
- C: tipo de ambiente (fluxo padrão) em que as operações serão realizadas.
- D: critério pelo qual o sequenciamento será avaliado.

A notação apresentada Quadro 1 é a utilizada nos livros de sequenciamento da produção de Baker (1974), Conway, Maxwell e Miller (2012), Leung (2004) e Pinedo (2008).

Quadro 1 - Principais notações de sequenciamento da produção

Sigla	Descrição
$d_i$	Prazo de entrega (due date) da tarefa $i$
$r_i$	Data de liberação da tarefa $i$
$N$	Número de jobs
$M$	Número de operações da tarefa $i$
Se $M = 1 \rightarrow p_i$	Tempo de processamento da tarefa $i$
Se $M \geq 2 \rightarrow p_{ij}$	Tempo de processamento da $j$ -ésima operação da tarefa $i$
$W_{ij}$	Tempo de espera da tarefa $i$ no momento que terminou a operação $(j-1)$ até ser iniciada a operação $j$
$W_i$	Tempo total de espera da tarefa $i$
$C_i$	Tempo de conclusão da tarefa $i$
$C$	Tempo total de conclusão das $n$ tarefas
$F_i$	Tempo de fluxo da tarefa $i$
$F$	Tempo total de fluxo das $n$ tarefas
$\bar{F}$	Tempo médio de fluxo
$L_i$	Atraso da tarefa $i$
$L$	Atraso total das $n$ tarefas
$L_i < 0$	Tarefa $i$ ficou pronta antes do prazo
$T_i$	Atraso da tarefa $i$ (não pode ser negativo)
$T$	Tempo total de atraso das $n$ tarefas

Fonte: adaptado de Baker (1974), Conway, Maxwell e Miller (2012), Leung (2004) e Pinedo (2008).

Nas notações apresentadas as letras maiúsculas são variáveis de resposta e as minúsculas são parâmetros de um determinado problema.

Problemas de programação podem ser descritos da seguinte forma (MACCARTHY; LIU, 1993).

- $n$  tarefas  $\{j_1, \dots, j_n\}$  devem ser processadas por  $m$  máquinas  $\{M_1, \dots, M_m\}$ .
- Cada tarefa deve ser processada em cada máquina somente uma vez.
- O processamento de uma tarefa  $j$  em uma máquina  $m$  é chamado de operação com duração  $p_{jm}$  conhecida.
- Para cada operação  $O_{ij}$  existe um tempo  $T_{ij}$  de processamento associado.
- O instante em que a tarefa  $j$  está disponível para processamento é conhecido.



Portanto programar a produção consiste em definir a ordem das tarefas a serem executadas em cada máquina. Assim otimizando uma ou mais medidas de desempenho. A literatura apresenta frequentemente as seguintes suposições (BAKER, 1974):

1. Máquinas nunca quebram e estão sempre disponíveis.
2. Máquinas processam somente 1 operação por vez.
3. Os tempos de processamento são conhecidos.
4. Tempos de *setup* não dependem da programação e estão incluídos nos tempos de processamento.
5. As operações são realizadas sequencialmente, não podendo iniciar uma operação antes de terminar a anterior na máquina.
6. Duas operações de uma mesma tarefa não podem ser executadas simultaneamente.
7. Cada tarefa deve ser processada até seu término.

Os tipos de fluxo dos trabalhos nas máquinas podem ser identificados como:

**Job Shop (G):** em um *job shop* com  $m$  máquinas, cada trabalho tem sua própria rota. Podendo visitar algumas máquinas mais de uma vez e não visitar outras máquinas, a rota de fabricação não é necessariamente a mesma para todas as peças. Este problema é considerado um problema *NP-hard*.

**Flow Shop (F):** em um *flow shop* com  $m$  máquinas, as máquinas são sequencialmente ordenadas e todas as peças têm a mesma rota de produção e passam nas mesmas máquinas.

**Open Shop (O):** em um *open shop* com  $m$  máquinas, não possui uma sequência específica ou preestabelecida para o processamento das tarefas nas máquinas. É um modelo menos restrito que o *job shop* e o *flow shop*.

As possibilidades de máquinas no sistema produtivo são as que seguem:

**Máquina única (1):** existe uma única máquina no sistema

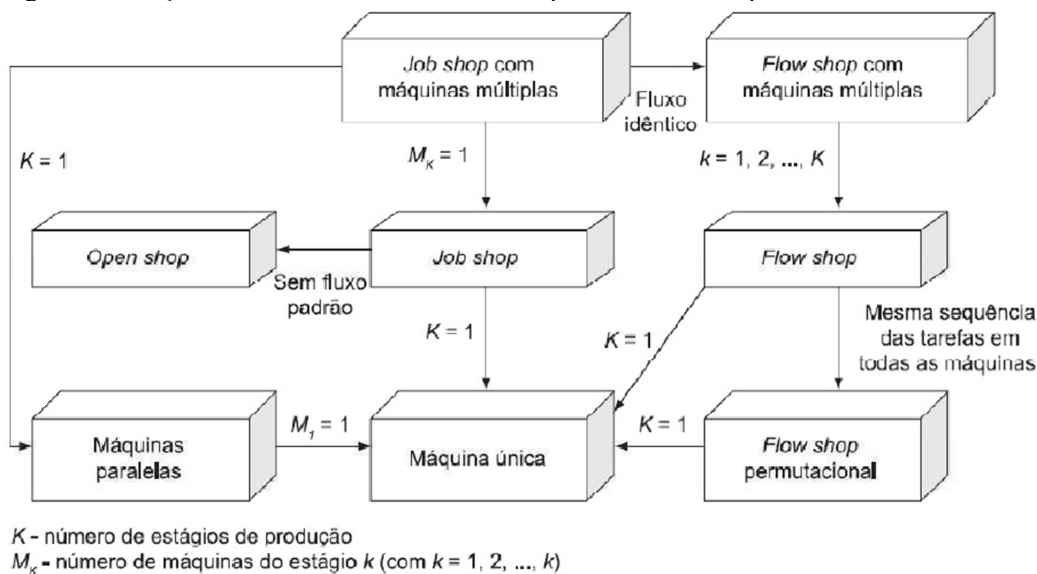
**Máquinas paralelas (k-paralela):** existem  $m$  máquinas paralelas, geralmente idênticas, cada trabalho exige uma única operação e pode ser processado em qualquer uma das  $m$  máquinas.

**Job shop com máquinas múltiplas (G,k-paralela):** *job shop* com  $m$  máquinas paralelas idênticas, e as tarefas precisam ser processadas em somente uma destas máquinas.

**Flow shop com máquinas múltiplas (F,k-paralela):** *flow shop* com  $m$  máquinas paralelas idênticas.

A Figura 3 ilustra a relação entre os diferentes ambientes e quantidades de máquinas.

Figura 3 - Relação entre os diferentes ambientes e quantidades de máquinas.



Fonte: adaptado de Dauzere-Peres e Lasserre (2002).

As abreviações presentes no Quadro 2 são usadas para representar restrições que podem ocorrer em ambientes de *sequenciamento da produção* mais complexos.

Quadro 2 - Abreviações de restrições que podem ocorrer em ambientes de sequenciamento da produção.

Abreviação	Descrição
$r_j$	Trabalhos com diferentes tempos de finalização
Str	Str <i>String</i> (sequência) de trabalhos
prec	Restrições de precedência
Unit	Tempos de processo da unidade
Eq	Tempo de processo igual para todos os trabalhos
depend	Trabalhos dependentes
<i>setup</i>	Sequência com <i>setup</i> dependente

Fonte: adaptado de Dauzere-Peres e Lasserre (2002).

A dificuldade teórica dos problemas de programação aumenta conforme são adicionadas mais máquinas e à medida que são processadas mais tarefas. No entanto, essa dificuldade aumenta em maior grau ao aumentarmos o número de máquinas do que quando aumentamos a quantidade de tarefas. A restrição sobre  $n$  é que este é um número que deve ser conhecido e finito. O próximo nível de complexidade ocorre quando duas ou mais tarefas devem ser processadas em duas máquinas em sequência. O seguinte grau de complexidade é caracterizado por múltiplos centros de máquinas, processando diversas tarefas diferentes que chegam intermitentemente. Se houver  $n$  tarefas para serem processadas em  $m$  máquinas, e todas as tarefas são processadas em

todas as máquinas, existem  $(n!)^m$  modos diferentes de programar estas tarefas (AQUILANO; CHASE; JACOBS, 2006).

Segundo Pinedo (2008), durante muito tempo, pesquisas sobre regras de prioridade (*dispatching*) foram realizadas e diversas regras foram estudadas na literatura. Essas regras são úteis quando se deseja encontrar um bom sequenciamento das ordens de produção com um objetivo a ser otimizado, como o atraso máximo ou menor tempo de fluxo.

Os métodos desenvolvidos para a resolução de problemas de sequenciamento da produção são divididos em dois tipos: métodos de solução ótima e os métodos heurísticos (MACCARTHY; LIU, 1993).

Os modelos heurísticos permitem que uma boa solução seja encontrada, não necessariamente essa é a solução ótima (PACHECO; SANTORO, 1999). A literatura divide os métodos heurísticos em duas classes: métodos heurísticos construtivos e melhorativos. Os construtivos se caracterizam por gerarem somente uma solução. Os métodos melhorativos, obtêm uma solução inicial e, posteriormente, através de procedimentos iterativos busca-se obter uma sequência melhor que a atual (NAGANO; BRANCO; MOCCELLIN, 2009)

No trabalho atual serão comparadas as regras de sequenciamento SPT, FIFO e *random* com a heurística de sequenciamento da produção associada ao S-DBR/MTA.

O *Shortest Processing Time* (SPT) minimiza o tempo de fluxo médio (*average flowtime*), conforme demonstrado no trabalho de Baker e Trietsch (2009). O SPT sequencia as ordens de produção em ordem crescente dos seus tempos de processamento (BAKER; TRIETSCH, 2009; BOBELIN et al., 2016; BRUNO; COFFMAN; SETHI, 1973; ZHU; WANG, 2017). Nos estudos de Baker e Bertrand (1982) o SPT apresentou o melhor desempenho em termos do tempo total de atraso de  $n$  tarefas.

O SPT foi selecionado para esta pesquisa, pois possui uma lógica que, a princípio, é intrinsecamente oposta à regra de sequenciamento associada ao S-DBR/MTA. Como será visto mais adiante, a regra S-DBR/MTA tende a priorizar aquelas ordens de produção com maiores quantidades de itens (ordens de itens cujos estoques de produtos acabados estão mais baixos) e, portanto, com tempos de processamento maiores. Porém, e ao mesmo tempo, como também será oportunamente apresentado, uma premissa da regra S-DBR/MTA é maximizar o fluxo, e a regra SPT tende a apresentar bons resultados em termos deste objetivo da manufatura.

O FIFO processa as tarefas na mesma sequência que elas chegam à estação de trabalho (DAUZÈRE-PÉRÈS; LASSERRE, 1994). O FIFO foi utilizado como uma das regras de sequenciamento de controle para avaliar o desempenho da regra de sequenciamento do S-DBR/MTA.

A regra de sequenciamento *random* processa as tarefas de maneira aleatória, portanto assim que uma máquina está livre é selecionada a próxima tarefa aleatoriamente, sem nenhuma tentativa de otimizar qualquer objetivo (PINEDO, 2005). Esta regra de sequenciamento foi selecionada para ser utilizada como regra de controle na avaliação do desempenho da regra intrínseca ao S-DBR/MTA.

O Quadro 3 apresenta uma síntese destas três regras que serão utilizadas para avaliar a performance do sequenciamento das ordens de produção do S-DBR/MTA.

Quadro 3 - Regras de sequenciamento que serão utilizadas para avaliar a performance do S-DBR/MTA.

<b>Regra</b>	<b>Descrição</b>
SPT ( <i>Shortest Processing Time</i> )	Tarefas são sequenciadas na ordem crescente de seus tempos de processamento.
FIFO ( <i>First in, First out</i> )	Tarefas são processadas na mesma sequência em que chegam na linha de produção.
Random	Seleciona-se a tarefa aleatoriamente.

Fonte: Autor.

## 2.4 Teoria das restrições

A Teoria das Restrições (*Theory of Constraints – TOC*) teve início na década de 1984 com o desenvolvimento do software de sequenciamento da produção chamado OPT (*Optimized Production Technology*), o qual foi desenvolvido pelo físico israelense Eliyahu Moshe Goldratt. Neste software estavam implícitas as técnicas de gerenciamento utilizadas pela TOC (GUPTA; BHARDWAJ; KANDA, 2010). A TOC popularizou-se com a publicação do romance “A Meta” em 1984 (GOLDRATT; COX, 2016) no qual eram aplicados os princípios da TOC na gestão de operações.

Um dos principais conceitos da TOC é o que todo sistema deve ter ao menos uma restrição, definindo-se restrição como aquilo que limita o desempenho do sistema, ou seja, caso não existissem restrições os sistemas possuiriam resultados ilimitados. Pensando em organizações que visam lucro, isto significaria lucro infinito. Apesar da restrição limitar o sistema, a TOC enxerga a restrição como uma coisa positiva porque

ao focar as melhorias nas restrições pode-se melhorar os resultados do sistema como um todo (GUPTA; BHARDWAJ; KANDA, 2010).

Na regra de Pareto é denominado que 80% dos resultados estão relacionados a 20% das causas, no entanto segundo a visão da TOC por existirem interdependências e variabilidades, o número de elementos que limitam o desempenho do sistema é extremamente baixo, com isto tem-se a importância de focar as ações na restrição do sistema (SCHRAGENHEIM, 2010).

Apesar de a TOC focar as ações na restrição é importante não cometer o equívoco de avaliar tudo que não é restrição como algo sem importância, pois ao se ignorar uma não restrição, devido as interdependências, a restrição também será afetada. No entanto, não deve-se utilizar um recurso não restritivo todo o tempo e sim somente o tempo necessário para extrair o máximo da restrição. Neste sentido focar para a TOC deve ser entendido como fazer o que deve ser feito e não fazer o que não deve ser feito (SCHRAGENHEIM, 2010).

Para lidar com as restrições a TOC propõe cinco passos de focalização ou melhoria contínua (GOLDRATT; COX, 2016; RAHMAN, 2002):

1. Identificar a(s) restrição(ões) do sistema;
2. Decidir como explorar a(s) restrição(ões) do sistema;
3. Subordinar as demais partes de acordo com a decisão acima;
4. Elevar a(s) restrição(ões) do sistema;
5. Se durante o processo uma restrição é quebrada, volte para o primeiro passo, não deixando a inércia se tornar a restrição.

Para auxiliar o gestor na tomada de decisões, a TOC define o conceito do “mundo dos custos” e “mundo do ganho” no qual é considerado mundo dos custos as atitudes tomadas pelos gestores voltadas a diminuir os custos e mundo dos ganhos as ações tomadas com o objetivo de ganhar mais dinheiro. Como a meta de toda empresa é ganhar mais dinheiro hoje e sempre, e não simplesmente cortar custos, todas as decisões devem ser analisadas pelo ponto de vista de quanto auxiliarão a empresa a ganhar dinheiro. Assim a TOC propõe duas medidas e uma condição necessária que auxiliam a avaliar as decisões locais do ponto de vista do mundo dos ganhos, são elas: Lucro Líquido e Retorno sobre o Investimento e a condição necessária é o Fluxo de Caixa (GOLDRATT; COX, 2016).

Estas três medidas auxiliam e direcionam a meta da empresa (ganhar dinheiro). Porém, para que elas fiquem de mais fácil compreensão e possam ser utilizadas de maneira mais fácil em decisões locais e no chão de fábrica, Goldratt e Cox (2016) as desdobraram em outras três medidas: ganho, inventário e despesa operacional. Analisando estes parâmetros, observa-se que uma boa administração deve aumentar o ganho e, se possível diminuir o inventário e a despesa operacional (GOLDRATT; COX, 2016).

## 2.5 Tambor-Pulmão-Corda simplificado na produção para estoque

O Tambor-Pulmão-Corda (*Drum-Buffer-Rope* – DBR) é o nome dado por Eliyahu Moshe Goldratt ao método do SCO da teoria das restrições. O DBR foi tido como a base da TOC até o surgimento da corrente crítica, método da TOC para o gerenciamento de projetos (SCHRAGENHEIM, 2010).

O Tambor-Pulmão-Corda simplificado (*Simplified Drum-Buffer-Rope* - S-DBR) é uma variação do TPC original e substitui o método tradicional. O S-DBR primeiramente apresentado em 2001 no livro *Manufacturing at Warp Speed* (SCHRAGENHEIM; DETTEMER, 2001).

O método do DBR clássico originalmente não diferencia o tratamento para ambientes produtivos MTS ou MTO, porém posteriormente quando Goldratt estava estudando melhor o ambiente MTS ele viu a necessidade de um novo termo: produção para disponibilidade (*Make-to-availability* – MTA). A principal diferença entre o MTS e o MTA é que no MTA é assumido um compromisso com o mercado de manter uma disponibilidade correta de algum grupo de produtos (SCHRAGENHEIM, 2010).

Dois importantes princípios sustentam o aspecto operacional da abordagem MTA (SCHRAGENHEIM; DETTEMER, 2001):

(1) Produção necessita focar no fluxo, fazendo com que os materiais necessários fluam tão rapidamente quanto possível pela fábrica, até alcançar o armazém de produtos acabados.

(2) A menos que haja uma boa razão para acreditar que a demanda mudou, ou que a quantidade a quantidade no sistema é muito alta ou muito baixa, então uma simples e direta maneira de reagir às vendas é repor um item tão logo ele foi vendido. Da perspectiva do planejamento da produção, é necessário produzir hoje o que foi vendido ontem.

Com a ideia de produzir hoje o que foi consumido ontem, a quantidade de estoque da fábrica deve permanecer constante para cada produto, para isso o MTA mantém um estoque alvo (EA) constante que é obtido pela soma do inventário de produtos acabados (*Finished Goods Inventory* – FGI) com os produtos em processamento (*Work-In-Process* – WIP).

O EA inicial pode ser calculado de duas maneiras: i) observando a quantidade de vendas máximas nos últimos seis meses a um ano durante seu tempo de reposição (TR) e adotar este valor como EA ou ii) verificando a quantidade média vendida (Demanda – D) de cada produto durante o TR e multiplicar esta quantidade por um fator de segurança (FS), geralmente entre 1,5 e 2 (SCHRAGENHEIM, 2010), segundo a fórmula que segue:

$$EA_i = FS * TR * D_i \quad (1)$$

Onde:

EA<sub>i</sub> é o Estoque Alvo do produto i.

FS é o fator de segurança.

TR é o tempo de reposição médio.

D<sub>i</sub> é a quantidade média vendida do produto i, durante seu tempo de reposição.

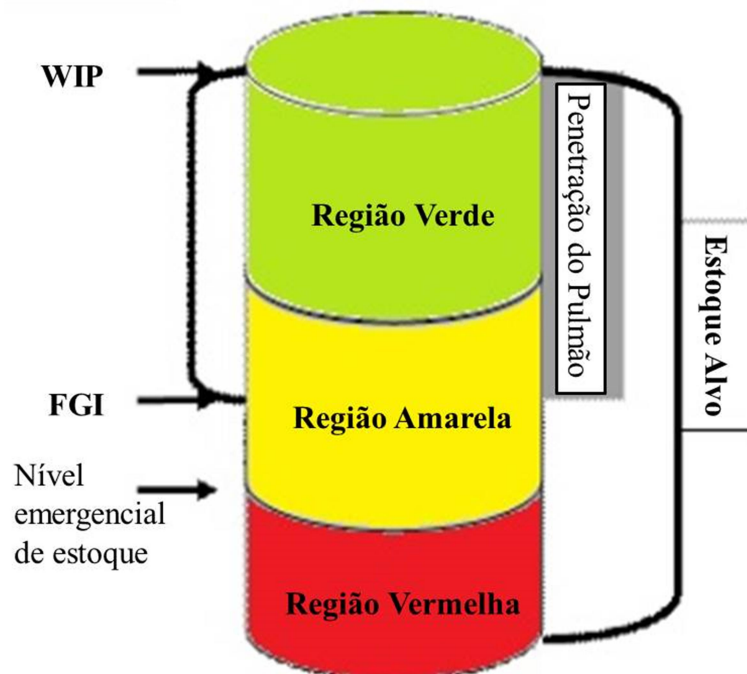
O EA obtido com esta fórmula é um valor inicial e conservador que deve ser ajustado dinamicamente de acordo com o perfil de comportamento do FGI durante o tempo (SCHRAGENHEIM, 2010). O ajuste do estoque alvo é feito pelo gerenciamento dinâmico do pulmão (GDP) conforme a ocorrência das variabilidades (SCHRAGENHEIM; DETTEMER; PATTERSON, 2009).

### 2.5.1 SEQUENCIANDO E PRIORIZANDO AS ORDENS DE PRODUÇÃO NO SISTEMA S-DBR/MTA

Nos ambientes MTS, a principal proteção para entrega imediata é o FGI. Neste caso, o esgotamento do pulmão significa que os estoques estão disponíveis, porém em níveis muito baixos e que eles podem ser esgotados antes da chegada de qualquer ordem de reposição. A recomendação é que o EA seja dividido em três zonas iguais. Quando o FGI é igual ou superior a dois terços do EA, seu status é considerado verde e um terço ou menos do EA foi consumido, esse consumo é chamado de penetração do pulmão.

Quando o FGI está entre um terço e dois terços do EA, seu status é considerado amarelo. Se o FGI for inferior a um terço do EA, seu status será considerado vermelho. A Figura 4 apresenta esse conceito.

Figura 4 - Conceito dos níveis do Estoque Alvo



Fonte: Adaptado Schragenheim (2010).

#### 2.5.1.1 Priorizando as ordens de produção no S-DBR/MTA

O status do pulmão (*Buffer status* – BS) determina os critérios de priorização das ordens de produção abertas. Como o S-DBR/MTA não trabalha com datas de entrega, o status do pulmão é calculado como o percentil consumido do estoque alvo. Assim, uma ordem de reposição de um produto acabado cujo nível é de 66% do EA tem prioridade sobre outra ordem de cujo seus estoques de produtos acabados estão em um nível de 30% de seu respectivo EA (SCHRAGENHEIM, 2010). O status do pulmão (BS) de uma determinada ordem de produção (OP) é calculado a partir da informação de seu estoque alvo (EA), de seu estoque de produtos acabados (FGI) e das quantidades de produto em processamento (WIP) a sua frente (*Downstream Work-In-Process* – WDIP) (SCHRAGENHEIM, 2010). O BS pode ser calculado utilizando a seguinte fórmula (SCHRAGENHEIM, 2010):



$$BS_i = \frac{(EA_i - DWIP_{ij} - FGI_i)}{EA_i} \quad (2)$$

Onde:

$BS_i$  é o status do pulmão da ordem de produção  $i$ .

$EA_i$  é o estoque alvo do produto  $i$ .

$DWIP_{ij}$  é o *downstream work-in-process* da ordem de produção  $j$  com relação ao produto  $i$ .

$FGI_i$  é o estoque de produtos acabados do produto  $i$ .

No lugar de percentagens, o S-DBR/MTA faz uso de cores para estabelecer as prioridades e sequenciar as ordens de produção no chão de fábrica. Quando o BS calculado está entre 0% e 33,3% sua cor é verde. Se estiver entre 33,4% e 66,6%, sua cor é amarela e entre de 66,7% e 99,9% sua cor é vermelha e denota urgência. Além disso, quando uma ordem de produção (OP) atinge o status vermelho a mesma deve ser acelerada para que não ocorra a falta deste produto no estoque de produtos acabados. O tamanho da região vermelha do pulmão deve permitir tempo suficiente para que ao acelerar o fluxo das ordens que apresentaram status vermelho as mesmas sejam concluídas e seja evitada a falta de disponibilidade dos produtos correspondentes a estas ordens de produção (SCHRAGENHEIM, 2010).

Suponha que o EA para um item específico seja de 100 unidades. Em um determinado momento, existe um OP de 30 unidades no final do roteamento de fabricação (aqui chamada OP01), mas ainda não concluído, e uma OP de 40 unidades já liberada, mas ainda no início do seu roteamento, chamada OP02. Existem 20 unidades deste item no depósito FGI. A jusante do OP01, existem apenas 20 unidades do item como FGI, que equivale a uma penetração de 80 unidades e sua BS é, portanto, 80%  $((100 - 0 - 20) / 100)$  e sua cor é vermelha. O OP01 deve obter prioridade sobre outras ordens amarelas ou verdes de outros itens no chão de fábrica. A jusante da OP02 existem 30 unidades que se referem a OP01 (DWIP da OP02), além das 20 unidades como FGI. Assim, no ponto de vista da OP02, a BS é 50%  $((100 - 30 - 20) / 100)$  e sua cor é amarela. Uma vez que a soma das quantidades referentes as OP01, OP02 e ao FGI é igual a 90 unidades, uma OP03 deve ser criada, para 10 unidades, e sua BS é 10%  $((100 - 30 - 40 - 20) / 100)$  (verde).

O gerenciamento do pulmão (GP) Além de identificar prioridades no chão de fábrica, o GP é uma fonte importante de informação para promover um processo de

melhoria contínua focada no balanceamento do fluxo (BARNARD, 2010; GOLDRATT, 2009). O GP pode apoiar esse processo identificando áreas que, se aprimoradas, acelerarão o fluxo. Para tal, no modo de operação S-DBR/MTA, o GP permite a identificação de ordens de produção que, por algum motivo, sofrem de atrasos e, como consequência, atingem o status vermelho. Os motivos subjacentes a esses bloqueios no fluxo tornam-se alvos para iniciativas de melhoria e para a aplicação de ferramentas de resolução de problemas (SCHRAGENHEIM; DETTEMER; PATTERSON, 2009). Outra das ferramentas de melhoria contínua do S-DBR/MTA é o gerenciamento dinâmico do pulmão (GPD), o qual recomenda alterações nos tamanhos dos EA dos produtos, observando se os pulmões apresentam verde ou vermelho em demasia. Verde em demasia pode indicar um estoque alvo muito grande, por outro lado vermelho em demasia pode indicar que o mesmo está muito baixo. Quando for confirmado um destes fatos, deve-se aumentar o estoque alvo em 20% ou reduzi-lo em 15% (SCHRAGENHEIM, 2010).

#### 2.5.1.2 Gerando Ordens de produção no S-DBR/MTA

Sempre que, para cada produto, a soma de FGI e WIP (aqui denominada *Total Current Stock* - TCS) está abaixo do EA, uma nova ordem de produção deve ser gerada imediatamente, de preferência na quantidade exata para cobrir a diferença entre o EA e o TCS do produto. Nenhuma data deve ser associada a esta ordem de reabastecimento.

Embora simples e com base no senso comum, essa ideia tem o inconveniente de gerar ordens de produção muito pequenas quando o TCS de um produto específico é somente um pouco inferior ao EA. Com a finalidade de contornar essa situação, Schragenheim, Dettemer e Patterson (2009) sugerem dois mecanismos para gerar OP para o S-DBR/MTA.

O primeiro baseia-se na manutenção de um lote de produção mínimo. De acordo com este mecanismo, sempre que o TCS for menor que o EA, uma OP é aberta na quantidade equivalente ao seu lote mínimo ou a quantidade que se refere à diferença entre o EA e o TCS, o maior valor prevalecente. Se o valor mais elevado corresponder ao lote mínimo, o TCS estará temporariamente acima do EA e uma nova OP para este produto somente será emitida quando o TCS cair abaixo do EA. Assim, quando a demanda diária média por um item é menor do que o lote mínimo, as ordens de

produção não serão geradas todos os dias para este produto. Os lotes mínimos são geralmente aplicados a itens com baixo volume de vendas.

O segundo mecanismo, proposto em Schragenheim (2002), Schragenheim (2010) e em Schragenheim, Dettemer e Patterson (2009) procura definir dinamicamente os tamanhos e os tempos de lançamento para as OP, de acordo com a carga de trabalho imposta pelas OP abertas no recurso com restrição de capacidade (RRC), mas ainda não processada por ele. Esta carga, geralmente medida em horas, é chamada de carga planejada regular (RPL).

De acordo com este segundo mecanismo, é necessário verificar todos os TCS e EA de produtos fabricados diariamente. Quando o TCS é menor do que o EA, uma ordem de reposição deve ser aberta para este produto. Cada pedido de reabastecimento tem uma prioridade a cada dia. Esta prioridade é definida de acordo com o BS. No momento de liberação da OP o seu BS é expresso por (SCHRAGENHEIM; DETTEMER; PATTERSON, 2009):

$$BS_i = \frac{(EA_i - TCS_i)}{EA_i} \quad (3)$$

Onde:

$BS_i$  é o status do pulmão da ordem de produção  $i$ .

$EA_i$  é o estoque alvo do produto  $i$ .

$TCS_i$  é o *Total Current Stock* do produto  $i$ .

Se, por exemplo, o EA para um determinado produto é de 60 unidades e atualmente existem 28 unidades na forma de FGI e outras 14 unidades na forma de WIP ( $TCS = 28 + 14 = 42$  unidades), então seu BS para o produto abrir outra OP de 18 unidades para manter as 60 unidades constantes no sistema é de 30% ( $((60 - 42) / 60)$ ). Quanto maior for o BS de uma ordem de produção, maior será sua prioridade. No entanto, antes de liberar a ordem, o RPL no RRC precisa ser verificado.

Todas as ordens de reposição são lançadas até que o RPL sobre o RRC se aproxime de um limite de tempo máximo equivalente ao pulmão do DBR clássico. Quando o RRC é carregado em níveis iguais ou superiores a este, o algoritmo pode atrasar a abertura de uma nova OP até o RPL retornar a um nível inferior ao máximo pré-estabelecido. Neste momento, as ordens de reposição serão abertas de acordo com as prioridades estabelecidas pela BS. Schragenheim, Dettemer e Patterson (2009)

sugerem que o RPL máximo aceitável sobre o RRC deve ser sempre inferior a 80% do tempo médio de reposição.

Vale ressaltar que, em contraste com as aplicações clássicas do DBR cujas libertações de trabalho geralmente são baseadas em um agendamento detalhado fino do RRC, o mecanismo de controle de entrada utilizado pelo S-DBR e especificamente pelo MTA em particular, geralmente é regulado pela carga do RRC e sequenciado pela abertura das OP com base nas regras de ordem do BS. A exceção é a presença de configurações dependentes, que podem impor algum tipo de sequenciamento diferente (SCHRAGENHEIM; DETTEMER; PATTERSON, 2009). No entanto, enquanto o RPL não é um "cronograma", sua característica de capacidade finita é importante para explorar adequadamente a capacidade RRC.

Portanto, o S-DBR/MTA calcula o BS tanto das ordens de produção que estão na fila aguardando abertura quanto das OP que já estão no chão de fábrica. Neste trabalho em todos os cenários estudados com todas as regras de sequenciamento o BS das OP aguardando serem abertas é calculado e utilizado para a abertura das OP, após aberta a OP segue a regra de sequenciamento que está sendo estudada, seja ela S-DBR/MTA, SPT, FIFO ou *random*.

### 3 MÉTODO DE PESQUISA

Pesquisa pode ser definida como um processo sistemático e racional que objetiva responder aos problemas propostos, a pesquisa é desenvolvida através do processo que envolve todos os passos entre a formulação do problema até a apresentação dos resultados (GIL, 2010).

O presente trabalho utilizará de simulação computacional para obter seus resultados. Para um projeto de simulação computacional ser bem sucedido ele depende do uso de um método que coordene as atividades do estudo. Podem-se encontrar exemplos de métodos de gerenciamento de projetos de simulação na literatura, entre eles: Banks (1998); Goog e Mott (1992); Law e Kelton (2000); Pritsker, Sigal e Hammesfahr (1989).

Nesta pesquisa optou-se em utilizar o método proposto por Law e Kelton (2000), pois ele se adapta à estrutura desta pesquisa e também por estar difundido na literatura em trabalhos como: Boeira (2008); Gavira (2003); Pergher e Vaccaro (2014); Souto Junior, Loch e Moita (2009).

O método busca desenvolver um modelo de forma estruturada que represente um sistema real de maneira simplificada e posteriormente, simulá-lo e validá-lo. Para desenvolver esta simulação, será utilizado o software ProModel<sup>®</sup>, utilizando as etapas propostas por Law e Kelton (2000):

1. Formulação do problema e planejamento do estudo;
2. Definição do modelo lógico conceitual: são coletados os dados essenciais do sistema a ser modelado no software e é construído um modelo lógico conceitual do sistema;
3. Validação do modelo lógico conceitual: nesta etapa é avaliado o modelo conceitual. Somente após esta validação passa-se para a etapa seguinte;
4. Coleta de dados e programação do sistema no software computacional: realização da programação do modelo no ProModel<sup>®</sup> e verificação de sua adequação ao modelo conceitual;
5. Execução de rodadas piloto para determinar os parâmetros e executar a verificação e validação do modelo: são realizadas execuções do modelo computacional para sua verificação e validação. Após esta verificação, são realizadas as etapas seguintes;

6. Definição dos cenários a serem simulados: decide-se o que simular e quais os parâmetros da simulação, como duração, número de rodadas e condições iniciais;
7. Execução das simulações: são executadas as simulações conforme os parâmetros definidos anteriormente;
8. Análise dos resultados: utilizam-se técnicas estatísticas para analisar os dados das simulações e permitir as análises do processo simulado. Após o uso das técnicas estatísticas, são realizados relatórios sumarizando todos os resultados obtidos na simulação.

Seguindo as etapas propostas busca-se evitar algumas armadilhas da simulação, como o uso de detalhamento inadequado na simulação ou a não realização das análises estatísticas para validar a simulação (LAW; KELTON, 2000).

### **3.1 Formulação do problema e planejamento do estudo**

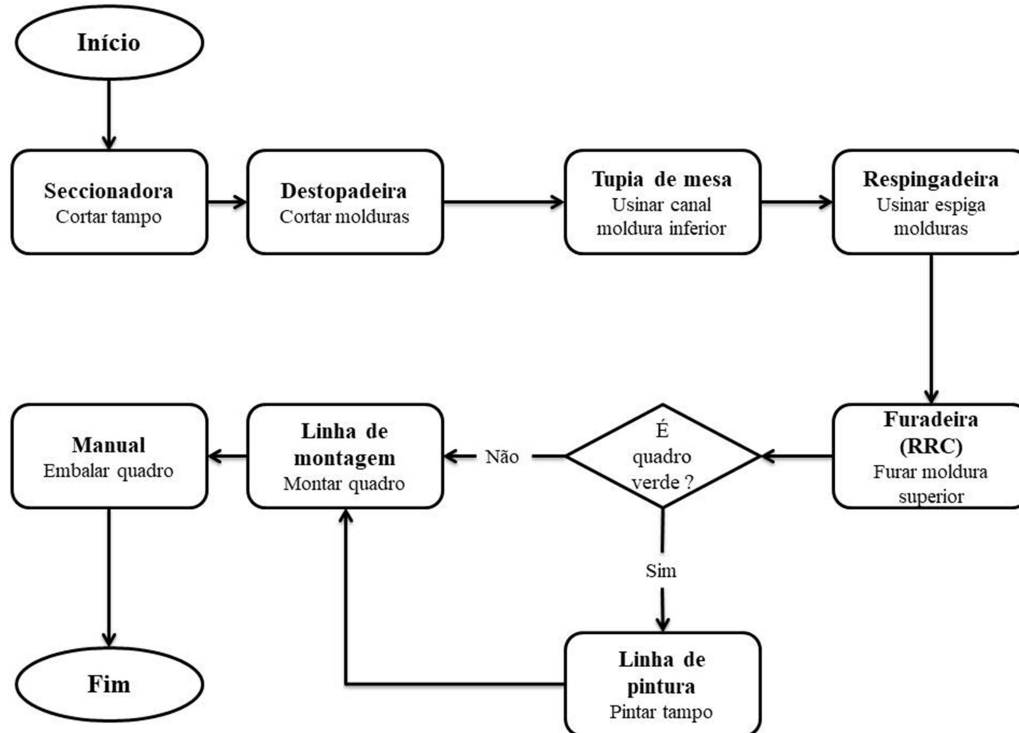
Com o intuito de simular um ambiente inspirado numa manufatura real, foi escolhida como base para a modelagem uma empresa de produção de quadros de madeira, localizada no interior do estado de São Paulo. Não foi objetivo desta pesquisa comparar os resultados simulados com os resultados reais obtidos pela empresa.

A empresa produz diversos modelos de quadros de madeira. Por simplificação, foram escolhidos oito modelos de quadros de madeira, sendo quatro deles verdes e quatro brancos. A presença de quadros com cores distintas cria um ponto de divergência na rota produtiva, pois os quadros verdes seguem para o processo de pintura e os quadros brancos vão diretamente para a linha de montagem.

### **3.2 Definição do modelo lógico conceitual**

Mediante o acompanhamento dos gestores, foi realizada uma visita a linha de produção para compreender o processo produtivo da fábrica. O funcionamento esquemático da linha de produção pode ser verificado no fluxograma a seguir (Figura 5) e melhor descrito nos itens abaixo.

Figura 5 - Fluxograma da produção de quadros de madeira da empresa simulada.



Fonte: Autor.

- **Seccionadora:** neste primeiro processo são cortadas as chapas de fibra de madeira de acordo com a quantidade e dimensões especificadas nas ordens de produção
- **Destopadeira:** as molduras de pinus são cortadas nas medidas indicadas nas ordens de produção.
- **Tupia de mesa:** é realizado um canal na moldura inferior para a fixação do porta canetas e também cria os canais tanto na moldura inferior quanto na superior para a fixação das espigas das molduras laterais.
- **Respingadeira:** cria as espigas nas molduras laterais para a fixação nas molduras superior e inferior.
- **Furadeira:** faz os furos na moldura superior, os quais serão utilizados para fixação do quadro.
- **Linha de Pintura:** os quadros verdes passam pela linha de pintura para que sua superfície receba a tinta verde.
- **Linha de montagem:** é executada a montagem manual dos quadros.
- **Manual:** os quadros são embalados manualmente.

### **3.3 Validação do modelo lógico conceitual**

Após definição do modelo conceitual foram realizadas reuniões com os gestores da linha de produção, nas quais antes de chegar ao fluxograma produção de quadros apresentado na Figura 5, foram apresentados modelos preliminares, os quais foram corrigidos de qualquer inconsistência encontrada. Tal etapa é importante, pois reduz a necessidade de se executar mudanças durante o processo de desenvolvimento do programa computacional.

### **3.4 Coleta dos dados e programação do sistema no software computacional**

Os dados de tempo de processamento, estruturas dos produtos e quantidade de vendas foram extraídos do ERP (*Enterprise Resource Planning*) da empresa. Por questões de segurança da informação, tais dados foram mascarados no modelo, mas mantidas suas proporções originais e pelo mesmo motivo não foram obtidos os dados sobre carga horária de trabalho, portanto foi adotado um valor de oito horas diárias de trabalho, trabalhando 288 dias por ano, totalizando 2304 horas de trabalho anuais. Como nos relatórios cedidos pela empresa não existiam dados detalhados sobre cada pedido, adotou-se a soma dos pedidos de cada produto por dia como demanda diária deste produto. Para a simulação foi adotado que cada pedido corresponde a somente um produto e a quantidade demandada por pedido varia de pedido para pedido. Na tabela 2 está expressa a demanda média diária de um ano de demanda para cada um dos oito produtos escolhidos nos três níveis utilizados na simulação. Os três níveis de demanda foram escolhidos de maneira que possuíssem cerca de 10% de diferença de carga no RRC entre eles. Os códigos de nomenclatura de cada um dos produtos são os mesmos utilizados pela empresa.



Tabela 2 - Demanda média diária para os quadros de madeira nos três níveis de demanda utilizados na simulação.

Nível demanda	Código	Descrição	Demanda media diária
Demanda baixa	8164	Quadro branco madeira 40 X 30 cm	26
	8166	Quadro branco madeira 60 X 40 cm	18
	8167	Quadro branco madeira 70 X 50 cm	9
	8168	Quadro branco madeira 90 X 60 cm	11
	8175	Quadro verde madeira 40 X 30 cm	7
	8177	Quadro verde madeira 60 X 40 cm	7
	8178	Quadro verde madeira 70 X 50 cm	12
	8180	Quadro verde madeira 90 X 60 cm	6
	<b>Total</b>		<b>96</b>
	<b>Média</b>		<b>12,00</b>
Demanda média	8164	Quadro branco madeira 40 X 30 cm	30
	8166	Quadro branco madeira 60 X 40 cm	21
	8167	Quadro branco madeira 70 X 50 cm	10
	8168	Quadro branco madeira 90 X 60 cm	13
	8175	Quadro verde madeira 40 X 30 cm	8
	8177	Quadro verde madeira 60 X 40 cm	7
	8178	Quadro verde madeira 70 X 50 cm	14
	8180	Quadro verde madeira 90 X 60 cm	7
	<b>Total</b>		<b>110</b>
	<b>Média</b>		<b>13</b>
Demanda alta	8164	Quadro branco madeira 40 X 30 cm	34
	8166	Quadro branco madeira 60 X 40 cm	23
	8167	Quadro branco madeira 70 X 50 cm	11
	8168	Quadro branco madeira 90 X 60 cm	14
	8175	Quadro verde madeira 40 X 30 cm	9
	8177	Quadro verde madeira 60 X 40 cm	8
	8178	Quadro verde madeira 70 X 50 cm	16
	8180	Quadro verde madeira 90 X 60 cm	8
	<b>Total</b>		<b>123</b>
	<b>Média</b>		<b>15,38</b>

Fonte: Autor.

O lote mínimo de produção foi obtido a partir da média aritmética das demandas médias diárias do nível médio de demanda, tal média é de 13,75, portanto para a simulação foi adotado como lote mínimo de produção o valor 14. O lote mínimo de produção foi calculado desta maneira por não existirem informações suficientes para realizar os cálculos de outras formas propostas pela literatura, como o lote econômico de produção. Adotou-se como lote de transferência sendo igual ao lote mínimo de produção.

Os tempos médios unitários de processamento de cada operação descrita na Figura 5 encontram-se na Tabela 3, lembrando que os mesmos são os valores fornecidos pela empresa multiplicados por algum fator por questões de segurança da informação.

Tabela 3 - Tempos de processamento unitário por estação de trabalho por produto em horas.

Tipo de quadro	Estações de Trabalho	Produtos				Total
		8164	8166	8167	8168	
Quadros Brancos	<b>Seccionadora</b>	0,0377	0,0440	0,0543	0,0770	<b>0,2130</b>
	<b>Destopadeira</b>	0,0462	0,0525	0,0525	0,0653	<b>0,2165</b>
	<b>Tupia de Mesa</b>	0,0500	0,0500	0,0500	0,0500	<b>0,2001</b>
	<b>Respigadeira</b>	0,0462	0,0462	0,0462	0,0462	<b>0,1847</b>
	<b>Furadeira</b>	0,0600	0,0600	0,0600	0,0600	<b>0,2401</b>
	<b>Linha de Montagem</b>	0,0491	0,0491	0,0561	0,0561	<b>0,2103</b>
	<b>Embalagem</b>	0,0487	0,0422	0,0487	0,0548	<b>0,1945</b>
	<b>Inspeção</b>	0,0494	0,0494	0,0494	0,0494	<b>0,1974</b>
	<b>Total</b>	<b>0,3873</b>	<b>0,3933</b>	<b>0,4172</b>	<b>0,4588</b>	
Quadros Verdes		<b>8175</b>	<b>8177</b>	<b>8178</b>	<b>8180</b>	<b>Total</b>
	<b>Seccionadora</b>	0,0377	0,0440	0,0543	0,0770	<b>0,2130</b>
	<b>Destopadeira</b>	0,0462	0,0525	0,0525	0,0653	<b>0,2165</b>
	<b>Tupia de Mesa</b>	0,0500	0,0500	0,0500	0,0500	<b>0,2001</b>
	<b>Respigadeira</b>	0,0462	0,0462	0,0462	0,0462	<b>0,1847</b>
	<b>Furadeira</b>	0,0600	0,0600	0,0600	0,0600	<b>0,2401</b>
	<b>Linha de Pintura</b>	0,0621	0,1168	0,1291	0,2337	<b>0,5417</b>
	<b>Linha de Montagem</b>	0,0491	0,0491	0,0561	0,0561	<b>0,2103</b>
	<b>Embalagem</b>	0,0487	0,0422	0,0487	0,0548	<b>0,1945</b>
	<b>Inspeção</b>	0,0494	0,0494	0,0494	0,0494	<b>0,1974</b>
<b>Total</b>	<b>0,4494</b>	<b>0,5101</b>	<b>0,5464</b>	<b>0,6924</b>		

Fonte: Autor

Multiplicando-se os tempos de processamento presentes na tabela 3 pela demanda média obtemos a tabela 4, correspondente a carga de trabalho diária, em horas, de cada estação de trabalho para cada um dos produtos nos três níveis de demanda.

Tabela 4 - Carga média diária de trabalho dos quadros para os três níveis de demanda.

Nível demanda	Estações de Trabalho	8164	8166	8167	8168	8175	8177	8178	8180	Total
Demanda baixa	<b>Demanda Média Diária (unidades)</b>	26	18	9	11	7	7	12	6	
	<b>Seccionadora (h)</b>	0,980	0,791	0,489	0,846	0,263	0,307	0,652	0,461	<b>4,7932</b>
	<b>Destopadeira (h)</b>	1,200	0,944	0,472	0,718	0,323	0,367	0,629	0,391	<b>5,0484</b>
	<b>Tupia de Mesa (h)</b>	1,300	0,900	0,450	0,550	0,350	0,350	0,600	0,300	<b>4,8030</b>
	<b>Respigadeira (h)</b>	1,200	0,831	0,415	0,508	0,323	0,323	0,554	0,277	<b>4,4335</b>
	<b>Furadeira (h)</b>	1,560	1,080	0,540	0,660	0,420	0,420	0,720	0,360	<b>5,7616</b>
	<b>Linha de Pintura</b>					0,434	0,817	1,549	1,402	<b>4,2041</b>
	<b>Linha de Montagem(h)</b>	1,275	0,883	0,504	0,616	0,343	0,343	0,672	0,336	<b>4,9770</b>
	<b>Embalagem (h)</b>	1,267	0,759	0,438	0,603	0,341	0,295	0,585	0,329	<b>4,6194</b>
	<b>Inspeção (h)</b>	1,283	0,888	0,444	0,542	0,345	0,345	0,592	0,296	<b>4,7383</b>
Demanda média	<b>Demanda Média Diária (unidades)</b>	30	21	10	13	8	7	14	7	
	<b>Seccionadora (h)</b>	1,131	0,923	0,543	1,000	0,301	0,307	0,760	0,538	<b>5,5075</b>
	<b>Destopadeira (h)</b>	1,385	1,102	0,524	0,849	0,369	0,367	0,734	0,457	<b>5,7901</b>
	<b>Tupia de Mesa (h)</b>	1,500	1,050	0,500	0,650	0,400	0,350	0,700	0,350	<b>5,5034</b>
	<b>Respigadeira (h)</b>	1,385	0,969	0,461	0,600	0,369	0,323	0,646	0,323	<b>5,0801</b>
	<b>Furadeira (h)</b>	1,800	1,260	0,600	0,780	0,480	0,420	0,840	0,420	<b>6,6018</b>
	<b>Linha de Pintura</b>					0,496	0,817	1,807	1,635	<b>4,7581</b>
	<b>Linha de Montagem(h)</b>	1,472	1,030	0,560	0,729	0,392	0,343	0,785	0,392	<b>5,7060</b>
	<b>Embalagem (h)</b>	1,462	0,885	0,487	0,712	0,390	0,295	0,682	0,383	<b>5,3004</b>
	<b>Inspeção (h)</b>	1,480	1,036	0,493	0,641	0,394	0,345	0,691	0,345	<b>5,4293</b>
Demanda alta	<b>Demanda Média Diária (unidades)</b>	34	23	11	14	9	8	16	8	
	<b>Seccionadora (h)</b>	1,281	1,011	0,597	1,077	0,339	0,351	0,869	0,615	<b>6,1449</b>
	<b>Destopadeira (h)</b>	1,570	1,207	0,577	0,914	0,415	0,419	0,839	0,522	<b>6,4665</b>
	<b>Tupia de Mesa (h)</b>	1,701	1,150	0,550	0,700	0,450	0,400	0,800	0,400	<b>6,1538</b>
	<b>Respigadeira (h)</b>	1,570	1,062	0,508	0,646	0,415	0,369	0,738	0,369	<b>5,6804</b>
	<b>Furadeira (h)</b>	2,040	1,380	0,660	0,840	0,540	0,480	0,960	0,480	<b>7,3820</b>
	<b>Linha de Pintura</b>					0,559	0,934	2,066	1,869	<b>5,4290</b>
	<b>Linha de Montagem(h)</b>	1,668	1,128	0,616	0,785	0,441	0,392	0,897	0,448	<b>6,3790</b>
	<b>Embalagem (h)</b>	1,657	0,970	0,536	0,767	0,438	0,337	0,780	0,438	<b>5,9267</b>
	<b>Inspeção (h)</b>	1,678	1,135	0,542	0,691	0,444	0,394	0,789	0,394	<b>6,0710</b>

Fonte: Autor.

A tabela 5 mostra carga de trabalho em um dia de trabalho (8 horas) para cada uma das estações.

Tabela 5 - Carga de trabalho nas estações para cada um dos três níveis de demanda (8 horas disponíveis).

Nível demanda	Estações de Trabalho	Horas de Trabalho em um dia	Nível de utilização
Demanda baixa	Seccionadora	4,7932	59,91%
	Destopadeira	5,0484	63,10%
	Tupia de Mesa	4,8030	60,04%
	Respigadeira	4,4335	55,42%
	<b>Furadeira</b>	<b>5,7616</b>	<b>72,02%</b>
	Linha de Pintura	4,2041	52,55%
	Linha de Montagem	4,9770	62,21%
	Embalagem	4,6194	57,74%
	Inspeção	4,7383	59,23%
Demanda média	Seccionadora	5,5075	68,84%
	Destopadeira	5,7901	72,38%
	Tupia de Mesa	5,5034	68,79%
	Respigadeira	5,0801	63,50%
	<b>Furadeira</b>	<b>6,6018</b>	<b>82,52%</b>
	Linha de Pintura	4,7581	59,48%
	Linha de Montagem	5,7060	71,33%
	Embalagem	5,3004	66,26%
	Inspeção	5,4293	67,87%
Demanda alta	Seccionadora	6,1449	76,81%
	Destopadeira	6,4665	80,83%
	Tupia de Mesa	6,1538	76,92%
	Respigadeira	5,6804	71,01%
	<b>Furadeira</b>	<b>7,3820</b>	<b>92,27%</b>
	Linha de Pintura	5,4290	67,86%
	Linha de Montagem	6,3790	79,74%
	Embalagem	5,9267	74,08%
	Inspeção	6,0710	75,89%

Fonte: Autor.

Com os dados presentes na tabela 5 é possível verificar que a furadeira possui a menor folga de capacidade em qualquer um dos três níveis de demanda, portando sendo considerada o RRC da fábrica.

### 3.5 Execução de rodadas piloto para determinar os parâmetros e executar a verificação e validação do modelo

Para o cálculo do Tempo de Reposição (TR) médio foi primeiramente definido um TR inicial e com o mesmo foram rodadas 30 replicações de simulação do S-

DBR/MTA com a demanda média e ao final da simulação o TR real obtido com a simulação pode ser diferente do inicial, caso fosse diferente o TR real poderia ser aceito caso fosse maior que o TR inicial em no máximo um dia, caso não fosse aceito o TR real obtido seria utilizado como TR inicial até que esta condição fosse satisfeita. O TR médio encontrado, arredondado para cima, foi de três dias e o mesmo foi aplicado em todos os cenários simulados.

O EA inicial foi calculado através multiplicação da demanda média pelo TR médio e pelo fator de segurança (FS), considerando como TR médio três dias e como FS dois e para demanda média foram retirados os dados da Tabela 2. Na Tabela 6 estão os EA inicial calculados para os três níveis de demanda.

Tabela 6 - Estoque Alvo inicial para cada produto e nível de demanda.

<b>Nível demanda</b>	<b>Código</b>	<b>Demanda media diária</b>	<b>FS</b>	<b>TR</b>	<b>EA</b>
Demanda baixa	8164	26	2	3	<b>156</b>
	8166	18	2	3	<b>108</b>
	8167	9	2	3	<b>54</b>
	8168	11	2	3	<b>66</b>
	8175	7	2	3	<b>42</b>
	8177	7	2	3	<b>42</b>
	8178	12	2	3	<b>72</b>
	8180	6	2	3	<b>36</b>
Demanda média	8164	30	2	3	<b>180</b>
	8166	21	2	3	<b>126</b>
	8167	10	2	3	<b>60</b>
	8168	13	2	3	<b>78</b>
	8175	8	2	3	<b>48</b>
	8177	7	2	3	<b>42</b>
	8178	14	2	3	<b>84</b>
	8180	7	2	3	<b>42</b>
Demanda alta	8164	34	2	3	<b>204</b>
	8166	23	2	3	<b>138</b>
	8167	11	2	3	<b>66</b>
	8168	14	2	3	<b>84</b>
	8175	9	2	3	<b>54</b>
	8177	8	2	3	<b>48</b>
	8178	16	2	3	<b>96</b>
	8180	8	2	3	<b>48</b>

Fonte: Autor.

O simulador utilizado na pesquisa, Promodel®, possui funções que permitem simular a variações com base em parâmetros como média e desvio padrão. O tempo entre chegadas de pedidos, em média, é de 8 horas, para variar este valor foi aplicada uma função da distribuição exponencial, a qual recebeu o parâmetro da média (8 horas). Para simular a variação das quantidades de itens por pedido utilizou-se a função da distribuição lognormal, parametrizada com a demanda média diária e o desvio padrão, o desvio padrão foi calculado à partir da multiplicação do coeficiente de variação (CV) pela demanda média diária de cada produto. A variação nos tempos de processamento também utilizou a função da distribuição lognormal, parametrizada com os tempos médios de processamento e com o desvio padrão, o qual foi obtido através da multiplicação dos tempos médios de processamento pelo CV. No quadro 4 estão resumidos quais funções e parâmetros foram utilizados para variar o tempo entre chegadas, a quantidade de itens por pedido e os tempos de processamento.

Quadro 4 - Parâmetros e funções utilizadas para a geração de variabilidade.

Variável	Função da distribuição	Parâmetros
Tempo entre chegada dos pedidos	Exponencial	Média = 8 horas
Itens por pedido	Lognormal	Média = Tabela 2 Desvio padrão = CV (0,25 e 1,4) multiplicado pela média (Tabela 2)
Tempo de processamento	Lognormal	Média = Tabela 3 Desvio padrão = CV (1,04) multiplicado pela média (Tabela 3)

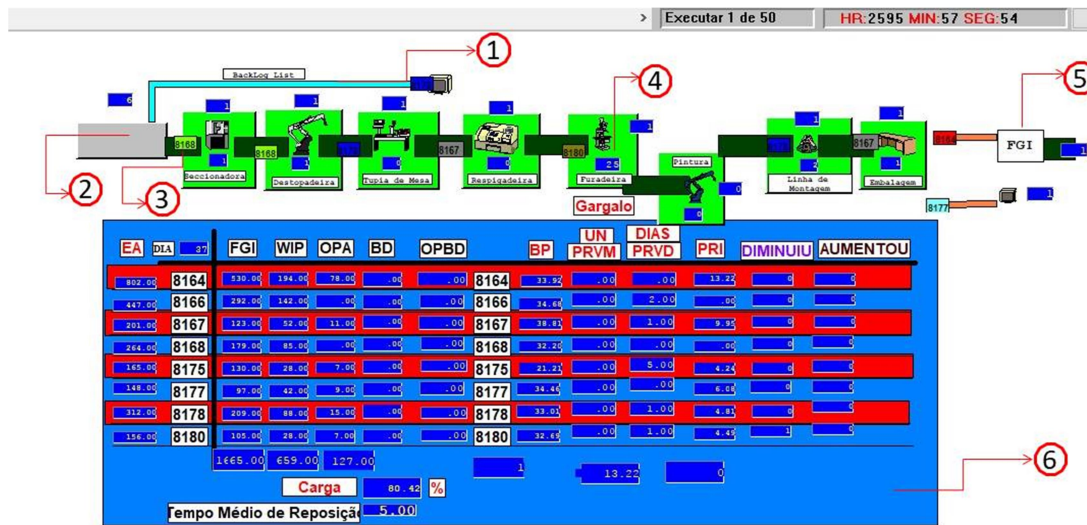
Fonte: Autor.

A distribuição lognormal foi escolhida, pois não apresenta valores negativos e apresenta uma cauda longa para a direita, portanto a mesma é um bom modelo para representar demanda (BROWN, 1959; JUAN et al., 2011; KAMATH; PAKKALA, 2002).

Pelas mesmas características também pode-se aplicar a distribuição lognormal para os tempos de processamento, assim como fez Hillier (2013) no seu trabalho.

A Figura 6 mostra o layout da linha de produção após sua implementação no promodel®.

Figura 6 - Layout da linha de produção simulada.



Fonte: Autor.

Cada número indica uma parte do sistema simulado, são elas:

1. Fila de ordens de produção aguardando liberação.
2. Local onde é feita a liberação das ordens de produção.
3. OP do produto 8168 liberada e pronta para ser processada pela primeira estação de trabalho, a seccionadora.
4. Contador de quantas OPs estão na fila da estação de trabalho, neste caso na fila da furadeira, o RRC do sistema
5. Estoque de produtos acabados (FGI)
6. Painel que centraliza as principais informações do sistema produtivo.

Para a validação do modelo, foram utilizadas duas técnicas distintas: na primeira foram comparados os resultados obtidos a partir do modelo simulado com os obtidos pelo modelo M/M/1 da teoria das filas, com taxa de chegada ( $\lambda$ ) e tempo médio de serviço ( $\mu$ ). Nesta técnica, foi comparado o tempo médio no sistema e o número de usuários no sistema de cada estação de trabalho. Para o cálculo do tempo médio no sistema, é necessário calcular a taxa de ocupação do sistema ( $\rho$ ), a qual é dada pela divisão da taxa de chegada ( $\lambda$ ) pelo tempo médio de serviço ( $\mu$ ) (ARENALES; ARMENTANO; MORABITO, 2007), conforme equação abaixo:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} \quad (4)$$

O tempo médio no sistema pode ser calculado pela equação 5:

$$E(W) = \frac{\rho}{\lambda * (1 - \rho)} \quad (5)$$

Já o número médio de usuários no sistema é dado pela equação 6:

$$E(L) = \lambda * E(W) \quad (6)$$

A segunda técnica utilizada para validação do modelo aplica a Lei de Little (equação 7), que relaciona a taxa de saída de produtos acabados da linha de produção (*Throughput* – TH), o tempo que uma ordem de produção leva para atravessar a linha (tempo de ciclo - CT) e o estoque de produtos em processamento médio (WIP) (SPEARMAN; HOPP, 2011).

$$WIP = TH * CT \quad (7)$$

Anteriormente a coleta dos dados da validação foi feito o cálculo do *warm-up* com dez replicações, o *warm-up* encontrado foi de 641 horas, onde o WIP médio fica mais estável.

Após o cálculo do tempo de *warm-up* foram realizadas mais dez replicações, coletando os dados após o *warm-up* e os mesmos foram comparados com os resultados obtidos pelo modelo da teoria das filas M/M/1, suas diferenças percentuais e os resultados obtidos pela Lei de Little, os resultados encontrados estão nas Tabelas 7, 8 e 9, respectivamente.



Tabela 7 - Comparativos dos resultados da simulação com os resultados obtidos pela teoria das filas.

Estações de trabalho	Resultados da simulação		Resultados do Modelo M/M/1	
	Tempo médio no sistema	Número de usuários no sistema	Tempo médio no sistema	Número de usuários no sistema
Seccionadora	0,1569	1,7647	0,1562	1,7654
Destopadeira	0,2221	2,4832	0,2204	2,4899
Tupia de Mesa	0,2119	2,3742	0,2101	2,3534
Respigadeira	0,0984	1,1137	0,0992	1,1140
Furadeira	0,2669	3,0147	0,2654	2,9957
Linha de Pintura	0,2234	1,2498	0,2235	1,2469
Linha de Montagem	0,1886	2,1142	0,1868	2,0933
Embalagem	0,1842	2,0019	0,1827	2,0211

Fonte: Autor.

Tabela 8 - Diferença absoluta e percentual dos resultados obtidos com a simulação e a teoria das filas.

Estações de trabalho	Resultados da simulação		Resultados do Modelo M/M/1	
	Tempo médio no sistema	Número de usuários no sistema	Tempo médio no sistema	Número de usuários no sistema
Seccionadora	0,0007	-0,0006	0,48%	-0,04%
Destopadeira	0,0017	-0,0067	0,77%	-0,27%
Tupia de Mesa	0,0018	0,0209	0,83%	0,88%
Respigadeira	-0,0008	-0,0003	-0,84%	-0,03%
Furadeira	0,0015	0,0189	0,56%	0,63%
Linha de Pintura	-0,0001	0,0029	-0,05%	0,23%
Linha de Montagem	0,0018	0,0210	0,95%	0,99%
Embalagem	0,0015	-0,0192	0,83%	-0,96%

Fonte: Autor.

Tabela 9 - Comparativo dos resultados obtidos na simulação com os resultados obtidos pela Lei de Little.

Fone do resultado	WIP	TH	CT
Simulação	222,35	109,12	2,03
Lei de Little	221,25	109,66	2,04
Diferença absoluta	1,1	-0,54	-0,01
Diferença percentual	0,004961	-0,004986	-0,004986

Fonte: Autor.

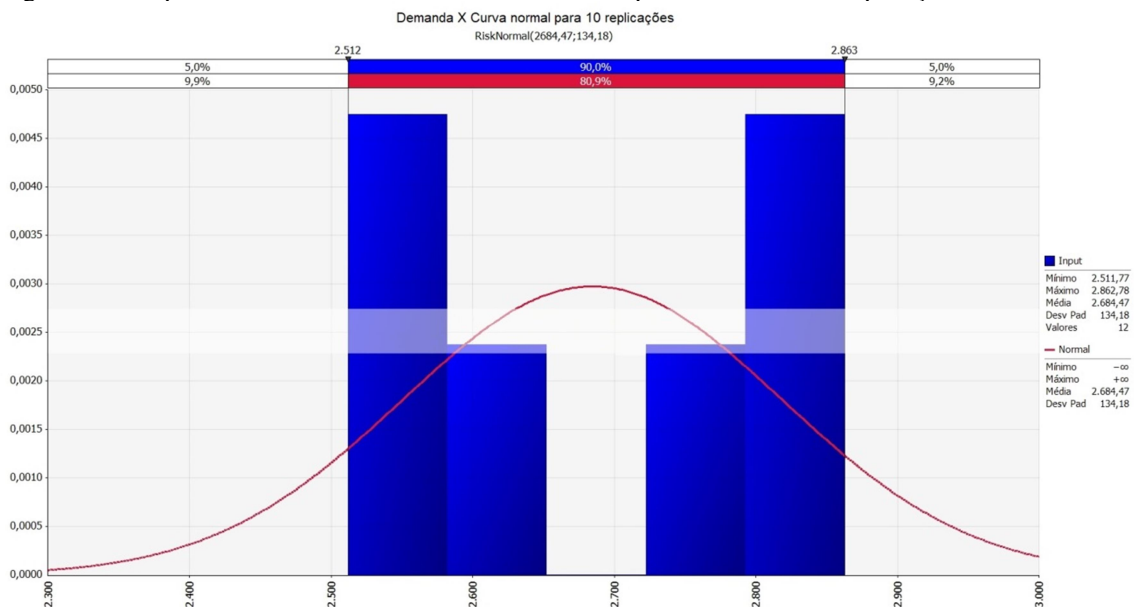
Como se pode visualizar nas tabelas 7 e 8 a diferença percentual entre os dados obtidos pela simulação e os resultados obtidos tanto pela teoria das filas quanto pela Lei de Little foi inferior a 1%.

O tempo de *warm-up* considerado para a simulação foi de 2304 horas, o que corresponde 1 ano de trabalho, esse período foi utilizado para garantir uma margem de

segurança e garantir que em todos os cenários e replicações a simulação possuiu um bom período de aquecimento.

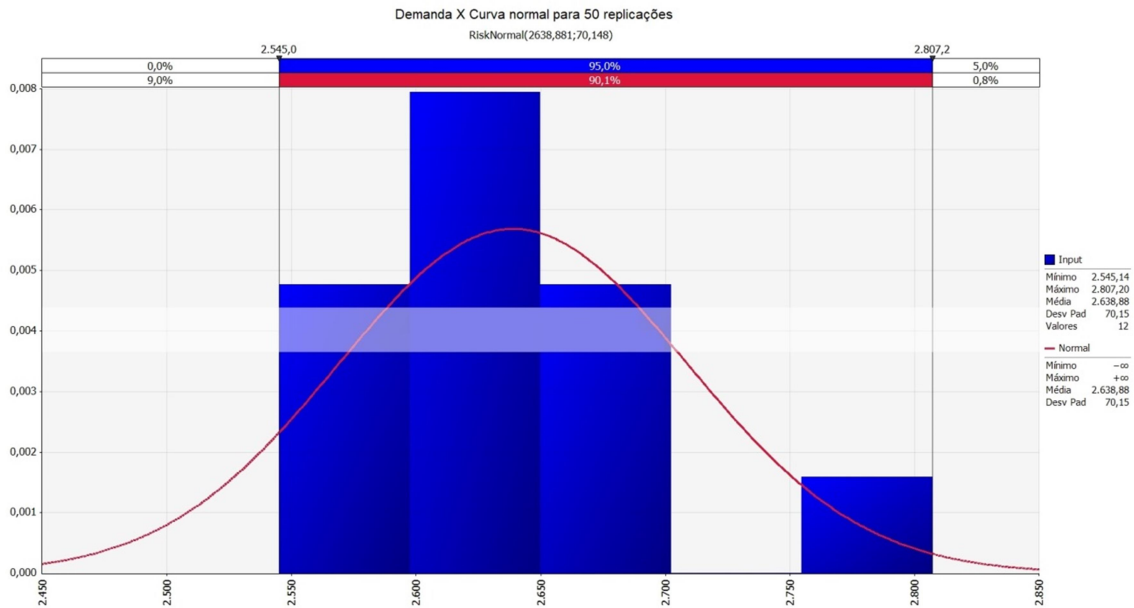
Para calcular o número de replicações necessárias foi utilizado o Teorema do Limite Central (TLC), segundo o qual, conforme o número de replicações aumenta, a distribuição se aproxima da normal (LEVINE et al., 2012). Primeiramente foi realizado os testes de aderência do valor médio da variável demanda total no tempo de simulação com a distribuição normal para 10 replicações, como sua aderência foi baixa (Figura 7) o número de replicações foi aumentado para 50 com o qual foram obtidos resultados com nível de significância igual ou superior a 0,05 para os testes do Chi-quadrado, Kolmogorov-Sirnov e Anderson-Darling (Figura 8). Portanto, este trabalho adotou como 50 o número de replicações dos modelos simulados.

Figura 7 - Comparativo demanda total com a curva normal para a média de 10 replicações.



Fonte: Autor.

Figura 8 - Comparativo demanda total com a curva normal para a média de 50 replicações.

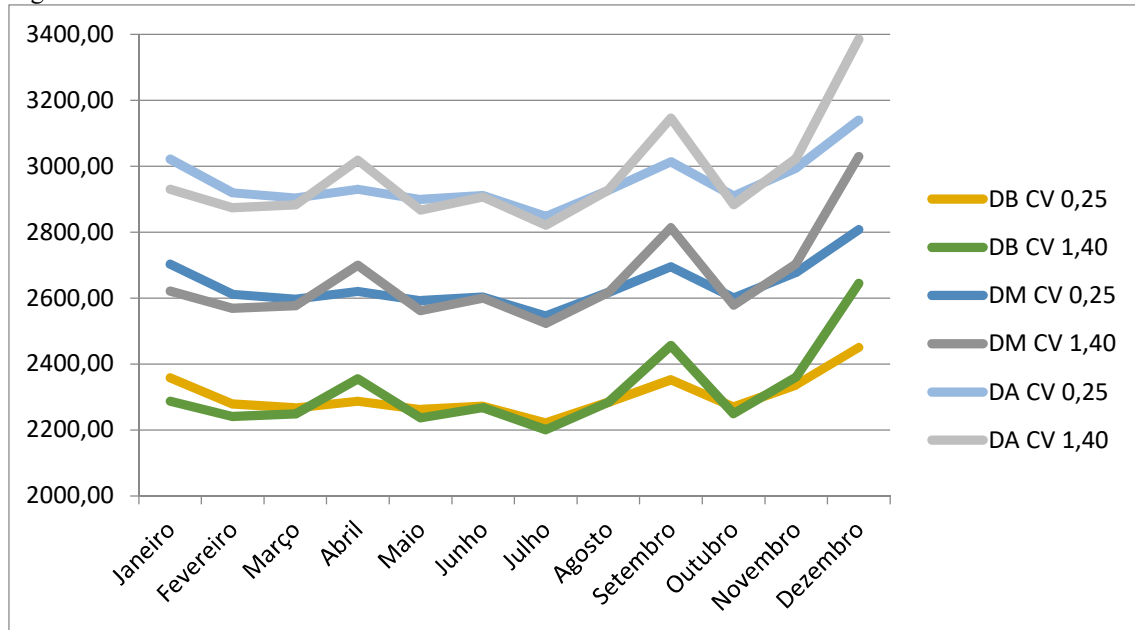


Fonte: Autor.

### 3.6 Definição dos cenários a serem simulados

Conforme mostra a Tabela 1, foram simulados seis cenários, obtidos através de três níveis de demanda, dois níveis de CV de demanda e um nível de CV dos tempos de processamento. Para os dois níveis de CV da demanda e o CV dos tempos de processamento, foi considerada a seguinte faixa de valores (SPEARMAN; HOPP, 2011): variabilidade baixa quando o coeficiente de variação (CV) é inferior a 0,75, média entre 0,75 e 1,33 e alta quando acima de 1,33. Nesta pesquisa foi utilizado o CV de 1,04 para as variabilidades nos tempos de processamento e foram utilizados CV iguais a 0,25 e 1,5 para as variabilidades da demanda. A figura 9 apresenta as variações da demanda média nos cenários.

Figura 9 - Demanda média em cada um dos cenários.



Fonte: Autor.

Para minimizar a influência dos mecanismos do S-DBR/MTA e possibilitar verificar o desempenho de sua heurística de sequenciamento de ordens de produção primeiramente foram realizadas 10 replicações do S-DBR/MTA completo para cada cenário e à partir dele foram extraídos os valores médios de EA. Estes valores médios de EA encontrados foram fixados e o mecanismo de gerenciamento dinâmico do pulmão (GDP) foi desativado e todas as simulações e análises seguintes foram feitas com o EA fixado nos valores contidos nas Tabelas 10, 11 e 12, para os cenários de demanda baixa, média e alta, respectivamente.

Tabela 10 - Estoque alvo fixo para os cenários de demanda baixa.

<b>Coefficiente de Variação</b>	<b>Código do produto</b>	<b>Estoque Alvo fixo</b>
0,25	8164	211
	8166	151
	8167	80
	8168	99
	8175	66
	8177	65
	8178	112
	8180	63
	1,40	8164
8166		204
8167		111
8168		134
8175		92
8177		95
8178		155
8180		87

Fonte: Autor.

Tabela 11 - Estoque alvo fixo para os cenários de demanda média.

<b>Coefficiente de Variação</b>	<b>Código do produto</b>	<b>Estoque Alvo fixo</b>
0,25	8164	287
	8166	195
	8167	97
	8168	132
	8175	78
	8177	71
	8178	142
	8180	77
	1,40	8164
8166		294
8167		139
8168		179
8175		112
8177		110
8178		201
8180		107

Fonte: Autor.

Tabela 12 - Estoque alvo fixo para os cenários de demanda alta.

Coefficiente de Variação	Código do produto	Estoque Alvo fixo
0,25	8164	589
	8166	347
	8167	153
	8168	201
	8175	127
	8177	113
	8178	249
	8180	123
	1,40	8164
8166		520
8167		240
8168		311
8175		199
8177		180
8178		377
8180		189

Fonte: Autor.

### 3.7 Análise dos resultados

Para a avaliação dos cenários, foi escolhido o indicador *fill rate*, que mede o atendimento da demanda a partir do estoque de produtos acabados (SILVER; PYKE; PETERSON, 1998), reforçando o próprio objetivo da lógica S-DBR/MTA, qual seja, a disponibilidade de produtos pronta-entrega. Como o EA foi mantido fixo durante as simulações, foi utilizado somente o *fill rate* como indicador de desempenho para cada regra de sequenciamento pesquisada.

Para avaliar os resultados da heurística do S-DBR/MTA, foram comparados os seus resultados com os obtidos a partir da heurística do SPT que, como foi mencionado anteriormente, foi escolhida por apresentar características ambivalentes à regra S-DBR/MTA. Por um lado, no SPT, é dada prioridade às ordens de produção mais rápidas, o que significa uma tendência que prioridades são dadas às ordens com menor quantidade de itens. A regra S-DBR/MTA, tende a priorizar aquelas com maior quantidade de itens, pois teriam níveis relativos mais baixos de estoques de produtos acabados. Por outro lado, um pressuposto do método S-DBR/MTA é que, para se manter estoques baixos e altos níveis de *fill rate*, os tempos de reposição devem ser

curtos. A regra SPT tende a proporcionar fluxos rápidos e tempos médios de permanência no chão de fábrica baixos.

A regra de sequenciamento FIFO foi escolhida por sua praticidade e simplicidade de uso em ambientes reais. Além disso, ela atende também uma outra premissa do método S-DBR/MTA: estoques devem ser repostos assim que forem consumidos. Desta forma, as ordens de reposição de estoques tenderiam a ser liberadas para o chão de fábrica segundo esta regra e, se nenhuma variação significativa ocorrer, ser mantida em todo o roteiro de produção.

A regra de sequenciamento *random* foi escolhida, por sua vez, para servir como base de comparação com as demais, pois consiste na escolha aleatória de qual ordem de produção fazer.

O *fill rate* foi analisado separadamente para cada demanda (baixa, média e alta), por meio de análises de variâncias, considerando o delineamento inteiramente ao acaso em esquema de parcela subdividida. Na parcela foram alocados os Coeficientes de variação e na subparcelas às regras de sequenciamento. Posteriormente as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Para satisfazer as pressuposições da análise de variância, os dados do *fill rate* foram transformados usando a transformação Box-Cox (BOX; COX, 1964). Essas análises foram feitas utilizando-se o software R versão 3.4.0 (R CORE TEAM; R FOUNDATION FOR STATISTICAL COMPUTING, 2017).

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 13 apresenta o *fill rate* médio dos seis cenários para cada uma das quatro regras de sequenciamento simuladas, nela pode-se observar que somente a regra SPT no cenário de demanda alta com alta variabilidade que possui um *fill rate* inferior a 90%. Também presente na Tabela 13 são os valores de desvio padrão do *fill rate* em cada um dos seis cenários, pode-se observar que os valores de desvio padrão são inferiores em todos os cenários com CV de demanda de 1,40 quando comparados com os cenários equivalentes de CV 0,25 e também podemos observar que com exceção do cenário de nível de demanda alta e CV de demanda 1,40 o S-DBR/MTA apresentou o menor desvio padrão para os seus valores de *fill rate*.

Tabela 13 - Valores médios de *fill rate*.

Cenário		Fill rate médio			
Nível demanda	CV	MTA (Desv. Pad.)	FIFO (Desv. Pad.)	Random (Desv. Pad.)	SPT (Desv. Pad.)
Baixa	0,25	99,95% (0,08%)	99,89% (0,14%)	99,87% (0,15%)	99,52% (0,36%)
	1,40	96,13% (1,62%)	95,37% (1,98%)	95,33% (2,04%)	93,95% (2,55%)
Média	0,25	99,97% (0,05%)	99,87% (0,14%)	99,85% (0,18%)	99,17% (0,91%)
	1,40	96,40% (2,27%)	94,95% (3,26%)	95,02% (3,35%)	92,94% (3,75%)
Alta	0,25	99,98% (0,08%)	99,08% (1,66%)	99,22% (1,01%)	96,01% (3,31%)
	1,40	94,28% (8,43%)	89,84% (7,95%)	90,57% (8,50%)	85,44% (7,53%)

Fonte: Autor.

Na tabela 14 estão apresentados os resultados das análises de variância dos valores de *fill rate* dos cenários com níveis baixo e médio de demanda. Estas análises não apresentaram diferença significativa na interação coeficiente de variação (fator principal) com as regras de sequenciamento (fatores secundários), porém indicaram diferença significativa entre os CV e entre as regras de sequenciamento. Posteriormente foi realizado o teste de Tukey para verificar se existe diferença significativa entre as médias dos valores de *fill rate* considerando os CV e as regras de sequenciamento. Os resultados obtidos pelo teste de Tukey podem ser visualizados na tabela 15.



Tabela 14 - ANOVA dos cenários de demanda baixa e média.

Demanda	Fonte da variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados médios	F	P valor
Baixa	F1	1	3.2898	3.2898	615.08	<2e <sup>-16</sup> ***
	Erro a	98	0.4952	0.0051		
	F2	3	0.1286	0.0429	242.02	<2e <sup>-16</sup> ***
	F1 X F2	3	0.0006	0.0002	1.10	0.3499
	Erro b	294	0.0521	0.0002		
	Total	399	3.9663			
Média	F1	1	3.2616	3.2616	338.85	<2e <sup>-16</sup> ***
	Erro a	98	0.9433	0.0096		
	F2	3	0.2853	0.0951	253.21	<2e <sup>-16</sup> ***
	F1 X F2	3	0.0026	0.0009	2.30	0.07725
	Erro b	294	0.1104	0.0004		
	Total	399	4.6032			

F1: Fator principal (CV); F2: Fator secundário (regra de sequenciamento). Fonte: Autor.  
 \*\*\* Significativo pelo teste F (P<0,001).

Tabela 15 - Teste de Tukey dos cenários de demanda baixa e média

Demanda	Fator	Tratamento	Média
Baixa	F1	0,25	1.5367 <sup>a</sup>
		1,40	1.3554 <sup>b</sup>
	F2	MTA	1.4667 <sup>a</sup>
		FIFO	1.4511 <sup>b</sup>
		<i>Random</i>	1.4491 <sup>b</sup>
		SPT	1.4173 <sup>c</sup>
Média	F1	0,25	1.5328 <sup>a</sup>
		1,40	1.3522 <sup>b</sup>
	F2	MTA	1.4746 <sup>a</sup>
		<i>Random</i>	1.4475 <sup>b</sup>
		FIFO	1.4473 <sup>b</sup>
		SPT	1.4004 <sup>c</sup>

F1: CV (fator principal); F2: Regra de sequenciamento (fator secundário). Fonte: Autor.  
 a, b, c Médias seguidas por letras diferentes diferem a 5% pelo teste de Tukey

Os resultados obtidos pelos cenários de demanda média e baixa indicam maiores valores da média de *fill rate* para a regra de sequenciamento do S-DBR/MTA e também para os cenários de menor CV da demanda, portanto quando comparamos as regras de sequenciamento em um destes cenários o S-DBR/MTA apresenta melhor atendimento da demanda à partir do estoque de produtos acabados que as outras três regras de sequenciamento. Quando comparamos os resultados dos valores médios de *fill*

rate para o CV 0,25 e 1,40 pode-se perceber que os cenários que possuem CV 0,25 apresentam melhor atendimento da demanda à partir do estoque de produtos acabados que os cenários com CV da demanda 1,40.

Na tabela 16 verifica-se o resultado das análises de variância dos valores de *fill rate* dos cenários com nível alto de demanda. Estas análises indicaram diferença significativa na interação entre os CV e as regras de sequenciamento. Como houve diferença significativa na interação, foi realizado o desdobramento da interação. Na tabela 17 encontra-se a ANOVA dos desdobramentos das interações de CV com as regras de sequenciamento para a demanda alta. Na tabela 18 encontra-se o teste de Tukey para cada uma destas interações.

Tabela 16 - ANOVA dos cenários de demanda alta.

Fonte da variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados médios	F	P valor
F1	1	26.595	26.5949	162.021	$<2e^{-16}$ ***
Erro a	98	16.086	0.1641		
F2	3	10.199	3.3998	176.562	$<2e^{-16}$ ***
F1 X F2	3	0.558	0.1860	9.659	$4e^{-06}$ ***
Erro b	294	5.661	0.0193		
Total	339	59.100			

F1: Fator principal (CV); F2: Fator secundário (regra de sequenciamento). Fonte: Autor.  
\*\*\* Significativo pelo teste F ( $P < 0,001$ ).

Tabela 17 - ANOVA dos desdobramentos para a demanda alta.

Fonte da variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados médios	F	P valor
CV dentro de cada Regra de sequenciamento					
MTA	1	5.991946	5.991946	108.005796	0***
FIFO	1	8.849579	8.849579	159.515104	0***
Random	1	8.197696	8.197696	147.764803	0***
SPT	1	4.113636	4.113636	74.148964	0***
Erro combinado	172.0155	9.543076	0.055478		
Regra de sequenciamento dentro de cada CV					
F2 : F1	3	4.179009	1.393003	72.341236	0***
F2 : F1	3	6.578475	2.192825	113.87499	0***
Erro b	294	5.661193	0.019256		

F1: Fator principal (CV); F2: Fator secundário (regra de sequenciamento). Fonte: Autor.  
\*\*\* Significativo pelo teste F ( $P < 0,001$ ).

Tabela 18 - Teste de Tukey dos desdobramentos para a demanda alta.

Fator	Tratamento	Média
CV dentro de cada Regra de sequenciamento		
MTA	0,25	0.9947 <sup>a</sup>
	1,40	0.5051 <sup>b</sup>
FIFO	0,25	0.8560 <sup>a</sup>
	1,40	0.2610 <sup>b</sup>
<i>Random</i>	0,25	0.8580 <sup>a</sup>
	1,40	0.2854 <sup>b</sup>
SPT	0,25	0.5047 <sup>a</sup>
	1,40	0.0990 <sup>b</sup>
Regra de sequenciamento dentro de cada CV		
CV 0,25	MTA	0.9947 <sup>a</sup>
	<i>Random</i>	0.8580 <sup>b</sup>
	FIFO	0.8560 <sup>b</sup>
	SPT	0.5047 <sup>c</sup>
CV 1,40	MTA	0.5051 <sup>a</sup>
	<i>Random</i>	0.2854 <sup>b</sup>
	FIFO	0.2610 <sup>b</sup>
	SPT	0.0990 <sup>c</sup>

F1: CV (fator principal); F2: Regra de sequenciamento (fator secundário). Fonte: Autor.

<sup>a, b, c</sup> Médias seguidas por letras diferentes diferem a 5% pelo teste de Tukey

Nos cenários com nível baixo e médio de demanda, o teste de Tukey confirmou a diferença significativa entre os *fill rate* dos dois coeficientes de variação. Em todos os cenários de menor CV da demanda, o valor médio de *fill rate* foi superior, indicando que em situações de demanda com menor variação, o sistema produtivo apresenta um melhor atendimento da demanda a partir do estoque de produtos acabados. Nestes mesmos cenários, o teste de Tukey indicou que não existe diferença significativa entre as médias de *fill rate* para as regras FIFO e *random*. O teste de Tukey também apresentou que as regras S-DBR/MTA e SPT diferem das demais. Nota-se que os valores médios são maiores para a regra S-DBR/MTA. Com relação às demais, a heurística SPT apresentou o pior valor médio de *fill rate*. Com isso, pode-se afirmar que, no modelo simulado, demandas bem comportadas apresentam melhor *fill rate* e também que a heurística S-DBR/MTA apresenta melhor *fill rate* que as demais regras estudadas.

Após realização do teste de Tukey, os cenários com nível alto de demanda apresentaram interação significativa entre o coeficiente de variação e a regra de

sequenciamento aplicada. Dessa forma, procederam-se os desdobramentos da interação para estudar os efeitos dos coeficientes de variação em cada regra e também os efeitos das regras dentro de cada Coeficiente de variação. Nas quatro regras avaliadas, o coeficiente de variação da demanda de 0,25 apresentou diferença significativa quando comparado com o CV de 1,4 e em todos os casos os valores médios de *fill rate* foram superiores nos cenários com CV de 0,25. Este fato que reafirma os resultados encontrados nos cenários de menor demanda. Quando se realiza o desdobramento dos métodos com relação aos coeficientes de variação, o teste de Tukey indicou que não existe diferença significativa entre as médias de *fill rate* para as regras FIFO e *random* para ambos os valores de CV e que as regras S-DBR/MTA e SPT diferem das demais. Nota-se que os valores médios de *fill rate* são maiores para a regra S-DBR/MTA. Com relação às demais, a heurística SPT apresentou o pior valor médio de *fill rate*, fato que surpreende dado o potencial para bons resultados possibilitados pela heurística SPT.

## 5 CONCLUSÕES

A maneira do S-DBR/MTA gerenciar a produção é a forma como o TOC lida com os ambientes MTS, porém com um importante componente: garantia imediata de alguns produtos para alguns mercados específicos, conseguindo assim vantagem competitiva, conseguindo assim aumento de vendas, com isso mais capital que irá auxiliar a sustentar a vantagem competitiva alcançada (LANG, 2010).

Os resultados obtidos evidenciam que a lógica de sequenciamento da produção do método S-DBR/MTA favorece a disponibilidade de produtos acabados em todos os cenários simulados, portanto, gerariam vantagem competitiva e aumento das vendas para a empresa. Os mesmos resultados apontam para um desempenho relativamente ruim para a regra SPT.

Dado o potencial para bons resultados possibilitados pela heurística SPT, que visa a acelerar o fluxo de produção, as conclusões desta pesquisa podem surpreender em um primeiro momento (BAKER; TRIETSCH, 2009; BOBELIN et al., 2016; ZHU; WANG, 2017). Uma explicação para isso está no próprio bom desempenho obtido pela regra S-DBR/MTA. Como dito anteriormente, o uso do Buffer Status como definidor de prioridades aproxima esta regra daquela inversa do SPT, o LPT (*Longest Processing Time*). Assim, se a regra recomendada pelo sistema S-DBR/MTA oferece os melhores resultados em termos de *fill rate*, era de esperar que a regra SPT obtivesse, pelo seu antagonismo, resultados inferiores. Pesquisas futuras poderiam explorar esta percepção, incluindo a regra LPT no planejamento de experimentos.

Também é importante destacar que todas as ordens de produção foram geradas seguindo a lógica S-DBR/MTA, ou seja: o que é consumido hoje deve ser substituído amanhã (SCHRAGENHEIM, 2010). Porém quando a carga no RRC é alta a liberação de novas ordens de produção deve seguir o BS e enquanto estas ordens aguardam sua liberação as quantidades e sequências dos produtos podem diferir do consumo real (SCHRAGENHEIM; DETTEMER; PATTERSON, 2009). As ordens de produção vão aumentando conforme elas aguardam a sua liberação, conseqüentemente as mesmas ordens apresentam menor FGI o que aumenta as suas prioridades para liberação, fazendo que ordens maiores sejam liberadas anteriormente a ordens menores. Após liberadas para o chão de fábrica, as ordens seguem as quatro regras avaliadas nesta pesquisa. Este fato pode ter afetado a performance das outras regras, pois como o SPT minimiza o tempo de fluxo médio ao sequenciar as ordens de produção em ordem

crescente dos seus tempos de processamento (BAKER; TRIETSCH, 2009; BOBELIN et al., 2016; BRUNO; COFFMAN; SETHI, 1973; ZHU; WANG, 2017). As ordens maiores, ou seja com menor estoque em forma de FGI, não são priorizadas. Como a regra de sequenciamento FIFO processa as tarefas na mesma sequencia que elas chegam à estação de trabalho (DAUZÈRE-PÉRÈS; LASSERRE, 1994) e as ordens de produção são liberadas na sequencia de maior importância com relação ao BS no momento da abertura da OP, caso o BS não se altere durante o fluxo da OP pela fábrica a mesma estará seguindo a mesma ordem de sequenciamento que a regra do S-DBR/MTA.

Outra limitação da pesquisa é que o sistema S-DBR/MTA não foi simulado em sua plenitude, pois o método GDP foi mantido desligado ao longo das simulações. Ainda que a razão para isso tenha sido manter sob controle a quantidade de estoque no sistema, futuras pesquisas poderiam avaliar o desempenho das regras de sequenciamento com o mecanismo do gerenciamento dinâmico do pulmão ativo, o que levaria a avaliar o impacto simultâneo sobre duas variáveis dependentes (nível de serviço e nível total de estoque).

Por fim, novas pesquisas poderiam cotejar o método S-DBR/MTA contra outras regras de sequenciamento, além daquelas aqui estudadas, assim como segundo outros parâmetros, como a adoção de mais CV para a demanda e para o tempo de processamento dos recursos fabris.

## REFERÊNCIAS

AQUILANO, N. J.; CHASE, R. B.; JACOBS, F. R. Administração da produção para a vantagem competitiva. **Tradução Taylor Brian. Porto Alegre: Bookmann, 2006.**

ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R. **Pesquisa operacional: para cursos de engenharia.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

BAKER, K. R. **Introduction to sequencing and scheduling.** New Jersey: John Wiley & Sons, 1974.

BAKER, K. R.; BERTRAND, J. W. M. A dynamic priority rule for scheduling against due-dates. **Journal of Operations Management**, v. 3, n. 1, p. 37–42, 1982.

BAKER, K. R.; TRIETSCH, D. **Principles of Sequencing and Scheduling.** New Jersey: Wiley, 2009.

BANKS, J. **Handbook of simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice.** [s.l.] John Wiley & Sons, 1998.

BARNARD, A. Continuous improvement and auditing. In: **Cox III, J. F. and Schleier, J. G. (Org.). Theory of Constraints Handbook.** New York: McGraw-Hill, 2010. p. 403–454.

BOBELIN, L. et al. Shortest Processing Time First Algorithm for Hadoop. **Proceedings - 3rd IEEE International Conference on Cyber Security and Cloud Computing, CSCloud 2016 and 2nd IEEE International Conference of Scalable and Smart Cloud, SSC 2016**, p. 119–123, 2016.

BOEIRA, L. DO A. Simulação computacional: um estudo de caso em uma empresa fabricante de câmaras de ar pneumáticas. 2008.

BOX, G. E. P.; COX, D. R. An analysis of transformations. **Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)**, p. 211–252, 1964.

BROWN, R. G. **Statistical forecasting for inventory control.** [s.l.] McGraw/Hill, 1959.

BRUNO, J.; COFFMAN, E. G.; SETHI, R. Scheduling independent tasks to reduce mean finishing-time. **ACM SIGOPS Operating Systems Review**, v. 7, n. 4, p. 102–103, 1973.

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

BURBIDGE, J. L. **Planejamento e controle da produção.** São Paulo: Atlas, 1988.

CAIÇARA JUNIOR, C. **Sistemas integrados de gestão-ERP.** [s.l.] Editora Ibpex, 2008.

CAUCHICK MIGUEL, P. A. **Metodologia De Pesquisa Em Engenharia De Produção E Gestão De Operações**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.

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.

CHANG, Y.-C.; HUANG, W.-T. Using simplified drum-buffer-rope for re-entrant flow shop scheduling in a random environment. **African Journal of Business Management**, v. 5, n. 26, p. 10796, 2011.

CHANG, Y.-C.; HUANG, W.-T. An enhanced model for SDBR in a random reentrant flow shop environment. **International Journal of Production Research**, v. 52, n. 6, p. 1808–1826, 2014.

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

DAUZÈRE-PÉRÈS, S.; LASSERRE, J.-B. **An Integrated Approach in Production Planning and Scheduling**. New York: Springer, 1994.

DAUZÈRE-PÉRÈS, S.; LASSERRE, J. On the importance of sequencing decisions in production planning and scheduling. **International transactions in operational research**, v. 9, n. 6, p. 779–793, 2002.

FERNANDES, F. C. F.; GODINHO FILHO, M. Sistemas de coordenação de ordens: revisão, classificação, funcionamento e aplicabilidade. **Gestão & Produção**, v. 14, n. 2, p. 337–352, 2007.

FERNANDES, F. C. F.; GODINHO FILHO, M. **Planejamento e controle da produção: dos fundamentos ao essencial**. São Paulo: Atlas, 2010.

FRENCH, S. **Sequencing and scheduling: an introduction to the mathematics of the job-shop**. [s.l.] Ellis Horwood Ltd, Publisher, 1982.

GAVIRA, M. DE O. **Simulação computacional como uma ferramenta de aquisição de conhecimento**. Universidade de São Paulo, , 2003.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2010.

GOGG, T. J.; MOTT, J. R. A. **Improve quality and productivity with simulation**. [s.l.] Society for Computer Simulation, 1992.

GOLDRATT, E. M. Standing on the shoulders of giants: production concepts versus production applications. The Hitachi Tool Engineering example. **Gestão & Produção**, v. 16, n. 3, p. 333–343, set. 2009.

GOLDRATT, E. M.; COX, J. **The goal: a process of ongoing improvement**. New York: Routledge, 2016.



GÜNALAY, Y. Efficient management of production-inventory system in a multi-item manufacturing facility: MTS vs. MTO. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 54, n. 9–12, p. 1179–1186, 2011.

GUPTA, A.; BHARDWAJ, A.; KANDA, A. Fundamental concepts of Theory of Constraints: An emerging philosophy. **Measurement**, v. 5352, p. 15593, 2010.

HERRMANN, J. W. **Handbook of production scheduling**. New York: Springer, 2006. v. 89

HILLIER, M. Designing unpaced production lines to optimize throughput and work-in-process inventory. **IIE Transactions**, v. 45, n. 5, p. 516–527, 2013.

JACKSON, J. R. **Scheduling a production line to minimize maximum tardiness**. [s.l.] DTIC Document, 1955.

JUAN, A. et al. Using safety stocks and simulation to solve the vehicle routing problem with stochastic demands. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 19, n. 5, p. 751–765, 2011.

KAMATH, K. R.; PAKKALA, T. P. M. A Bayesian approach to a dynamic inventory model under an unknown demand distribution. **Computers & Operations Research**, v. 29, n. 4, p. 403–422, 2002.

KIM, S.; COX, J. F.; MABIN, V. J. An exploratory study of protective inventory in a re-entrant line with protective capacity. **International Journal of Production Research**, v. 48, n. 14, p. 4153–4178, 2010.

LANG, L. Mafia Offers: dealing with a market constraint. In: Cox III, J. F. and Schleier, J. G. (Org.). **Theory of Constraints Handbook**. In: New York: McGraw-Hill, 2010. p. 603–628.

LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation Modeling & Analysis**. New York: McGraw-Hill, 2000.

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

LENSTRA, J. K.; KAN, A. H. G. R.; BRUCKER, P. Complexity of machine scheduling problems. **Annals of discrete mathematics**, v. 1, p. 343–362, 1977.

LEUNG, J. Y. T. **Handbook of scheduling: algorithms, models, and performance analysis**. Boca Raton: CRC Press, 2004.

LEVINE, D. M. et al. **Estatística: teoria e aplicações. Usando o Microsoft Excel em português**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

LIU, C. L.; LAYLAND, J. W. Scheduling algorithms for multiprogramming in a hard-real-time environment. **Journal of the ACM (JACM)**, v. 20, n. 1, p. 46–61, 1973.

MACCARTHY, B. L.; LIU, J. Addressing the gap in scheduling research: a review of optimization and heuristic methods in production scheduling. **The International Journal of Production Research**, v. 31, n. 1, p. 59–79, 1993.

NAGANO, M. S.; BRANCO, F. J. C.; MOCCELLIN, J. V. Soluções de alto desempenho para a programação da produção flow shop. **Gepros: Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, v. 4, n. 2, p. 11, 2009.

PACHECO, R. F.; SANTORO, M. C. Proposta de classificação hierarquizada dos modelos de solução para o problema de job shop scheduling. **Gestão & Produção**, v. 6, n. 1, p. 1–15, 1999.

PERGHER, I.; VACCARO, G. L. R. Work in process level definition: a method based on computer simulation and electre tri. **Production**, v. 24, n. 3, p. 536–547, 2014.

PINEDO, M. **Planning and scheduling in manufacturing and services**. New York: Springer, 2005. v. 24

PINEDO, M. **Scheduling**. New York: Springer, 2015.

PINEDO, M. L. **Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems**. New York: Prentice Hall, 2008.

PIRES, S. R. I. **Gestão Estratégica da Produção**. Piracicaba: UNIMEP, 1995.

PIRES, S. R. I. **Gestão da Cadeia de Suprimentos (Supply Chain Management): Conceitos, Estratégias, Práticas e Casos**. São Paulo: Atlas, 2009.

PRITSKER, A. B.; SIGAL, C. E.; HAMMESFAHR, R. D. **SLAM II-Network Models for Decision Support**. [s.l.] Prentice Hall Professional Technical Reference, 1989.

R CORE TEAM; R FOUNDATION FOR STATISTICAL COMPUTING. **R: A language and environment for statistical computing** Vienna, Austria, 2017.

RAHMAN, S. The theory of constraints' thinking process approach to developing strategies in supply chains. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 32, n. 10, p. 809–828, 2002.

SCHRAGENHEIM, E. **Make-to-stock under drum-buffer-rope and buffer management methodology**. Proceedings of the international conference—the educational society for resource management (APICS), Nashville, TN. **Anais...**2002

SCHRAGENHEIM, E. Managing Make-to-Stock and the concept of Make-to-Availability. In: **Cox III, J. F.; Schleier, J. G. (Org.). Theory of Constraints Handbook**. New York: McGraw-Hill, 2010. p. 239–264.

SCHRAGENHEIM, E. M.; DETTEMER, H. W. **Manufacturing at Warp Speed**. Boca Raton: Lucie Press, 2001.

SCHRAGENHEIM, E. M.; DETTEMER, H. W.; PATTERSON, J. W. **Supply chain management at warp speed**. Boca Raton: Taylor & Francis, 2009.

SILVER, E.; PYKE, D. F.; PETERSON, R. **Inventory management and production planning and scheduling**. New York: Wiley, 1998.

SIPPER, D.; BULFIN, R. L. **Production: Planning, Control, and Integration**. New York: McGraw-Hill, 1997.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da produção**. São Paulo: Atlas, 2002.

SMITH, W. E. Various optimizers for single-stage production. **Naval Research Logistics Quarterly**, v. 3, n. 1-2, p. 59–66, 1956.

SOUTO JUNIOR, A. K. D.; LOCH, G. V.; VELEDA MOITA, M. H. Simulação computacional para o auxílio à tomada de decisão: um estudo de caso na indústria de aparelhos eletrônicos no Pólo Industrial de Manaus. **INGEPRO-Inovação, Gestão e Produção**, v. 1, n. 9, p. 48–55, 2009.

SOUZA, F. B.; BAPTISTA, H. R. Proposal of enhancement for the Simplified Drum-Buffer-Ropemethod applied to make-to-order production environments. **Gestão & Produção**, v. 17, n. 4, p. 735–746, 2010.

SOUZA, F. B. DE; PIRES, S. R. I. Making to availability: an application of the Theory of Constraints in make-to-stock environments. **Gestão & produção**, v. 21, n. 1, p. 65–76, 2014.

SPEARMAN, M. L.; HOPP, W. J. **Factory physics**. Long Grove: Waveland Press, 2011.

TAVARES NETO, R. F.; GODINHO FILHO, M.; DA SILVA, F. M. An ant colony optimization approach for the parallel machine scheduling problem with outsourcing allowed. **Journal of intelligent manufacturing**, v. 26, n. 3, p. 527–538, 2015.

TUBINO, D. F. **Planejamento e controle da produção: teoria e prática**. São Paulo: Atlas, 2007.

ZACCARELLI, S. B. **Programação e controle de produção**. São Paulo: Livaria Pioneira, 1979.

ZHU, W.; WANG, B. New Robust Single Machine Scheduling to Hedge against Processing Time Uncertainty. p. 2418–2423, 2017.