

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

HUMBERTO GOVONI

**Análise de estratégias de melhorias de recursos produtivos em ambientes
MTS gerenciados pelo método S-DBR**

Bauru
2018

HUMBERTO GOVONI

**Análise de estratégias de melhorias de recursos produtivos em ambientes
MTS gerenciados pelo método S-DBR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, campus de Bauru, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Gestão de Sistemas Produtivos

Orientador: Prof. Dr. Fernando Bernardi de Souza

Bauru
2018

Govoni, Humberto.

Análise de estratégias de melhorias de recursos produtivos em ambientes MTS gerenciados pelo método S-DBR / Humberto Govoni, 2018

84 f. : il.

Orientador: Fernando Bernardi de Souza

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2018

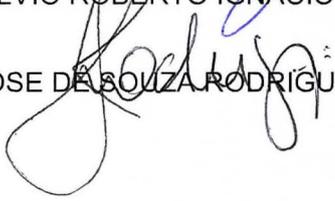
1. Melhoria contínua. 2. Teoria das Restrições. 3. Tambor-pulmão-corda simplificado. 4. Produzir para disponibilidade. 5. Simulação. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

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

Aos 07 dias do mês de dezembro do ano de 2018, às 09:00 horas, no(a) Anfiteatro da Pós-graduação / 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 - UNESP, Prof. Dr. SILVIO ROBERTO IGNACIO PIRES do(a) Departamento de Produção / Universidade Metodista de Piracicaba, Prof. Dr. JOSE DE SOUZA RODRIGUES do(a) Departamento de Engenharia de Produção / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de HUMBERTO GOVONI, intitulada **ANÁLISE DE ESTRATÉGIAS DE MELHORIAS DE RECURSOS PRODUTIVOS EM AMBIENTES MTS GERENCIADOS PELO MÉTODO S-DBR**. 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. SILVIO ROBERTO IGNACIO PIRES


Prof. Dr. JOSE DE SOUZA RODRIGUES

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fernando Bernardi de Souza, pela oportunidade, ensinamentos e incentivo oferecidos ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus pais, Hilário e Vera, e minha namorada, Cristiane Silva, que me apoiaram em todos os momentos desta jornada.

Ao colega Robson Flávio Castro, pelas discussões e contribuição à pesquisa.

Aos Profs. Drs. Antônio Fernando Crepaldi, José de Souza Rodrigues e Silvio Roberto Ignácio Pires, os quais fizeram parte da Comissão Examinadora para o Exame Geral de Qualificação e/ou Defesa de Dissertação, pelas grandes contribuições oferecidas a este trabalho.

A todos os familiares, amigos e colegas que incentivaram em todos os momentos.

RESUMO

A análise do comportamento do fluxo das ordens de produção e dos recursos que compõem um sistema produtivo oferece um indicativo de onde se deve atuar para melhorar este sistema. A Teoria das Restrições (*Theory of Constraints – TOC*) indica três métodos de focalização de melhorias de recursos produtivos que impactam globalmente o sistema. Este trabalho busca avaliar o desempenho de cinco métodos de melhoria, incluindo os indicados pela TOC, em um ambiente de produção para estoque (*make-to-stock – MTS*) utilizando-se de simulação computacional. Para isto, estas abordagens são simuladas em seis configurações de linha de produção e o desempenho é medido em termos de Tempo de Ciclo (*Cycle Time – CT*) e Taxa de Preenchimento de Pedidos (*Fill Rate – FR*). Os resultados indicam que, em sistemas balanceados, a melhor abordagem de melhoria a ser utilizada é a que atua em todos os recursos simultaneamente. Em ambientes desbalanceados, por outro lado, é necessário utilizar um método que foca melhorias em um único recurso, como o método de nível de ocupação, estoque em processo ou *Buffer Management*. Neste caso, a focalização pelo nível de ocupação da máquina trouxe mais benefícios ao sistema.

Palavras-chave: Melhoria contínua. Teoria das Restrições. Tambor-pulmão-corda simplificado. Produzir para disponibilidade. Simulação.

ABSTRACT

A behavioral analysis of the flow of production orders and resources that form a production system provides an indication of where to improve this system. The Theory of Constraints (TOC) suggests three approaches for identifying and improving resource constraints aiming to entirely affect the system: based on the largest queue of work-in-progress, the highest utilization level, and using the buffer management method. This study aims to assess the performance of these approaches comparing them with each other and with two others: dispersed improvements in all the resources and random improvements. Data was taken and analyzed from a simulated make-to-stock (MTS) environment, managed using the Simplified Drum Buffer Rope (S-DBR) method. For this, each improvement approach is simulated in six production line configurations and performance is measured in terms of Cycle Time (CT) and Fill Rate (FR). The results indicate that, in balanced systems, scattered improvements in all resources allowed better results than all three approaches recommended by TOC. In unbalanced environments, on the other hand, the focus on occupancy level exceeded all the other four approaches assessed.

Keywords: *Continuous improvement. Theory of Constraints. Simplified Drum Buffer Rope. Make-to-Availability. Simulation.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Melhoria radical x melhoria incremental.....	20
Figura 2 - As curvas vermelha e verde de potencial inerente.....	27
Figura 3 - Pulmões no DBR	32
Figura 4 - Restrição de capacidade em períodos de baixa e alta demanda.....	33
Figura 5 - Pulmão no S-DBR	34
Figura 6 - Carga planejada.....	35
Figura 7 - Liberação e provável conclusão das ordens de produção	36
Figura 8 - Prazo de entrega padrão maior do que o de conclusão da ordem de produção	37
Figura 9 - Pulmão no S-DBR/MTA	38
Figura 10 - Estoque alvo.....	39
Figura 11 - Ajustes no nível do Pulmão	41
Figura 12 - Proporção das cores das ordens de produção em um determinado momento	43
Figura 13 - Processo de melhoria contínua segundo a TOC	45
Figura 14 - Fluxograma do processo produtivo utilizado neste trabalho	48
Figura 15 - Ocupação dos recursos nos cenários propostos	53
Figura 16 - Tempo de ciclo médio	58
Figura 17 - Tempo de Ciclo com carga diária de 95%	59
Figura 18 - <i>Boxplots</i> da variável Tempo de Ciclo	61
Figura 19 - Taxa de preenchimento de pedidos.....	65
Figura 20 - <i>Fill Rate</i> com carga diária de 95%.....	65
Figura 21 - <i>Boxplots</i> da variável <i>Fill Rate</i>	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tempos médios de processamento, em horas (Cenário Original).....	52
Tabela 2 - Carga diária dos recursos, em horas, e taxa diária de ocupação (Cenário Original)	52
Tabela 3 - Teste de normalidade Shapiro-Wilk para a variável Tempo de Ciclo	60
Tabela 4 - Resultado do teste estatístico da variável Tempo de Ciclo - Cenários balanceados.....	62
Tabela 5 - Resultado do teste estatístico da variável Tempo de Ciclo - Cenários desbalanceados	63
Tabela 6 - Teste de normalidade Shapiro-Wilk para a variável <i>Fill Rate</i>	67
Tabela 7 - Resultado do teste estatístico da variável <i>Fill Rate</i> - Cenários balanceados.....	69
Tabela 8 - Resultado do teste estatístico da variável <i>Fill Rate</i> - Cenários desbalanceados	70
Tabela 9 - Comparação das variáveis em conjunto - Cenários balanceados	71
Tabela 10 - Comparação das variáveis em conjunto - Cenários desbalanceados.....	72
Tabela 11 - Tempos médios de processamento, em horas (Cenário 1)	82
Tabela 12 - Tempos médios de processamento, em horas (Cenário 2)	82
Tabela 13 - Tempos médios de processamento, em horas (Cenário 3)	82
Tabela 14 - Tempos médios de processamento, em horas (Cenário 4)	83
Tabela 15 - Tempos médios de processamento, em horas (Cenário 5)	83
Tabela 16 - Tempos médios de processamento, em horas (Cenário 6)	83
Tabela 17 - Carga diária dos recursos, em horas, e taxa diária de ocupação (Cenário 1)	84
Tabela 18 - Carga diária dos recursos, em horas, e taxa diária de ocupação (Cenário 2)	84
Tabela 19 - Carga diária dos recursos, em horas, e taxa diária de ocupação (Cenário 3)	84
Tabela 20 - Carga diária dos recursos, em horas, e taxa diária de ocupação (Cenário 4)	85
Tabela 21 - Carga diária dos recursos, em horas, e taxa diária de ocupação (Cenário 5)	85
Tabela 22 - Carga diária dos recursos, em horas, e taxa diária de ocupação (Cenário 6)	85

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Ciclo DMAIC.....	22
Quadro 2 - Demanda média diária de cada produto, em unidades	50
Quadro 3 - Estoque-alvo dos produtos utilizados na simulação.....	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BM – *Buffer Management*
CCPM – *Critical Chain Project Management*
CONWIP – *Constant Work in Process*
CT – *Cycle Time*
CTQ – *Critical to quality*
DBR – *Drum-Buffer-Rope*
DMAIC – *Define, Measure, Analyse, Improve, Control*
FC – Fluxo de caixa
FGI – *Finished Goods Inventory*
FMEA – *Failure Mode and Effect Analysis*
FR – *Fill Rate*
G – Gargalo
JIT – *Just in time*
LL – Lucro Líquido
MRP – *Material Requirement Planning*
MTA – *Make to Availability*
MTBF – *Mean time between failures*
MTTR – *Mean time to repair*
MTG – Montagem
MTO – *Make to Order*
MTS – *Make to Stock*
OEE – *Overall Equipment Effectiveness*
OP – Ordem de produção
OPT – *Optimized Production Technology*
OTE – *Overall Throughput Effectiveness*
PDCA – *Plan, Do, Check, Act*
PL – *Planned Load*
RRC – Recurso com Restrição de Capacidade
RSI – Retorno sobre investimento
SC – *Supply Chain*
S-DBR – *Simplified Drum-Buffer-Rope*
TH – *Throughput*

TOC – *Theory of Constraints*

VCD – Vantagem Competitiva Decisiva

WIP – *Work in process*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. OBJETIVOS	16
1.2. JUSTIFICATIVA	17
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	18
2. REVISÃO DA LITERATURA	19
2.1. ASPECTOS TRADICIONAIS DA MELHORIA CONTÍNUA	19
2.1.1. Melhoria incremental	21
2.1.2. Melhoria radical	23
2.2. MELHORIA CONTÍNUA NA PERSPECTIVA DA TOC	23
2.2.1. Princípios	24
2.2.2. Os processos de melhoria contínua segundo a TOC	24
2.2.3. Recomendações clássicas da TOC para a melhoria contínua	28
2.2.4. Aplicações em operações	29
2.2.5. Do DBR ao S-DBR em ambientes MTO	30
2.2.6. O sistema S-DBR/MTA	37
2.2.7. <i>Buffer Management</i> em ambientes MTA.....	42
2.2.8. Síntese das contribuições da TOC ao processo de melhoria contínua	43
3. MÉTODO DE PESQUISA	46
3.1. INTRODUÇÃO	46
3.2. IDENTIFICAÇÃO DO MÉTODO DE PESQUISA	46
3.3. APLICAÇÃO.....	47
3.4. MODELAGEM CONCEITUAL.....	49
3.5. CENÁRIOS E DERIVAÇÕES DA SIMULAÇÃO	51
3.6. VARIÁVEIS DEPENDENTES E INDEPENDENTES.....	54
3.7. TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS	55
4. RESULTADOS	57
4.1. TEMPO DE CICLO MÉDIO	57
4.2. TAXA DE PREENCHIMENTO DE PEDIDOS	64
4.3. ANÁLISE CONJUNTA DAS VARIÁVEIS.....	71
5. CONCLUSÃO	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
APÊNDICE A - Tempo médio de processamento dos seis cenários propostos	82

APÊNDICE B - Carga diária e taxa de ocupação diária dos recursos nos seis cenários propostos	84
---	-----------

1. INTRODUÇÃO

Em um cenário cada vez mais competitivo e com clientes cada vez mais exigentes com a qualidade dos produtos e dos serviços associados a eles, é imperativo que as organizações melhorem continuamente os processos de manufatura. Deste modo, esforços substanciais têm sido devotados à pesquisa e prática de estratégias, métodos, tecnologias e implementações de melhoria (LI; PAPADOPOULOS; ZHANG, 2016).

Nesses mais de 50 anos em que a melhoria contínua é discutida na academia, surgiram diversas abordagens de sua implementação em organizações, como é o caso, por exemplo, da Manufatura Enxuta, focada na redução de desperdícios (WOMACK; JONES; ROOS, 1990); do Seis Sigma, que busca eliminar as variações dos processos (PYZDEK, 2003); e da Teoria das Restrições (*Theory of Constraints – TOC*), cujo objetivo é focar a atenção no recurso que restringe o fluxo de produtos ou de geração de dinheiro (GOLDRATT; COX, 2014).

A característica básica da Teoria das Restrições é programar a produção de acordo com o ritmo da restrição de capacidade, protegendo-a das variabilidades do processo com certa quantidade de estoque e garantindo que o resto da fábrica trabalhe em função das necessidades da restrição. Se a restrição for interna ao sistema produtivo, diz-se que há um gargalo, pois a falta de capacidade em um ou mais recursos é o fator limitante para que a empresa gere mais dinheiro. Essa limitação, porém, pode estar na demanda de mercado, o que sugere que há capacidade em excesso nos recursos do sistema.

No primeiro caso, em que, geralmente, usa-se o método Tambor-Pulmão-Corda (*Drum-Buffer-Rope – DBR*) para programar e controlar a produção, a ideia básica é que o recurso gargalo trabalhe no máximo de sua capacidade para que o sistema possa atender o máximo possível de pedidos. Já no segundo, costumeiramente tratado pelo método Tambor-Pulmão-Corda Simplificado (*Simplified Drum-Buffer-Rope – S-DBR*), mesmo o recurso restritivo tem certa capacidade de sobra em relação ao que lhe é demandado (SCHRAGENHEIM; DETTMER, 2001). A implementação deste último modo difere quanto ao ambiente no qual está inserido, seja ele *make-to-order* (S-DBR/MTO) ou *make-to-stock* (S-DBR/MTS, ou S-DBR/MTA, de *make-to-availability*).

Para se colocar em prática um processo de melhoria contínua sob a ótica da TOC, Goldratt e Cox (2014) apresentam uma abordagem constituída de cinco passos, os quais se baseiam na descoberta da restrição do sistema e na correta atuação sobre ela para que se obtenha uma solução de ruptura. Kasemset e Kachitvichyanukul (2010) apontam que a identificação da restrição é a chave para a implementação da TOC pelo fato de a restrição ser

a única máquina que pode limitar o desempenho do sistema. Uma vez encontrada a restrição, os próximos passos para a melhoria do sistema definitivamente podem funcionar.

Há dois simples modos para se identificar a restrição (GOLDRATT; COX, 2014; WANG et al., 2011). O primeiro deles é orientado à quantidade de trabalho em processo, ou seja, a fila de trabalhos à espera de processamento em cada um dos recursos. O segundo é orientado à capacidade dos equipamentos, se baseando na carga diária de trabalho nestes recursos. Por exemplo, se um recurso produz quase 100% do tempo, ele provavelmente limita o ganho do sistema (REID, 2007).

O método Gerenciamento do Pulmão (*Buffer Management* – BM) é uma terceira abordagem, baseado no monitoramento da dinâmica das ordens vermelhas no sistema (ordens que consumiram mais de dois terços do pulmão). Se os pulmões estão bem dimensionados, tais ordens devem ocorrer em número pequeno, permitindo apressá-las e criar um mecanismo sistematizado de análise de suas causas (SCHRAGENHEIM; DETTMER, 2001). O ataque sistemático às causas destas obstruções deve resultar, em última instância, na melhoria contínua do sistema.

Para a análise do desempenho destes tipos de melhoria, foi escolhida a abordagem de planejamento e controle da produção mais contemporânea da TOC: o S-DBR. Além disso, a pesquisa tem como foco o ambiente MTS, pois a grande maioria dos trabalhos relacionados ao DBR foca no ambiente MTO (KUO; CHANG; HUANG, 2009; LEE et al., 2010; CHANG; HUANG, 2014; HINCKELDEYN et al., 2014).

Foram escolhidos, ainda, três métodos de melhoria indicados pela Teoria das Restrições. Muitos trabalhos reconhecem o benefício que ela traz à melhoria contínua (GOLDRATT; FOX, 1986; GOLDRATT, 1990; SCHRAGENHEIM; RONEN, 1991; UMBLE; UMBLE, 2006; UMBLE; UMBLE; MURAKAMI, 2006; LEE et al., 2010; SOUZA; BAPTISTA, 2010; STRATTON; KNIGHT, 2010; GOLDRATT; COX, 2014), mas nenhum deles se propõe a analisar quantitativamente o tema. Devido a esta carência, o estudo do impacto de melhorias de recursos em sistemas S-DBR/MTA possui caráter pioneiro.

Para avaliar o comportamento de diferentes abordagens, esta dissertação visa analisar quantitativamente, por meio de simulação computacional, o desempenho de várias estratégias de melhoria em ambientes MTS. Além das três abordagens recomendadas pela TOC citadas anteriormente, foram adicionadas outras duas: melhorias aleatórias (resultantes de um processo não sistematizado de identificação de um alvo de melhoria) e melhorias dispersas em todos os recursos, refletindo a estratégia *kaizen* de pequenas e contínuas melhorias por toda a fábrica. Um sexto cenário representa a ausência de melhorias e servirá de referência para

quantificar a efetividade de ganho de desempenho das demais. Em suma, a seguintes abordagens foram avaliadas:

- Sem melhorias;
- Melhorias aleatórias;
- Melhorias em todos os recursos;
- Melhoria nos recursos que possuem as maiores filas;
- Melhoria nos recursos com os maiores níveis de utilização;
- Melhoria nos recursos que mais criam ordens vermelhas (Buffer Management).

A Teoria das Restrições recomenda que o sistema produtivo seja desbalanceado, ou seja, os recursos não restritivos devem possuir capacidade excedente em relação ao recurso com restrição de capacidade (GOLDRATT; COX, 2014). A diferença de capacidade entre os recursos influencia diretamente nas estratégias de melhorias e, portanto, diferentes graus de desbalanceamento devem ser avaliados. Outras estratégias, por outro lado, como melhorias dispersas entre todos os recursos, partem da premissa de que as linhas balanceadas constituem configurações ideais. Dessa forma, o efeito da presença de linhas balanceadas, assim como o nível de utilização dos recursos devem impactar os resultados advindos de diferentes estratégias de melhorias.

Considerando o balanceamento e o nível de utilização da linha, as políticas de melhoria acima expostas são aplicadas a seis diferentes configurações de sistemas produtivos, apresentadas a seguir:

- Balanceado com carga de 75% em todos os recursos;
- Balanceado com carga de 85% em todos os recursos;
- Balanceado com carga de 95% em todos os recursos;
- Desbalanceado com carga de 75% no recurso com restrição de capacidade;
- Desbalanceado com carga de 85% no recurso com restrição de capacidade;
- Desbalanceado com carga de 95% no recurso com restrição de capacidade.

1.1. OBJETIVOS

Hopp e Spearman (2013) afirmam que um sistema produtivo é altamente afetado pela variabilidade, de modo que quanto maior a sua amplitude, maiores precisam ser as proteções contra seus efeitos, seja na forma de estoque, capacidade ou tempo. À medida que se atacam esses obstáculos e as variabilidades do sistema são diminuídas, menos quantidade de estoque

é necessária para protegê-lo contra rupturas e menor o tempo de reposição, fatores importantes para viabilizar a alta disponibilidade de produtos acabados.

Há diversas maneiras de se identificar os recursos que trazem variabilidade ao sistema apresentadas pela Teoria das Restrições. Um deles analisa a quantidade de estoque em processo na frente das máquinas. Neste caso, a que tiver mais estoque aguardando para ser processado, deve ser alvo de melhorias. Outro verifica a carga de trabalho nos recursos. A opção, neste caso, deve ser melhorar a que tiver a maior exigência de processamento durante um dia de trabalho. Além disso, a constante análise da dinâmica das ordens no chão de fábrica proporcionada pelas informações obtidas do *Buffer Management* permite que se identifiquem os recursos que mais obstruem o fluxo de produção. O ataque sistemático às causas de obstruções deve resultar, em última instância, na melhoria contínua do sistema.

Assim, o objetivo geral desta dissertação é: **avaliar, segundo indicadores que mensuram o tempo de ciclo e o nível de atendimento da demanda a partir do estoque disponível de produtos acabados, diferentes estratégias de melhorias de recursos produtivos em ambientes de produção para estoque gerenciados pelo método S-DBR.**

Foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos, por meio dos quais se deseja atingir o objetivo geral:

- 1) Construir um modelo de simulação com o *software* ProModel que aborde as lógicas do *Buffer Management* em um ambiente S-DBR/MTA.
- 2) Mensurar o desempenho das diferentes estratégias de melhorias em termos de tempo de ciclo e atendimento imediato da demanda.
- 3) Avaliar as estratégias supracitadas em sistemas balanceados e desbalanceados.

1.2. JUSTIFICATIVA

A literatura pesquisada foi analisada mediante dois pontos de vista: da melhoria contínua e da Teoria das Restrições. Quando se trata de trabalhos cujo foco é a melhoria contínua, percebe-se que a Teoria das Restrições é frequentemente negligenciada como método de melhoria. Estes trabalhos normalmente focam em outras abordagens, tais como a Manufatura Enxuta e o Seis Sigma (SINGH; SINGH, 2012; SINGH; SINGH, 2015).

Em relação aos trabalhos que abordam a Teoria das Restrições como tema central, constata-se que alguns trabalhos reconhecem o benefício que ela traz à melhoria contínua (GOLDRATT; FOX, 1986; GOLDRATT, 1990; SCHRAGENHEIM; RONEN, 1991; UMBLE; UMBLE, 2006; UMBLE; UMBLE; MURAKAMI, 2006; LEE et al., 2010; SOUZA; BAPTISTA, 2010; STRATTON; KNIGHT, 2010; GOLDRATT; COX, 2014), mas

nenhum deles se propõe a analisar profundamente o tema, principalmente utilizando uma pesquisa de caráter quantitativo.

Outras publicações possuem propósitos semelhantes ao desta pesquisa por envolverem a avaliação quantitativa de diversos métodos de melhoria, mas utilizam uma abordagem diferente de análise, a chamada *System Dynamics* (GODINHO; UZSOY, 2009; GODINHO; UZSOY, 2013; GODINHO; UZSOY, 2014).

Com a análise do desempenho de diferentes abordagens de melhoria quantitativa da focalização de esforços de melhoria feita pela Teoria das Restrições, esta pesquisa pretende contribuir para um nicho muito restrito de trabalhos que tratam destes dois temas em conjunto de modo quantitativo.

Além disso, este tema pode ser de grande interesse dos profissionais voltados à melhoria de processos, já que contribui para o aumento do desempenho organizacional focando nos recursos que mais obstruem o fluxo, o que permite economizar recursos e trazer mais valor à empresa do ponto de vista do cliente.

Em suma, há uma escassez de trabalhos que comparam diversas políticas de melhoria da TOC, assim como inexistem estudos que os fizeram em ambientes MTS. Com a análise do desempenho de diferentes abordagens de melhoria à luz da Teoria das Restrições, esta pesquisa pretende contribuir para um nicho muito restrito de trabalhos que tratam destes dois temas em conjunto de modo quantitativo. Além disso, este tema pode ser de grande interesse dos profissionais voltados à melhoria de processos, já que contribui para o aumento do desempenho organizacional focando nos recursos que mais obstruem o fluxo, o que permite economizar recursos e trazer mais valor à empresa do ponto de vista do cliente.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos. O capítulo inicial consiste em uma introdução à temática abordada, além do problema de pesquisa, objetivos, justificativa e estrutura do trabalho.

O segundo capítulo contém a revisão de literatura, a qual, por motivos didáticos, foi dividida em dois subitens: o primeiro dedicado aos fundamentos da melhoria contínua tradicional, e o segundo abordando a Teoria das Restrições.

No capítulo três é abordado o método empregado na pesquisa, incluindo todos os passos necessários para a sua realização, desde a pesquisa experimental até a simulação.

O quarto capítulo é dedicado aos resultados obtidos com a dissertação.

Finalmente, o capítulo cinco traz as conclusões do trabalho.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Esta seção apresenta uma revisão da literatura sobre os assuntos pertinentes à pesquisa a ser desenvolvida. Ela aborda, primeiramente, os aspectos tradicionais da Melhoria Contínua, incluindo os conceitos, evolução histórica e suas diferentes abordagens. Em seguida, a revisão abrange a Teoria das Restrições, abordando aspectos de sua história, sua filosofia e sua aplicação nos ambientes sob encomenda e para estoque. Por fim, ela discorre sobre a melhoria contínua na perspectiva da Teoria das Restrições.

2.1. ASPECTOS TRADICIONAIS DA MELHORIA CONTÍNUA

As raízes dos modernos programas de melhoria datam do fim do século XIX, quando os gestores encorajavam melhorias por parte dos empregados e os recompensava por trazerem ideias positivas para a organização (SCHROEDER; ROBINSON, 1991). Desde então, as formas de melhoria evoluíram muito e, atualmente, avanços em informação, tecnologia, atividades econômicas com crescimento agressivo e mercado inconstante têm contribuído para as inovações em melhoria (LI; PAPADOPOULOS; ZHANG, 2016).

Schroeder e Robinson (1991) identificam alguns pressupostos para o sucesso dos programas de melhoria:

- As melhorias precisam de tempo para se provarem eficazes.
- As práticas operacionais que restringem o fluxo de ideias devem ser abolidas.
- Empregados devem ser continuamente treinados e desenvolvidos, particularmente em técnicas de métodos de melhoria.
- É necessário um mecanismo eficiente para lidar com as ideias de melhorias que surgem.

Bessant et al. (2001) identificam cinco níveis de desenvolvimento em melhoria contínua em que as organizações podem se encontrar:

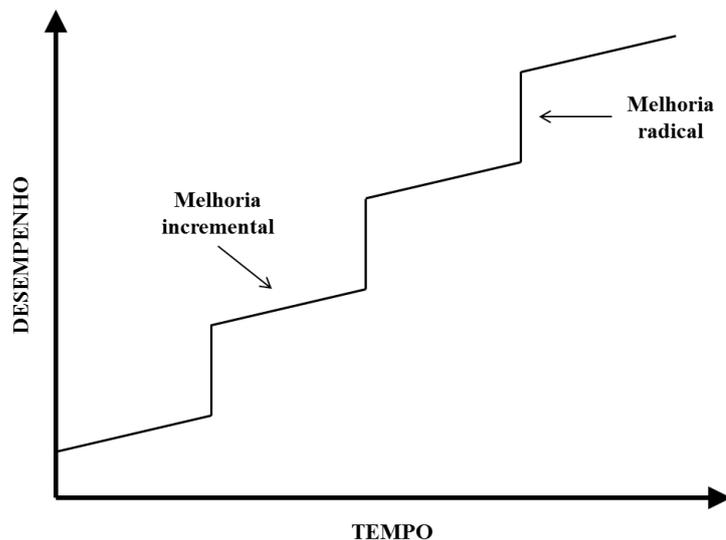
- Nível 1 – Pré-Melhoria Contínua: Há interesse no tema, mas a sua implementação é pontual;
- Nível 2 – Melhoria Contínua Estruturada: Há um comprometimento formal em construir um sistema que irá desenvolver a melhoria contínua em toda a organização;
- Nível 3 – Melhoria Contínua Orientada a Objetivos: Há um comprometimento em ligar os procedimentos de melhoria contínua às metas estratégicas;
- Nível 4 – Melhoria Contínua Proativa: Há uma tentativa de desenvolver autonomia e dar mais poder a pessoas e grupos a gerenciar seus próprios processos;

- Nível 5 – Melhoria Contínua Completa: Próximo de um modelo de aprendizado organizacional.

Pode-se dividir o tema de melhoria em duas abordagens: uma delas se caracteriza por ser gradual e contínua, ao passo que a outra é radical e esporádica. A primeira delas, também conhecida como *kaizen*, procura inserir na mente das pessoas a ideia de buscar sempre o aprimoramento, seja na vida pessoal, profissional ou no ambiente em que o indivíduo está inserido (IMAI, 1986). Em japonês, *kaizen* significa “melhoria contínua”, expressão que sugere melhorias que envolvem todos – de gerentes a operários – e necessita de relativamente pouco investimento.

A segunda abordagem, conhecida pela expressão japonesa *kaikaku*, é uma melhoria de larga escala que envolve o redesenho dos processos relacionados à produção, com o objetivo de atingir melhorias dramáticas (HAMMER; CHAMPY, 2001). Ao contrário do *kaizen*, cuja iniciativa vem dos próprios operadores, o *kaikaku* é normalmente uma abordagem *top-down*, que envolve mudança de produto, processo ou até de conceitos (KURDVE et al., 2016). A Figura 1 apresenta o comportamento destas duas abordagens em um gráfico de desempenho ao longo do tempo.

Figura 1 - Melhoria radical x melhoria incremental



Fonte: Adaptado de Imai (1986)

Slack, Chambers e Johnston (2009) afirmam que a melhoria radical dá grande valor para as soluções criativas e incentiva o pensamento livre e a iniciativa individual, ao passo que a melhoria contínua é construída a partir da experiência acumulada dentro da operação e

favorece a adaptabilidade, o trabalho em grupo e a atenção a detalhes. Ambas as abordagens serão discutidas na próxima seção.

2.1.1. Melhoria incremental

A origem do *kaizen* como metodologia de melhoria contínua remonta ao Japão pós Segunda Guerra Mundial, quando o país vivia sérias dificuldades devido aos desfechos da guerra e da ocupação de seu território pelos países aliados. Nessa época, relata Imai (1986), a maioria das empresas japonesas teve que começar do zero, o que significava desafios para gerentes e operários todo dia, resultando em progresso diário. Toda essa dificuldade vivenciada pelo Japão no passado deu origem ao que se conhece hoje por *kaizen*.

Brunet e New (2003) citam três características fundamentais do conceito de *kaizen*, quais sejam: (1) *kaizen* é contínuo, o que significa uma jornada sem fim em direção à qualidade e eficiência; (2) *kaizen* é de natureza incremental, o que denota pequenas melhorias; e (3) *kaizen* é participativo, o que evidencia o importante papel que os operadores têm nesse processo.

Com o objetivo de chegar a níveis mais altos de qualidade, os executivos japoneses utilizaram as ideias do antigo ciclo de Deming (relação entre pesquisa, projeto, produção e vendas) e criaram o ciclo PDCA (IMAI, 1986), o qual é definido por Werkema (1994) como um método de gestão, que representa o caminho a ser seguido para que as metas estabelecidas possam ser atingidas.

A dinâmica do uso do PDCA é detalhada por Imai (1986, p. 53):

Ele começa com um estudo da situação atual, durante o qual os dados são reunidos para uso na formulação de um plano de melhoramento. Uma vez que este plano tenha sido finalizado, ele é implantado. Depois disso, a implantação é verificada para ver se ela realizou o melhoramento previsto. Quando a experiência tem sucesso, é tomada uma medida final, como a padronização metodológica, para assegurar que os novos métodos introduzidos sejam praticados continuamente para manter o melhoramento.

Uma segunda metodologia de melhoria que merece destaque é o Seis Sigma. Essa estratégia fornece uma série de intervenções e ferramentas estatísticas que podem gerar grandes saltos em lucratividade e em qualidade (HARRY, 1998). Para Schroeder et al. (2008), Seis Sigma é uma estrutura organizada para reduzir a variação de processos organizacionais, utilizando especialistas de melhoria, um método estruturado e métricas de desempenho com o intuito de atingir os objetivos estratégicos.

Segundo Kwak e Anbari (2006), a metodologia Seis Sigma possui duas perspectivas: a estatística e a de negócio. Do ponto de vista estatístico, seis sigma é definido como a presença

de menos de 3,4 defeitos por milhão de oportunidades (ou 99,9997% de sucesso). Do ponto de vista de negócio, é uma metodologia utilizada para melhorar a lucratividade do negócio, a eficácia e a eficiência das operações, para atingir ou até exceder as necessidades do cliente.

Os projetos de melhoria Seis Sigma seguem um método estruturado baseado no PDCA (SCHROEDER et al., 2008), chamado de DMAIC, sigla em inglês para os termos “Definir”, “Medir”, “Analisar”, “Melhorar” e “Controlar”. O Quadro 1 traz as definições de cada etapa segundo De Koning e De Mast (2006).

Quadro 1 - Ciclo DMAIC

D	<p>Seleção do problema e análise dos benefícios. Estabelecimento de uma base lógica para um projeto Seis Sigma. Definir o problema a ser solucionado, incluindo o impacto no consumidor e benefícios em potencial.</p>
M	<p>Tradução do problema em uma forma mensurável e medição da situação atual. Identificar as características críticas para qualidade (CTQs) do produto ou serviço. Verificar a medição da capacidade. Verificar a taxa de defeitos atual e definir metas para melhoria. Selecionar uma ou mais características do produto, mapear seu processo, fazer as medidas necessárias, gravar os resultados nos cartões de controle do processo e estimar as capacidades de curto e longo prazos do processo.</p>
A	<p>Identificação dos fatores de influência e causas que determinam o comportamento dos CTQs. Entender as causas raízes dos defeitos e identificar as variáveis que os causam. Verificar o desempenho passado das métricas selecionadas e identificar os fatores de sucesso mais comuns. Em outras palavras, identificar os fatores que explicam o bom desempenho que a métrica teve no passado. Analisar os dados iniciais para documentar o desempenho atual e começar a identificar as causas raízes dos defeitos e seus impactos, e agir apropriadamente.</p>
I	<p>Planejamento e implementação de ajustes no processo para melhorar o desempenho dos CTQs. Definir como intervir no processo para reduzir significativamente os defeitos. Gerar, selecionar e implementar soluções.</p>
C	<p>Ajuste da gestão do processo e sistema de controle para que as melhorias se tornem sustentáveis. Implementar medidas contínuas e ações para sustentar as melhorias. Uma vez que as melhorias desejadas foram feitas, definir um sistema para garantir que as melhorias sejam sustentadas, mesmo que os recursos não estejam mais focados no problema.</p>

Fonte: De Koning e De Mast (2006)

2.1.2. Melhoria radical

A melhoria radical, segundo Slack, Chambers e Johnston (2009), presume que a base de melhoria são mudanças grandes e dramáticas na operação.

O exemplo mais extremo de melhoria radical é a reengenharia de processos, definida por Hammer e Champy (2001) como a revisão fundamental e o redesenho radical dos processos de negócios para obter melhorias dramáticas em medidas críticas e contemporâneas de desempenho, como custo, qualidade, serviço e velocidade. Davenport (1993) aponta algumas similaridades entre a reengenharia e a melhoria contínua, dentre as quais se destacam o foco em processo, necessidade de mudanças de comportamento e da organização em si e substancial investimento de tempo.

A partir da análise de três casos reais de reengenharia, Hammer e Champy (2001) citam quatro características comuns, quais sejam: *orientação a processos*, que busca entender o processo como um todo, e não só as atividades de um departamento; *ambição*, procurando soluções de ruptura; *quebra de regras*, abandonando antigas premissas dadas como certas; e uso criativo de tecnologia da informação, que permite que as organizações busquem modos diferentes de trabalhar.

2.2. MELHORIA CONTÍNUA NA PERSPECTIVA DA TOC

A origem da Teoria das Restrições está associada a um *software* de programação da produção chamado *Optimized Production Technology* (OPT), desenvolvido pelo físico israelense Dr. Eliyahu M. Goldratt no fim da década de 70. Segundo Goldratt (1988), este *software* foi a terceira tentativa de se programar a produção com o uso de computadores, sucedendo os sistemas MRP (*Material Requirement Planning*). A lógica desse sistema se diferenciava dos anteriores, pois a programação gerada baseava-se nas restrições de capacidade do sistema produtivo, ou seja, nos recursos que ditam o ritmo da produção no sistema.

Na década de 1980, Goldratt expandiu esse conceito e propôs um processo científico para a resolução de problemas no ambiente produtivo, ao qual deu o nome de Teoria das Restrições. Essa filosofia apareceu na literatura pela primeira vez no livro “A Meta: um processo de melhoria contínua”, de Goldratt e Cox, em 1984 (GOLDRATT; COX, 2014). O subtítulo deste livro sugere que o aspecto central da Teoria das Restrições é a melhoria contínua.

2.2.1. Princípios

Goldratt (2013a) afirma que existem quatro principais obstáculos que bloqueiam pessoas ou organizações a iniciarem um processo de melhoria contínua, os quais estão relacionados à forma como se lida com a complexidade, conflitos, comportamento humano e capacidade de se obter melhorias significativas sempre. Para superar tais entraves e facilitar a identificação e exploração das oportunidades de melhoria existentes, a Teoria das Restrições se estrutura em quatro princípios (GOLDRATT, 2013a):

1) Simplicidade inerente

A TOC prega que quanto menos pontos necessitam ser tocados para impactar todo o sistema, mais simples ele é. Em consonância com essa ideia, a TOC trabalha planejando e controlando a menor quantidade possível de elementos em um sistema – as restrições.

2) Harmonia

Para a TOC, um conflito de ideias impede que a organização atinja seu objetivo. Para eliminá-lo é necessário eliminar os pressupostos errôneos que os causam. Com a eliminação da raiz do conflito, portanto, surge uma solução ganha-ganha, em que ambos os lados são favorecidos.

3) Respeito

As pessoas são inerentemente boas, o que significa que maus comportamentos podem ser explicados pelo modo como elas percebem o mundo, e não necessariamente por falhas éticas ou morais. O instinto humano de acusar os outros pelos problemas que ocorrem deteriora as relações e dificultam o raciocínio lógico, responsável pela busca das soluções dos problemas.

4) Nunca diga “eu sei”

A TOC acredita que toda situação pode ser melhorada substancialmente. Assim, quando a raiz de um conflito é eliminada, abrem-se novas oportunidades para melhorias substanciais.

De acordo com estes princípios, um processo de melhoria segundo a TOC deve ser focado na restrição, baseado em soluções e práticas ganha-ganha, com respeito às pessoas e que vise melhorias contínuas e significativas, as quais podem ser entendidas como melhorias radicais.

2.2.2. Os processos de melhoria contínua segundo a TOC

O processo geral de melhoria da Teoria das Restrições é guiado pelas respostas a quatro perguntas, as quais podem ser aplicadas em qualquer nível organizacional e em

qualquer setor, envolvendo desde restrições políticas até o chão de fábrica (BARNARD, 2013):

- 1) Por que mudar? – visualizar a diferença entre a situação atual e a que se deseja alcançar no futuro e convencer a todos que a mudança é necessária;
- 2) O que mudar? – identificar o ponto que, se mudado, impactará positivamente o sistema como um todo;
- 3) Para o que mudar? – buscar soluções simples e práticas para realizar a mudança;
- 4) Como causar a mudança? – realizar a gestão da mudança de forma que as pessoas envolvidas no processo de mudança compreendam as razões subjacentes e os benefícios individuais e sistêmicos esperados dele.

O resultado das respostas para estas perguntas é um processo de melhoria contínua com características de melhoria radical quando as restrições forem políticas, devido principalmente ao item 2), que busca concentrar os esforços em mudanças procedimentais ou de paradigma da organização.

A TOC propõe, ainda, uma metodologia de cinco passos de focalização para estruturar o seu processo de melhoria contínua especificamente de processos que envolvem gestão de recursos físicos (GOLDRATT; COX, 2014), que se assemelha ao ciclo PDCA no que diz respeito à continuidade do ciclo (SCHRAGENHEIM; DETTMER, 2001):

1) Identificar a(s) restrição(ões) do sistema

Como a restrição do sistema determina seu desempenho, é lógico que o desempenho máximo dele só pode ser alcançado sabendo onde está a sua restrição. Esta restrição pode estar dentro do sistema (um recurso ou política interna) ou fora dele (o mercado, fornecimento de materiais, vendedores ou outra política). Se esta restrição pode ser quebrada sem muito esforço, deve-se fazê-lo imediatamente e recomeçar este passo. Caso contrário, deve-se prosseguir ao segundo passo.

2) Decidir como explorar a(s) restrição(ões) do sistema

Uma vez identificada a restrição, é necessário que se retire dela o seu máximo – redução significativa de desperdícios na restrição – sem que se invista dinheiro, ou seja, obter o máximo benefício financeiro. Se, por exemplo, a restrição for demanda de mercado, dever-se-ia priorizar ações para aumentar vendas. Se, por outro lado, a restrição for um recurso interno, significa usar aquele recurso do melhor modo para maximizar a sua contribuição marginal para o lucro.

3) Subordinar todo o resto à decisão anterior

Uma vez que a decisão sobre como explorar a decisão foi tomada, é necessário que todos os outros recursos sejam subordinados a ela, assumindo o papel de apoiadores da restrição. Em suma, a subordinação serve para focar os esforços do sistema nas coisas que o ajudam a maximizar o atual desempenho. Uma ferramenta utilizada para a prática da subordinação é o mecanismo *Buffer Management*, estudado neste trabalho.

4) Elevar a(s) restrição(ões) do sistema

É possível que, depois de completar o terceiro passo, a restrição se quebre, fazendo com que a restrição passe para outro local. Se esse for o caso, é necessário que se recomece os passos, identificando a nova restrição, explorando-a ao máximo e subordinando todo o resto a ela. Caso contrário, o próximo passo é adicionar capacidade à restrição. No caso de ser um recurso interno, essa adição significa obter mais capacidade de operação, tanto adquirindo novas máquinas como fazendo horas extras ou abrindo outro turno de produção. Se a restrição for falta de vendas, essa adição pode se dar investindo em propaganda ou em um novo produto.

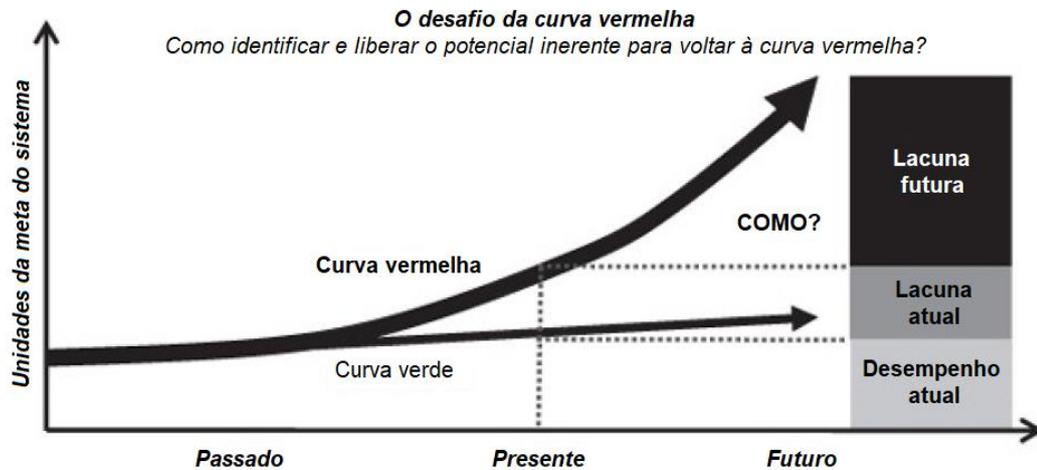
5) Se em um passo anterior uma restrição tiver sido quebrada, voltar ao primeiro passo, mas não deixar que a inércia cause uma restrição do sistema

Com a quebra da restrição em algum dos passos anteriores, é necessário que se volte ao primeiro passo para se ter certeza de onde a nova restrição está. Isso permite que se embarque em um processo de melhoria contínua, revisitando continuamente a restrição e melhorando-a.

Percebe-se, portanto, que o resultado de um processo de melhoria que segue os cinco passos e/ou as quatro perguntas é um tipo de melhoria que possui foco na restrição. Como consequência, pode levar a soluções de ruptura, caracterizada por saltos de desempenho. Esse tipo de característica é próprio da melhoria radical.

Goldratt (2013b) aponta duas condições necessárias para que as empresas sejam sempre prósperas: o crescimento exponencial dos resultados aliado ao crescimento da estabilidade da organização. Ele retratou essas duas condições com duas curvas em um gráfico de desempenho ao longo do tempo, como na Figura 2. Nele, a curva vermelha representa o crescimento do desempenho e a verde, a estabilidade.

Figura 2 - As curvas vermelha e verde de potencial inerente



Fonte: Goldratt (1999) apud Barnard (2013)

Goldratt (2013b) ainda afirma que é preciso alavancar as duas curvas em conjunto, ou seja, obter um desempenho cada vez mais alto aliado à crescente estabilidade da empresa. Para que isso ocorra, é necessário que se atenda uma necessidade significativa do cliente de modo que nenhum concorrente consiga, o que é comumente chamado de *vantagem competitiva decisiva* (VCD). Deste modo, o objetivo é, simultaneamente, capitalizar a VCD, obtendo uma taxa de crescimento cada vez maior, além de sustentá-la, estabilizando o sistema mesmo em uma situação de demanda crescente.

Percebe-se, assim, que para sempre possuir uma VCD, soluções de ruptura são necessárias, o que faz da TOC uma filosofia com características de melhoria radical. No entanto, no intervalo entre tais melhorias radicais, melhorias incrementais são necessárias, as quais podem ser realizadas a partir da aplicação de ferramentas Lean ou Seis Sigma. A ferramenta *Buffer Management* auxilia nesta aplicação, mostrando indiretamente onde estes esforços devem ser aplicados.

Neste caso, estas melhorias incrementais visam sempre: a) uma melhor exploração da restrição do sistema; b) uma melhor subordinação à restrição do sistema; ou c) uma elevação da restrição do sistema. O BM procura apoiar principalmente o item "b". Se a restrição está no mercado, o BM não é uma ferramenta que age diretamente sobre ele, mas visa melhorar o sistema para que ele se submeta cada vez mais e melhor aos interesses desta restrição, sustentando a VCD conquistada. De forma menos estruturada, a identificação e melhoria de recursos mais sobrecarregados (maior ocupação) ou com maior nível de estoque em processo acumulado (maior fila) também são mecanismos voltados a desobstruir o fluxo de produção.

Atwater e Chakravorty (1995) apresentam vários exemplos que ilustram como a TOC pode ser utilizada para focar projetos de melhoria de qualidade e aumentar o ganho da empresa. Antunes Jr. e Rodrigues (1993) discutem sobre a Teoria das Restrições como ferramenta de priorização de esforços de redução de setups, pois mostra os pontos que as esperam mais geram impactos no processo produtivo.

Há, na literatura, algumas alternativas de metodologias de melhoria que não são puramente TOC, mas que a relacionam com outros tipos. Sahnó, Shevtshenko, Zahharov (2015), por exemplo, integram a TOC, FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*) e método Classificador de Falhas no ciclo DMAIC do Seis Sigma.

2.2.3. Recomendações clássicas da TOC para a melhoria contínua

Além do BM, a TOC recomenda outras duas abordagens para a identificação de restrições. A primeira delas mede a utilização dos diferentes recursos do sistema (GOLDRATT; COX, 2014; WANG et al., 2011; LAW; KELTON, 2000). Neste caso, a máquina com o maior nível de utilização é considerada a restrição. Entretanto, as utilizações das máquinas são geralmente muito similares e não se pode ter certeza de qual máquina é a restrição (ROSER; NAKANO; TANAKA, 2002). Este método, ainda segundo os autores, não é útil para identificar restrições momentâneas, apenas a média ao longo de grandes períodos de tempo.

A segunda é caracterizada pelo tamanho da fila ou pelo tempo de espera nos recursos (GOLDRATT; COX, 2014; WANG et al., 2011). Roser, Nakano e Tanaka (2002) afirmam que é um método de fácil utilização, permitindo encontrar inclusive restrições momentâneas. No entanto, eles apontam alguns pontos negativos, como:

- Em sistemas em que a liberação de trabalho excede a capacidade da linha, as quantidades de trabalhos nas filas de produção atingem o tamanho máximo do pulmão e, conseqüentemente, não podem ser comparadas;
- A possibilidade de dar resultado incorreto se o tamanho de lotes de produção varia entre as entidades;
- As filas são fatores dependentes entre si, o que dificulta a estimação de fila média entre os recursos.

O método de tamanho da fila de produção é eficaz em ambientes de produção em massa. Em ambientes enxutos, por outro lado, eles lembram que estoque em processo não deveria existir e, portanto, neste caso, outro método deve ser empregado (SIMS; WAN, 2017).

White, Sengupta e Van Til (2012), Sengupta, Das e Van Til (2008) e Sengupta et al. (2013) apontam outros dois métodos para identificação de restrições: (i) recursos com a o maior estado ativo sem interrupções, e (ii) recursos com maior razão de tempo de falha pelo tempo de ciclo.

Sims e Wan (2017) propõem três métodos para identificação de restrições em ambientes *lean* maduros:

- *Flow Constraint Analysis*: compara o *takt time* com o tempo de ciclo dos recursos. Se o *takt time* for maior do que o tempo de ciclo, diz-se que há uma restrição.
- *Effective Utilization Analysis*: avaliando o output da linha com a capacidade ideal do sistema, baseado na relação entre estoque em processo, capacidade da restrição e lead time considerando a utilização de um sistema *Constant Work in Process* (CONWIP). Recursos com baixo nível de utilização tendem a ser a restrição.
- *Quick Effective Utilization Analysis*: com método de cálculo semelhante ao anterior, mas aplicado a transportadores de movimentação constante.

Muthiah e Huang (2007) desenvolvem um método para medição de desempenho de um sistema produtivo chamado *Overall Throughput Effectiveness* (OTE), uma expansão do *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) teórico de cada recurso. O OTE traz o benefício de controle do sistema, auxiliando na detecção de gargalos emergentes.

Neste trabalho são consideradas os seguintes métodos de detecção de restrições dadas pela TOC: quantidade de WIP (estoque em processo) a serem processadas nos recursos, nível de utilização dos recursos e o método *Buffer Management* de controle de produção. Além deles, são adicionadas outras formas de melhoria sem detecção de restrição, como melhorias em todos os recursos simultaneamente e melhorias em recursos aleatórios. Uma última abordagem é considerada, a qual considera que não há melhoria alguma durante a simulação, como forma de controle.

2.2.4. Aplicações em operações

As primeiras aplicações dos conceitos da TOC se deram em ambientes de produção, mais especificamente, ambientes *make-to-order* (MTO, ou “fazer sob encomenda”). A principal preocupação nessa época, descrita em Goldratt e Cox (2014), era gerenciar efetivamente o gargalo, recurso produtivo que, em grande parte do tempo, não consegue atender toda a demanda a ele imposta. Para que esse gerenciamento de fato acontecesse, era necessário garantir que este recurso produzisse o máximo de tempo possível, que ele não

processasse peças de má qualidade e que todo o resto do sistema trabalhasse somente o necessário para alimentá-lo.

Reconhecendo que a presença de um gargalo representava um grande bloqueio no fluxo de produção, que empresas com gargalos entregam menos valor aos clientes e que a reprogramação da produção é uma tarefa difícil, passou-se a focar o recurso restritivo com o objetivo de elevar sua capacidade para atender toda a demanda necessária na maior parte do tempo (SOUZA; BAPTISTA, 2010). A melhoria do recurso restritivo permitiu que se elevasse a quantidade de pedidos atendidos no prazo com a diminuição da proteção em forma de estoque em ambientes sob encomenda (SCHRAGENHEIM; DETTMER, 2001).

Mais recentemente, devido à necessidade de garantir alta disponibilidade de certos produtos para que possam ser retirados no ato da compra, as ideias até então vigentes foram expandidas para ambiente *make-to-stock* (SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009). As seções seguintes detalham a proposta da Teoria das Restrições para o ambiente de produção. Antes, porém, nos próximos parágrafos, serão brevemente apresentadas algumas aplicações da TOC em outros ambientes, como em cadeias de suprimentos e projetos.

Para produzir um produto é necessário gerenciar não só a produção, mas o fornecimento de matéria-prima e a distribuição dos produtos acabados, integrando toda a cadeia de suprimentos. Schragenheim (2013a) cita alguns dos problemas das cadeias de suprimentos (*Supply Chain* – SC) atuais, que passam pela baixa quantidade de giros de estoque, alto investimento em estoque, perda de venda em determinados locais por falta de estoque e, ao mesmo tempo, estoque excedente dos mesmos produtos em outros locais, alto nível de obsolescência de estoque, falta de agilidade em relação às necessidades dos clientes, entre outros.

A Teoria das Restrições, além de ter contribuído para os ambientes de produção e distribuição, permitiu também avanços para a área de gerenciamento de projetos. Para isso, a Gestão de Projetos por Corrente Crítica (*Critical Chain Project Management* – CCPM) desafia algumas premissas tradicionalmente aceitas por gestores de projetos, que dificultam o gerenciamento e provocam vários problemas de desempenho (GOLDRATT, 2014).

2.2.5. Do DBR ao S-DBR em ambientes MTO

Os sistemas produtivos gerenciados pela TOC operam sob uma técnica de produção puxada chamada Tambor-Pulmão-Corda (*Drum-Buffer-Rope* – DBR). A ideia fundamental dessa técnica é que a quantidade que o sistema todo consegue produzir é igual à quantidade que o recurso mais ocupado deste sistema consegue processar. Deste modo, o ambiente

produtivo é gerenciado com base na sua restrição. A técnica prega que a restrição – e somente ela – deve trabalhar o máximo possível, enquanto que os outros recursos devem trabalhar apenas o necessário para suportá-la.

Schrageheim e Ronen (1990) conceituam os três componentes do DBR. O Tambor representa a programação da produção do recurso com restrição de capacidade, que dita o ritmo que toda a cadeia deve seguir. O Pulmão é um mecanismo de proteção cujo objetivo é evitar que os pontos críticos do sistema parem de trabalhar por não ter o que fazer. Ele é medido em tempo e, na prática, significa quanto tempo antes de ser trabalhado na restrição o trabalho em processo deve chegar nela (SCHRAGENHEIM; DETTMER, 2001). Por fim, a Corda é um mecanismo que regula a entrada de material no sistema de acordo com o ritmo dado pelo Tambor, evitando que haja mais trabalho em processo do que a restrição pode processar, o que mantém curto o *lead-time* de produção.

Consoante ao princípio da simplicidade inerente, a variante clássica do DBR possui três pontos críticos:

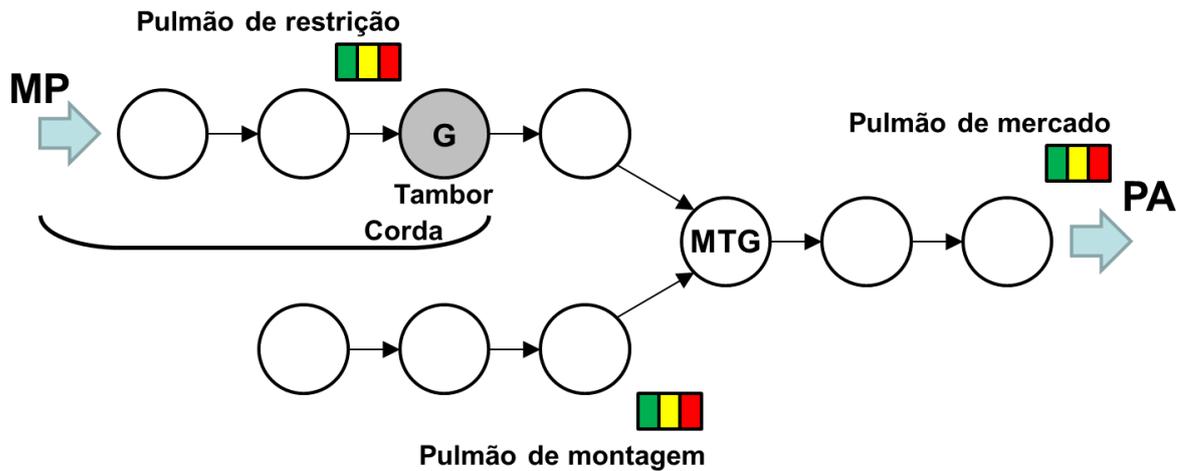
- Gargalo (G) – recurso mais sobrecarregado, caracterizado por não ter capacidade de processar toda a demanda imposta a ele na maior parte do tempo;
- Montagem (MTG) – convergência de dois ou mais ramos do sistema, em que peças em processo são unidas;
- Mercado – demanda imposta pelos pedidos dos clientes

Cada um destes pontos necessita de um pulmão de inventário para protegê-los das variabilidades do sistema. Um exemplo é a parada de uma máquina para manutenção corretiva. Se o pulmão estiver bem dimensionado, ele poderá proteger o ponto crítico com estoque de peças para processar ou entregar aos clientes até que a máquina volte a operar. O Pulmão de Restrição procura garantir que o gargalo jamais pare de operar devido a falhas em processos anteriores; o Pulmão de Montagem busca assegurar que a montagem não pare de processar devido às variabilidades que ocorrem nos caminhos onde o gargalo não se encontra; e o Pulmão de Mercado procura proteger as datas de entrega aos clientes.

Schrageheim e Dettmer (2001) afirmam que os pulmões são necessários para proteger o sistema contra as variações internas ao sistema, como absenteísmo, quebra de máquinas, queda de energia etc., e as externas a ele, como mudança na demanda dos clientes, atrasos do fornecedor, entre outros.

A Figura 3 identifica os três tipos de pulmões presentes no sistema DBR.

Figura 3 - Pulmões no DBR



Fonte: Adaptado de Schragenheim e Dettmer (2001)

A presença de uma restrição interna ativa, como é o caso da variante clássica do DBR, levanta algumas questões que devem ser respondidas, como não permitir que se explore a restrição do mercado em todo o seu potencial, a dificuldade em se reprogramar o gargalo para introduzir uma ordem mais urgente ou o próprio bloqueio ao fluxo de produção.

Uma característica importante sobre a TOC é que ela compartilha os mesmos princípios fundamentais de cadeias de suprimentos defendidos por Henry Ford (linhas de montagem com produção em massa) e por Taiichi Ohno (Sistema Toyota de Produção), quais sejam (GOLDRATT, 2009a):

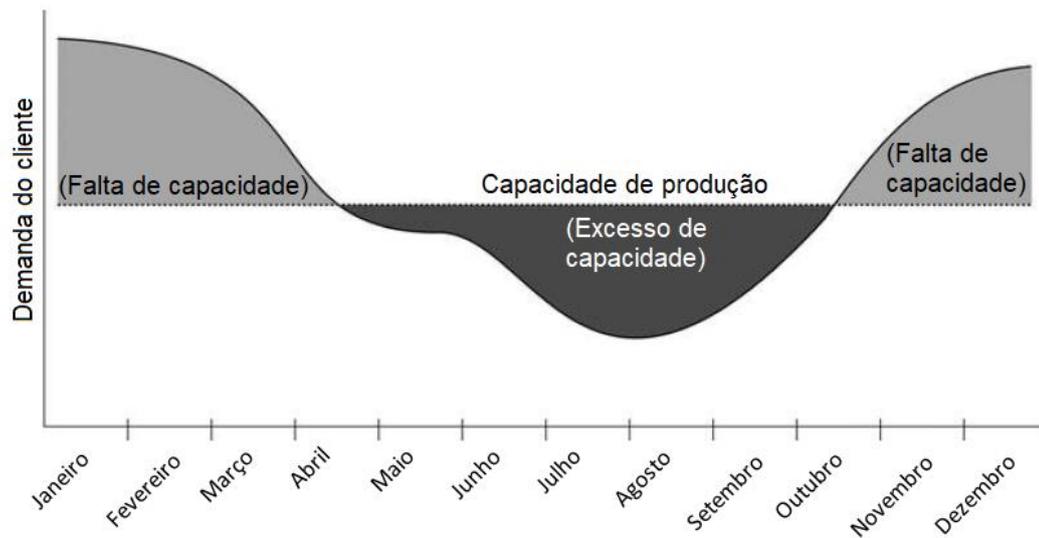
- Melhorar o fluxo das operações;
- Prevenir a superprodução criando um mecanismo que determine quando não se deve produzir;
- Abolir eficiências locais;
- Criar um processo focado para balancear o fluxo.

De acordo com estes princípios e para superar os obstáculos descritos anteriormente, começou-se a questionar a presença de todos os pulmões no sistema, os quais bloqueiam o fluxo e dificultam a gestão. Foi desenvolvido, então, o sistema Tambor-Pulmão-Corda Simplificado (*Simplified Drum-Buffer-Rope – S-DBR*), cuja principal premissa é o fato de a demanda de mercado ser a principal restrição, mesmo na presença de restrição de capacidade interna (SOUZA; BAPTISTA, 2010).

Schragenheim e Dettmer (2001) adicionam que a restrição de capacidade pode se tornar ativa em tempos de alta demanda, fazendo com que a capacidade de um recurso limite

o ganho, mas essa situação tende a desaparecer em períodos de baixa demanda. A Figura 4 apresenta um exemplo dessa situação. Nela, o período entre os meses de outubro e abril possui demanda acima do que o sistema produtivo consegue suportar. A partir de abril, porém, a demanda diminui e ocorre excesso de capacidade produtiva.

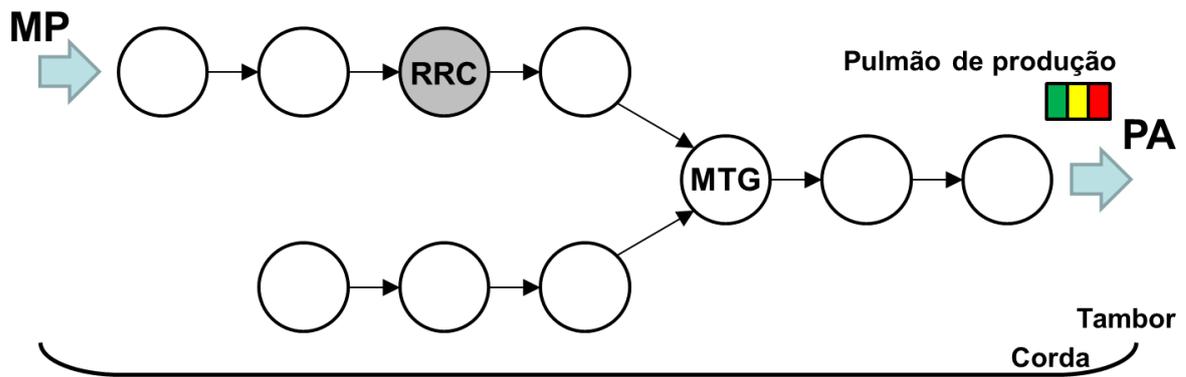
Figura 4 - Restrição de capacidade em períodos de baixa e alta demanda



Fonte: Schragenheim, Dettmer e Patterson (2009)

No S-DBR, os três pulmões descritos anteriormente são agregados em um único pulmão, chamado de Pulmão de Produção, que engloba desde a liberação da matéria-prima até a finalização do produto e entrega aos clientes. Neste caso, conforme apresentado na Figura 5, o gargalo não mais existe, dando lugar o Recurso com Restrição de Capacidade (RRC). Esta diferença de nomenclatura indica que a restrição não é mais ativa, de modo que o que dita o ritmo do sistema é a demanda de mercado.

Figura 5 - Pulmão no S-DBR



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

A lógica de implantação do sistema S-DBR em ambientes sob encomenda é estruturada em cinco passos, descritos a seguir e baseados em Souza e Baptista (2010):

1) Estabilizando o sistema de produção

A primeira ação que deve ser feita é garantir que o nível de estoque em processo no sistema está adequado. Níveis de estoque em processo abaixo da faixa ideal podem ocasionar muitos atrasos de entrega, pois qualquer atraso dentro do processo pode ter efeito nas datas de entrega. Por outro lado, níveis altos de estoque em processo congestionam o sistema, fazendo com que muitas filas se formem, as prioridades se confundam etc. O ideal, portanto, é que se tenha um nível médio de estoque em processo, suficiente para que se tenha um fluxo sem obstruções e atrasos. Goldratt (2009a) sugere admitir um nível inicial de estoque em processo de cerca de 50% do *lead-time* atual.

2) Estabelecendo prioridades

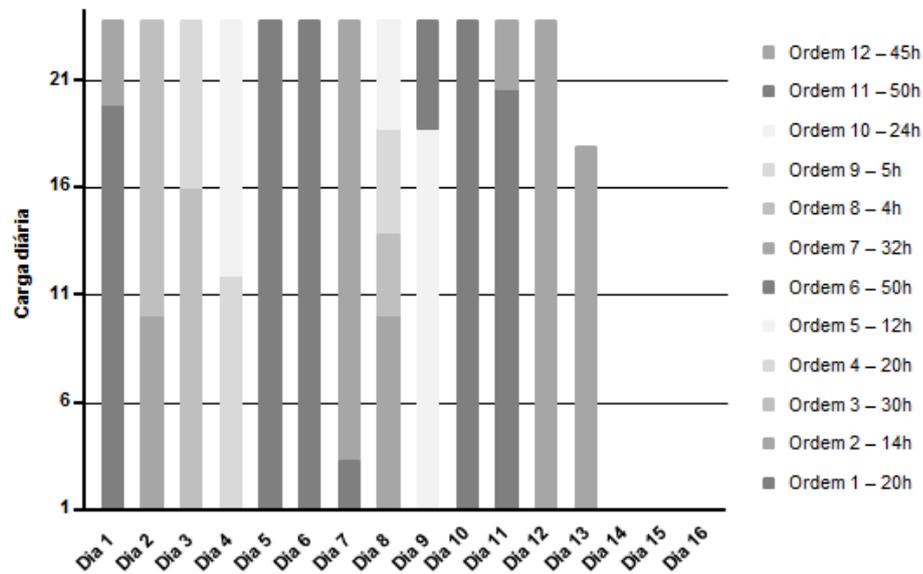
O sistema de prioridades baseado nas cores – que refletem níveis de consumo do pulmão – do *Buffer Management* traz uma grande contribuição no gerenciamento das filas do chão de fábrica no que diz respeito à escolha da ordem de produção a ser processada em seguida.

3) Estabelecendo datas de entrega confiáveis

As datas de entrega são calculadas por um mecanismo chamado de Carga Planejada (*Planned Load – PL*) que é definida por Schragenheim (2013b) como a acumulação de carga no RRC, ou em outro recurso relativamente carregado, de todas as ordens firmes que a empresa prometeu entregar dentro de certo horizonte de tempo. Como se pode perceber pela Figura 6, a carga planejada é um gráfico de barras, em que o eixo x representa o horizonte de

tempo e o eixo y, a carga diária do RRC. Ela é gerada colocando-se todas as ordens em sequência adicionando seus respectivos tempos de processamento no RRC.

Figura 6 - Carga planejada

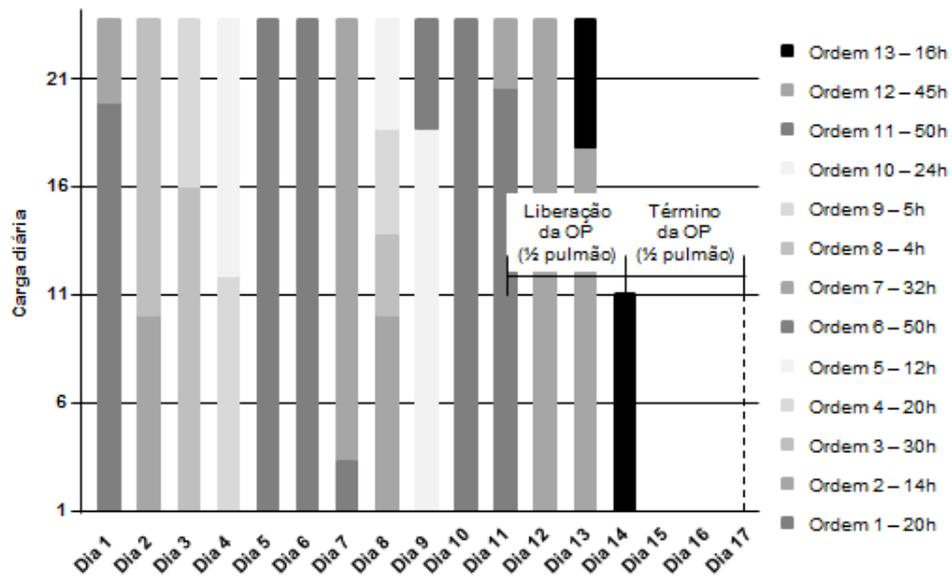


Fonte: Schragenheim (2013b)

Ela provê uma estimativa de tempo para que o RRC processe tudo o que a empresa prometeu entregar e, conseqüentemente, sabe quando processar os novos pedidos que recebe. Com essa informação e sabendo o tamanho do pulmão de produção, determina-se a data de liberação do pedido para o chão de fábrica (carga planejada menos meio pulmão de produção) e a data aproximada em que o pedido estará pronto para entrega (carga planejada mais meio pulmão de produção).

A Figura 7 exemplifica essa situação, considerando um pulmão de produção de seis dias. A liberação da ordem de produção deste produto se daria três dias antes da data do seu processamento pelo RRC (dia 11) e espera-se que esta ordem seja finalizada três dias depois desta data (dia 17). Portanto, pode-se concluir, também, que o dia 17 é a data mínima que se pode prometer a entrega deste item.

Figura 7 - Liberação e provável conclusão das ordens de produção

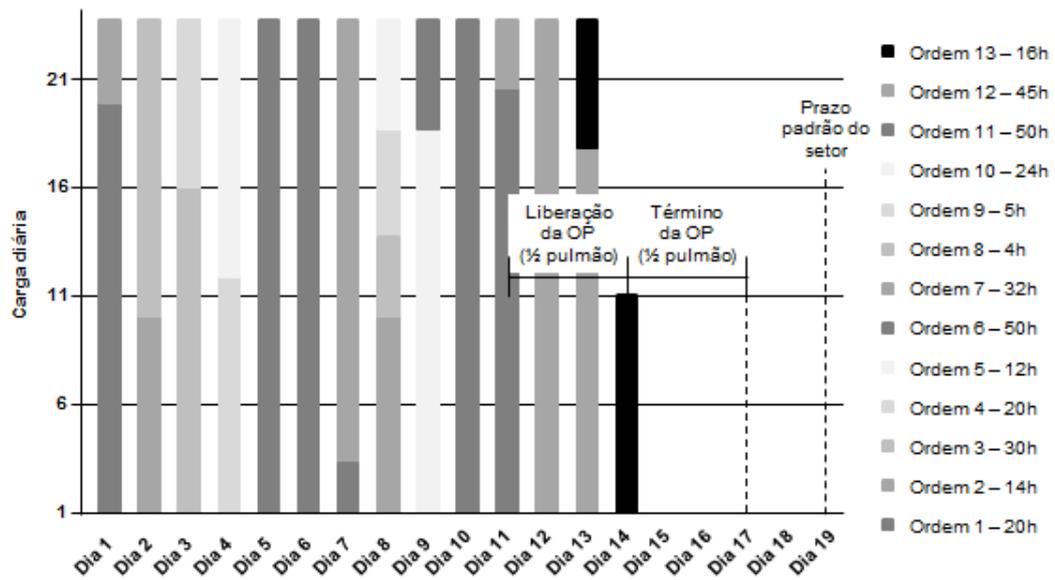


Fonte: Adaptado de Schragenheim (2013b)

4) Gerenciando a capacidade

Quando o prazo de entrega padrão do setor, ditado pela exigência do mercado, passa a ser menor do que o permitido pelo sistema produtivo atual, é necessário adicionar mais capacidade. No caso da Figura 8, o prazo exigido pelo mercado é maior do que o que a empresa consegue fazer, oferecendo uma folga de dois dias para entrega. Supondo que o prazo do setor caísse três dias, seria necessário diminuir o pulmão ou a carga planejada, de alguma forma, inclusive comprando capacidade.

Figura 8 - Prazo de entrega padrão maior do que o de conclusão da ordem de produção



Fonte: Adaptado de Schragenheim (2013b)

5) Estabelecendo um processo de melhoria contínua

O *Buffer Management* permite identificar os recursos que contribuíram para os atrasos das ordens de produção. Esporadicamente, a análise destes dados ajuda a descobrir em qual recurso houve mais bloqueios ao fluxo e, assim, agir para melhorá-lo. É importante salientar que o RRC nem sempre é o principal culpado pelos atrasos que ocorrem no processo, pois um recurso não RRC pode possuir uma variabilidade tão grande que é capaz de prejudicar o desempenho de todo o sistema.

2.2.6. O sistema S-DBR/MTA

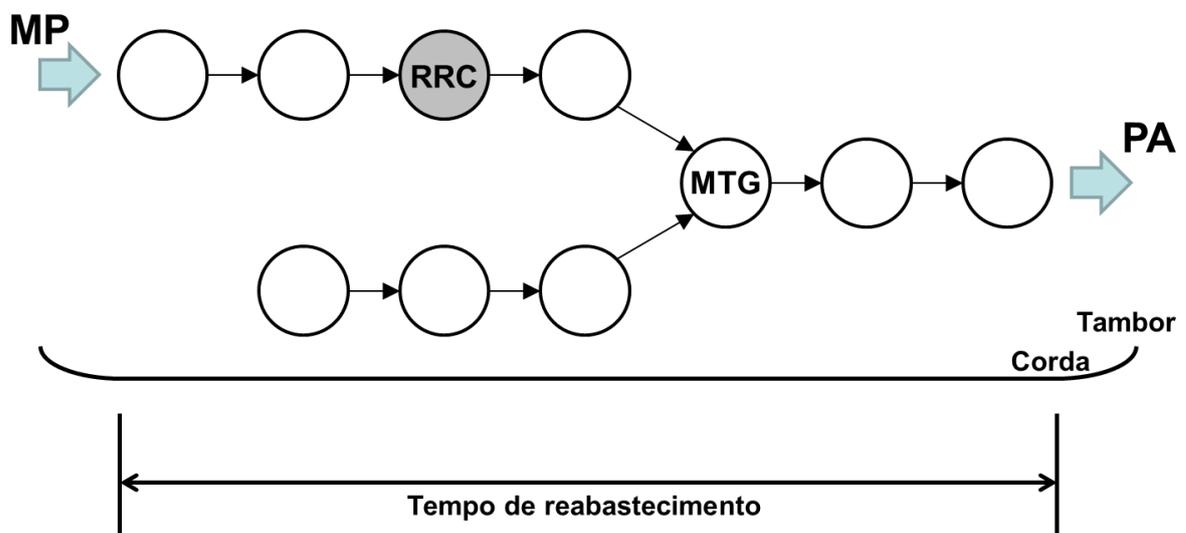
O modo de se produzir sob encomenda deveria ser a melhor forma de produzir, devido à constante pressão para se diminuir custos (principalmente de estoque) e à crescente customização dos produtos. Porém, muitas vezes isso não é possível, pois o lead-time de produção é maior do que o tempo que o cliente está disposto a esperar pelo item que ele deseja. Além disso, muitas empresas vendem seus produtos através de redes varejistas, o que dificulta a produção sob encomenda, pois tudo o que vendem está estocado em algum elo da cadeia (SOUZA; PIRES, 2014).

A proposta da TOC para ambientes *make-to-stock* (MTS) foi introduzida e extensivamente abordada por Schragenheim, Dettmer e Patterson (2009), que a nomearam de produzir para disponibilidade (*make-to-availability* – MTA). MTA é uma declaração geral do

produtor que se propõe a prover imediato fornecimento sempre que necessário (SOUZA; PIRES, 2014). Esta seção dedica maior atenção a este método em detrimento dos outros por este ser o foco da pesquisa.

A Figura 9 apresenta um processo produtivo baseado no ambiente S-DBR/MTA. Neste caso, o pulmão é medido em peças e não mais em tempo. Assim, o que protege a demanda é a quantidade de peças finalizadas somadas às peças em processamento, o estoque em processo (SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009).

Figura 9 - Pulmão no S-DBR/MTA



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

Schragenheim, Dettmer e Patterson (2009) apontam os cinco princípios sobre os quais o MTA está alicerçado:

- 1) Inventário e tempo de reposição são fortemente correlacionados

Tempos de reposição menores necessitam de menos estoque para garantir a disponibilidade e evitar perda de vendas, além de permitir uma previsão de vendas mais acurada.

- 2) Estoque em processo suplementa a proteção da disponibilidade

As ordens de produção não finalizadas também fazem parte da proteção. A ideia por trás disso é que, embora o trabalho em processo não esteja imediatamente disponível aos clientes, grande parte está perto de estar.

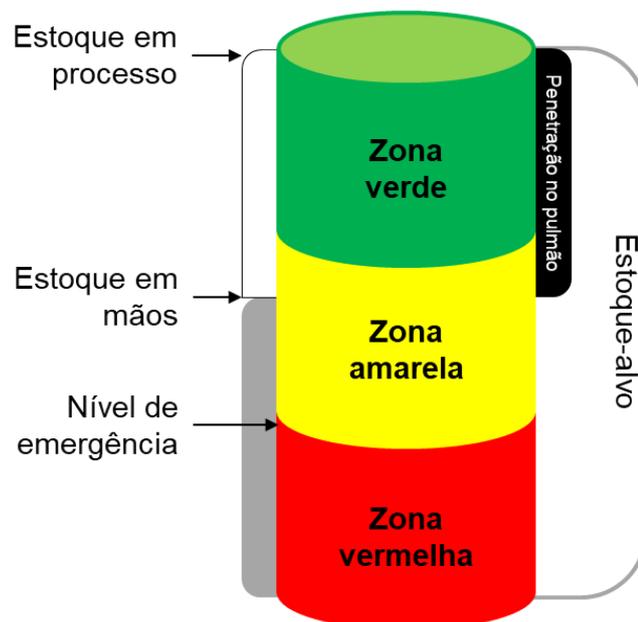
3) Amanhã será semelhante a hoje

Sempre que houver consumo do estoque de produtos acabados, uma nova ordem de produção deve ser aberta. Isso permite que se mantenha o tempo de reposição o mais curto possível e se tenha um nível de estoque relativamente constante.

4) *Status* do estoque de produtos acabados dita as prioridades da produção

A prioridade das ordens de produção deve ser dada a partir da diferença entre o estoque de acabados atual e o estoque alvo definido. A Figura 10 mostra uma representação do estoque-alvo. Ele é um planejamento de estoque suficiente para que seja atendida uma demanda máxima durante todo o tempo de reposição do sistema, e considera a soma do estoque em mãos (FGI) e em processo (WIP). A penetração no pulmão é a quantidade consumida do estoque de acabados que ainda não foi reposta.

Figura 10 - Estoque alvo



Fonte: Schragenheim (2013b)

Os níveis de prioridade das ordens de produção são:

a) Verde. Quando o estoque de acabados perfaz dois terços ou mais do nível alvo, significa que há mais do que o necessário para garantir a disponibilidade de certo produto no momento. Assim, essas ordens possuem a prioridade mais baixa em relação às demais.

b) Amarelo. Quando o estoque de acabados está entre dois terços e um terço do nível alvo, significa que não há urgência de se produzir um produto, mas o estoque não é tão alto. Essas ordens recebem prioridade intermediária.

c) Vermelho. Quando o estoque de acabados totaliza menos de um terço do nível alvo, significa que há um grande risco de faltar produtos para atender a demanda. Portanto, essas ordens recebem a máxima prioridade no chão de fábrica.

5) Estagnação é indesejável

Se um item possuir *status* verde ou vermelho por muito tempo, significa que o nível alvo necessita de correção. Para isso, se houver *status* verde em demasia, há mais estoque do que o necessário e, portanto, é preciso diminuir o nível alvo. Por outro lado, se houver *status* vermelho em demasia, há o risco de faltar produtos para atender a demanda e a orientação é para que se aumente o nível alvo.

A partir da definição dos princípios, Schragenheim, Dettmer e Patterson (2009) discorrem sobre o procedimento para se adotar com efetividade o MTA, o qual é constituído por quatro passos:

1) Definir os níveis iniciais de estoque alvo

O nível alvo de cada um dos itens produzidos e comercializados pela fábrica deve ser capaz de cobrir a máxima demanda dentro de um tempo de reposição médio, multiplicada por um fator de segurança. Para Goldratt (2009b), a “demanda máxima” não deve levar em conta ordens extremamente grandes que possam surgir, pois isso levaria a um estoque alvo igualmente grande. O autor ainda afirma que tais ordens devem ser atendidas via MTO, ou seja, os itens não devem sair do estoque de acabados, mas sim serem fornecidos por uma ordem de produção exclusiva para eles.

2) Gerar a ordem de produção

Uma vez que o nível alvo de cada produto está definido, é necessário mantê-lo. Isso significa que sempre que a soma do estoque de acabados com o estoque em processo estiver abaixo do nível alvo, indicando que houve consumo, é preciso que se abra uma nova ordem de produção daquele item. Uma saída para que não se faça tantas ordens pequenas, enchendo o tempo disponível do RRC com setups, é processar as ordens mais urgentes até que a carga planejada atinja em torno de 80% do tempo de reabastecimento.

3) Gerenciar o pulmão

Uma política de prioridades precisa ser instalada para os operadores saberem qual trabalho dentre todos os possíveis eles precisam fazer primeiro. Essa política é baseada na penetração do pulmão de cada um dos produtos, medida através do status. O status é definido como a porcentagem de peças que faltam, considerando tanto o estoque de acabados quanto o estoque em processo, para completar o nível alvo. Assim, quanto maior o status, mais risco

aquele produto corre de esgotar e maior a prioridade de produção que ele recebe. Ele é dado pela fórmula a seguir:

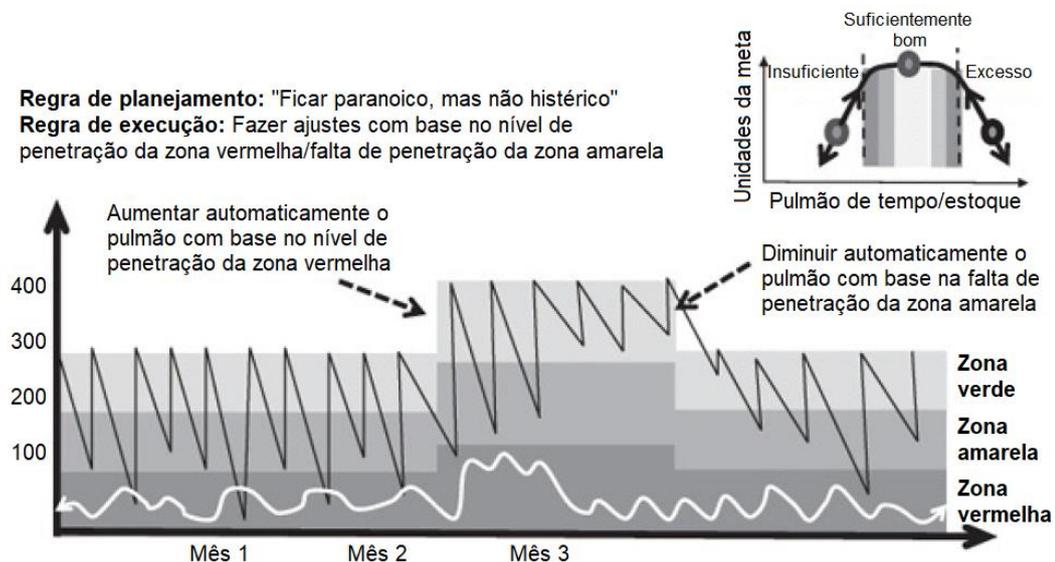
$$\text{Status} = \frac{\text{nível alvo} - \text{estoque em mãos} - \text{ordens em aberto}}{\text{nível alvo}} \quad (1)$$

4) Manter os níveis de estoque-alvo sempre corretos

O nível alvo é baseado inicialmente na combinação de dados reais e intuição, podendo estar errado devido à má leitura da situação ou à mudança desta com o passar do tempo. Assim, se ele de fato estiver errado, deve-se revisá-lo.

Se o nível alvo estiver muito baixo, haverá uma grande quantidade de ordens vermelhas daquele produto específico no chão de fábrica, o que gerará muitas penetrações no pulmão e demorará mais para resolvê-las. Portanto, deve-se aumentar o nível alvo. Caso contrário, se o nível estiver muito alto, haverá estoque de produtos acabados muito além do necessário e as ordens passarão muito tempo com status verde. Deste modo, deve-se diminuir o nível de estoque alvo. O ideal é que se tenha um nível alvo que varie entre verde e amarelo, o que significa um nível não tão alto, mas que consegue proteger até mesmo um pico súbito de vendas. A Figura 11 exemplifica este conceito.

Figura 11 - Ajustes no nível do Pulmão



Fonte: Barnard (2013)

A mudança do tamanho do nível alvo deve ser feita rapidamente face à mudança no consumo de um produto, porém, deve-se ter cuidado para não considerar meras variações estatísticas como uma tendência, o que ocasionaria muitas mudanças desnecessárias e desequilibraria o processo. Uma solução para esse problema, segundo Goldratt (2009c), é

utilizar constantes de tempo que refletem o prejuízo de não agir rapidamente. Deste modo, uma diminuição do estoque alvo, que ocasionaria uma retenção de muito estoque durante certo período, pode esperar mais para ser realizada do que um aumento daquele, que poderia trazer até perda de vendas.

2.2.7. Buffer Management em ambientes MTA

Como visto, o *Buffer Management* é uma importante ferramenta de controle da produção, que permite a atualização do tamanho do nível alvo dos produtos face às mudanças na demanda e tempo de reposição, além de estabelecer prioridades de processamento, tornando mais urgentes as ordens mais atrasadas. Gardiner, Blackstone Jr. e Gardiner (1993) ainda destacam vários outros benefícios, tais como: refinamento das complexidades do fluxo de materiais, redução do número de recursos que necessitam ser programados diretamente, alternativa ao sistema de produção baseado em cartões kanban, alinhamento de medidas locais com o desempenho global e oferece uma técnica inovadora de gestão de capacidade.

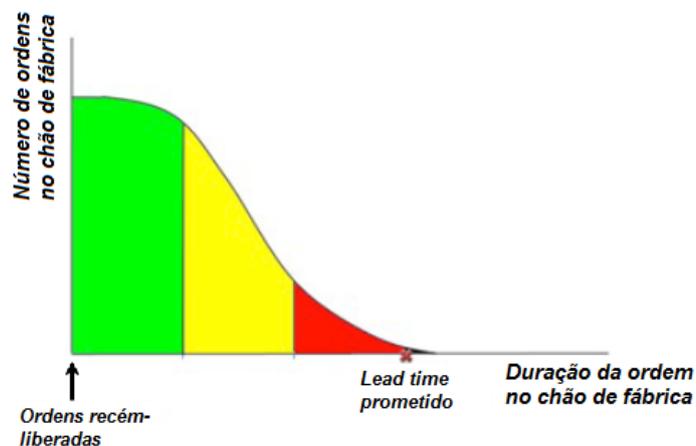
Além disso, o *Buffer Management* traz uma importante contribuição para o processo de melhoria contínua. Quando o BM indica que uma ordem se tornou vermelha, é investigado por onde essa ordem passou e os motivos que a fizeram se atrasar. Periodicamente, os principais motivos dos bloqueios ao fluxo são analisados e melhorados. Com as melhorias, os pulmões podem se tornar menores, o que diminui a quantidade de WIP no sistema e o *lead-time* de produção (GARDINER; BLACKSTONE JR.; GARDINER, 1993).

Segundo Schragenheim (2013b), existem três causas possíveis para um pedido entrar na zona vermelha: (1) atraso na liberação do pedido para o chão de fábrica, (2) fluxo muito lento na produção, e (3) pico de vendas nos dois últimos dias. A terceira causa, segundo o autor, é menos importante porque somente causa atrasos curtos. A comparação entre o pulmão planejado e o real revela as peças que estão faltando. Estes “buracos” no pulmão são causados por interrupções no fluxo de material nas operações anteriores ou nos fornecedores (GOLDRATT; FOX, 1986).

Goldratt (2008) apud Schragenheim (2013b) aponta que é necessário registrar qualquer pedido que entre na zona vermelha e que obtenha um atraso de, pelo menos, um décimo do tempo de reabastecimento previsto, em qualquer recurso. Após certo período, é preciso fazer um Pareto das causas para encontrar o recurso que mais contribui para os bloqueios ao fluxo. Goldratt e Fox (1986) sugerem que o principal recurso encontrado deve ser analisado sob as óticas de manutenção, qualidade, *setups* longos e não confiáveis, entre outras.

Goldratt (2009d) diz que se pode analisar por duas perspectivas a porcentagem de ordens vermelhas no chão de fábrica. A primeira delas significa um retrato do chão de fábrica, ou seja, com quantas ordens de cada cor os operadores estão lidando em um determinado momento. A Figura 12 exemplifica esta perspectiva com uma distribuição das cores, considerando uma taxa constante de liberação das ordens. À esquerda do gráfico estão as ordens recém-liberadas e, à medida que se move à direita, há cada vez um número menor de ordens, até que todas elas estejam finalizadas.

Figura 12 - Proporção das cores das ordens de produção em um determinado momento



Fonte: Adaptado de Goldratt (2009d)

O número de ordens vermelhas como WIP determina quão estressado está o ambiente naquele momento. Assim, muitas ordens vermelhas (mais do que 10%) significa que o sistema está trabalhando sob muita pressão, enquanto que muito poucas vermelhas (menos de 5%) significa que o pulmão está desnecessariamente longo.

A segunda perspectiva considera a distribuição de cores das ordens finalizadas. Esta, segundo o autor, não possui implicação prática alguma, já que muitas ordens podem ter sido finalizadas com status vermelho e o sistema estar trabalhando normalmente.

2.2.8. Síntese das contribuições da TOC ao processo de melhoria contínua

Em suma, o principal propósito da Teoria das Restrições é a melhoria contínua do sistema. Segundo ela, um sistema produtivo é composto por vários processos interdependentes e o que limita o desempenho deste sistema é a restrição, que pode ser o mercado (menos vendas que capacidade) ou é o processo com menos capacidade, quando a demanda supera a capacidade de produção.

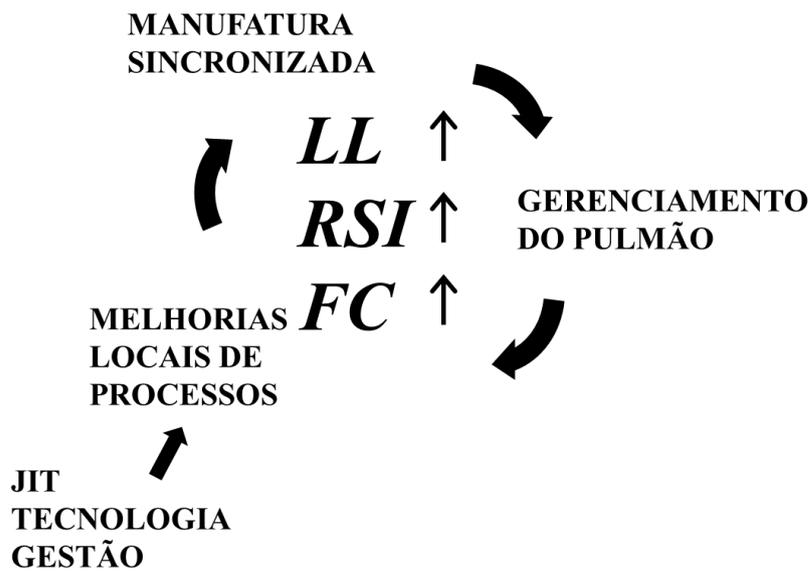
Goldratt (2009a) tece uma comparação entre os modelos de produção em massa, *lean* e TOC. Nela, ele afirma que todas utilizaram alguma forma de limitação da produção para balancear o fluxo, não deixando que muito estoque em processo bloqueie o chão de fábrica. Segundo ele, Ford controlava o espaço físico e Ohno, o número de cartões kanban para limitar o estoque em processo na fábrica. A TOC, por sua vez, utiliza pulmões de tempo ou estoque para este fim.

Barnard (2013) afirma que Goldratt propôs dois mecanismos simples para identificar onde as melhorias no fluxo eram necessárias e para balancear o fluxo de produtos e serviços com a demanda. O primeiro deles é semelhante à ideia de Ford: observação de onde o estoque em processo está crescendo no sistema e atuação no recurso que contribui para que isso ocorra.

O segundo deles é o mecanismo *Buffer Management* da TOC: Se o pulmão de tempo de uma ordem específica penetra a região vermelha, ou se o pulmão de estoque atinge a região vermelha ou preta, então esta ordem deveria não somente ser priorizada e acelerada para garantir a data de entrega ou a disponibilidade daquele produto, mas também deveria ser mantido um histórico de qual recurso esta ordem estava esperando. Periodicamente, esses dados devem ser analisados utilizando Pareto para se determinar qual recurso mais contribuiu para o surgimento de ordens vermelhas e pretas. O recurso encontrado deve ser o alvo de melhorias do próximo período.

Goldratt e Fox (1986) afirmam que o primeiro passo para se estabelecer um processo de melhoria é implementar manufatura sincronizada. Em seguida, é necessário gerenciar os pulmões de inventário e focar o processo de melhoria contínua. Por fim, técnicas *just-in-time*, novas tecnologias e boas práticas de gestão deveriam ser utilizadas onde terão o maior impacto. O resultado do correto emprego desses passos será, segundo os autores, um aumento no lucro líquido, no retorno sobre o investimento e no fluxo de caixa. A Figura 13 demonstra este processo.

Figura 13 - Processo de melhoria contínua segundo a TOC



Fonte: Goldratt e Fox (1986)

Como se percebe e como afirma Reid (2007), uma das forças da TOC, em oposição a abordagens de melhoria que buscam otimizar o desempenho de cada área do sistema individualmente, como o Seis Sigma e a Manufatura Enxuta, é que ele é baseado em um pensamento sistêmico, focando esforços de melhoria nos seus pontos críticos. Esta prática traz melhorias substanciais, já que atinge o ponto que restringe o ganho da empresa.

3. MÉTODO DE PESQUISA

3.1. INTRODUÇÃO

Esta seção detalha o método de pesquisa, apresentando o sistema produtivo que inspirou o modelo, a origem dos dados utilizados, parâmetros da simulação e detalhamento da montagem dos cenários e das derivações.

3.2. IDENTIFICAÇÃO DO MÉTODO DE PESQUISA

Esta dissertação se baseia na estratégia de pesquisa experimental com a utilização do método de modelagem e simulação, pois ela permite avaliar numericamente um modelo e reunir dados para estimar as verdadeiras características de um modelo (LAW; KELTON, 2000).

A pesquisa bibliográfica foi executada nas seguintes etapas:

- Definição dos termos de busca;
- Definição das bases de dados;
- Realização da pesquisa;
- Leitura dos resumos e seleção dos trabalhos;
- Leitura dos textos e retirada das partes relevantes para citação.

A pesquisa foi feita com o uso da seguinte combinação de palavras-chave e operadores lógicos: "*continuous improvement*" AND ("*theory of constraints*" OR "TOC" OR "Goldratt" OR "*drum-buffer-rop*" OR "DBR"). O intuito de tal expressão foi o de encontrar publicações somente sobre melhoria contínua no âmbito da Teoria das Restrições e, mais especificamente, tambor-pulmão-corda, eliminando grande parte dos trabalhos relacionados a quaisquer outras áreas.

Esta busca foi realizada no campo "*article title, abstract, keywords*", o qual envolve títulos de artigos, resumos e palavras-chave, principalmente na base de dados Scopus da editora Elsevier, pois esta base é rigorosa e apresenta uma grande quantidade de trabalhos. Foram utilizadas também outras bases e livros reconhecidos sobre o tema.

A simulação deste trabalho foi conduzida com o auxílio do *software* ProModel, a partir das etapas sugeridas por Law e Kelton (2000):

- Formular o problema e planejar o estudo: definir os objetivos do estudo, medidas de desempenho, escopo do modelo e outros parâmetros iniciais;
- Coletar dados e definir o modelo: coletar informações sobre o layout e operações, além dos dados dos parâmetros do modelo e incluir distribuições de probabilidade;

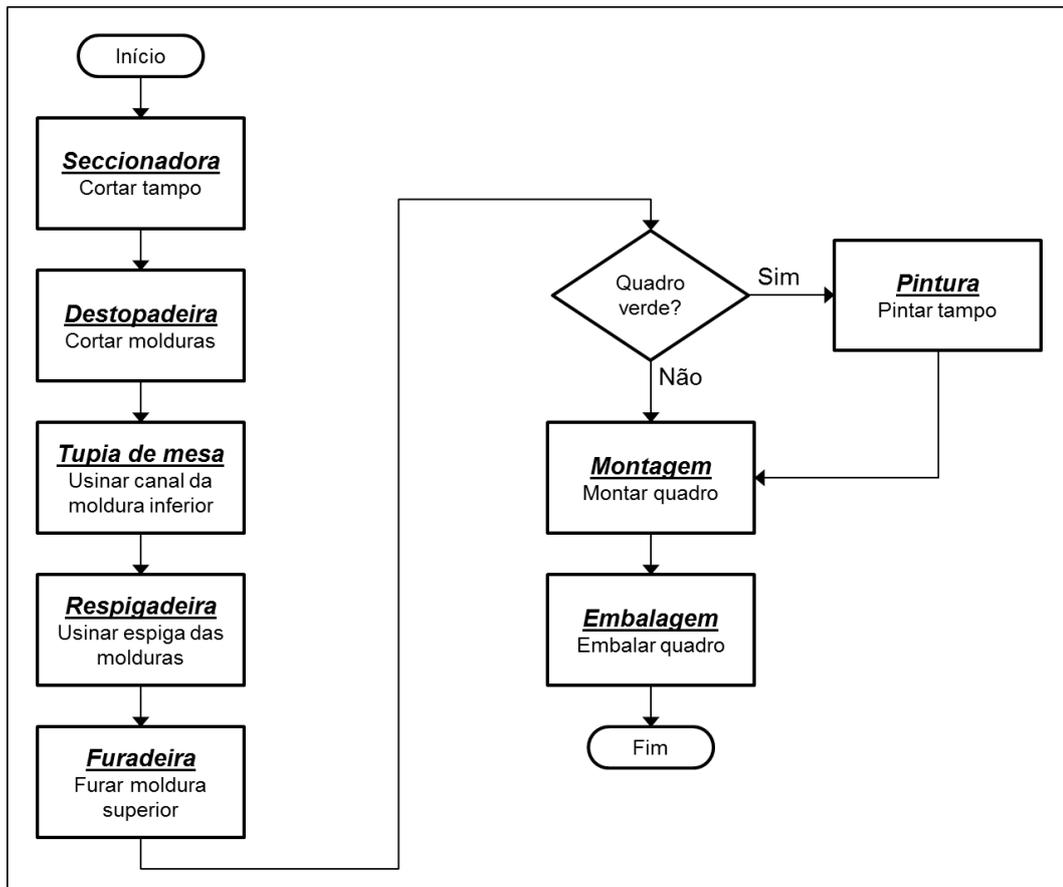
- Validar o modelo: verificar se o modelo definido corresponde ao real;
- Construir o programa computacional e verificar: programar o modelo definido e validado e rodar;
- Executar rodadas-piloto: validar o modelo novamente fazendo algumas rodadas-piloto;
- Desenhar os experimentos: definir a duração das rodadas, aquecimento, número de simulações independentes;
- Executar as simulações: simular o programa desenvolvido;
- Analisar os resultados: verificar o desempenho do sistema.

3.3. APLICAÇÃO

O sistema produtivo simulado foi baseado em Castro (2016), que utilizou dados de um processo real de manufatura, mais especificamente uma linha de produção de quadros de madeira de uma empresa localizada no interior do estado de São Paulo. Os quadros de madeira são compostos por duas unidades de moldura lateral, uma de moldura superior, uma de moldura inferior, uma de tampo e uma de porta-canetas.

Na simulação foram utilizados oito produtos diferentes, sendo quatro dimensões em duas cores cada. O fluxograma mostrado na Figura 14 mostra o processo produtivo dos quadros escolares.

Figura 14 - Fluxograma do processo produtivo utilizado neste trabalho



Fonte: Autor

Nele, nota-se que o processo produtivo dos quadros difere levemente dependendo da cor do produto. Os tampos dos quadros verdes necessitam ser pintados antes de irem para a montagem.

A seguir, são descritas as etapas do processo de fabricação dos quadros escolares:

- **Cortar tampo:** as chapas de fibra de madeira são cortadas de acordo com as dimensões necessárias para formar o tampo;
- **Cortar molduras:** os perfis de pinus são cortados nas dimensões descritas na ordem de produção e formam as molduras inferior, superior e laterais;
- **Usinar canal:** são usinados os canais para fixar as molduras ao tampo, além de um canal para fixar o porta-canetas;
- **Usinar espiga:** são usinadas espigas nas molduras laterais para que se encaixem nas molduras superior e inferior;
- **Furar moldura:** são feitos furos na moldura superior para fixar os ganchos para pendurar o quadro;

- **Pintar tampo:** os tampos dos quadros verdes são pintados;
- **Montar quadro:** os quadros são montados manualmente a partir dos componentes fabricados anteriormente;
- **Embalar quadro:** os quadros são embalados em embalagens plásticas.

A empresa considerada neste trabalho, segundo Castro (2016), trabalhou 288 dias em 2013, ano ao qual pertencem os dados utilizados. Na simulação, considera-se que um dia de trabalho equivale a oito horas. Portanto, a empresa trabalhou 2.304 horas.

3.4. MODELAGEM CONCEITUAL

O estudo consistiu em simular um processo produtivo trabalhando sob o método MTA aplicando-se, periodicamente, melhorias a seus recursos segundo diferentes regras, introduzidas no capítulo 1 e que serão detalhadas na seção 3.5. A simulação total consistiu em 12 períodos de 192 horas de aquecimento, além de outros 60 períodos de simulação, totalizando 13.824 horas.

O ambiente simulado segue todos os conceitos da dinâmica de uma linha de produção segundo o MTA e os seus dois mecanismos de controle: o *Buffer Management* e a Carga Planejada. As prioridades de lançamento das ordens para o chão de fábrica e de produção em cada recurso se dão pelo status das ordens, que considera a diferença entre o nível alvo e a quantidade real de peças no estoque de acabados (FGI) e das ordens que ainda estão na produção (WIP). As que estão na região vermelha recebem prioridade sobre as amarelas, e estas, sobre as verdes.

Os parâmetros considerados na simulação estão expostos abaixo:

- Fator de segurança:

este fator considera a amplitude das variabilidades presentes no processo. Neste estudo, o fator de segurança foi fixado em 2.

- Tempo de reposição médio:

foi encontrado por meio de simulação e fixado em 3 dias.

- Tempo entre chegada de pedidos:

o tempo entre chegadas de pedidos possui uma função exponencial, com média igual a 8 horas.

- Variabilidade da demanda:

o comportamento da variável que representa a quantidade de itens nos pedidos possui uma função lognormal, com média dada pelo Quadro 2. A demanda diária de cada produto é a soma dos pedidos recebidos por dia para cada um deles. Estas demandas foram mascaradas a

pedido da empresa, porém a proporção entre os produtos continuou a mesma. Os respectivos desvios-padrão são dados pelas médias multiplicadas pelo coeficiente de variação 0,5.

Quadro 2 - Demanda média diária de cada produto, em unidades

Código	Descrição	Demanda média diária
8164	Quadro Branco Madeira 40x30 cm	30
8166	Quadro Branco Madeira 60x40 cm	21
8167	Quadro Branco Madeira 70x50 cm	10
8168	Quadro Branco Madeira 90x60 cm	13
8175	Quadro Verde Madeira 40x30 cm	8
8177	Quadro Verde Madeira 60x40 cm	7
8178	Quadro Verde Madeira 70x50 cm	14
8180	Quadro Verde Madeira 90x60 cm	7

Fonte: Castro (2016)

- Estoque-alvo inicial:

o cálculo do estoque-alvo inicial se dá pela multiplicação dos parâmetros de demanda, fator de segurança e tempo de reposição médio para cada um dos produtos incluídos no estudo. Os estoques-alvos utilizados estão apresentados no Quadro 3 e são os mesmos utilizados em Castro (2016). Na simulação final, ele é mantido constante para que se possa comparar de forma mais precisa os diferentes cenários.

Quadro 3 - Estoque-alvo dos produtos utilizados na simulação

Código	Demanda média diária	Fator de segurança	Tempo de reposição	Estoque-alvo
8164	30	2	3	180
8166	21	2	3	126
8167	10	2	3	60
8168	13	2	3	78
8175	8	2	3	48
8177	7	2	3	42
8178	14	2	3	84
8180	7	2	3	42

Fonte: Castro (2016)

- Variabilidade dos tempos de processamento:

o comportamento dos tempos de processamento segue a mesma lógica do comportamento da demanda, mas com as médias sendo dadas pelas Tabelas 11, 12, 13, 14, 15 e 16, localizadas no Apêndice A, para cada um dos cenários. A distribuição utilizada para

gerar os dados de demanda e de tempo de processamento foi a lognormal, pois é assimétrica com a cauda longa à direita e desconsidera valores negativos (BECKER et al., 2013). Além disso, evidências empíricas são apresentadas por Brown (1959) de que esta distribuição representa bem demanda de produtos e por Hillier (2013) no caso de tempos de processamento.

- Fator de melhoria:

ao final de cada período, o programa calcula os parâmetros para identificar o recurso eleito para ser melhorado, com base nas premissas de cada cenário. Uma vez identificado este recurso, tanto o tempo de processamento médio e seu desvio-padrão são diminuídos em 1,66%, resultado da divisão de 100% por 60 períodos em que de fato há melhoria. No caso da derivação 3, melhoria em todos os recursos, o fator de melhoria é dividido por 9, quantidade de recursos do sistema, resultando em um fator de melhoria de aproximadamente 0,19%. Esta divisão visa manter constante a força de trabalho dedicada a melhorias do sistema entre todas as derivações de melhoria. Por exemplo, nove pessoas focam na melhoria de um único recurso nas derivações 2, 4, 5 e 6, ao passo que na derivação 3 cada uma destas nove pessoas foca na melhoria de um recurso diferente entre si.

3.5. CENÁRIOS E DERIVAÇÕES DA SIMULAÇÃO

A simulação é composta por seis cenários de configuração de linha e seis derivações de foco das melhorias. Os cenários de linha visam analisar o sistema em relação à taxa de ocupação dos recursos, ao passo que as derivações analisam cada cenário de acordo com diferentes comportamentos de melhoria.

Os tempos médios de processamento do trabalho original, dados em horas, são reproduzidos na Tabela 1. Nas linhas do quadro se encontram as estações de trabalho do sistema, enquanto que nas colunas estão os códigos dos produtos fabricados.

Tabela 1 - Tempos médios de processamento, em horas (Cenário Original)

	8164	8166	8167	8168	8175	8177	8178	8180
Seccionadora	0,0377	0,0440	0,0543	0,0770	0,0377	0,0440	0,0543	0,0770
Destopadeira	0,0462	0,0525	0,0525	0,0653	0,0462	0,0525	0,0525	0,0653
Tupia de Mesa	0,0500	0,0500	0,0500	0,0500	0,0500	0,0500	0,0500	0,0500
Respigadeira	0,0462	0,0462	0,0462	0,0462	0,0462	0,0462	0,0462	0,0462
Furadeira	0,0600	0,0600	0,0600	0,0600	0,0600	0,0600	0,0600	0,0600
Pintura	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0621	0,1168	0,1291	0,2337
Montagem	0,0491	0,0491	0,0561	0,0561	0,0491	0,0491	0,0561	0,0561
Embalagem	0,0487	0,0422	0,0487	0,0548	0,0487	0,0422	0,0487	0,0548
Inspeção	0,0494	0,0494	0,0494	0,0494	0,0494	0,0494	0,0494	0,0494

Fonte: Castro (2016)

Na Tabela 2 estão as cargas diárias de trabalho, em horas, de cada produto em cada recurso, resultado da multiplicação da demanda média diária (Quadro 2) e tempo médio de processamento (Tabela 1). A coluna “Soma” fornece a soma da carga para cada recurso e a coluna “Ocup.” apresenta a taxa de ocupação diária de cada recurso, calculada como a divisão da carga diária dos recursos por 8, número de horas diárias de trabalho.

Tabela 2 - Carga diária dos recursos, em horas, e taxa diária de ocupação (Cenário Original)

	8164	8166	8167	8168	8175	8177	8178	8180	SOMA	OCUP.
Seccionadora	1,131	0,924	0,543	1,001	0,302	0,308	0,760	0,539	5,508	68,8%
Destopadeira	1,386	1,103	0,525	0,849	0,370	0,368	0,735	0,457	5,792	72,4%
Tupia de Mesa	1,500	1,050	0,500	0,650	0,400	0,350	0,700	0,350	5,500	68,8%
Respigadeira	1,386	0,970	0,462	0,601	0,370	0,323	0,647	0,323	5,082	63,5%
Furadeira	1,800	1,260	0,600	0,780	0,480	0,420	0,840	0,420	6,600	82,5%
Pintura	0,000	0,000	0,000	0,000	0,497	0,818	1,807	1,636	4,758	59,5%
Montagem	1,473	1,031	0,561	0,729	0,393	0,344	0,785	0,393	5,709	71,4%
Embalagem	1,461	0,886	0,487	0,712	0,390	0,295	0,682	0,384	5,297	66,2%
Inspeção	1,482	1,037	0,494	0,642	0,395	0,346	0,692	0,346	5,434	67,9%

Fonte: Castro (2016)

Os cenários utilizados na simulação foram confeccionados por meio da ferramenta Solver, do Microsoft Excel 2010. Os três primeiros cenários simulam sistemas produtivos balanceados e, portanto, tiveram os tempos de processamento modificados de modo que todos os recursos obtivessem a mesma carga diária de trabalho. Os três últimos, por outro lado, caracterizam sistemas desbalanceados e tiveram o tempo de processamento do RRC modificado para obter a carga desejada. Os demais recursos tiveram seus tempos de processamento médios modificados segundo a mesma variação obtida pelo recurso RRC.

O cenário 1 avalia o comportamento das melhorias em um sistema balanceado e com baixa ocupação dos recursos. Nele, a taxa de ocupação de todos os recursos foi fixada em 75% do tempo diário, ou 6 horas.

O cenário 2, como o anterior, avalia o sistema em um ambiente balanceado, porém com média taxa de ocupação. Neste cenário, a taxa de ocupação de todos os recursos foi fixada em 85% do tempo diário, ou 6,8 horas.

O cenário 3 também avalia o sistema em um ambiente balanceado, mas com alta taxa de ocupação, fixada em 95% do tempo diário, ou 7,6 horas.

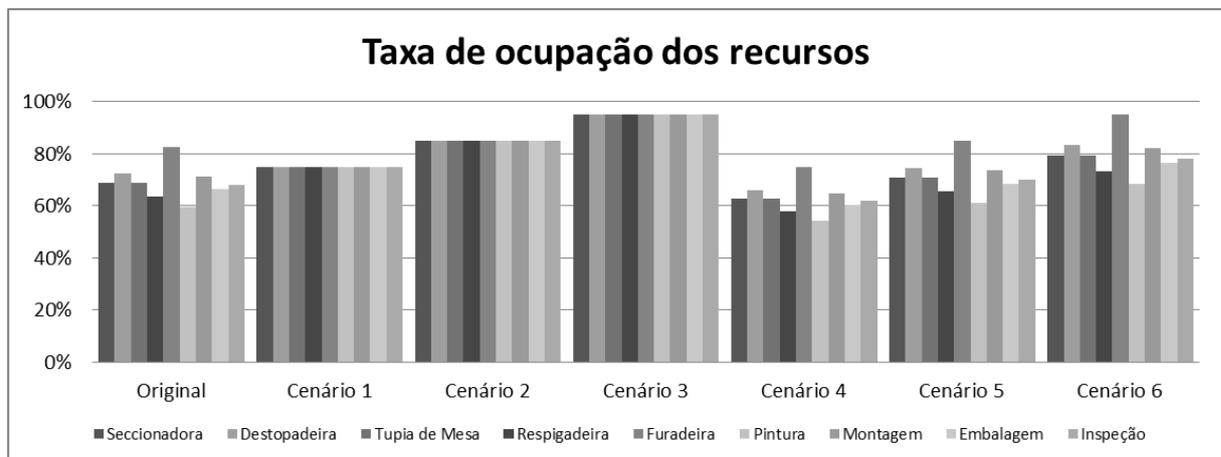
O cenário 4, por sua vez, busca avaliar o comportamento das melhorias em um sistema desbalanceado e com baixa ocupação de RRC. Para isso, a taxa de ocupação do RRC é de 75% do tempo diário, ou 6 horas, enquanto que a taxa de ocupação dos outros recursos foram variados proporcionalmente a ela.

O cenário 5 simula um ambiente desbalanceado e com média ocupação do RRC. Neste caso, a taxa de ocupação do RRC foi fixada em 85% do tempo diário, ou 6,8 horas, e a taxa de ocupação dos demais recursos variaram proporcionalmente a ela.

Por fim, o cenário 6 simula um ambiente desbalanceado com alta taxa de ocupação do RRC, 95% do tempo diário, ou 7,6 horas.

Em resumo, as cargas diárias de trabalho se comportam de acordo com a Figura 15. As cargas diárias de cada recurso em cada cenário estão destacadas nas Tabelas 17, 18, 19, 20, 21 e 22, localizadas no Apêndice B deste trabalho.

Figura 15 - Ocupação dos recursos nos cenários propostos



Fonte: Autor

O intuito das derivações é analisar como diferentes políticas de melhorias afetam o desempenho do sistema produtivo.

A derivação 1 apresenta um sistema sem melhorias. Ela foi proposta como uma forma de controle, para que se possam comparar as melhorias feitas nos outros cenários com a ausência de melhorias.

A derivação 2 considera melhorias aleatórias nos recursos. Em cada período, o sistema aponta aleatoriamente um recurso para que seu tempo de processamento seja melhorado.

Na derivação 3 ocorrem melhorias em todos os recursos ao fim de cada período. Como neste caso são feitas nove melhorias por período, o impacto de cada melhoria é dividido por nove para que o impacto total seja o mesmo das outras derivações que apresentam melhorias.

Na derivação 4 o método de focalização de melhorias é baseado na quantidade de estoque em processo em cada recurso. Assim, a melhoria ocorre no recurso que possui a maior fila de peças para processar (maior quantidade de estoque em processo esperando processamento no recurso).

A derivação 5 considera o maior nível de utilização como parâmetro de ocorrência de melhorias nos recursos.

Por fim, a derivação 6 busca focar a melhoria no recurso em que mais ordens se tornam vermelhas ao fim de cada período. Estes recursos são os que mais contribuem para os bloqueios ao fluxo das ordens na linha de produção.

Percebe-se que as três últimas abordagens citadas anteriormente condizem com a Teoria das Restrições, de modo que um único recurso é escolhido para ser melhorado, de acordo com algum parâmetro, seja a quantidade de estoque a ser processado pelos recursos, nível de ocupação destas máquinas ou quantidade de ordens vermelhas que um recurso gera.

Para fazer referência aos cenários e suas respectivas derivações, foi utilizada a nomenclatura C_x_Dy , em que x é o número do cenário e y da derivação. Por exemplo, a configuração $C3_D4$ significa que se está simulando o cenário 3 (fábrica balanceada com 95% de utilização) e derivação 4 (melhoria com base no estoque em processo).

3.6. VARIÁVEIS DEPENDENTES E INDEPENDENTES

A avaliação do sistema se dá modificando algumas variáveis e verificando o impacto desta mudança em outras variáveis, dependentes das primeiras. No caso deste trabalho, as variáveis independentes utilizadas são os tempos de processamento, que são modificados de acordo com as premissas de cada derivação.

Medidas de desempenho são utilizadas pelas organizações para identificar oportunidades e conduzir esforços para o aumento da competitividade (LARSEN; THORSTENSON, 2014). Neste estudo, foram utilizados os indicadores de desempenho Taxa de Preenchimento de Pedidos (*Fill Rate* – FR) e Tempo de Ciclo (*Cycle Time* – CT).

O indicador *Fill Rate* é a medida de atendimento da demanda realizada diretamente a partir do estoque disponível (SILVER; PYKE; PETERSON, 1998). O seu objetivo neste trabalho é mensurar o nível de serviço do sistema, ou seja, o atendimento imediato a partir do estoque de produtos acabados em termos de quantidade e *mix* de produtos. Ao final de cada rodada, o programa soma as quantidades atendidas e a quantidade demandada de cada produto. Ao fim da simulação, é realizada a divisão destas duas medidas.

A segunda variável, Tempo de Ciclo, é o tempo contado a partir do consumo de uma unidade do estoque de produtos acabados até a sua reposição (SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009). Ele foi utilizado para medir o tempo com que o sistema repõe as unidades de produtos vendidas. Ao longo da simulação, o programa calcula a média de todos os tempos de ciclo obtidos. Isso que permite também fazer uma relação direta com a quantidade de estoque em processo na fábrica, por meio da Lei de Little (HOPP; SPEARMAN, 2013), expressa abaixo:

$$WIP = TH \times CT \quad (2)$$

em que WIP é o estoque em processo (*work in process*), TH é a taxa de produtividade de um sistema (*throughput*) e CT é o tempo de ciclo do sistema (*cycle time*). Dado que TH reflete o atendimento da demanda na ausência de recursos gargalos, quanto maior o CT, maior o WIP.

3.7. TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS

A simulação foi conduzida pelo *software* Promodel 2016. Em seguida, os dados das variáveis ao longo da simulação foram exportados para o Microsoft Excel 2010, tratados, e inseridos no *software* R versão 3.5.1 para a avaliação estatística de normalidade e de comparação das amostras.

Para atestar ou refutar a normalidade dos dados, foi utilizado o teste de Shapiro-Wilk (SHAPIRO; WILK, 1965), que, segundo os autores, avalia a hipótese nula de que a amostra vem de uma população normalmente distribuída.

A estatística W, calculada conforme as fórmulas (3) e (4), varia de 0 a 1. Se W for pequeno, a hipótese é rejeitada; se for próximo de 1, é aceita (RAZALI; WAH, 2011).

$$W = \frac{\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)}^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

onde $x_{(i)}$ é a i -ésima ordem estatística, \bar{x} é a média da amostra, e os coeficientes a_i são dados por:

$$(a_1, \dots, a_n) = \frac{m^T V^{-1}}{(m^T V^{-1} V^{-1} m)^{1/2}} \quad (4)$$

onde $m = (m_1, \dots, m_n)^T$ é um vetor feito de valores esperados de uma amostra de variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas da distribuição normal padronizada, e V a sua matriz de covariância.

Se o p -valor for menor do que o nível de significância escolhido, a hipótese nula é rejeitada e há evidência de que os dados não são normalmente distribuídos. Caso contrário, a hipótese nula não pode ser rejeitada. Royston (1995) melhorou o algoritmo, de modo que ele pudesse ser utilizado em amostras de até 5.000 itens.

Este teste foi escolhido pelo fato de haver evidências, por meio de simulações de Monte Carlo, de que ele possui maior precisão para um dado nível de significância, se comparado a outros métodos, como Kolmogorov–Smirnov, Lilliefors e Anderson–Darling (RAZALI; WAH, 2011).

O resultado deste teste, como será discutido nas próximas seções, resultou em muitos casos de não normalidade. Por isso, foi utilizado teste não paramétrico (que não supõe algum tipo específico de distribuição dos dados) de Wilcoxon-Mann-Whitney de amostras independentes (MANN; WHITNEY, 1947) para comparar os cenários aos pares e avaliar se há diferença entre seus membros.

O teste envolve o cálculo da estatística U , dada pelo cálculo a seguir (MANN; WHITNEY, 1947):

$$U = n_1 n_2 - \frac{n_2(n_2+1)}{2} - \sum_{i=n_1+1}^{n_2} R_i \quad (5)$$

onde n_1 é o tamanho da amostra 1, n_2 é o tamanho da amostra 2 e R_i é o ranqueamento do peso da amostra.

Se o U calculado for menor ou igual ao valor crítico da tabela U , para os respectivos tamanhos de amostra e nível de significância, rejeita-se a hipótese nula.

4. RESULTADOS

A análise dos resultados foi feita com base em duas variáveis dependentes: tempo de ciclo (*cycle time* – CT) e taxa de preenchimento de pedidos (*fill rate* – FR). Estas variáveis foram escolhidas porque traduzem da melhor maneira o desempenho de sistemas de produção para estoque: a disponibilidade de produtos acabados por meio do atendimento do maior número possível de itens mediante pedidos e rápido reabastecimento do pulmão de produção.

Primeiramente foi feita uma análise descritiva das variáveis, observando o comportamento de suas médias. Em seguida, foi feito um teste de hipóteses para avaliar a normalidade dos dados de saída dos cenários simulados e, por último, outro teste para avaliar a igualdade presente entre as médias das duas variáveis nas derivações dentro de cada cenário de configuração de linha.

A análise estatística foi feita utilizando o *software* R. Primeiramente foi testada a normalidade dos dados por meio do teste Shapiro-Wilk (SHAPIRO; WILK, 1965) com nível de significância de 5%. Em seguida, foram comparadas as médias aos pares das derivações com o teste de Wilcoxon-Mann-Whitney, também chamado de teste Mann-Whitney U (MANN; WHITNEY, 1947) com ajustamento do p-valor dada por Benjamini e Hochberg (1995), também com nível de significância de 5%.

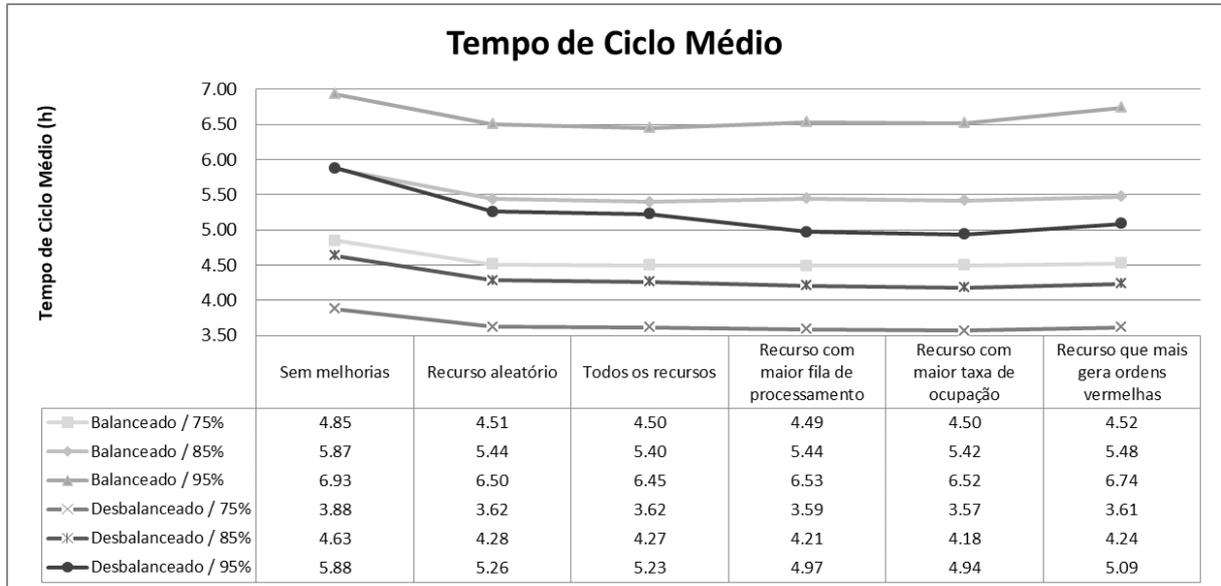
4.1. TEMPO DE CICLO MÉDIO

O tempo de ciclo médio é apresentado na Figura 16. Nela, as linhas representam os cenários de configuração de linha e os pontos destacados nas linhas se referem às políticas de melhoria impostas a cada um deles.

Analisando o desempenho dos cenários em relação às condições de melhoria, percebe-se que, tanto em sistemas balanceados quanto em desbalanceados, quanto menor a taxa de ocupação do sistema, menor o tempo de ciclo. Além disso, é possível analisar o desempenho dos cenários balanceados em relação aos seus correspondentes desbalanceados. Nota-se que, para o mesmo nível de ocupação do sistema, os cenários desbalanceados possuem tempos de ciclo médio menores.

Estas duas características possuem uma causa comum: a quantidade de estoque em processo. Na primeira, a menor ocupação do sistema permite que não haja filas muito longas de itens a processar, o que melhora o fluxo das peças. Na segunda, por haver somente uma restrição no sistema e conseqüentemente menos necessidade de proteção em forma de estoque, o fluxo é facilitado em relação ao correspondente que possui todos os recursos com as mesmas cargas de trabalho.

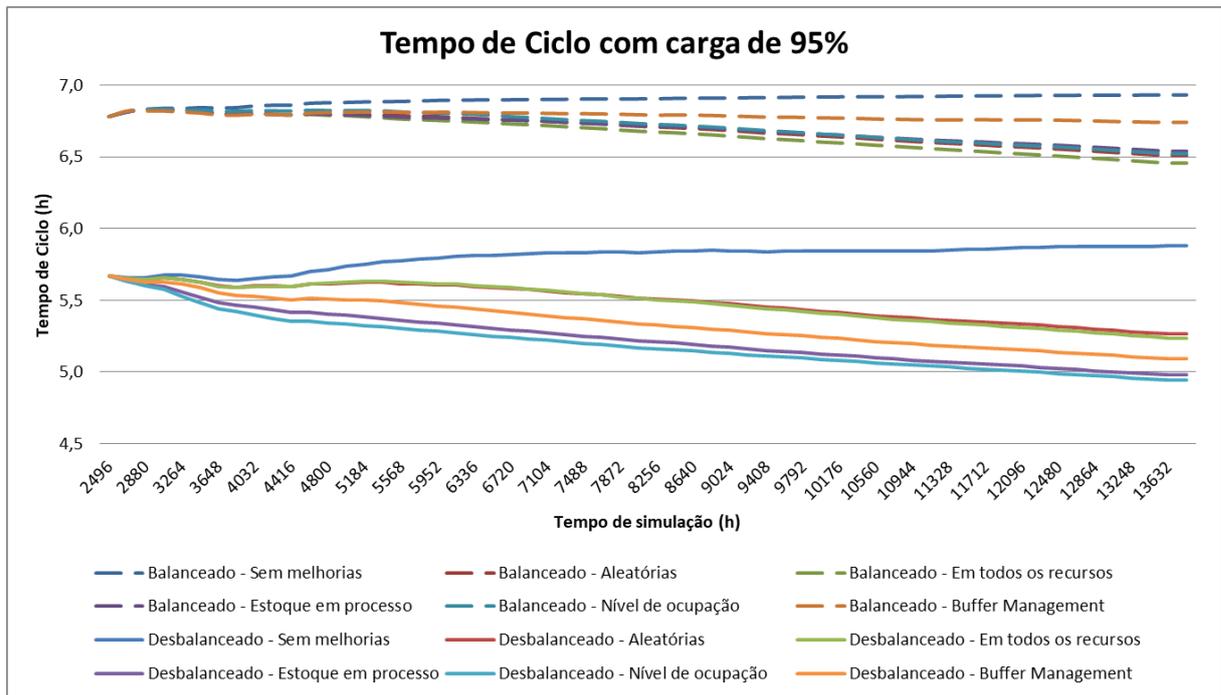
Figura 16 - Tempo de ciclo médio



Fonte: Autor

Com o intuito de exemplificar o comportamento das variáveis dependentes em relação ao tempo, a variável Tempo de Ciclo dos dois cenários simulados com 95% de carga diária foi selecionada e apresentada na Figura 17. Nela, as linhas tracejadas se referem à configuração balanceada e as contínuas, à desbalanceada. Cada linha destaca o comportamento de um método específico de melhoria.

Figura 17 - Tempo de Ciclo com carga diária de 95%



Fonte: Autor

De início, pode-se perceber que após o período de aquecimento (tempo de simulação = 2.496 horas), os cenários desbalanceados possuem desempenho em termos de tempo de ciclo muito superior aos balanceados. Outro fato que merece destaque é que mesmo os cenários balanceados com melhoria possuem desempenho inferior ao desbalanceado sem melhoria. Isso corrobora as afirmações de Goldratt de que sistemas desbalanceados são preferíveis em detrimento dos balanceados, considerando o sistema produtivo utilizado nesta pesquisa.

Além disso, como se espera, à medida que as melhorias acontecem, o desempenho das derivações com melhoria se distancia das sem melhoria, em ambos os casos de balanceamento. Por fim, percebe-se que a derivação de melhorias em todos os recursos possui desempenho superior na configuração balanceada, enquanto que a focalização de melhorias pelo nível de utilização supera as outras derivações na configuração desbalanceada.

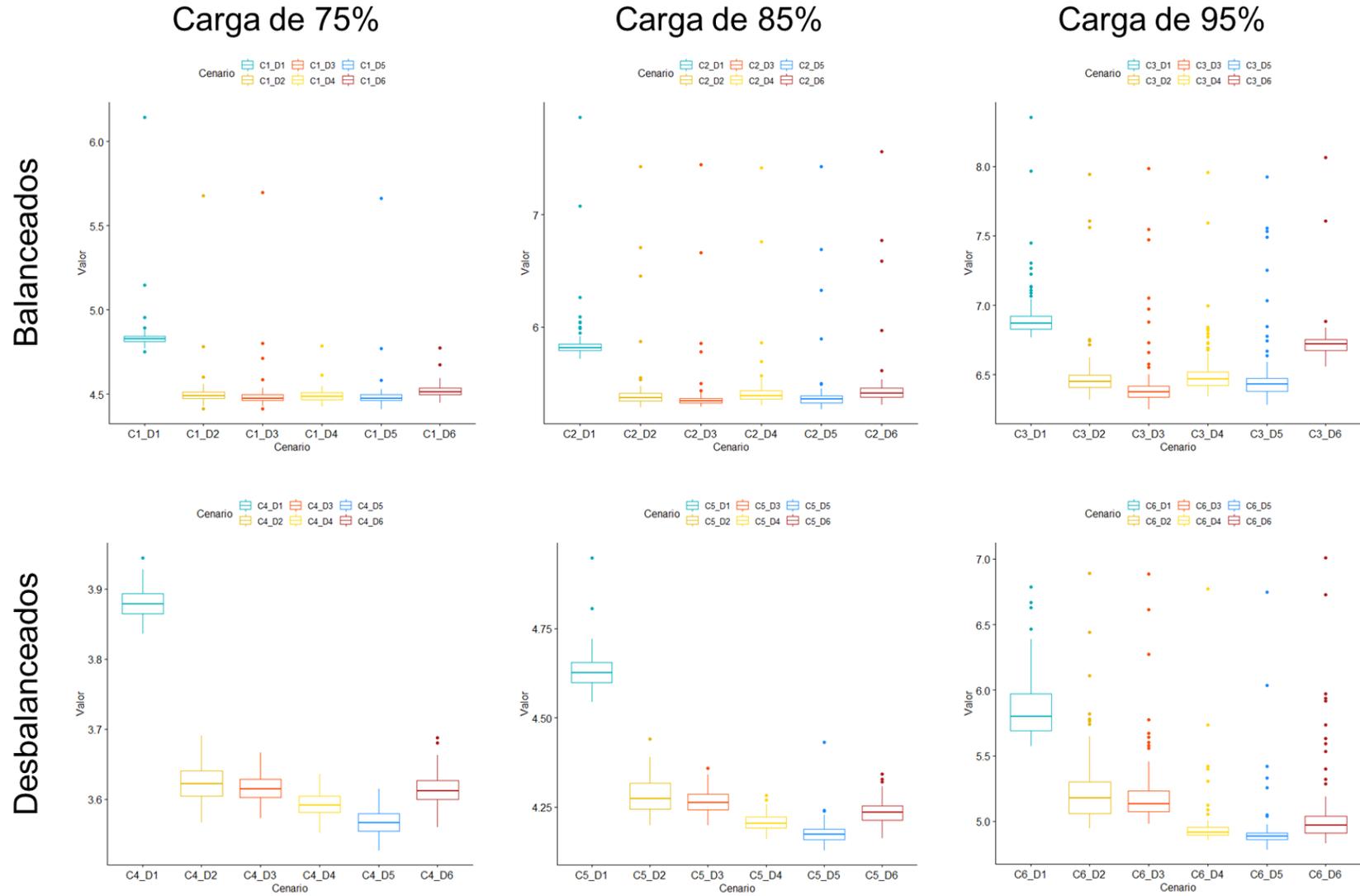
O resultado do teste de Shapiro-Wilk sugeriu a normalidade de apenas sete dos 36 cenários analisados, incluindo todos os cenários da configuração 4 e um da configuração 5. A Tabela 3 traz a estatística W, os p-valores e a conclusão sobre a normalidade dos dados da variável Tempo de Ciclo em todos os cenários.

Tabela 3 - Teste de normalidade Shapiro-Wilk para a variável Tempo de Ciclo

Cenário	W	p-valor	Conclusão
C1_D1	0.26833	2.2E-16	Amostra não normal
C1_D2	0.28008	2.2E-16	Amostra não normal
C1_D3	0.28334	2.2E-16	Amostra não normal
C1_D4	0.72408	2.4E-11	Amostra não normal
C1_D5	0.25272	2.2E-16	Amostra não normal
C1_D6	0.77097	3.5E-10	Amostra não normal
C2_D1	0.35089	2.2E-16	Amostra não normal
C2_D2	0.35337	2.2E-16	Amostra não normal
C2_D3	0.28785	2.2E-16	Amostra não normal
C2_D4	0.32476	2.2E-16	Amostra não normal
C2_D5	0.32926	2.2E-16	Amostra não normal
C2_D6	0.35888	2.2E-16	Amostra não normal
C3_D1	0.53020	4.7E-15	Amostra não normal
C3_D2	0.44666	2.6E-16	Amostra não normal
C3_D3	0.48765	1.0E-15	Amostra não normal
C3_D4	0.56087	1.5E-14	Amostra não normal
C3_D5	0.56233	1.6E-14	Amostra não normal
C3_D6	0.43309	2.2E-16	Amostra não normal
C4_D1	0.98542	4.6E-01	Amostra normal
C4_D2	0.98465	4.1E-01	Amostra normal
C4_D3	0.98224	2.9E-01	Amostra normal
C4_D4	0.98795	6.2E-01	Amostra normal
C4_D5	0.98860	6.7E-01	Amostra normal
C4_D6	0.97598	1.1E-01	Amostra normal
C5_D1	0.79355	1.4E-09	Amostra não normal
C5_D2	0.96656	2.6E-02	Amostra não normal
C5_D3	0.97782	1.5E-01	Amostra normal
C5_D4	0.96986	4.4E-02	Amostra não normal
C5_D5	0.70662	9.7E-12	Amostra não normal
C5_D6	0.97069	5.0E-02	Amostra não normal
C6_D1	0.80743	3.6E-09	Amostra não normal
C6_D2	0.72802	3.0E-11	Amostra não normal
C6_D3	0.58612	4.1E-14	Amostra não normal
C6_D4	0.36925	2.2E-16	Amostra não normal
C6_D5	0.36931	2.2E-16	Amostra não normal
C6_D6	0.55649	1.3E-14	Amostra não normal

Fonte: Autor

Figura 18 - *Boxplots* da variável Tempo de Ciclo



Fonte: Autor

Tabela 4 - Resultado do teste estatístico da variável Tempo de Ciclo - Cenários balanceados

Pares de derivações comparadas	Config. 1 (75% carga)		Config. 2 (85% carga)		Config. 3 (95% carga)	
	p-valor	Conclusão	p-valor	Conclusão	p-valor	Conclusão
D1 x D2	2.0E-16	D2	2.0E-16	D2	2.0E-16	D2
D1 x D3	2.0E-16	D3	2.0E-16	D3	2.0E-16	D3
D1 x D4	2.0E-16	D4	2.0E-16	D4	2.0E-16	D4
D1 x D5	2.0E-16	D5	2.0E-16	D5	2.0E-16	D5
D1 x D6	2.0E-16	D6	2.0E-16	D6	2.0E-16	D6
D2 x D3	1.4E-03	D3	1.2E-04	D3	3.1E-09	D3
D2 x D4	3.0E-01	=	2.7E-02	D2	3.0E-02	D2
D2 x D5	2.4E-03	D5	3.0E-02	D5	9.3E-02	=
D2 x D6	1.8E-06	D2	1.1E-04	D2	2.0E-16	D2
D3 x D4	4.7E-02	D3	7.6E-10	D3	2.2E-12	D3
D3 x D5	7.7E-01	=	9.6E-02	=	2.0E-05	D3
D3 x D6	7.0E-13	D3	4.6E-13	D3	2.0E-16	D3
D4 x D5	6.0E-02	=	9.0E-06	D5	1.0E-03	D5
D4 x D6	1.8E-08	D4	2.9E-02	D4	2.0E-16	D4
D5 x D6	1.8E-13	D5	4.3E-09	D5	2.0E-16	D5

Fonte: Autor

Os *boxplots* da Figura 18 mostram a comparação entre os dados de Tempo de Ciclo das derivações dos cenários 1, 2 e 3, caracterizados por sistemas balanceados, e 4, 5 e 6, desbalanceados. Dada a não normalidade de grande parte das amostras, foi utilizado o teste não paramétrico de Wilcoxon-Mann-Whitney para comparação das derivações duas a duas dentro de cada cenário de configuração de linha. As comparações dos resultados dos cenários balanceados estão na Tabela 4. Nos casos em que aparece um “=”, entende-se que não há diferença significativa entre os membros do par de derivações em análise e, portanto, não se pode apontar qual deles é o melhor.

No cenário 1, percebe-se que os pares de derivações 2-4, 3-5 e 4-5 não possuem diferença significativa entre si, não permitindo, portanto, afirmar que (1) melhorias aleatórias produzem resultados diferentes que melhorias baseadas em recursos com maior WIP acumulado, (2) melhorias em todos os recursos são diferentes que em recursos com maiores níveis de utilização e (3) melhorias em recursos com maiores WIP dão resultados diferentes que em recursos com maiores níveis de utilização. Portanto, não se pode concluir que uma única derivação possui o menor tempo de ciclo, por não ser possível afirmar que as derivações 2, 3, 4 e 5 são estatisticamente diferentes. Porém, percebe-se que a derivação 6, melhorias em recursos que mais geram ordens vermelhas (*Buffer Management*), não constitui um dos melhores desempenhos em termos de tempo de ciclo.

Em relação ao cenário 2, conclui-se que apenas as derivações 3 e 5 não são estatisticamente diferentes entre si. Neste cenário, pode-se concluir que tais derivações possuem os menores tempos de ciclo em relação a todas as outras, mas não se pode concluir que uma delas é a menor quando comparada à outra.

Em relação ao cenário 3, é possível afirmar que apenas as derivações 2 e 5 não são estatisticamente diferentes. Neste caso, ao contrário dos anteriores, pode-se afirmar que uma única derivação possui o melhor resultado: a de número 3, caracterizada por melhorias realizadas em todos os recursos.

Percebe-se que os dois últimos cenários possuem dados mais congruentes do que o primeiro, uma vez que naqueles apenas uma comparação não obteve diferença significativa. Este fato é causado pela maior dispersão dos dados, consequência do maior estresse sofrido pelo sistema, ocasionado pela maior taxa de utilização dos recursos. Esta maior dispersão dos dados é possível ser vista nos *boxplots* dos cenários balanceados da Figura 18, em que se nota o crescimento da distância entre o primeiro e o terceiro quartil, em todas as derivações, à medida que a taxa de utilização dos recursos é aumentada. Além disso, é visível o aumento do número de *outliers* das amostras, evidenciando mais uma vez a maior dispersão dos dados no sistema mais utilizado.

Tabela 5 - Resultado do teste estatístico da variável Tempo de Ciclo - Cenários desbalanceados

Pares de derivações comparadas	Config. 4 (75% carga)		Config. 5 (85% carga)		Config. 6 (95% carga)	
	p-valor	Conclusão	p-valor	Conclusão	p-valor	Conclusão
D1 x D2	2.0E-16	D2	2.0E-16	D2	2.0E-16	D2
D1 x D3	2.0E-16	D3	2.0E-16	D3	2.0E-16	D3
D1 x D4	2.0E-16	D4	2.0E-16	D4	2.0E-16	D4
D1 x D5	2.0E-16	D5	2.0E-16	D5	2.0E-16	D5
D1 x D6	2.0E-16	D6	2.0E-16	D6	2.0E-16	D6
D2 x D3	1.3E-01	=	3.6E-02	D3	4.1E-01	=
D2 x D4	4.2E-12	D4	2.0E-16	D4	2.0E-16	D4
D2 x D5	2.0E-16	D5	2.0E-16	D5	2.0E-16	D5
D2 x D6	5.8E-02	=	1.9E-10	D6	1.9E-12	D6
D3 x D4	5.4E-12	D4	2.0E-16	D4	2.0E-16	D4
D3 x D5	2.0E-16	D5	2.0E-16	D5	2.0E-16	D5
D3 x D6	6.0E-01	=	2.3E-08	D6	1.4E-13	D6
D4 x D5	1.5E-14	D5	1.9E-13	D5	4.8E-07	D5
D4 x D6	4.2E-10	D4	6.3E-09	D4	1.3E-04	D4
D5 x D6	2.0E-16	D5	2.0E-16	D5	1.4E-11	D5

Fonte: Autor

As comparações dos resultados dos cenários desbalanceados estão na Tabela 5 e os *boxplots* são apresentados na parte inferior da Figura 18.

No cenário 4, as comparações entre os pares entre as derivações 2 e 3, 2 e 6 e 3 e 6 não apresentam diferença significativa. Neste cenário fica clara a superioridade da derivação 5 em relação às outras, que é caracterizada por melhorias em recursos com maiores taxas de ocupação.

Quanto ao cenário 5, desbalanceado com 85% de carga no RRC, a tabela indica que todas as derivações são diferentes entre si. Neste caso, mais uma vez, a derivação 5 aparece como tendo o melhor desempenho em termos de tempo de ciclo.

Por fim, em relação ao cenário 6, é indicado que não há diferença estatística apenas entre as derivações 2 e 3 no que concerne à variável Tempo de Ciclo. Neste caso, a derivação 5 é novamente superior, como nos dois cenários anteriores.

Portanto, percebe-se que nos três primeiros cenários, constituídos de sistemas balanceados, quanto maior a carga de trabalho imposta, mais a conclusão converge para a derivação 3. Nos três últimos, porém, a derivação 5 atinge sempre o melhor desempenho, independente da carga aplicada ao sistema.

De modo geral, os dois últimos cenários possuem dados que se dispersam mais do que o primeiro, porém, neste caso, a configuração desbalanceada com 85% de carga obteve todas as diferenças significativas, enquanto que a de maior carga obteve uma não diferença. Destaca-se, ainda, o crescimento na quantidade de *outliers* com o aumento da carga de trabalho. Estas duas características são possíveis de identificar na parte inferior da Figura 18.

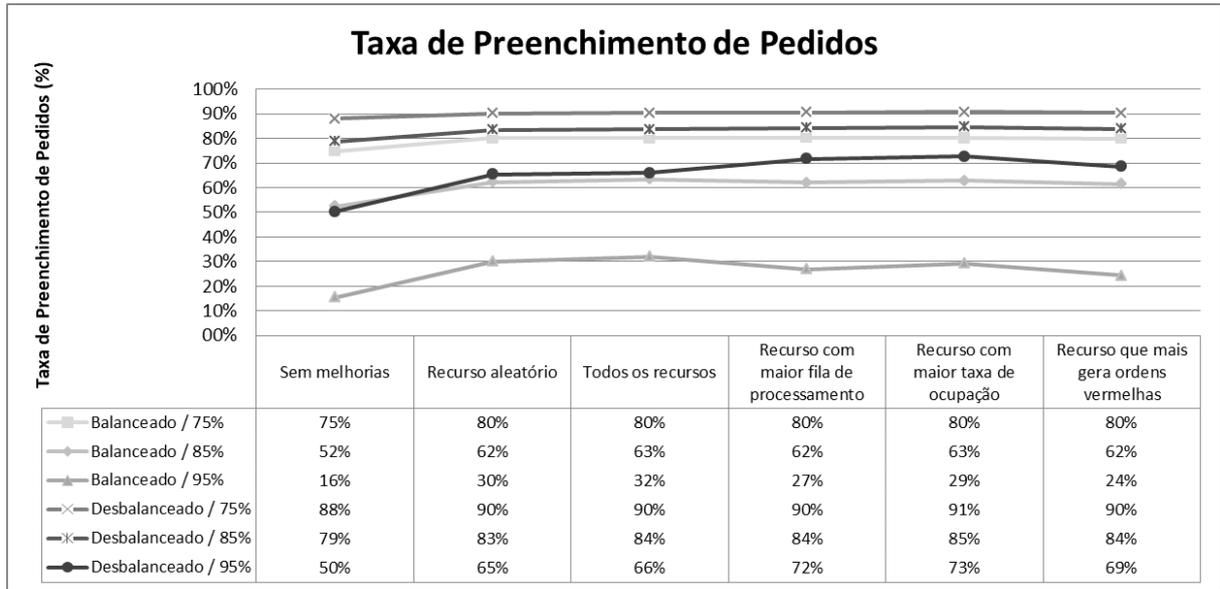
4.2. TAXA DE PREENCHIMENTO DE PEDIDOS

O comportamento da taxa de preenchimento de pedidos é mostrado na Figura 19. Do mesmo modo que a anterior, cada linha representa um cenário e cada ponto em destaque, uma política de melhoria.

O comportamento dos cenários se assemelha ao inverso do de tempo de ciclo médio: dentro de cada tipo de configuração de linha (balanceado/desbalanceado), quanto menor a taxa de ocupação do sistema, maior o preenchimento de pedidos.

Do mesmo modo, quando se comparam os pares balanceado/desbalanceado para cada nível de ocupação, o último possui melhores taxas de preenchimento de pedidos em relação ao primeiro.

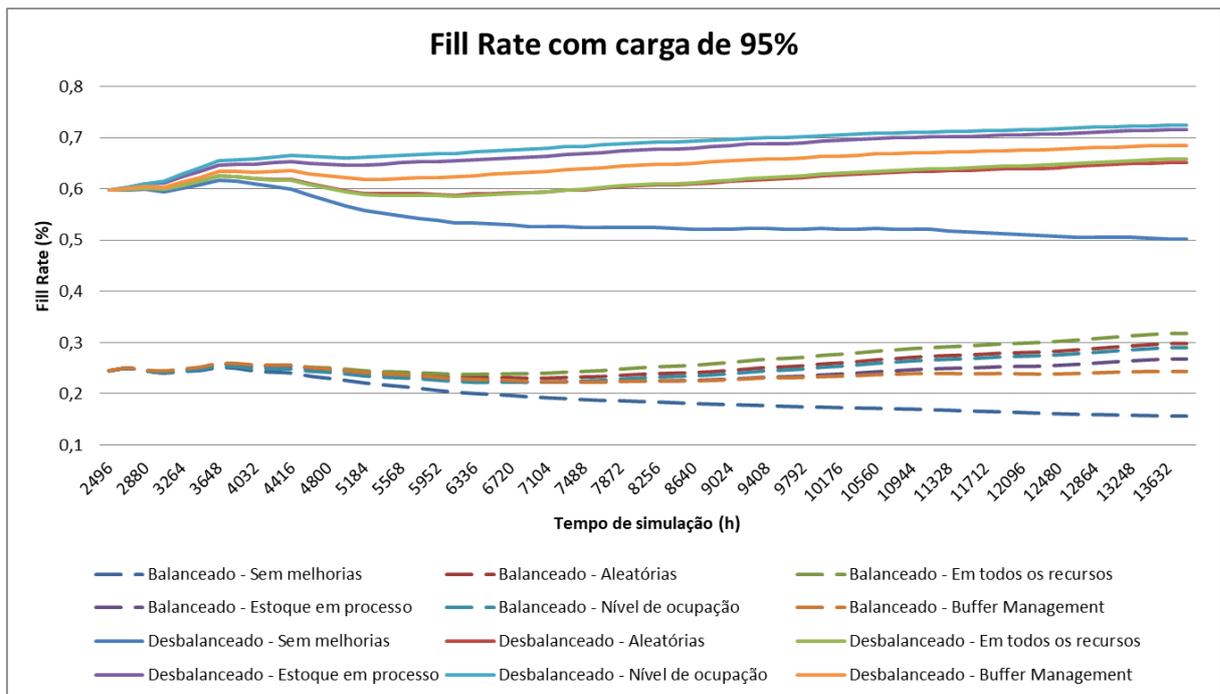
Figura 19 - Taxa de preenchimento de pedidos



Fonte: Autor

A Figura 20 traz o comportamento da variável *Fill Rate* em relação ao tempo de simulação nas configurações balanceada e desbalanceada com 95% de carga diária nos recursos.

Figura 20 - *Fill Rate* com carga diária de 95%



Fonte: Autor

Tal qual na variável abordada anteriormente, na *Fill Rate* os cenários desbalanceados possuem desempenho significativamente superior aos balanceados em todo o tempo de simulação. Além disso, novamente, melhorias em todos os recursos é a melhor opção no sistema balanceada, ao passo que melhorar o recurso com o maior nível de ocupação é a melhor escolha para sistemas desbalanceados.

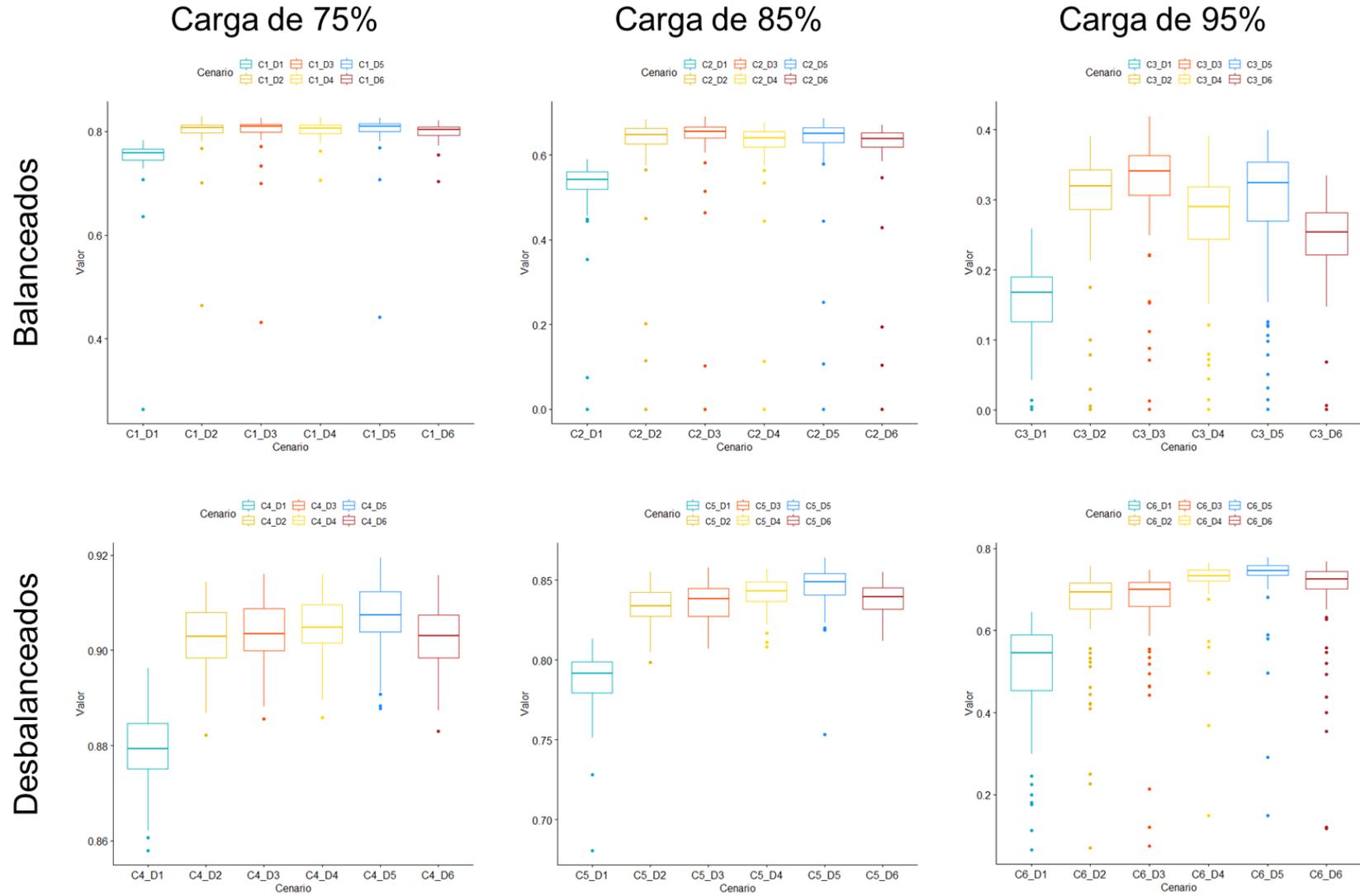
A Tabela 6 traz os resultados do teste de normalidade Shapiro-Wilk para a variável *Fill Rate*, os quais apontam que quatro dos 36 cenários possuem distribuição normal, todos eles na configuração 4, caracterizada pelo desbalanceamento dos recursos e 75% de carga no RRC.

Tabela 6 - Teste de normalidade Shapiro-Wilk para a variável *Fill Rate*

Cenário	W	p-valor	Conclusão
C1_D1	0.29773	2.2E-16	Amostra não normal
C1_D2	0.34216	2.2E-16	Amostra não normal
C1_D3	0.33022	2.2E-16	Amostra não normal
C1_D4	0.78991	1.1E-09	Amostra não normal
C1_D5	0.31209	2.2E-16	Amostra não normal
C1_D6	0.75753	1.6E-10	Amostra não normal
C2_D1	0.50328	1.8E-15	Amostra não normal
C2_D2	0.41388	2.2E-16	Amostra não normal
C2_D3	0.35435	2.2E-16	Amostra não normal
C2_D4	0.39598	2.2E-16	Amostra não normal
C2_D5	0.39019	2.2E-16	Amostra não normal
C2_D6	0.40068	2.2E-16	Amostra não normal
C3_D1	0.94992	2.4E-03	Amostra não normal
C3_D2	0.74587	8.0E-11	Amostra não normal
C3_D3	0.76656	2.7E-10	Amostra não normal
C3_D4	0.87032	4.4E-07	Amostra não normal
C3_D5	0.82821	1.6E-08	Amostra não normal
C3_D6	0.87938	9.8E-07	Amostra não normal
C4_D1	0.98473	4.2E-01	Amostra normal
C4_D2	0.97186	6.0E-02	Amostra normal
C4_D3	0.97269	6.8E-02	Amostra normal
C4_D4	0.96374	1.7E-02	Amostra não normal
C4_D5	0.95843	7.9E-03	Amostra não normal
C4_D6	0.97233	6.4E-02	Amostra normal
C5_D1	0.81767	7.3E-09	Amostra não normal
C5_D2	0.95972	9.5E-03	Amostra não normal
C5_D3	0.96246	1.4E-02	Amostra não normal
C5_D4	0.94196	8.2E-04	Amostra não normal
C5_D5	0.72313	2.3E-11	Amostra não normal
C5_D6	0.95957	9.3E-03	Amostra não normal
C6_D1	0.82494	1.2E-08	Amostra não normal
C6_D2	0.65145	6.7E-13	Amostra não normal
C6_D3	0.59224	5.2E-14	Amostra não normal
C6_D4	0.42112	2.2E-16	Amostra não normal
C6_D5	0.40346	2.2E-16	Amostra não normal
C6_D6	0.55303	1.1E-14	Amostra não normal

Fonte: Autor

Figura 21 - Boxplots da variável *Fill Rate*



Fonte: Autor

Tabela 7 - Resultado do teste estatístico da variável *Fill Rate* - Cenários balanceados

Pares de derivações comparadas	Config. 1 (75% carga)		Config. 2 (85% carga)		Config. 3 (95% carga)	
	p-valor	Conclusão	p-valor	Conclusão	p-valor	Conclusão
D1 x D2	2.0E-16	D2	2.0E-16	D2	2.0E-16	D2
D1 x D3	2.0E-16	D3	2.0E-16	D3	2.0E-16	D3
D1 x D4	2.0E-16	D4	2.0E-16	D4	2.0E-16	D4
D1 x D5	2.0E-16	D5	2.0E-16	D5	2.0E-16	D5
D1 x D6	2.0E-16	D6	2.0E-16	D6	2.0E-16	D6
D2 x D3	3.3E-01	=	1.1E-01	=	2.8E-03	D3
D2 x D4	6.6E-01	=	1.0E-01	=	1.0E-03	D2
D2 x D5	2.8E-01	=	3.1E-01	=	9.2E-01	=
D2 x D6	1.5E-02	D2	4.6E-02	D2	4.5E-12	D2
D3 x D4	1.7E-01	=	4.6E-04	D3	6.5E-08	D3
D3 x D5	8.7E-01	=	5.4E-01	=	1.2E-02	D3
D3 x D6	8.2E-04	D3	8.9E-05	D3	2.3E-15	D3
D4 x D5	1.4E-01	=	5.0E-03	D5	5.5E-03	D5
D4 x D6	6.6E-02	=	7.2E-01	=	3.3E-04	D4
D5 x D6	4.6E-04	D5	1.7E-03	D5	1.1E-08	D5

Fonte: Autor

Os *boxplots* da Figura 21 mostram o comportamento da variável Taxa de Preenchimento de Pedidos nas derivações dos cenários balanceados, acima, e desbalanceados, abaixo. As comparações dos resultados dos cenários balanceados estão na Tabela 7. Tal qual a variável anterior, foi utilizado o teste não paramétrico de Wilcoxon-Mann-Whitney devido à não normalidade de grande parte dos dados. Nos casos em que não há diferença significativa entre os membros do par de derivações em análise foram marcados com “=”.

No cenário 1, percebe-se que, com exceção da derivação sem melhoria, todas as outras obtiveram taxas ao redor de 80%. Neste cenário, pelo fato de as derivações 2, 3, 4, 5 e 6 não serem estatisticamente diferentes, não se pode concluir que uma foi superior à outra no quesito taxa de preenchimento de pedidos. A única afirmação possível, neste caso, remete ao fato de a derivação 1, sem melhorias, ser pior do que as outras.

No cenário 2, do mesmo modo que no anterior, não há diferença significativa entre as derivações 2, 3, 4, 5 e 6. Novamente, não se pode concluir que uma foi superior à outra no quesito taxa de preenchimento de pedidos. A única afirmação possível é que a derivação 1 possui pior desempenho do que as demais.

Em relação ao cenário 3, é possível apontar que apenas as derivações 2 e 5 não são diferentes entre si. Neste cenário, diferentemente dos dois últimos, é possível afirmar que a

derivação 3, melhorias em todos os recursos, obteve um desempenho superior em termos de taxa de preenchimento de pedidos em relação às demais.

Percebe-se que o comportamento dos cenários é semelhante às configurações balanceadas da variável anterior, com o último cenário possuindo dados mais congruentes do que os primeiros. Esta maior dispersão dos dados é possível ser vista nos *boxplots* dos cenários balanceados da Figura 21. Além disso, é visível o aumento do número de *outliers* das amostras, evidenciando mais uma vez a maior dispersão dos dados no sistema mais utilizado.

Tabela 8 - Resultado do teste estatístico da variável *Fill Rate* - Cenários desbalanceados

Pares de derivações comparadas	Config. 4 (75% carga)		Config. 5 (85% carga)		Config. 6 (95% carga)	
	p-valor	Conclusão	p-valor	Conclusão	p-valor	Conclusão
D1 x D2	2.0E-16	D2	2.0E-16	D2	2.0E-16	D2
D1 x D3	2.0E-16	D3	2.0E-16	D3	2.0E-16	D3
D1 x D4	2.0E-16	D4	2.0E-16	D4	2.0E-16	D4
D1 x D5	2.0E-16	D5	2.0E-16	D5	2.0E-16	D5
D1 x D6	2.0E-16	D6	2.0E-16	D6	2.0E-16	D6
D2 x D3	6.2E-01	=	3.2E-01	=	4.7E-01	=
D2 x D4	8.1E-02	=	1.2E-05	D4	2.7E-13	D4
D2 x D5	4.0E-05	D5	1.8E-11	D5	2.0E-16	D5
D2 x D6	9.9E-01	=	2.0E-02	D6	6.8E-07	D6
D3 x D4	1.8E-01	=	1.0E-03	D4	4.6E-13	D4
D3 x D5	1.9E-04	D5	4.3E-09	D5	2.0E-16	D5
D3 x D6	6.2E-01	=	2.6E-01	=	1.5E-06	D6
D4 x D5	1.5E-02	D5	9.1E-04	D5	7.8E-04	D5
D4 x D6	8.1E-02	=	2.0E-02	D4	2.8E-02	D4
D5 x D6	4.0E-05	D5	2.0E-07	D5	1.7E-06	D5

Fonte: Autor

As comparações dos resultados dos cenários desbalanceados estão na Tabela 8.

No cenário 4, as derivações 2, 3, 4 e 6 não são diferentes entre si, considerando a variável taxa de preenchimento de pedidos. Neste caso é possível afirmar que a derivação 5, melhorias baseadas na carga de trabalho dos recursos, sobressai-se quanto ao preenchimento dos pedidos em relação às demais.

O cenário 5 permite concluir que as comparações 2-3 e 3-6 não são significativamente diferentes entre si. Neste cenário, mais uma vez, a derivação 5 possui o melhor desempenho.

Por fim, o cenário 6 aponta apenas o par de derivações 2-3 como não diferentes entre si. Neste cenário, tal qual os dois anteriores, a derivação 5 é que possui melhor desempenho.

Portanto, percebe-se que nos cenários balanceados, quanto maior a carga de trabalho imposta, mais a conclusão converge para a derivação 3. Nos cenários desbalanceados, porém, a derivação 5 atinge o melhor desempenho em termos de preenchimento de pedidos, independente da carga de trabalho aplicada ao sistema.

Do mesmo modo que o comportamento dos cenários balanceados da variável Tempo de Ciclo e *Fill Rate*, ocorre o crescimento na quantidade de *outliers* com o aumento da carga de trabalho. Porém, ao contrário daqueles, de modo geral, ocorre diminuição na dispersão dos dados, demonstrada pela diminuição da distância interquartílica. Estas duas características são possíveis de identificar na parte inferior da Figura 21.

4.3. ANÁLISE CONJUNTA DAS VARIÁVEIS

O intuito desta seção é realizar uma análise conjunta das variáveis Tempo de Ciclo e *Fill Rate*, considerando todos os cenários e derivações anteriormente descritos.

A Tabela 9 apresenta a comparação conjunta das variáveis dependentes nas configurações balanceadas a 75%, 85% e 95% de carga nos recursos (cenários 1, 2 e 3).

Tabela 9 - Comparação das variáveis em conjunto - Cenários balanceados

Pares de derivações comparadas	Config. 1 (75% carga)		Config. 2 (85% carga)		Config. 3 (95% carga)	
	CT	FR	CT	FR	CT	FR
D1 x D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2
D1 x D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3
D1 x D4	D4	D4	D4	D4	D4	D4
D1 x D5	D5	D5	D5	D5	D5	D5
D1 x D6	D6	D6	D6	D6	D6	D6
D2 x D3	D3	=	D3	=	D3	D3
D2 x D4	=	=	D2	=	D2	D2
D2 x D5	D5	=	D5	=	=	=
D2 x D6	D2	D2	D2	D2	D2	D2
D3 x D4	D3	=	D3	D3	D3	D3
D3 x D5	=	=	=	=	D3	D3
D3 x D6	D3	D3	D3	D3	D3	D3
D4 x D5	=	=	D5	D5	D5	D5
D4 x D6	D4	=	D4	=	D4	D4
D5 x D6	D5	D5	D5	D5	D5	D5

Fonte: Autor

Percebe-se que, no cenário 1, quando há diferença significativa entre as derivações de cada par, sempre as mesmas derivações despontam como as melhores em ambas as variáveis.

Pode-se concluir que, para a variável Tempo de Ciclo as derivações 3 e 5 despontam como as melhores porém não é possível afirmar os mesmo para a variável Taxa de Preenchimento de Pedidos, em que nenhuma das derivações com melhorias apresentou diferença significativa de desempenho.

O cenário 2 apresenta o mesmo comportamento descrito no anterior. Nele, as derivações 3 e 5 também apresentam os melhores resultados em termos de tempo de ciclo. Quando se trata de *Fill Rate*, há um empate técnico entre as derivações 2, 3, 4 e 5.

No cenário 3, o resultado para ambas as variáveis é idêntico, com a derivação 3, melhoria em todos os recursos, apresentando os melhores resultados.

A Tabela 10 apresenta a comparação conjunta das variáveis dependentes nos cenários desbalanceados a 75%, 85% e 95% de carga nos recursos (cenários 4, 5 e 6).

Tabela 10 - Comparação das variáveis em conjunto - Cenários desbalanceados

Pares de derivações comparadas	Config. 4 (75% carga)		Config. 5 (85% carga)		Config. 6 (95% carga)	
	CT	FR	CT	FR	CT	FR
D1 x D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2
D1 x D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3
D1 x D4	D4	D4	D4	D4	D4	D4
D1 x D5	D5	D5	D5	D5	D5	D5
D1 x D6	D6	D6	D6	D6	D6	D6
D2 x D3	=	=	D3	=	=	=
D2 x D4	D4	=	D4	D4	D4	D4
D2 x D5	D5	D5	D5	D5	D5	D5
D2 x D6	=	=	D6	D6	D6	D6
D3 x D4	D4	=	D4	D4	D4	D4
D3 x D5	D5	D5	D5	D5	D5	D5
D3 x D6	=	=	D6	=	D6	D6
D4 x D5	D5	D5	D5	D5	D5	D5
D4 x D6	D4	=	D4	D4	D4	D4
D5 x D6	D5	D5	D5	D5	D5	D5

Fonte: Autor

No cenário 4 as variáveis possuem o mesmo comportamento nos casos em que há diferença significativa. Novamente, é possível perceber comportamento similar entre as variáveis. Neste caso, é possível afirmar que a derivação 5 apresenta o melhor desempenho em ambas as variáveis analisadas. A derivação 4 apresenta o segundo melhor resultado.

Em relação ao cenário 5, conclui-se que o comportamento das duas variáveis é similar e que a derivação 5 exibe os melhores resultados, com o menor tempo de ciclo e a maior taxa de preenchimento de pedidos. Em seguida, vem a derivação 4.

Por fim, é possível observar, no cenário 6, que as variáveis se comportam identicamente e, como no caso anterior, a derivação 5 obtém os melhores resultados. Novamente, a derivação 4 possui o segundo melhor resultado.

Analisando os dados de modo geral, percebe-se que o comportamento das variáveis é bastante idêntico. Com exceção de quando não há diferença significativa entre elas, todos os pares possuem as mesmas derivações como sendo as melhores, para ambas as variáveis analisadas, dentro dos cenários balanceados e desbalanceados. Este fato mostra a congruência dos dados de que quanto maior o impacto das melhorias no sistema, menor o tempo de ciclo e maior o *fill rate*.

No cenário balanceado de baixa carga de trabalho não é possível concluir qual método de melhoria obtém melhor desempenho. No cenário balanceado de alta carga, porém, é possível concluir que a derivação 3, melhorias em todos os recursos, obtém o melhor resultado. Já em cenários desbalanceados, o resultado se mostrou bastante sólido, com a derivação 5, melhorias a partir da taxa de ocupação dos recursos, sendo superior às outras, seguida da derivação 4, melhorias considerando as filas de estoque em processo dos recursos, quaisquer que sejam as cargas de trabalho aplicadas ao sistema.

O resultado obtido para o cenário balanceado se justifica pelo fato de que, por definição, todos os recursos têm a mesma carga de trabalho e, por isso, é necessário melhorar todos eles simultaneamente para que se obtenha impacto global em termos de menor tempo de ciclo e maior nível de serviço. É importante destacar que fábricas balanceadas não são recomendadas pela Teoria das Restrições e, embora a melhoria indicada aqui não seja uma das recomendadas por ela, ela ocorreu em um ambiente não TOC.

O resultado obtido para os cenários desbalanceados também condiz com a literatura, uma vez que as abordagens de melhorias com melhores desempenhos nestes casos buscam, de alguma forma, focalizar as melhorias em uma máquina específica, seja de acordo com a maior quantidade de estoque em processo das filas, maior taxa de ocupação ou em recursos que mais causam ordens vermelhas. Neste caso, a identificação de recursos alvos de melhoria da TOC ocorre em um ambiente igualmente TOC, ou seja, desbalanceado.

5. CONCLUSÃO

O intuito desta pesquisa foi avaliar melhorias com diversos focos e em diferentes situações de ocupação dos recursos produtivos por meio de simulação. As abordagens de melhorias analisadas foram: melhorias aleatórias, em todos os recursos, focalização pelo tamanho da fila de processamento, priorização pela ocupação dos recursos e eleição do recurso a ser melhorado pelo método *Buffer Management*. Além destas, como forma de controle, foi incluída também uma derivação sem melhorias. A simulação ocorreu em seis configurações de linha com diferentes taxas de ocupação, sendo três balanceadas e três desbalanceadas.

A utilização do *software* ProModel permitiu a criação de 36 cenários, o que aumentou a possibilidade de generalização dos resultados. Cada cenário foi replicado 85 vezes e seus resultados foram medidos em termos de Tempo de Ciclo (CT) e *Fill Rate* (FR). As amostras obtidas foram, por fim, analisadas estatisticamente no *software* R versão 3.5.1, em que, primeiramente, foi verificada a normalidade dos dados com o teste Shapiro-Wilk, o que resultou na não normalidade de grande parte dos experimentos. Em seguida, dada a ausência de normalidade dos dados, foi utilizado o teste Wilcoxon-Mann-Whitney com ajustamento do p-valor dada por Benjamini e Hochberg (1995) para comparar as amostras duas a duas e atestar a presença ou ausência de diferença entre elas.

A partir dos resultados, pode-se concluir que não se pode utilizar a mesma abordagem de melhoria para sistemas balanceados e desbalanceados. Em sistemas balanceados, é necessário utilizar um método de melhoria geral, aprimorando todos os recursos simultaneamente. Deste modo, o sistema todo é impactado pelas melhorias. Se fosse melhorado um único elo deste tipo de sistema, como nas estratégias incentivadas pela Teoria das Restrições, a melhoria impactaria somente aquele elo e o sistema continuaria a ser restringido pelos demais recursos.

Em sistemas desbalanceados, por outro lado, é possível que se tenha uma abordagem de melhoria que foque no recurso restritivo, seja monitorando a ocupação de cada máquina individualmente, seja verificando as filas que se formam antes dos recursos, ou ainda utilizando o método *Buffer Management* de controle de produção. Deste modo, o sistema automaticamente aponta o recurso que mais contribui para a obstrução do fluxo de produção. Este trabalho apontou, de forma pioneira, que a estratégia de escolha dos recursos a serem melhorados com base no nível de utilização é melhor que as demais, em ambientes desbalanceados de produção para estoque. Percebe-se que as três estratégias com melhores desempenhos são defendidas pela TOC.

O resultado desta pesquisa mostra que, em termos práticos, os gestores devem planejar e manter linhas de produção desbalanceadas, com o recurso com restrição de capacidade atendendo a todo o mercado (sem restrição de capacidade ativa). Em uma eventual necessidade, seja por aumento da demanda, *mix* de produção ou tempo de ciclo, a melhoria deve ser focalizada no recurso restritivo.

Este método, porém, considera a premissa de que deve haver capacidade ociosa em todos os demais recursos do sistema, com exceção da restrição. Esta premissa é frequentemente evitada pelos gestores, por acharem que capacidade ociosa é perda de dinheiro. A Teoria das Restrições defende que esta afirmação não é verdadeira, uma vez que, tendo mais capacidade em alguns recursos, opera-se com menos estoque em processo com tempo de ciclo menor, permitindo atender mais clientes de forma imediata. Isso pode se configurar em uma vantagem competitiva que pode levar a aumentos consistentes da demanda no médio e longo prazos.

Esta pesquisa contribuiu para a literatura no âmbito geral da Teoria das Restrições e, mais especificamente, da ferramenta de controle de produção *Buffer Management* e do método de produção *make-to-availability*. Além disso, cooperou para a literatura referente à melhoria contínua. O tipo de pesquisa quantitativo neste tema é considerado inédito e pode ser utilizado como ponto de partida para outras pesquisas sobre o benefício trazido pela Teoria das Restrições à melhoria contínua.

Esta dissertação também pode auxiliar no âmbito gerencial, já que contribui para a melhoria de processos produtivos de forma menos empírica, ajudando a tornar as organizações mais competitivas.

Como fatores limitantes deste trabalho, destacam-se a utilização de apenas seis configurações de linha, cinco métodos de melhoria e duas variáveis dependentes, além do fato de não considerar outros integrantes da cadeia de suprimentos na sua análise. Ela se limita, ainda, pelo fato de ter sido simulado apenas um ambiente de produção para estoque. Outro fator limitante destacado é a utilização de dados fictícios, com distribuições dadas pelo *software* empregado.

Como propostas de ampliação do estudo, podem-se simular mais situações de configuração de linha com outras abordagens de melhorias e outras variáveis, como tempo médio entre falhas (*mean time between failures* – MTBF) e tempo médio para reparação (*mean time to repair* – MTTR). Futuras pesquisas podem abordar o tema proposto neste trabalho na forma de um estudo de caso, aplicando o método com dados mais próximos da realidade e em ambientes de produção mais complexos, como *job-shop*. Outras pesquisas

poderiam confirmar se o nível de utilização é também o melhor método para se focar ações de melhoria em outros ambientes de produção, como o DBR ou o S-DBR/MTO.

Por fim, esta pesquisa pode beneficiar trabalhos que têm como tema o uso de tecnologias para automação e troca de dados na manufatura, comumente denominado de Quarta Revolução Industrial ou Indústria 4.0, bem como empresas que a utilizam, uma vez que os métodos de identificação de melhorias de sistemas produtivos apresentados podem ser automatizados, mostrando em tempo real o status dos recursos, seus níveis de utilização e estoque em processo, auxiliando mais eficientemente a tomada de decisão por parte dos gestores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANTUNES JR., J. A. V.; RODRIGUES, L. H. A Teoria das Restrições como balizadora das ações visando a Troca Rápida de Ferramentas. **Revista Produção**, v. 3, n. 2, p. 73-85, 1993.
- ATWATER, J. B.; CHAKRAVORTY, S. S. Using the theory of constraints to guide the implementation of quality improvement projects in manufacturing operations. **International Journal of Production Research**, v. 33, n. 6, p. 1737-1760, 1995.
- BARNARD, A. Melhoria contínua e auditoria. In: COX III, J. F.; SCHLEIER, J. G. (Org.). **Handbook da Teoria das Restrições**. Porto Alegre: Bookman, p. 413-468, 2013.
- BECKER, J.; HARTMANN, W.; BERTSCH, S.; NYWLT, J.; SCHMIDT, M. Dynamic Safety-Stock Calculation. **World Academy of Science, Engineering and Technology, International Science Index 82, International Journal of Mechanical, Industrial Science and Engineering**, v. 7, n. 10, p. 781-785, 2013.
- BENJAMINI, Y.; HOCHBERG, Y. Controlling the false discovery rate: a practical and powerful approach to multiple testing. **Journal of the Royal Statistical Society**, v. 57, n. 1, p. 289-300, 1995.
- BESSANT, J.; CAFFYN, S.; GALLAGHER, M. An evolutionary model of continuous improvement behaviour. **Technovation**, v. 21, p. 67-77, 2001.
- BROWN, R. G. **Statistical forecasting for inventory control**. New York: McGraw-Hill, 1959.
- BRUNET, A. P.; NEW, S. *Kaizen* in Japan: an empirical study. **International Journal of Operations and Production Management**, v. 23, n. 12, p. 1426-1446, 2003.
- CASTRO, R. F. **Avaliação do sistema Simplified Drum-Buffer-Rope em ambientes de produção para estoque**. 2016. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru. 2016.
- 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.
- DE KONING, H.; DE MAST, J. A rational reconstruction of Six-Sigma's breakthrough cookbook. **International Journal of Quality and Reliability Management**, v. 23, n. 7, p. 766-787, 2006.
- GARDINER, S. C.; BLACKSTONE JR., J. H.; GARDINER, L. R. Drum-Buffer-Rope and Buffer Management: Impact on Production Management Study and Practices. **International Journal of Operations and Production Management**, v. 13, n. 6, p. 68-78, 1993.
- GODINHO, M.; UZSOY, R. Efeito da redução do tamanho de lote e de programas de Melhoria Contínua no Estoque em Processo (WIP) e na Utilização: estudo utilizando uma abordagem híbrida System Dynamics - Factory Physics. **Revista Produção**, v. 19, n. 1, p. 214-229, 2009.
- GODINHO, M.; UZSOY, R. The impact of simultaneous continuous improvement in setup time and repair time on manufacturing cycle times under uncertain conditions. **International Journal of Production Research**, v. 51, n. 2, p. 447-464, 2013.

GODINHO, M.; UZSOY, R. Assessing the impact of alternative continuous improvement programmes in a flow shop using system dynamics. **International Journal of Production Research**, v. 52, n. 10, p. 3014-3031, 2014.

GOLDRATT, E. M. Computerized shop floor scheduling. **International Journal of Production Research**, v. 26, n. 3, p. 443-455, 1988.

GOLDRATT, E. M. **The Haystack Syndrome**: Sifting information out of the data ocean. New York: North River Press, 1990.

GOLDRATT, E. M. Standing on the Shoulders of Giants – Production concepts versus production applications: The Hitachi Tool Engineering example. **Gestão e Produção**, v. 16, n. 3, p. 333-343, 2009a.

GOLDRATT, E. M. **Stray Elephant**. Roelofarendsveen: Goldratt Marketing Group, 2009b. (Série Goldratt's TOC Golden Nugget – parte 2). Disponível em: <www.goldrattconsulting.com>.

GOLDRATT, E. M. **Inventory target**: asymmetric time constants. Roelofarendsveen: Goldratt Marketing Group, 2009c. (Série Goldratt's TOC Golden Nugget – parte 4). Disponível em: <www.goldrattconsulting.com>.

GOLDRATT, E. M. **When you say “red”, what do you mean?** Roelofarendsveen: Goldratt Marketing Group, 2009d. (Série Goldratt's TOC Golden Nugget – parte 8). Disponível em: <www.goldrattconsulting.com>.

GOLDRATT, E. M. **A Escolha**. São Paulo: Nobel, 2013a.

GOLDRATT, E. M. Introdução à TOC: minha visão. In: COX III, J. F.; SCHLEIER, J. G. (Org.). **Handbook da Teoria das Restrições**. Porto Alegre: Bookman, p. 3-9, 2013b.

GOLDRATT, E. M. **Corrente Crítica**. São Paulo: Nobel, 2014.

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

GOLDRATT, E. M.; FOX, R. E. **The Race**. New York: North River Press, 1986.

HAMMER, M.; CHAMPY, J. **Reengineering the corporation**: a manifesto for business revolution. New York: Perfect Bound, 2001.

HARRY, M. J. Six Sigma: A breakthrough strategy for profitability. **Quality Progress**, v. 31, n. 5, p. 60-64, 1998.

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

HINCKELDEYN, J.; DEKKERS, R.; ALTFELD, N.; KREUTZFELDT, J. Expanding bottleneck management from manufacturing to product design and engineering processes. **Computers & Industrial Engineering**, v. 76, p. 415-428, 2014.

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

IMAI, M. **Kaizen**: A estratégia para o sucesso competitivo. 5. ed. São Paulo: IMAM, 1986.

- KASEMSET, C.; KACHITVICHYANUKUL, V. Effect of confidence interval on bottleneck identification via simulation. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ENGINEERING AND ENGINEERING MANAGEMENT, 2010, Macau. **Proceedings...** Macau, 2010, p. 1592-1595.
- KUO, T. C.; CHANG, S. H.; HUANG, S. N. Due-date performance improvement using TOC's aggregated time buffer method at a wafer fabrication factory. **Expert Systems with Applications**, v. 36, p. 1783-1792, 2009.
- KURDVE, M.; SJÖGREN, P.; GÅSVAERA, D.; WIDFELDT, M.; WIKTORSSON, M. Production system change strategy in lightweight manufacturing. In: CIRP DESIGN CONFERENCE, n. 26, 2016. **Proceedings...** Estocolmo: Elsevier, 2016, p. 160-165.
- KWAK, Y. H.; ANBARI, F. T. Benefits, obstacles, and future of six sigma approach. **Technovation**, v. 26, p. 708-715, 2006.
- LARSEN, C.; THORSTENSON, A. The order and volume fill rates in inventory control systems. *International Journal of Production Economics*, v. 147, p. 13-19, 2014.
- LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation Modeling and Analysis**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2000.
- LEE, J. H.; CHANG, J. G.; TSAI, C. H.; LI, R. K. Research on enhancement of TOC Simplified Drum-Buffer-Rope system using novel generic procedures. **Expert Systems with Applications**, v. 37, p. 3747-3754, 2010.
- LI, J.; PAPADOPOULOS, C. T.; ZHANG, L. Continuous improvement in manufacturing and service systems. **International Journal of Production Research**, v. 54, n. 21, p. 6281-6284, 2016.
- MANN, H. B.; WHITNEY, D. R. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. **Annals of Mathematical Statistics**, v. 18, n. 1, p. 50-60, 1947.
- MUTHIAH, K. M. N.; HUANG, S. H. Overall throughput effectiveness (OTE) metric for factory-level performance monitoring and bottleneck detection. **International Journal of Production Research**, v. 45, n. 20, p. 4753-4769, 2007.
- PYZDEK, T. **The Six Sigma Handbook**. New York: McGraw-Hill, 2003.
- RAZALI, N. M.; WAH, Y. B. Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. **Journal of Statistical Modeling and Analytics**, v. 2, n. 1, p. 21-33, 2011.
- REID, R. A. Applying the TOC five-step focusing process in the service sector. **Managing Service Quality**, v. 17, n. 2, p. 209-234, 2007.
- ROSER, C.; NAKANO, M.; TANAKA, M. Shifting Bottleneck Detection. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2002, San Diego. **Proceedings...** San Diego, v. 2, 2002, p. 1079-1086.
- ROYSTON, P. Remark AS R94: A Remark on Algorithm AS181: The W-test for Normality. **Journal of the Royal Statistical Society**, v. 44, n. 4, p. 547-551, 1995.

- SAHNO, J.; SHEVTSHENKO, E.; ZAHHAROV, R. Framework for Continuous Improvement of Production Processes and Product Throughput. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INTELLIGENT MANUFACTURING AND AUTOMATION, n. 100, 2015, Tálin. **Proceedings...** Tálin, 2015, p. 511-519.
- SCHRAGENHEIM, A. Gerenciamento da cadeia de suprimentos. In: COX III, J. F.; SCHLEIER, J. G. (Org.). **Handbook da Teoria das Restrições**. Porto Alegre: Bookman, p. 274-311, 2013a.
- SCHRAGENHEIM, E. M. O gerenciamento da produção para estoque e o conceito de produção para disponibilidade. In: COX III, J. F.; SCHLEIER, J. G. (Org.). **Handbook da Teoria das Restrições**. Porto Alegre: Bookman, p. 246-273, 2013b.
- SCHRAGENHEIM, E. M.; DETTMER, H. W. **Manufacturing at Warp Speed**: optimizing supply chain financial performance. Boca Raton: St. Lucie Press, 2001.
- SCHRAGENHEIM, E. M.; DETTMER, H. W.; PATTERSON, J. W. **Supply Chain Management at Warp Speed**: Integrating the System from End to End. Boca Raton: Taylor & Francis, 2009.
- SCHRAGENHEIM, E. M.; RONEN, B. Drum-buffer-ropes shop floor control. **Production and Inventory Management Journal**, v. 31, n. 3, p. 18-23, 1990.
- SCHRAGENHEIM, E. M.; RONEN, B. Buffer management: a diagnostic tool for production control. **Production and Inventory Management Journal**, v. 32, n. 2, p. 74-79, 1991.
- SCHROEDER, D. M.; ROBINSON, A. G. **America's most successful export to Japan**: continuous improvement programs. Disponível em: <<http://sloanreview.mit.edu/article/americas-most-successful-export-to-japan-continuous-improvement-programs>>. Acesso em: 31 jan. 2017.
- SCHROEDER, R. G.; LINDERMAN, K.; LIEDTKE, C.; CHOO, A. S. Six Sigma: Definition and underlying theory. **Journal of Operations Management**, v. 26, p. 536-554, 2008.
- SENGUPTA, S.; DAS, K.; VAN TIL, R. P. A New method for bottleneck detection. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2008, Gotemburgo. **Proceedings...** Gotemburgo, 2008, p. 1741-1745.
- SENGUPTA, S.; WHITE, T.; DAS, K.; VAN TIL, R. P. Analysis of a new signal for bottleneck identification and loss allocation to individual machines. **International Journal of Industrial and Systems Engineering**, v. 13, n. 2, p. 175-196, 2013.
- SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples), **Biometrika**, v. 52, n. 3, p. 591-611, 1965.
- SILVER, E.; PYKE, D. F.; PETERSON, R. **Inventory management and production planning and scheduling**. New York: Wiley, 1998.
- SIMS, T.; WAN, H. Constraint identification techniques for lean manufacturing systems. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 43, p. 50-58, 2017.
- SINGH, J.; SINGH, H. Continuous improvement approach: state-of-art review and future implications. **International Journal of Lean Six Sigma**, v. 3, n. 2, p. 88-111, 2012.

SINGH, J.; SINGH, H. Continuous improvement philosophy: literature review and directions. **Benchmarking: An International Journal**, v. 22, n. 1, p. 75-119, 2015.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da Produção**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

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

SOUZA, F. B.; PIRES, S. R. I. Produzindo para disponibilidade: uma aplicação da Teoria das Restrições em ambientes de produção para estoque. **Gestão e Produção**, v. 21, n. 1, p. 65-76, 2014.

STRATTON, R.; KNIGHT, A. Managing patient flow using time buffers. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 21, n. 4, p. 484-498, 2010.

UMBLE, M.; UMBLE, E. Utilizing buffer management to improve performance in a healthcare environment. **European Journal of Operational Research**, v. 174, p. 1060-1075, 2006.

UMBLE, M.; UMBLE, E.; MURAKAMI, S. Implementing theory of constraints in a traditional Japanese manufacturing environment: the case of Hitachi Tool Engineering. **International Journal of Production Research**, v. 44, n. 10, p. 1863-1880, 2006.

WANG, J.; CHEN, J.; WANG, S.; ZHANG, Y.; SUN, S. Shifting Economic Bottleneck Identification. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ENGINEERING AND ENGINEERING MANAGEMENT, 2011, Singapura. **Proceedings...** Singapura, 2011, p. 1760-1764.

WHITE, T.; SENGUPTA, S.; VAN TIL, R. P. A new way to find bottlenecks. **Industrial Engineer**, v. 44, n. 11, p. 45-49, 2012.

WOMACK, J. P.; JONES D. T.; ROOS, D. **The Machine that Changed the World**. New York: McMillan, 1990.

APÊNDICE A - Tempo médio de processamento dos seis cenários propostos

Tabela 11 - Tempos médios de processamento, em horas (Cenário 1)

	8164	8166	8167	8168	8175	8177	8178	8180
Seccionadora	0,0411	0,0479	0,0592	0,0839	0,0411	0,0479	0,0592	0,0839
Destopadeira	0,0479	0,0544	0,0544	0,0676	0,0479	0,0544	0,0544	0,0676
Tupia de Mesa	0,0545	0,0545	0,0545	0,0545	0,0545	0,0545	0,0545	0,0545
Respigadeira	0,0545	0,0545	0,0545	0,0545	0,0545	0,0545	0,0545	0,0545
Furadeira	0,0545	0,0545	0,0545	0,0545	0,0545	0,0545	0,0545	0,0545
Pintura	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0783	0,1473	0,1628	0,2947
Montagem	0,0516	0,0516	0,0590	0,0590	0,0516	0,0516	0,0590	0,0590
Embalagem	0,0552	0,0478	0,0552	0,0621	0,0552	0,0478	0,0552	0,0621
Inspeção	0,0545	0,0545	0,0545	0,0545	0,0545	0,0545	0,0545	0,0545

Fonte: Autor

Tabela 12 - Tempos médios de processamento, em horas (Cenário 2)

	8164	8166	8167	8168	8175	8177	8178	8180
Seccionadora	0,0465	0,0543	0,0670	0,0951	0,0465	0,0543	0,0670	0,0951
Destopadeira	0,0542	0,0616	0,0616	0,0767	0,0542	0,0616	0,0616	0,0767
Tupia de Mesa	0,0618	0,0618	0,0618	0,0618	0,0618	0,0618	0,0618	0,0618
Respigadeira	0,0618	0,0618	0,0618	0,0618	0,0618	0,0618	0,0618	0,0618
Furadeira	0,0618	0,0618	0,0618	0,0618	0,0618	0,0618	0,0618	0,0618
Pintura	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0888	0,1669	0,1845	0,3340
Montagem	0,0585	0,0585	0,0668	0,0668	0,0585	0,0585	0,0668	0,0668
Embalagem	0,0625	0,0542	0,0625	0,0703	0,0625	0,0542	0,0625	0,0703
Inspeção	0,0618	0,0618	0,0618	0,0618	0,0618	0,0618	0,0618	0,0618

Fonte: Autor

Tabela 13 - Tempos médios de processamento, em horas (Cenário 3)

	8164	8166	8167	8168	8175	8177	8178	8180
Seccionadora	0,0520	0,0607	0,0749	0,1062	0,0520	0,0607	0,0749	0,1062
Destopadeira	0,0606	0,0689	0,0689	0,0857	0,0606	0,0689	0,0689	0,0857
Tupia de Mesa	0,0691	0,0691	0,0691	0,0691	0,0691	0,0691	0,0691	0,0691
Respigadeira	0,0691	0,0691	0,0691	0,0691	0,0691	0,0691	0,0691	0,0691
Furadeira	0,0691	0,0691	0,0691	0,0691	0,0691	0,0691	0,0691	0,0691
Pintura	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0992	0,1866	0,2062	0,3733
Montagem	0,0654	0,0654	0,0747	0,0747	0,0654	0,0654	0,0747	0,0747
Embalagem	0,0699	0,0605	0,0699	0,0786	0,0699	0,0605	0,0699	0,0786
Inspeção	0,0691	0,0691	0,0691	0,0691	0,0691	0,0691	0,0691	0,0691

Fonte: Autor

Tabela 14 - Tempos médios de processamento, em horas (Cenário 4)

	8164	8166	8167	8168	8175	8177	8178	8180
Seccionadora	0,0343	0,0400	0,0494	0,0700	0,0343	0,0400	0,0494	0,0700
Destopadeira	0,0420	0,0477	0,0477	0,0594	0,0420	0,0477	0,0477	0,0594
Tupia de Mesa	0,0455	0,0455	0,0455	0,0455	0,0455	0,0455	0,0455	0,0455
Respigadeira	0,0420	0,0420	0,0420	0,0420	0,0420	0,0420	0,0420	0,0420
Furadeira	0,0545	0,0545	0,0545	0,0545	0,0545	0,0545	0,0545	0,0545
Pintura	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0565	0,1062	0,1174	0,2125
Montagem	0,0446	0,0446	0,0510	0,0510	0,0446	0,0446	0,0510	0,0510
Embalagem	0,0443	0,0384	0,0443	0,0498	0,0443	0,0384	0,0443	0,0498
Inspeção	0,0449	0,0449	0,0449	0,0449	0,0449	0,0449	0,0449	0,0449

Fonte: Autor

Tabela 15 - Tempos médios de processamento, em horas (Cenário 5)

	8164	8166	8167	8168	8175	8177	8178	8180
Seccionadora	0,0388	0,0453	0,0559	0,0793	0,0388	0,0453	0,0559	0,0793
Destopadeira	0,0476	0,0541	0,0541	0,0673	0,0476	0,0541	0,0541	0,0673
Tupia de Mesa	0,0515	0,0515	0,0515	0,0515	0,0515	0,0515	0,0515	0,0515
Respigadeira	0,0476	0,0476	0,0476	0,0476	0,0476	0,0476	0,0476	0,0476
Furadeira	0,0618	0,0618	0,0618	0,0618	0,0618	0,0618	0,0618	0,0618
Pintura	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0640	0,1203	0,1330	0,2408
Montagem	0,0506	0,0506	0,0578	0,0578	0,0506	0,0506	0,0578	0,0578
Embalagem	0,0502	0,0435	0,0502	0,0565	0,0502	0,0435	0,0502	0,0565
Inspeção	0,0509	0,0509	0,0509	0,0509	0,0509	0,0509	0,0509	0,0509

Fonte: Autor

Tabela 16 - Tempos médios de processamento, em horas (Cenário 6)

	8164	8166	8167	8168	8175	8177	8178	8180
Seccionadora	0,0434	0,0507	0,0625	0,0887	0,0434	0,0507	0,0625	0,0887
Destopadeira	0,0532	0,0605	0,0605	0,0752	0,0532	0,0605	0,0605	0,0752
Tupia de Mesa	0,0576	0,0576	0,0576	0,0576	0,0576	0,0576	0,0576	0,0576
Respigadeira	0,0532	0,0532	0,0532	0,0532	0,0532	0,0532	0,0532	0,0532
Furadeira	0,0691	0,0691	0,0691	0,0691	0,0691	0,0691	0,0691	0,0691
Pintura	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0715	0,1345	0,1487	0,2691
Montagem	0,0565	0,0565	0,0646	0,0646	0,0565	0,0565	0,0646	0,0646
Embalagem	0,0561	0,0486	0,0561	0,0631	0,0561	0,0486	0,0561	0,0631
Inspeção	0,0569	0,0569	0,0569	0,0569	0,0569	0,0569	0,0569	0,0569

Fonte: Autor

APÊNDICE B - Carga diária e taxa de ocupação diária dos recursos nos seis cenários propostos

Tabela 17 - Carga diária dos recursos, em horas, e taxa diária de ocupação (Cenário 1)

	8164	8166	8167	8168	8175	8177	8178	8180	SOMA	OCUP.
Seccionadora	1,232	1,007	0,592	1,090	0,329	0,336	0,828	0,587	6,000	75,0%
Destopadeira	1,436	1,142	0,544	0,879	0,383	0,381	0,761	0,474	6,000	75,0%
Tupia de Mesa	1,636	1,145	0,545	0,709	0,436	0,382	0,764	0,382	6,000	75,0%
Respigadeira	1,636	1,145	0,545	0,709	0,436	0,382	0,764	0,382	6,000	75,0%
Furadeira	1,636	1,145	0,545	0,709	0,436	0,382	0,764	0,382	6,000	75,0%
Pintura	0,000	0,000	0,000	0,000	0,627	1,031	2,279	2,063	6,000	75,0%
Montagem	1,548	1,084	0,590	0,766	0,413	0,361	0,825	0,413	6,000	75,0%
Embalagem	1,655	1,004	0,552	0,807	0,441	0,335	0,772	0,435	6,000	75,0%
Inspeção	1,636	1,145	0,545	0,709	0,436	0,382	0,764	0,382	6,000	75,0%

Fonte: Autor

Tabela 18 - Carga diária dos recursos, em horas, e taxa diária de ocupação (Cenário 2)

	8164	8166	8167	8168	8175	8177	8178	8180	SOMA	OCUP.
Seccionadora	1,396	1,141	0,670	1,236	0,372	0,380	0,939	0,665	6,800	85,0%
Destopadeira	1,627	1,294	0,616	0,997	0,434	0,431	0,863	0,537	6,800	85,0%
Tupia de Mesa	1,855	1,298	0,618	0,804	0,495	0,433	0,865	0,433	6,800	85,0%
Respigadeira	1,855	1,298	0,618	0,804	0,495	0,433	0,865	0,433	6,800	85,0%
Furadeira	1,855	1,298	0,618	0,804	0,495	0,433	0,865	0,433	6,800	85,0%
Pintura	0,000	0,000	0,000	0,000	0,710	1,169	2,583	2,338	6,800	85,0%
Montagem	1,754	1,228	0,668	0,869	0,468	0,409	0,935	0,468	6,800	85,0%
Embalagem	1,876	1,138	0,625	0,915	0,500	0,379	0,875	0,492	6,800	85,0%
Inspeção	1,855	1,298	0,618	0,804	0,495	0,433	0,865	0,433	6,800	85,0%

Fonte: Autor

Tabela 19 - Carga diária dos recursos, em horas, e taxa diária de ocupação (Cenário 3)

	8164	8166	8167	8168	8175	8177	8178	8180	SOMA	OCUP.
Seccionadora	1,561	1,275	0,749	1,381	0,416	0,425	1,049	0,744	7,600	95,0%
Destopadeira	1,819	1,447	0,689	1,114	0,485	0,482	0,965	0,600	7,600	95,0%
Tupia de Mesa	2,073	1,451	0,691	0,898	0,553	0,484	0,967	0,484	7,600	95,0%
Respigadeira	2,073	1,451	0,691	0,898	0,553	0,484	0,967	0,484	7,600	95,0%
Furadeira	2,073	1,451	0,691	0,898	0,553	0,484	0,967	0,484	7,600	95,0%
Pintura	0,000	0,000	0,000	0,000	0,794	1,306	2,887	2,613	7,600	95,0%
Montagem	1,961	1,373	0,747	0,971	0,523	0,458	1,046	0,523	7,600	95,0%
Embalagem	2,096	1,271	0,699	1,022	0,559	0,424	0,978	0,550	7,600	95,0%
Inspeção	2,073	1,451	0,691	0,898	0,553	0,484	0,967	0,484	7,600	95,0%

Fonte: Autor

Tabela 20 - Carga diária dos recursos, em horas, e taxa diária de ocupação (Cenário 4)

	8164	8166	8167	8168	8175	8177	8178	8180	SOMA	OCUP.
Seccionadora	1,028	0,840	0,494	0,910	0,274	0,280	0,691	0,490	5,007	62,6%
Destopadeira	1,260	1,002	0,477	0,772	0,336	0,334	0,668	0,416	5,265	65,8%
Tupia de Mesa	1,364	0,955	0,455	0,591	0,364	0,318	0,636	0,318	5,000	62,5%
Respigadeira	1,260	0,882	0,420	0,546	0,336	0,294	0,588	0,294	4,620	57,8%
Furadeira	1,636	1,145	0,545	0,709	0,436	0,382	0,764	0,382	6,000	75,0%
Pintura	0,000	0,000	0,000	0,000	0,452	0,743	1,643	1,487	4,325	54,1%
Montagem	1,339	0,937	0,510	0,663	0,357	0,312	0,714	0,357	5,190	64,9%
Embalagem	1,328	0,806	0,443	0,648	0,354	0,269	0,620	0,349	4,815	60,2%
Inspeção	1,347	0,943	0,449	0,584	0,359	0,314	0,629	0,314	4,940	61,8%

Fonte: Autor

Tabela 21 - Carga diária dos recursos, em horas, e taxa diária de ocupação (Cenário 5)

	8164	8166	8167	8168	8175	8177	8178	8180	SOMA	OCUP.
Seccionadora	1,165	0,952	0,559	1,031	0,311	0,317	0,783	0,555	5,675	70,9%
Destopadeira	1,428	1,136	0,541	0,875	0,381	0,379	0,757	0,471	5,967	74,6%
Tupia de Mesa	1,545	1,082	0,515	0,670	0,412	0,361	0,721	0,361	5,667	70,8%
Respigadeira	1,428	1,000	0,476	0,619	0,381	0,333	0,666	0,333	5,236	65,5%
Furadeira	1,855	1,298	0,618	0,804	0,495	0,433	0,865	0,433	6,800	85,0%
Pintura	0,000	0,000	0,000	0,000	0,512	0,842	1,862	1,685	4,902	61,3%
Montagem	1,518	1,062	0,578	0,751	0,405	0,354	0,809	0,405	5,882	73,5%
Embalagem	1,505	0,913	0,502	0,734	0,401	0,304	0,702	0,395	5,458	68,2%
Inspeção	1,527	1,069	0,509	0,662	0,407	0,356	0,713	0,356	5,599	70,0%

Fonte: Autor

Tabela 22 - Carga diária dos recursos, em horas, e taxa diária de ocupação (Cenário 6)

	8164	8166	8167	8168	8175	8177	8178	8180	SOMA	OCUP.
Seccionadora	1,302	1,064	0,625	1,153	0,347	0,355	0,875	0,621	6,342	79,3%
Destopadeira	1,596	1,270	0,605	0,978	0,426	0,423	0,846	0,526	6,669	83,4%
Tupia de Mesa	1,727	1,209	0,576	0,748	0,461	0,403	0,806	0,403	6,333	79,2%
Respigadeira	1,596	1,117	0,532	0,692	0,426	0,372	0,745	0,372	5,852	73,2%
Furadeira	2,073	1,451	0,691	0,898	0,553	0,484	0,967	0,484	7,600	95,0%
Pintura	0,000	0,000	0,000	0,000	0,572	0,941	2,081	1,884	5,479	68,5%
Montagem	1,696	1,187	0,646	0,840	0,452	0,396	0,904	0,452	6,574	82,2%
Embalagem	1,682	1,020	0,561	0,820	0,449	0,340	0,785	0,442	6,100	76,2%
Inspeção	1,707	1,195	0,569	0,740	0,455	0,398	0,796	0,398	6,257	78,2%

Fonte: Autor