

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

ROBSON FLÁVIO CASTRO

**AVALIAÇÃO DO SISTEMA SIMPLIFIED DRUM-
BUFFER-ROPE EM AMBIENTES DE
PRODUÇÃO PARA ESTOQUE**

Bauru/SP
2016

ROBSON FLÁVIO CASTRO

**AVALIAÇÃO DO SISTEMA SIMPLIFIED DRUM-
BUFFER-ROPE EM AMBIENTES DE
PRODUÇÃO PARA ESTOQUE**

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

Orientador: Prof. Dr. Fernando Bernardi de Souza

Co-orientadora: Profa. Dra. Regiane Máximo de Souza

Bauru/SP
2016

Castro, Robson Flávio.

Avaliação do Sistema Simplified Drum-Buffer-Rope em ambientes de produção para estoque / Robson Flávio Castro, Bauru, 2016

Total de folhas. : 133

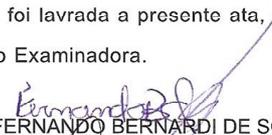
Orientador: Fernando Bernardi de Souza
Co-orientadora: Regiane Máximo de Souza

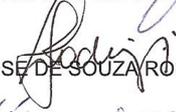
Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2016

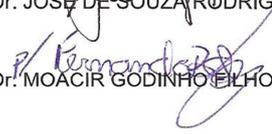
1. Planejamento e Controle da Produção. 2. Simplified Drum-Buffer-Rope. 3. Make-To-Availability. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado de ROBSON FLÁVIO CASTRO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, DA FACULDADE DE ENGENHARIA.

Aos 29 dias do mês de março do ano de 2016, às 14:00 horas, no(a) Anfiteatro da Seção Técnica de Pós-graduação da FEB/videoconferência, 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. JOSE DE SOUZA RODRIGUES do(a) Departamento de Engenharia de Produção / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. MOACIR GODINHO FILHO do(a) Departamento de Engenharia de Produção / Universidade Federal de São Carlos, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE Mestrado de ROBSON FLÁVIO CASTRO, intitulada **AVALIAÇÃO DO SISTEMA SIMPLIFIED DRUM-BUFFER-ROPE EM AMBIENTES DE PRODUÇÃO PARA ESTOQUE**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVAÇÃO . 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. JOSE DE SOUZA RODRIGUES


Prof. Dr. MOACIR GODINHO FILHO

Dedico este trabalho aos meus pais, Paulo e Ângela e ao meu irmão Vagner. A minha amada esposa Ana Paula e minha filha Alice, minhas maiores fontes de inspiração. Aos meus sobrinhos Tomás, Murilo, Nicolas e Matheus, e ao meu cunhado Sérgio, e às cunhadas Célia e Laura. Aos meus sogros Sérgio e Ana, e aos meus avós, em memória, Adelazia, Antônio, Amaro e Brígida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais Paulo e Ângela, pelo amor, incentivo e ensinamentos sobre respeito e honestidade. Ao meu irmão, Vagner, pela sua amizade e por poder compartilhar minhas ideias, alegrias e dificuldades. Ao meu grande orientador, Professor Fernando Bernardi, pela paciência, ensinamentos e pela sua extraordinária dedicação ao projeto, e principalmente pela amizade e companheirismo. A minha co-orientadora, Regiane Máximo, pela paciência, amizade, momentos de alegria e todo conhecimento compartilhado durante as aulas e nossas longas reuniões. Aos professores Moacir Godinho e José de Souza Rodrigues, pelas importantes sugestões e ideias.

Agradeço também aos professores Renato, Rosani, Henrique Salgado, Crepaldi e Enzo pela amizade e também por compartilharem um pouco de suas experiências e conhecimento. Ao professor Charbel pelas conversas e pela luta para manter o programa de pós-graduação da Engenharia de Produção em andamento. Não posso deixar de agradecer também a minha esposa Ana Paula, pelo amor, carinho e compreensão, e a nossa filha, Alice, que nos dá forças para continuarmos caminhando.

Agradeço ainda à psicóloga Sônia Lazari, ao psicólogo Fabio Luiz Vicente e ao Dr. Carlos Augusto Hueb, por me ouvirem e por me ajudarem a me tornar uma pessoa melhor. E também ao meu amigo Tiago Jorge, sua esposa e a Mariana Dias por me ajudarem com as traduções. Agradecimentos também à CAPES pelo apoio financeiro.

O mestrado era meu grande sonho, e só foi possível realiza-lo por que tive essas pessoas ao meu lado. Não cheguei até aqui sozinho. Obrigado a todos!

RESUMO

Por meio de experimentos baseados em simulação computacional, este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho do Sistema de Coordenação de Ordens (SCO) *Simplified Drum-Buffer-Rope* (S-DBR) aplicado a ambientes de produção para estoque, denominado *Make-to-Availability* (MTA). Composto por um conjunto de técnicas, o MTA visa maximizar o nível de serviço a partir da garantia de estoques de produtos acabados para pronta entrega. Nesta pesquisa, são criadas derivações do MTA com as retiradas das técnicas Gerenciamento do Pulmão, Priorização pelo Status do Pulmão e Carga Planejada. O desempenho das derivações é comparado com o MTA em sua forma completa. Para tanto, quatro indicadores de desempenho são utilizados: *fill rate*, estoque em processo, estoque de produtos acabados e tempo de reposição. Quatro cenários foram simulados, variando as taxas médias de demanda e o coeficiente de variação dos tempos de processamento. O MTA não obteve o melhor desempenho em nenhum dos indicadores, nos quatro cenários, porém a retirada das técnicas não trouxe melhoras significativas na disponibilidade dos produtos, e em alguns casos aumentou extremamente os níveis de estoque e o tempo de reposição. Ao final as técnicas se mostraram importantes para manter a disponibilidade dos produtos com menores níveis de estoque e menor tempo de reposição.

Palavras-chave: Planejamento e Controle da Produção, Simplified Drum-Buffer-Rope, Make-To-Availability, Produção para Estoque, Simulação.

ABSTRACT

Through experiments with computer simulation, this work aims to evaluate the performance of an Ordering System Coordinator (OSC), Simplified Drum-Buffer-Rope applied to a make to stock environment, called Make-To-Availability (MTA). Composed of a set of techniques, the MTA aims to maximize the level of service from the supply guarantee for immediate delivery. In this research, MTA derivations are created pulling out the techniques Buffer Management, Status of Buffer Prioritization and Planned Load. The performance of derivations was compared with MTA in its complete form. For this purpose, four performance indicators were utilized: fill rate, work in process, finished goods inventory and reposition time. Four scenarios were simulated, with different median demand rates and the coefficient of variation of the process time. The MTA does not obtain the best performance in any indicator, at the four scenarios, however the pulling out of techniques does not bring significant improvement on product availability, and in some cases, stocks and reposition time greatly increased. In the end, the techniques have shown important to keep the availability of products with lower stocks and smaller reposition time.

Key-words: Production Planning and Control, Simplified Drum-Buffer-Rope, Make-To-Availability, Make to Stock, Simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comportamento da demanda de um item típico MTA.....	18
Figura 2 – Demanda com pico.....	19
Figura 3 – Demanda com sazonalidade.....	19
Figura 4 – Conceitos básicos do <i>Drum-Buffer-Rope</i>	27
Figura 5 – Variações da Demanda sobre a capacidade de produção.....	31
Figura 6 – Evolução do tempo de produção <i>versus</i> aumento da demanda.....	32
Figura 7 – Ilustração de um exemplo do <i>Make-To-Availability</i>	38
Figura 8 – Exemplo de cálculo do Estoque Alvo	40
Figura 9 – Exemplo de abertura de uma Ordem de Produção utilizando Lote Mínimo	41
Figura 10 – Exemplo da Carga Planejada	43
Figura 11 – Ilustração do conceito de Penetração no Pulmão.....	43
Figura 12 – Exemplo de cálculo do Status do Pulmão	45
Figura 13 – Ilustração sobre Capacidade Protetiva	46
Figura 14 – Representação da linha de produção para quadros da cor verde.....	53
Figura 15 – Representação da linha de produção para quadros da cor branca.....	54
Figura 16 – Fluxograma da linha de produção de quadros.....	54
Figura 17 – Variações nas demandas dos cenários.....	66
Figura 18 – Variações no Tempo de Processamento.....	66
Figura 19 – Linha de produção de quadros de madeira implementada no ProModel.....	67
Figura 20 – Gráfico de warm-up da simulação do sistema real	69
Figura 21 – Linha de produção de quadros de madeira com o MTA implementado.....	71
Figura 22 – Warm-up da simulação do MTA	72
Figura 23 – Distribuição da amostra (30 replicações) da demanda total <i>versus</i> a distribuição normal.....	73
Figura 24 – Distribuição da amostra (50 replicações) da demanda total <i>versus</i> distribuição normal.....	73
Figura 25 – Variações nas demandas	75
Figura 26 – Ajustes do Estoque Alvo no Cenário 1	76
Figura 27 – Ajustes do Estoque Alvo no Cenário 2	76
Figura 28 – Ajustes do Estoque Alvo no Cenário 3	77
Figura 29 – Ajustes do Estoque Alvo no Cenário 4.....	77

Figura 30 – Movimentação do FGI durante a simulação	78
Figura 31 – Ordens de Produção Aguardando liberação	79
Figura 32 – Carga sobre o Recurso com Restrição de Capacidade (Furadeira).....	79
Figura 33 – WIP do MTA.....	80
Figura 34 – Tempo de Reposição do MTA	80
Figura 35 – Nível de Serviço do MTA	81
Figura 36 – Variações nas demandas	82
Figura 37 – <i>Fill Rate</i> no Cenário 1	83
Figura 38 – FGI no Cenário 1.....	84
Figura 39 – WIP no Cenário 1.....	86
Figura 40 – Tempo de Reposição no Cenário 1	88
Figura 41 – Variações nas demandas	89
Figura 42 – <i>Fill Rate</i> no Cenário 2	90
Figura 43 – FGI no Cenário 2.....	92
Figura 44 – WIP no Cenário 2.....	93
Figura 45 – Tempo de Reposição no Cenário 2	95
Figura 46 – Variações nas demandas	97
Figura 47 – <i>Fill Rate</i> no Cenário 3	98
Figura 48 – FGI no Cenário 3.....	100
Figura 49 – WIP no Cenário 3.....	101
Figura 50 – Tempo de Reposição no Cenário 3	103
Figura 51 – Variações nas demandas	105
Figura 52 – <i>Fill Rate</i> no Cenário 4.....	106
Figura 53 – FGI no Cenário 4.....	108
Figura 54 – WIP no Cenário 4.....	109
Figura 55 – Tempo de Reposição no Cenário 4	111
Figura 56 - Resumo dos Indicadores de Desempenho no Cenário 1.....	113
Figura 57 - Resumo dos Indicadores de Desempenho no Cenário 2.....	114
Figura 58 - Resumo dos Indicadores de Desempenho no Cenário 3.....	115
Figura 59 - Resumo dos Indicadores de Desempenho no Cenário 4.....	116

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Parâmetros para causar a variabilidade no sistema	63
Quadro 2 – Cenários simulados.....	65
Quadro 3 – Classificação no Cenário 1	113
Quadro 4 – Classificação no Cenário 2	114
Quadro 5 – Classificação no Cenário 3	116
Quadro 6 – Classificação no Cenário 4	117
Quadro 7 – Parâmetros para a variabilidade do sistema real.....	132

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exemplo de cálculo do Estoque Alvo inicial.....	39
Tabela 2 – Exemplo de priorização pelo Status do Pulmão	42
Tabela 3 – Médias das demandas diárias dos quadros de madeira.....	57
Tabela 4 – Tempos de processamento para os quadros brancos	57
Tabela 5 – Tempos de processamento para os quadros verdes	58
Tabela 6 – Composição dos quadros verdes e brancos	58
Tabela 7 – Carga de trabalho das estações de trabalho para cada produto.....	59
Tabela 8 – Carga das estações de trabalho	59
Tabela 9 – Estoque Alvo inicial	62
Tabela 10 – Resultados da Validação do Sistema Real.....	69
Tabela 11– Diferenças entre os resultados da simulação e do modelo de filas M/M/1	70
Tabela 12 – Comparação do WIP, TH e CT de produção (Simulação vs. Lei de Little).....	71
Tabela 13 – Resultados do MTA sobre os quatro cenários.	81
Tabela 14 – <i>Fill Rate</i> no Cenário 1	83
Tabela 15 – Estatística descritiva sobre o <i>Fill Rate</i> no Cenário 1.....	84
Tabela 16 – Diferença entre o <i>Fill Rate</i> médio do MTA e suas derivações no Cenário 1	84
Tabela 17 – FGI no Cenário 1	85
Tabela 18 – Diferença entre o FGI do MTA e suas derivações no Cenário 1.....	85
Tabela 19 –WIP no Cenário 1	86
Tabela 20 – Estoque total no sistema no Cenário 1.....	87
Tabela 21 – Diferença entre o WIP do MTA e suas derivações no Cenário 1.....	87
Tabela 22 – Tempo de Reposição no Cenário 1.....	88
Tabela 23 – Diferença do TR médio do MTA e suas derivações no Cenário 1	89
Tabela 24 – <i>Fill Rate</i> no Cenário 2	90
Tabela 25 – Estatística descritiva sobre o <i>Fill Rate</i> no Cenário 2.....	91
Tabela 26 – Diferença do <i>Fill Rate</i> entre o MTA e suas derivações no Cenário 2.....	91
Tabela 27 – FGI no Cenário 2	92
Tabela 28 – Diferença entre o FGI do MTA e suas derivações no Cenário 2.....	93
Tabela 29 –WIP no Cenário 2	94
Tabela 30 – Estoque total no sistema no Cenário 2.....	94
Tabela 31 – Diferença entre o WIP médio do MTA e suas derivações no Cenário 2.....	95

Tabela 32 – Tempo de Reposição no Cenário 2.....	96
Tabela 33 – Diferença entre o TR médio do MTA e suas derivações no Cenário 2.....	96
Tabela 34 – <i>Fill Rate</i> no Cenário 3	98
Tabela 35 – Estatística descritiva sobre o <i>Fill Rate</i> no Cenário 3.....	99
Tabela 36 – Diferença entre o <i>Fill Rate</i> do MTA e suas derivações no.....	99
Tabela 37 – FGI no Cenário 3	100
Tabela 38 – Diferença entre o FGI do MTA e suas derivações no Cenário 3.....	101
Tabela 39 –WIP no Cenário 3	102
Tabela 40 – Estoque total no sistema no Cenário 3.....	102
Tabela 41 – Diferença entre o WIP do MTA e suas derivações no	103
Tabela 42 – Tempo de Reposição no Cenário 3.....	104
Tabela 43 – Diferença entre o TR do MTA e suas derivações no.....	104
Tabela 44 – <i>Fill Rate</i> no Cenário 4	106
Tabela 45 – Estatística descritiva sobre o <i>Fill Rate</i> no Cenário 4.....	107
Tabela 46 – Diferença entre o <i>Fill Rate</i> do MTA e suas derivações no.....	107
Tabela 47 – FGI no Cenário 4	108
Tabela 48 – Diferença entre o FGI do MTA e suas derivações no	109
Tabela 49 – WIP no Cenário 4	110
Tabela 50 – Estoque total no sistema no Cenário 4.....	110
Tabela 51 – Diferença entre o WIP médio do MTA e suas derivações no Cenário 4.....	111
Tabela 52 – Tempo de Reposição no Cenário 4.....	112
Tabela 53 – Diferença entre o TR médio do MTA e suas derivações no Cenário 4.....	112
Tabela 54 – Tempos de processamentos para os quadros brancos (horas)	131
Tabela 55 – Tempos de processamentos para os quadros verdes (horas)	131
Tabela 56 – Tempo médio entre chegadas dos itens	132

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

BS	<i>Buffer Status</i>
CONWIP	<i>Constant Work-In-Process</i>
CP	Carga Planejada
DBR	<i>Drum-Buffer-Rope</i>
DWIP	<i>Downstream Work in Process</i>
EA	Estoque Alvo
FGI	<i>Finished Goods Inventory</i>
FS	Fator de Segurança
GP	Gerenciamento do Pulmão
MRP	<i>Material Requirement Planning</i>
MTA	<i>Make to Availability</i>
MTO	<i>Make to Order</i>
MTS	<i>Make to Stock</i>
OP	Ordem de Produção
POLCA	<i>Paired-cell Overlapping Loops of Cards with Authorization</i>
RRC	Recurso com Restrição de Capacidade
S-DBR	<i>Simplified Drum-Buffer-Rope</i>
SCO	Sistemas de Coordenação de Ordens
SP	<i>Status do Pulmão</i>
TL	<i>Target Level</i>
TOC	<i>Theory of Constraints</i>
TR	Tempo de Reposição
WIP	<i>Work in Process</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa e contribuição da Pesquisa	16
1.2	Definição do Problema de Pesquisa	18
1.3	Objetivos	21
1.4	Hipóteses de pesquisa	21
1.5	Métodos.....	22
1.6	Estrutura do Trabalho.....	23
2	REVISÃO DA LITERATURA	24
2.1	Teoria das Restrições	24
2.2	Drum-Buffer-Rope	26
2.3	Simplified Drum-Buffer-Rope	29
2.3.1	Simplified Drum-Buffer-Rope: diferenças entre Make-To-Order e Make-To-Stock.....	33
2.3.2	Simplified Drum-Buffer-Rope e Make-To-Availability.....	34
2.3.3	Capacidade Protetiva.....	46
2.3.4	Situações críticas para o MTA	47
2.3.4.1	<i>Picos de Demanda e Aumento do Tempo de Reposição</i>	47
2.3.4.2	<i>Sazonalidade</i>	48
2.3.4.3	<i>Variabilidades na Produção</i>	49
2.4	Modelagem e Simulação de Sistemas de Coordenação de Ordens	49
3	MÉTODOS DA PESQUISA	52
3.1	Pesquisa Experimental	52
3.2	Escolha do sistema para simulação	53
3.2.1	Desenho dos processos da linha de produção.....	54
3.2.2	Reunião de validação com gestores da linha	55
3.2.3	Coleta de dados sobre a produção	56
3.3	Modelagem conceitual do MTA.....	59
3.3.1	Parâmetros da Simulação	62
3.3.2	Cenários da Simulação	64
3.4	Simulação do sistema real	67
3.5	Validação da simulação do sistema real.....	68
3.6	Simulação do Make-To-Availability.....	71
3.7	Warm up.....	71
3.8	Número de Replicações.....	72
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES	75
4.1	Avaliando o MTA	75
4.2	Cenário 1: Demanda Média Constante.....	82
4.3	Cenário 2: Demanda com Pico.....	89
4.4	Cenário 3: Demanda com Sazonalidade.....	97
4.5	Cenário 4: Demanda Média Constante e CV igual a 3 nos tempos de processamento	105
4.6	Resultado Geral.....	112
5	CONCLUSÕES	118
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	123
	APÊNDICE A – Modelagem do MTA.....	128
	APÊNDICE B – Dados da Validação do Sistema Real.....	131

1 INTRODUÇÃO

A função produção é uma das três funções centrais de qualquer organização, juntamente com a função marketing, que expõe os produtos ou serviços ao mercado, em busca de gerar pedidos, e a função desenvolvimento, encarregada de criar e modificar produtos e serviços. Há também as funções de apoio contábil-financeira e de recursos humanos. A função produção é atribuída à fabricação de produtos e também a prestação de serviços. Ela tem o papel de atender aos pedidos dos clientes, por meio da produção e entrega dos produtos ou disponibilização de recursos para a execução de serviços (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2009). Para isso é preciso planejamento e controle.

O planejamento é a ação que gera um plano, baseado em expectativas, em que atividades, recursos e tempo são dispostos de tal forma a atingir um objetivo estabelecido. Porém, durante sua execução, mudanças podem acontecer, como, por exemplo, a perda de um fornecedor de matéria-prima ou, ainda, um desvio em relação aos objetivos estabelecidos por questões internas. Esses fatos são identificados por meio do controle e podem gerar mudanças no planejamento (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2009). O ato de planejar-se tem a intenção de evitar falhas, avaliando pontos críticos e alternativas caso elas aconteçam (FERNANDES; GODINHO FILHO, 2007).

Entre as atividades do planejamento e controle da produção estão: previsão, carregamento, sequenciamento, programação, monitoramento e controle. Juntas elas devem responder às questões sobre o que, quando e quanto produzir, com que recursos, ordem a seguir e se as atividades estão em conformidade com relação ao plano. Carregamento é a quantidade de trabalho alocada em um centro de trabalho. No sequenciamento, decisões devem ser tomadas quanto à ordem em que as atividades devem ser executadas (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2009). Também pode ser entendida como a definição das prioridades das atividades no sistema, a fim de atingir metas de desempenho (CORRÊA; CORRÊA, 2010). Na programação um cronograma é criado para mostrar o momento em que um trabalho deve ser iniciado e terminado (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2009), de acordo com o sequenciamento estabelecido (CORRÊA; CORRÊA, 2010). Durante a execução das ordens de produção a operação precisa ser monitorada e controlada (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2009). Essa atividade consiste em coletar e analisar informações sobre o desempenho das operações, e disparar ações quando observadas diferenças entre resultado e planejado (CORRÊA; CORRÊA, 2010).

Na literatura, os sistemas para o planejamento e controle da produção são retratados com diferentes nomenclaturas, como *material flow control mechanisms*, *production and material flow control mechanisms*, *flow control mechanisms* ou *production control mechanisms* (NG; BERNEDIXEN; SYBERFELDT, 2012). No sentido de evitar distorções no entendimento do escopo das atividades de planejamento e controle da produção, este trabalho faz uso da definição adotada para Sistema de Coordenação de Ordens (SCO) de produção e compra. Um SCO “programa ou organiza/explode as necessidades em termos de componentes e materiais, e/ou controla a emissão/liberação das ordens de produção e compra, e/ou programa/sequencia as tarefas nas máquinas” (FERNANDES; GODINHO FILHO, 2007, p.338).

O SCO *Simplified Drum Buffer Rope* (S-DBR), ou Tambor Pulmão Corda Simplificado, atende ambientes de produção sob encomenda (MTO – *Make-To-Order*) e produção para estoque (MTS – *Make-To-Stock*), denominado *Make-to-Availability* (MTA). O S-DBR é uma simplificação e evolução do método DBR. O sistema S-DBR/MTA, aqui estudo, é composto por um conjunto de técnicas e visa maximizar o nível de serviço (*Fill Rate*) a partir da garantia de disponibilidade de estoques de produtos acabados para pronta entrega, o que garante uma vantagem competitiva à empresa. No MTA, a quantidade máxima de estoque no sistema, denominado Estoque Alvo (EA), também chamado de *target level* (TL), deve ser fixada para cada produto. No texto é utilizada a sigla EA. O estoque no sistema é a soma do estoque de produtos acabados (*finished goods inventory* - FGI) - conjunto de itens finalizados e armazenados antes de serem enviados para o cliente - com o estoque em processo (*work in process* - WIP)- estoque que se encontra entre os pontos inicial e final de uma rota de produção (HOPP; SPEARMAN, 2000).

Uma das regras do MTA é repor o que foi vendido no dia anterior, sem com isso precisar de um processo apurado de previsão de vendas. O processo de liberação das ordens de produção ao sistema é chamado de corda (*rope*). O EA é o pulmão (*buffer*) de estoque do sistema de produção, que visa proteger as entregas a partir do FGI contra variações na demanda e do próprio fornecimento. O consumo real de produtos acabados dispara as necessidades de reposição, determinando, portanto, o ritmo de produção. O consumo real de produtos acabados é, portanto, o tambor (*drum*) da produção. Quando o FGI está abaixo do EA estabelecido, a diferença entre os dois é chamada de penetração no pulmão (PP), ou *buffer penetration*, a qual se materializa na forma de WIP (ordens de produção abertas sendo

processadas) ou de ordens de produção aguardando liberação (OPA) (SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009).

As principais técnicas do sistema MTA são Gerenciamento do Pulmão (GP), Carga Planejada (CP) e Priorização por meio do Status do Pulmão (SP). O Gerenciamento do Pulmão é responsável por controlar o estoque alvo, realizando ajustes de aumento ou diminuição. A Carga Planejada – que faz o papel da corda – controla a liberação de ordens de produção de acordo com a carga sobre o recurso com menor capacidade, chamado de Recurso com Restrição de Capacidade (RRC), imposta pelas ordens de produção (OP) que estão no chão de fábrica, em forma de WIP, mas que ainda não foram processadas por ele. Cada OP tem uma prioridade para sua liberação ao chão de fábrica, que é definida pelo status do pulmão (SP) (SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009). As técnicas estão detalhadas na revisão da literatura, seção 2.

Esta pesquisa procura avaliar a efetividade das técnicas GP, CP e Priorização por meio do SP, as quais compõem o conjunto de técnicas do MTA. O intuito é evidenciar o quanto e como essas técnicas influenciam na disponibilidade dos produtos acabados, o grande objetivo do MTA. A pesquisa também tem o intuito de apresentar, de forma didática, a maneira de planejar e controlar a produção para estoque, segundo a TOC, e contribuir futuras pesquisas.

1.1 Justificativa e contribuição da Pesquisa

Na literatura foram encontrados diversos trabalhos que avaliam o desempenho de SCOs, como o *Kanban* (NG; BERNEDIXEN; SYBERFELDT, 2012; KHOJATEH-GHAMARI, 2012), MRP (*Material Requirement Planning*) (MANIKAS; GUPTA; BOYD, 2014), DBR (*Drum-Buffer-Rope*) (NG; BERNEDIXEN; SYBERFELDT, 2012; KIM; ROSCOE DAVIS; COX III, 2003; KOH; BULFIN, 2004; TAKAHASHI; MORIKAWA; CHEN, 2007), CONWIP (*Constant Work-In-Process*) (NG; BERNEDIXEN; SYBERFELDT, 2012; KIM et al., 2003; KOH; BULFIN, 2004; TAKAHASHI et al., 2007) e POLCA (*Paired-cell Overlapping Loops of Cards with Authorization*) (HARROD; KANET, 2013). Porém, não foram encontrados trabalhos que avaliem o desempenho do *Simplified Drum-Buffer-Rope* (S-DBR), quer para MTO ou para MTS, mas foram encontrados trabalhos sobre a aplicação de conceitos do S-DBR em pequenas e médias empresas (BENAVIDES; VAN LANDEGHEM, 2015) e na avaliação do desempenho de relações de trabalho (CHAKRAVORTY; HALES, 2016).

Algumas publicações tem propósitos semelhantes ao desta pesquisa envolvendo o DBR. Ng, Bernedixen e Syberfeldt (2012) apontaram uma maneira de comparar Kanban, CONWIP e DBR sob configurações ideais dos parâmetros de controle e pulmões de capacidade. Kim, Roscoe Davis e COX III (2003), Koh e Bulfin (2004), Takahashi, Morikawa e Chen (2007) compararam o CONWIP e o DBR. Koh e Bulfin (2004) propuseram uma abordagem, utilizando processo de Markov e distribuições de probabilidade de estado estacionário, para comparar e otimizar o DBR e o CONWIP em uma linha desbalanceada de três estações. A conclusão a que chegaram foi a de que o DBR é melhor do que o CONWIP no *trade-off* entre *throughput* e a função de custo derivado, com o WIP como componente. Conclui-se também que é difícil estudar sistemas complexos por meio de procedimentos analíticos e, por isso, abordagens de simulação são adequadas, concluem os autores. Alguns autores utilizaram jogos criados em Excel® para simular e comparar a mecânica de SCOs. Manikas, Gupta e Boyd (2014) compararam os SCOs *Materials Requirements Planning*, *Kanban*, DBR e CONWIP dessa maneira, acreditando que jogos manuais melhoram a compreensão dos sistemas e suas diferenças. Sobre esses mesmos SCOs, Jodlbauer e Huber (2008) criaram um modelo de simulação para discutir o desempenho em termos de nível de serviço, em uma linha de produção *flow-shop*. Embora o desempenho do nível de serviço do CONWIP tenha apresentado melhores resultados, ele precisou se esforçar mais para manter sua vantagem em situações dinâmicas. Harrod e Kanet (2013) comparam o *Kanban*, CONWIP e POLCA, considerando três disciplinas de filas. Khojasteh-Ghamari (2012) desenvolveu um *framework* para comparar CONWIP e *Kanban*. Lavoie, Gharbi e Kenne (2010) consideraram um problema de otimização e comparação de linhas homogêneas de produção em série controladas por *Kanban*, CONWIP e um sistema híbrido *Kanban/CONWIP*. Herer e Masin (1997) apresentaram uma programação matemática, formulada para um sistema de produção baseado em CONWIP, a fim de definir a ordem dos pedidos da *backlog list*. Com este modelo, também foi possível explicar as principais vantagens do CONWIP sobre o sistema MRP. Os autores concluíram que a previsibilidade sobre o desempenho do sistema, por conta dos cartões que limitam o WIP, e a simplicidade para operar o sistema são as principais vantagens do CONWIP sobre o MRP.

Os trabalhos encontrados na literatura internacional sobre avaliação de desempenho de SCOs torna evidente a importância deste tipo de pesquisa, porém, o S-DBR ainda não fez parte de nenhum estudo semelhante. Ademais, e como consequência, não existem trabalhos de mesma natureza voltados a estudar detalhadamente o sistema MTA e suas técnicas. Neste

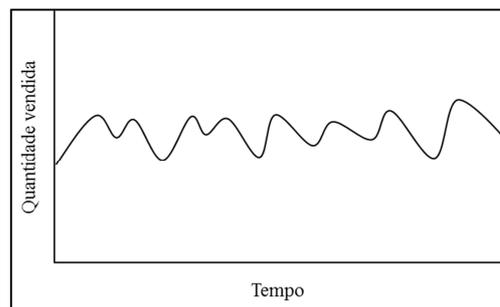
sentido, uma das contribuições desta pesquisa é, portanto, devido a seu ineditismo, permitir a ampliação do conhecimento atualmente disponível sobre as técnicas do MTA, e a ele mesmo. A avaliação aconteceu com a simulação de situações teoricamente críticas para o MTA, com grandes flutuações na demanda e variações nos tempos de processamento. Os resultados podem contribuir também com futuras pesquisas e melhoria dessas técnicas, tornando-as mais eficazes. Tais situações são discutidas na seção 1.2.

1.2 Definição do Problema de Pesquisa

Há uma lacuna de pesquisa referente à compreensão do funcionamento do sistema MTA e de suas técnicas, estudadas até então apenas com métodos qualitativos. Torna-se relevante, portanto, compreender se e como elas realmente contribuem para a disponibilidade dos produtos ao mercado, nos diversos padrões de demanda.

Para melhor compreendê-lo e avaliar seu desempenho, o MTA foi implementado em um ambiente simulado de produção submetido a variações na demanda e nos tempos de processamento, determinadas aqui como variáveis controladas. Segundo Schragenheim (2010b), alguns perfis de demanda são mais adequados ao MTA e outros não. Um item que pode ter seu estoque gerenciado pelo MTA tem uma demanda com um comportamento semelhante ao apresentado na Figura 1, onde não há grandes picos ou sazonalidades, nem tendências de crescimento ou de queda.

Figura 1 – Comportamento da demanda de um item típico MTA

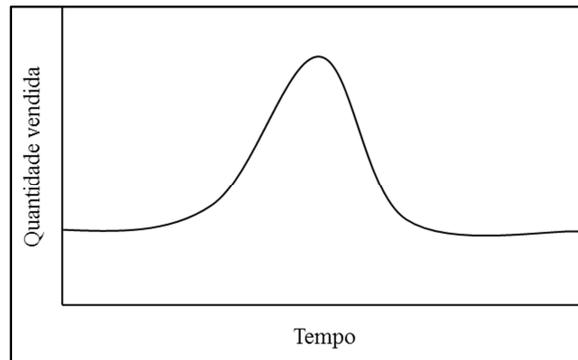


Fonte: Adaptado de Schragenheim (2010b)

Os tipos de demanda apresentados nas Figuras 2 e 3 trazem riscos para o MTA, por conta das mudanças acentuadas, o que exige mais do sistema. A Figura 2 mostra uma demanda com pico, e a Figura 3 uma demanda com sazonalidade. Obviamente é mais fácil manter a disponibilidade com menos flutuações. Aqui surgiram algumas questões do tipo:

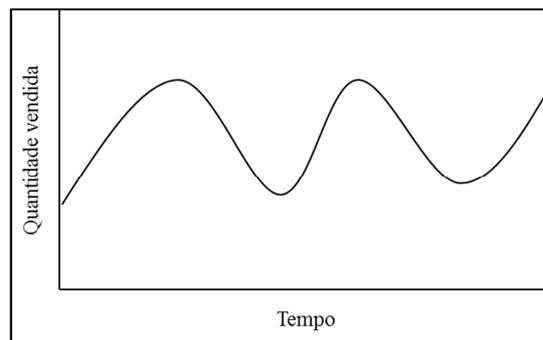
Como o MTA reage a um pico de demanda? O sistema demora a se recuperar quando a demanda começa a cair? Até que ponto o MTA consegue manter a disponibilidade quando há períodos sazonais? As técnicas Gerenciamento do Pulmão, Priorização pelo Status do Pulmão e Carga Planejada são efetivas mesmo nas situações mais críticas para o MTA?

Figura 2 – Demanda com pico



Fonte: Autor

Figura 3 – Demanda com sazonalidade



Fonte: Autor

Para fazer a avaliação de desempenho de qualquer tipo de sistema é preciso medi-lo. A medição de desempenho é o processo de quantificação de ações que levam a ele (NEELY; GREGORY; PLATTS, 2005). A medição se faz quantificando a eficiência e a eficácia das ações. Para avaliar o desempenho do MTA, quatro medidas foram empregadas: WIP, FGI, Tempo de Reposição e *Fill Rate*. Essas são as variáveis dependentes, ou não controladas, da pesquisa. Os indicadores foram assim definidos:

- ***Fill rate***: Silver, Pyke e Peterson (1998, p. 245) definem *fill rate* como a fração da demanda que pode ser atendida, no longo prazo, imediatamente a partir do estoque, sem espera.

- **FGI** (*finished goods inventory*): É o conjunto de produtos acabados e armazenados antes de serem enviados para o cliente (HOPP; SPEARMAN, 2000).
- **WIP** (*work in process*): O estoque de um produto que está entre os pontos inicial e final de uma rota de produção (HOPP; SPEARMAN, 2000).
- **TR** (tempo de reposição): É o tempo contado a partir do consumo de uma unidade do FGI até a sua reposição (SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009).

O *Fill Rate* foi escolhido como medida do nível de serviço oferecido pela produção em termos de disponibilidade imediata dos produtos em resposta à demanda de mercado. Essa medida está diretamente ligada ao objetivo do MTA, de produzir para manter a disponibilidade, e assim obter uma vantagem competitiva. É expresso em porcentagem, e quanto maior melhor. O FGI e o WIP representam a necessidade média, de estoque em todo o sistema para atender a demanda. Ele deve ser o suficiente para atender a demanda e o menor possível. O Tempo de Reposição representa o quão rápido a produção consegue repor um item após sua venda. Quanto menor ele for, menor será o FGI.

Com base nas demandas ilustradas nas Figuras 1, 2 e 3 e nos questionamentos feitos, o problema central que motiva a realização desta pesquisa pode ser expresso da seguinte forma: **Qual o desempenho da abordagem MTA comparado ao de suas derivações, onde as técnicas Gerenciamento do Pulmão, Priorização pelo Status do Pulmão e Carga Planejada, são retiradas, uma a uma, segundo os indicadores WIP, FGI, Tempo de Reposição e *Fill Rate*, diante de cenários com distintos comportamentos de demanda e variabilidades dos tempos de processamento?**

O MTA ao qual se refere a questão de pesquisa inclui todas as suas técnicas aqui estudadas: Gerenciamento do pulmão, Carga Planejada e Priorização pelo Status do Pulmão, as quais funcionam segundo uma lógica mais ampla sustentada em alguns princípios apresentados na seção 2.3 desta dissertação. Além do MTA, a questão de pesquisa faz referência às três derivações estudadas: MTA Sem Gerenciamento do pulmão (MTA Sem GP), MTA Sem Carga Planejada (MTA Sem CP) e MTA Sem Priorização pelo Status do Pulmão (MTA Sem SP), tratadas no texto como “derivações”. Portanto, toda vez que surgir esta palavra, estará sendo feita uma referência a essas derivações do MTA.

1.3 Objetivos

Em consonância com o problema de pesquisa, o objetivo geral da pesquisa é: **Avaliar o desempenho da abordagem MTA e suas técnicas, Gerenciamento do Pulmão, Priorização pelo Status do Pulmão e Carga Planejada, por meio de simulação computacional, segundo os indicadores *Fill Rate*, WIP, FGI e Tempo de Reposição.**

Alguns objetivos específicos foram estabelecidos como complemento ao objetivo geral:

- 1) Construir um modelo de simulação que contemple as lógicas de controle da produção da abordagem *Make-To-Availability* do sistema *S-DBR* utilizando o software Promodel®.
- 2) Avaliar o desempenho da abordagem *Make-To-Availability*.
- 3) Comparar o desempenho da abordagem *Make-To-Availability* com suas derivações – sem Gerenciamento do Pulmão, sem Priorização pelo Status do Pulmão e sem Carga Planejada.

1.4 Hipóteses de pesquisa

Com base no problema de pesquisa quatro hipóteses foram testadas:

- 1) Para uma demanda com média constante, o MTA alcança melhor desempenho nas medidas WIP, FGI, Tempo de Reposição e *Fill Rate* quando comparado às derivações avaliadas.
- 2) Havendo um pico de demanda, o MTA alcança melhor desempenho nas medidas WIP, FGI, Tempo de Reposição e *Fill Rate* quando comparado às derivações avaliadas.
- 3) Diante de uma demanda sazonal, o MTA alcança melhor desempenho nas medidas WIP, FGI, Tempo de Reposição e *Fill Rate*, quando comparado às derivações avaliadas.
- 4) Em situações onde há aumento na variabilidade dos tempos processamento, o MTA alcança melhor desempenho nas medidas WIP, FGI, Tempo de Reposição e *Fill Rate* quando comparado às derivações avaliadas.

1.5 Métodos

Algo importante em uma pesquisa é a definição dos métodos científicos a serem empregados. Método Científico é o conjunto de processos ou operações mentais empregados na pesquisa científica (GIL, 1999; LAKATOS; MARCONI, 1993). Pesquisas envolvem objetos e objetivos variados e, por isso, busca-se classificá-las. Há várias maneiras de classificar uma pesquisa (GIL, 2010). Esta pesquisa foi classificada segundo sua finalidade, objetivos gerais e métodos empregados.

Sua finalidade é de uma pesquisa básica pura, destinada à ampliação do conhecimento. O conhecimento aqui abordado é diz respeito a técnica MTA da Teoria das Restrições, um sistema para o Planejamento e Controle da Produção. A pesquisa foi classificada como descritiva e explicativa, quanto ao seu objetivo geral. É descritiva, pois se buscou identificar relações entre os indicadores de desempenho, e é explicativa por que busca explicar os resultados de um experimento realizado por meio de simulação. Os métodos de pesquisa empregados foram Experimental e Bibliográfica. O primeiro foi detalhado na seção 3 e o segundo é apresentado na sequência.

A Pesquisa Bibliográfica baseou-se em trabalhos já publicados, como livros, teses, dissertações e artigos científicos, em revistas, jornais e anais de eventos científicos, com o propósito de mostrar o estágio atual de conhecimento sobre o MTA (GIL, 2010). Foram realizadas buscas sem a determinação de um período de tempo, pois algumas referências têm mais de cinco anos (período de 2010 a 2015), inclusive os principais trabalhos sobre MTA. As bases de dados consultadas foram *Scopus*, *Web of Science*, *Scielo* e bibliotecas digitais da USP (Universidade de São Paulo), UNIFEI (Universidade Federal de Itajubá), UNESP (Universidade Estadual de São Paulo) e UFSCAR (Universidade Federal de São Carlos), com as palavras-chave: *Production Planning and Control*, *Production System*, *Theory of Constraints*, *Drum-Buffer-Rope*, *Simplified Drum-Buffer-Rope*, *Make-To-Availability*, *MTA*, *make-to-stock*, *MTS*, *Pull Production*, *Push* e *Simulation*. As principais referências foram encontradas nos periódicos *International Journal of Production Research*, *Journal of Industrial and Production Engineering*, *Production & Manufacturing Research*, *Production Planning & Control*, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* e *Gestão e Produção*.

Essas foram as etapas executadas na Pesquisa Bibliográfica:

- Definição dos Termos de Busca

- Definição das Bases de Dados a serem consultadas
- Realização das consultas em busca de publicações
- Seleção das publicações
- Leitura das publicações selecionadas
- Extração das partes relevantes para a pesquisa sobre os textos lidos

1.6 Estrutura do Trabalho

O trabalho se divide em cinco capítulos. O primeiro foi dedicado à sua introdução, e os outros estão distribuídos do seguinte modo:

- a) Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica: Fundamentação da pesquisa abordando a Teoria das Restrições, o sistema *Drum-Buffer-Rope*, o sistema *Simplified Drum-Buffer-Rope*, Make-To-Availability e Simulação de Sistemas de Coordenação de Ordens.
- b) Capítulo 3 – Métodos da Pesquisa: Descrição das etapas e dos métodos para realizar o experimento de avaliação do MTA e de suas técnicas.
- c) Capítulo 4 – Análise dos Resultados e Discussões: Análise dos resultados da pesquisa sobre os cenários 1, 2, 3 e 4.
- d) Capítulo 5 – Conclusões: Comentários sobre os resultados com base na literatura levantada. Sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A Revisão da Literatura é o resultado de buscas por trabalhos sobre Teoria das Restrições, *Drum-Buffer-Rope*, *Simplified Drum-Buffer-Rope*, *Make-To-Availability* e Simulação de Sistemas de Coordenação de Ordens. Em sua grande parte ela foi dedicada a descrever o MTA. Foram abordadas as situações críticas ao MTA, apresentados no problema de pesquisa (seção 1.2). Ao final da Revisão da Literatura há uma seção específica para a Simulação de SCOs, que mostra como a simulação vem sendo aplicada neste tipo de pesquisa.

2.1 Teoria das Restrições

Em uma organização, grande parte dos resultados pode ser atribuída a poucos elementos ou, em outras palavras, poucas causas são responsáveis pela maior parte dos efeitos observados (GOLDRATT, 2010). Essa colocação está inspirada, mas com importantes diferenças, na regra de Pareto denominada 80/20, segundo a qual 20% dos elementos contribuem para 80% dos impactos (GOLDRATT, 2010). Em um sistema pode haver várias ações que, se forem executadas, contribuem para o seu desempenho. Porém, pode não ser possível executar todas elas, por não haver tempo, dinheiro ou recursos suficientes (GOLDRATT, 2010). Se alguns poucos elementos são responsáveis por grande parte dos resultados e se não é possível executar todas as ações para melhorar o desempenho de um sistema, então é preciso realizar as ações com foco nos elementos que mais impactam nos resultados. Essa é a ideia fundamental da Teoria das Restrições (TOC). Por isso, Goldratt (2010) resume a TOC com apenas uma palavra: foco. A regra de Pareto é aplicável apenas quando não há interdependência entre os elementos do sistema, o que não é o caso em uma organização, onde há várias interdependências, além de variabilidades, e por isso, o número de elementos potencialmente identificados como causas ou problemas raízes tende a ser pequeno. Goldratt (2010) afirma que apenas 0,1% dos elementos determinam 99,9% dos resultados. Esses elementos são chamados, pela TOC, de restrições. Restrição é qualquer coisa que limite um sistema de atingir maior desempenho com relação à sua meta (GUPTA; SNYDER, 2010). As organizações, ou empresas com fins lucrativos, têm como meta ganhar dinheiro hoje e sempre (GOLDRATT, 1992).

No livro “A Meta” (GOLDRATT; COX, 2003) foram introduzidos os principais conceitos da TOC (SCHRAGENHEIM, 2010a), que começou a ser desenvolvida pelo Dr.

Elyiahu Goldratt na década de 1970 (WATSON; POLITO, 2010). Em uma parte do livro um dos personagens faz uma comparação entre um sistema e uma corrente que deixa claro o que é uma restrição e uma não restrição. Segundo esta analogia, a tração que uma corrente suporta não está na soma da resistência de cada elo, mas sim no elo mais fraco. Ele é quem determina a força máxima suportada pela corrente (GOLDRATT; COX, 2003). Em uma empresa a restrição é quem determina o ganho (tradução de *throughput*) máximo, definida no livro como “[...] o índice pelo qual o sistema gera dinheiro através de vendas”, ou a receita menos os custos totalmente variáveis (GOLDRATT; COX, 2003). Ganho é umas das medidas de desempenho da TOC, e seu significado e foram discutidos por Budd (2010).

Se uma restrição limita o ganho do sistema, então eliminar a restrição significa aumentar o ganho. Goldratt e Cox (2003) criaram uma ferramenta para auxiliar neste processo de focalização e eliminação da restrição, mais conhecido como os cinco passos de focalização (GONZALEZ-R; FRAMINAN; RUIZ-USANO, 2010). São eles (BARNARD, 2010):

Passo 1: Identificar a restrição do sistema (o elo mais fraco).

Passo 2: Decidir como explorar (e não desperdiçar seu potencial) a restrição do sistema.

Passo 3: Subordinar todo o resto do sistema às decisões do passo 2.

Para elevar o desempenho do sistema a um nível superior ao que é possível com a atual restrição, vá para o próximo passo (SRIKANTH, 2010):

Passo 4: Elevar a restrição do sistema.

Ao elevar o desempenho do sistema, a restrição pode mudar, sendo necessário então ir para o Passo 5 (SRIKANTH, 2010):

Passo 5: Se, nos passos anteriores, uma restrição foi quebrada, volte para a Etapa 1. Não se deve permitir que a inércia torne-se uma restrição do sistema.

Identificar e eliminar a restrição é parte de um processo de melhoria contínua, realizada por meio dos cinco passos de focalização (DETTMER, 2000).

Para Dettmer (2000), uma das mais conhecidas ferramentas para o gerenciamento de restrições desenvolvido por Goldratt é o *Drum-Buffer-Rope* (DBR). Para explicar os mecanismos do DBR, Goldratt e Cox (2003) fizeram uma analogia. Eles descreveram uma situação onde escoteiros caminhavam em fila e, para que não dispersassem, uma corda era passada na cintura do mais lento até o primeiro da fila. Para os meninos de trás, isso não era necessário, pois, eles naturalmente eram obrigados a caminharem na velocidade do mais lento e, por serem mais rápidos, não haveria dispersão. Isso criava uma ligação física entre eles. O

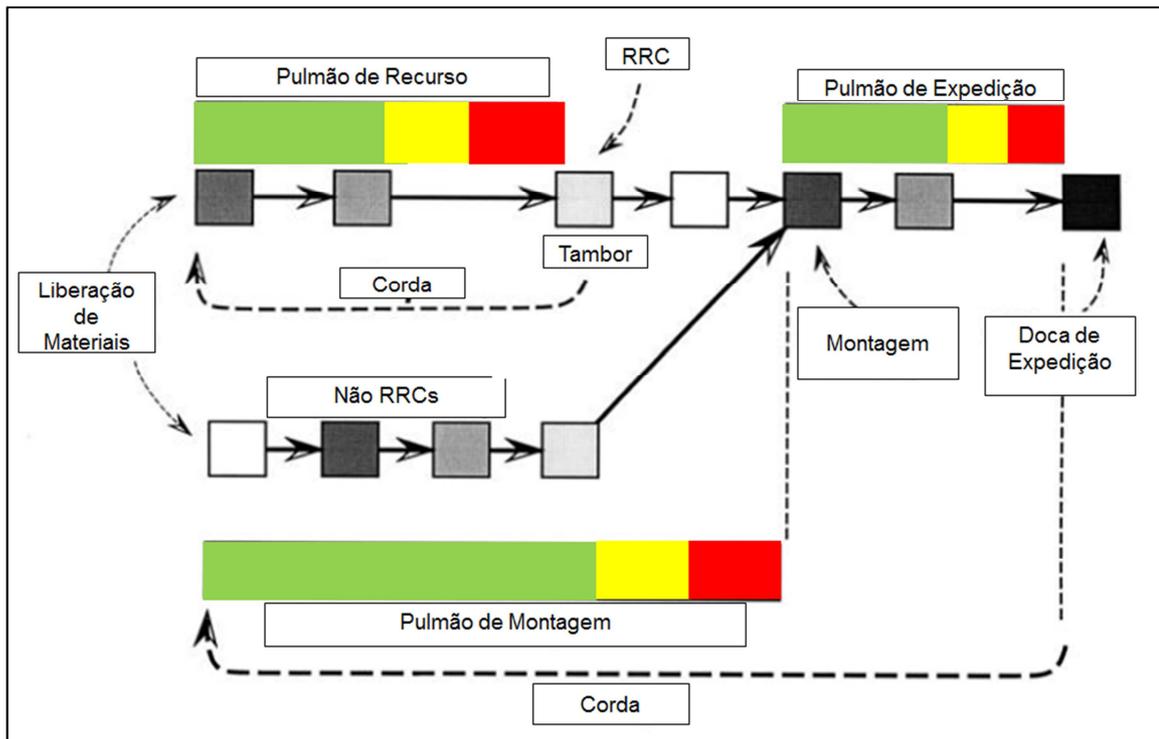
tambor (*Drum*) foi atribuído ao ritmo do mais lento escoteiro, que ditou o ritmo aos outros. A corda (*Rope*), como dito, evitava a dispersão entre eles, e assim todos caminhavam no mesmo ritmo do mais lento. O pulmão (*Buffer*), comprimento da corda, garantiria uma distância máxima. O sistema DBR é apresentado em maiores detalhes na seção 2.2.

Seguir as orientações da TOC tem implicações importantes sobre a forma como são realizadas as avaliações de desempenho das estações de trabalho (GOLDRATT; COX, 2003). Schragenheim (2010c) afirma que os sistemas de controle de chão de fábrica utilizados durante o final dos anos de 1970 e início dos anos de 1980 colocavam seu foco no incentivo "errado". Disse ainda que o senso comum da época premiava, individualmente, a alta eficiência de cada estação de trabalho do roteiro de fabricação. Eficiência significava manter ocupada cada uma delas o tempo todo, e o contrário disso era considerado ineficiência. Mas qual é o problema nisto? Suponha que todos os escoteiros andassem cada um em sua máxima velocidade. Isso causaria a dispersão, pois, provavelmente cada um tem uma velocidade diferente da do outro. Então, se o objetivo era não permitir a dispersão, por que fazer com que andassem na maior velocidade? Da mesma maneira, se todas as estações de trabalho produzirem o máximo que podem, provavelmente haverá estoque em excesso entre as estações, sem efetivas vantagens em termos de aumento da taxa de produção, pois uma delas é a mais lenta e não permitiria que a produção fosse acelerada.

Observando por este prisma, o DBR procura gerir o fluxo de trabalho e não a capacidade, assim, seu objetivo é maximizar o fluxo da linha de produção para que, finalmente, os produtos acabados possam trazer receita para a empresa, ao mesmo tempo em que procura minimizar a quantidade de trabalho parcialmente concluído (WIP) residentes no processo de produção (SCHRAGENHEIM, 2010c).

2.2 Drum-Buffer-Rope

O objetivo desta seção é promover o entendimento do DBR, baseado na Figura 4.

Figura 4 – Conceitos básicos do *Drum-Buffer-Rope*

Fonte: Adaptado de Dettmer (2000)

Uma explicação resumida sobre a Figura 4 seria a seguinte: o Tambor é o programa de produção do RRC, que determina o ritmo de liberação de material para a produção. O Pulmão de Recurso é medido em tempo e visa proteger o RRC contra variabilidades e interrupções. A Corda faz a liberação de materiais de acordo com a programação feita pelo Tambor e com o tamanho estabelecido pelo Pulmão de Recurso. O Pulmão de Expedição procura proteger as datas das entregas prometidas aos clientes. O Pulmão de Montagem, por sua vez, visa proteger o ponto de montagem, controlando o fluxo de material de todas as linhas que a ela convergem. O pulmão contempla os tempos de processamento, setup, movimentações, emissão de ordens e proteções contra as variações internas e externas do sistema de produção.

A taxa de produção do RRC está ligada ao ritmo do tambor, e define a taxa de transferência para todo o sistema (SCHRAGENHEIM; DETTMER, 2000b). O tambor recebe uma programação, que se inicia com a identificação das Ordens de Produção (OP) que devem ser executados pelo RRC para atender aos pedidos dos clientes (SRIKANTH; 2010). Com a lista do que deve ser produzido é o momento de determinar a sequência de liberação das OPs (SRIKANTH; 2010). Enquanto houver OPs a serem processadas, o RRC deve permanecer trabalhando. Para garantir que não falte trabalho para o RRC, um pulmão de tempo é estabelecido para protegê-lo contra variabilidades (DETTMER; 2000), garantindo que o WIP

o alcance algum tempo antes do momento programado para ser processado (SRIKANTH; 2010). Dessa forma, haverá um acúmulo de inventário em frente ao RRC, causado propositalmente pelo pulmão. Se houver uma parada inesperada e a chegada do WIP for interrompida, o RRC continuará trabalhando, consumindo o inventário acumulado. Porém, se a parada for longa, o inventário pode ser totalmente consumido, e o RRC ficará aguardando.

Desta forma, uma OP deve ser liberada para o chão de fábrica um pulmão de tempo antes do momento que ele está programado para ser processado pelo RRC. Por exemplo, se a programação do RRC solicita que este deve começar a processar determinada OP às 3h da terça-feira, e o pulmão de recurso é de um dia, então a OP deve ser liberada na segunda-feira às 3h, para permitir que todas as etapas de processamento anteriores possam ser concluídas a tempo. Não só o RRC, mas outros pontos críticos também são protegidos pelos pulmões. Esses pontos críticos são: qualquer processo subsequente ao RRC onde são realizadas montagens e também a expedição, ou mercado. Mas por que os pulmões estão concentrados nos pontos mais críticos, e não em outros? Utilizar pulmões em pontos críticos pode reduzir o *lead time* em 50% ou mais, sem comprometer a data de entrega prometida ao cliente (DETTMER; 2000). Souza e Baptista (2010) descrevem assim os pulmões de mercado e montagem:

Um Pulmão de Mercado é estabelecido para que todo pedido seja programado no Tambor um pulmão de tempo antes da sua data de entrega ao cliente. Este Pulmão de Mercado deve incorporar, portanto, as operações localizadas após o RRC (excluindo este) até a conclusão e embarque do pedido ao cliente. O terceiro tipo de pulmão existe para as situações nas quais há uma operação de montagem após o RRC no roteiro de produção. Denominado de Pulmão de Montagem, este pulmão visa garantir que as peças provenientes do RRC possam ser imediatamente montadas com aquelas que não passaram pelo RRC, evitando atrasos que poderiam colocar em risco as datas de entrega acordadas com os clientes.

Os pulmões devem ser divididos em três partes iguais representadas pelas cores verde, amarela e vermelha, que indicam graus de prioridade. Se o tempo percorrido, a partir da liberação de uma ordem, estiver dentro da primeira parte (região verde) e a ordem não chegou ao RRC (ou na expedição), não há por que se preocupar. Quando o tempo percorrido está dentro da segunda parte do pulmão (região amarela), a execução da ordem deve ser monitorada, mas nenhuma atitude deve ser tomada. No entanto, se o tempo percorrido entrou na parte final (região vermelha) do pulmão de tempo, mas a ordem ainda não está disponível para o RRC ou para expedição, algo deve ser feito para acelerá-la, evitando atraso (SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009).

A corda é um dispositivo de comunicação que conecta o RRC ao ponto de liberação de material objetivando garantir que o material não seja liberado para o chão de fábrica a uma taxa mais rápida do que aquela que o RRC pode suportar (SCHRAGENHEIM; DETTMER, 2000b). Ela faz o gerenciamento da liberação de material de acordo com a programação feita para o RRC, e evita que haja acúmulo de material entre os processos, a não ser nos pontos críticos protegidos pelos pulmões, onde o acúmulo deve acontecer (DETTMER; 2000). A corda também não deixa de ser um gerenciador do fluxo ao longo do sistema (SRIKANTH; 2010). Mais sobre o sistema DBR pode ser encontrado em Goldratt e Fox (1992).

2.3 Simplified Drum-Buffer-Rope

Esta seção começa com a apresentação dos trabalhos encontrados na literatura que tratam do sistema *Simplified Drum-Buffer-Rope* (S-DBR), como livros e artigos nacionais e internacionais. O livro “Manufacturing at warp speed: optimizing supply chain financial performance”, dos autores Schragenheim e Dettmer (2000a), introduz o S-DBR e aborda também a integração e coordenação das áreas de manufatura, marketing, vendas, compras e finanças para maximizar a receita de vendas pelo controle dos estoques e custos indiretos, oferecendo as ferramentas necessárias para implantá-lo. Dos mesmos autores, o artigo “Simplified Drum-Buffer-Rope, a Whole System Approach to High Velocity Manufacturing” (SCHRAGENHEIM; DETTMER, 2000b), publicado no mesmo ano, trás uma breve revisão sobre o DBR e uma introdução sobre a evolução para o S-DBR, além da construção de um paralelo entre eles. Os autores apontam também as circunstâncias em que o DBR ainda é preferível.

Em 2009, Schragenheim e Dettmer lançaram o livro “Supply Chain Management at Warp Speed: Integrating the system from end to end” (SCHRAGENHEIM; DETTMER, 2009), que é um refinamento do livro “Manufacturing at warp speed: optimizing supply chain financial performance”. O principal objetivo dos autores ao escrever este livro foi de mostrar como a TOC pode ser integrada com a distribuição de produtos acabados, aquisição de matérias-primas e com o processo de fabricação. Este é o primeiro livro que descreve detalhes da abordagem da TOC para assegurar a disponibilidade na distribuição, tanto para fornecedores quanto para varejistas. A abordagem básica para isso recebeu o nome de make-to-availability (MTA).

No livro “Theory of Constraints Handbook”, capítulo “From DBR to Simplified-DBR for Make-to-Order” (SCHRAGENHEIM, 2010a), Eli Schragenheim explica os conceitos de S-DBR e Gerenciamento do Pulmão. O autor enfatizou a evolução histórica da mudança de paradigma do DBR para o S-DBR. Em outro capítulo, chamado de “Managing Make-to-Stock and the Concept of Make-to-Availability” (SCHRAGENHEIM, 2010b), Eli Schragenheim aborda os meios operacionais para oferecer o compromisso de disponibilidade ao mercado. O autor escreve sobre o Gerenciamento do Pulmão para o MTA, sazonalidade, ambientes híbridos com MTO e MTA e casos onde o MTA não deve ser aplicado, além de destacar implicações práticas sobre sua implantação.

Lee et al. (2010) escreveram sobre algumas dificuldades para implantação do S-DBR em ambientes MTO. As três maiores dificuldades apontadas foram: (1) Os recursos com restrição de capacidade (RRC) nem sempre estão localizados no meio do roteamento como assumido pelo S-DBR, podendo estar localizados em qualquer parte da rota de produção; (2) múltiplas ou interativos RRCs podem existir; (3) inserção de pedidos urgentes causando mudanças na data de entrega (especialmente trazendo-o para a frente) é comum. Os autores apontam duas possíveis maneiras para superar essas dificuldades: (1) voltar para o DBR; (2) resolver os problemas mediante Gerenciamento do Pulmão. Propõem ainda um método alternativo para melhorar o desempenho do S-DBR.

O artigo de Souza e Baptista (2010) têm por objetivo apresentar a abordagem do S-DBR para ambientes MTO e fazem uma diferenciação deste com o DBR. Os autores apresentam uma proposta complementar ao método S-DBR para estabelecer promessas de entregas urgentes, baseada no trabalho de Lee et al. (2010).

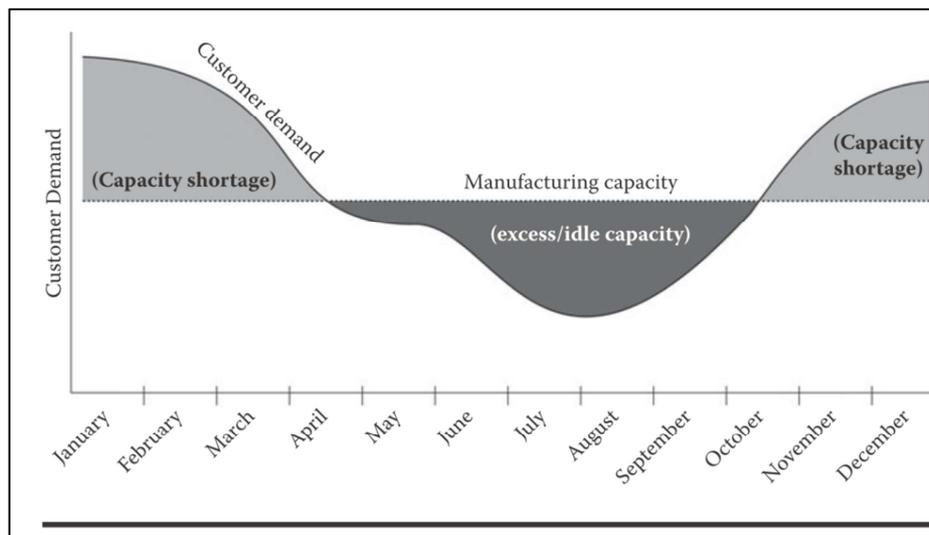
Souza e Pires (2014) apresentam em seu artigo a abordagem MTA, destacando que a criação de condições para garantir disponibilidade é uma inovação, pois, traz oportunidades mercadológicas.

Talvez por ser este um conceito contemporâneo, poucas pesquisas têm sido desenvolvidas sobre o sistema S-DBR. No entanto, recentemente, aplicações do sistema S-DBR têm sido estudadas, como em pequenas e médias empresas, devido às características de planejamento simplificado de tal sistema, que potencialmente facilitaria seu uso por tais empresas (BENAVIDES; VAN LANDEGHEM, 2015) ou na avaliação do desempenho de relações de trabalho (CHAKRAVORTY; HALES, 2016). Esses são os poucos trabalhos encontrados na literatura que tratam do S-DBR.

O S-DBR é, portanto, uma evolução do DBR, no sentido de simplificá-lo e aumentar seu escopo de aplicação. O DBR foi pensado para atender ambientes de produção MTO e assim também aconteceu com o S-DBR. Somente quando o sistema de planejamento baseado na TOC foi repensado é que se percebeu que o ambiente MTS precisava de princípios distintos (SCHRAGENHEIM, 2010a). Porém, alguns pressupostos são comuns aos dois sistemas.

O DBR foi projetado para situações em que a demanda frequentemente excede a capacidade da fábrica. O S-DBR, por sua vez, reconhece que para um grande número de empresas, durante ao menos parte do tempo, a demanda não consome toda a capacidade de produção (SOUZA; BAPTISTA, 2010). Isso é demonstrado pela Figura 5, onde a linha tracejada que corta horizontalmente o gráfico representa a capacidade da fábrica.

Figura 5 – Variações da Demanda sobre a capacidade de produção



Fonte: Schragenheim, Dettmer e Patterson (2009)

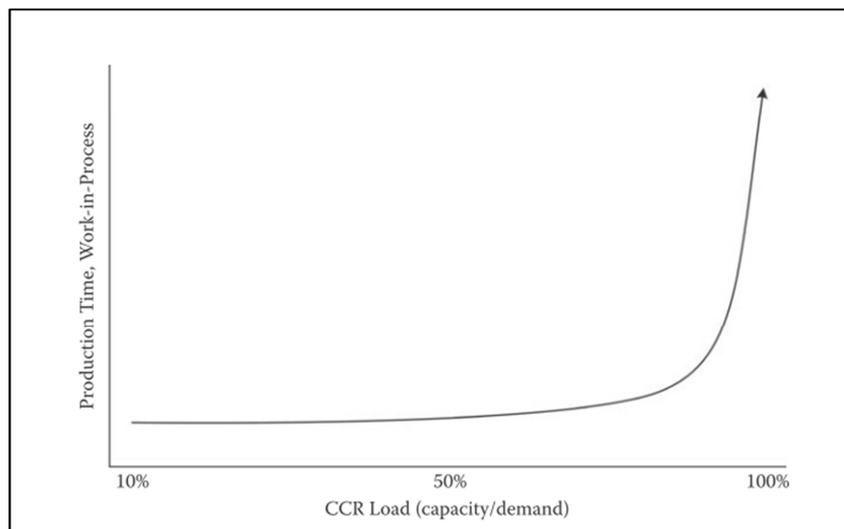
Algumas empresas enfrentam picos sazonais e em outras a demanda se altera de forma suave. De qualquer maneira, durante os períodos de pico de demanda, a capacidade de produção pode ficar abaixo do necessário para atendê-la. Combinar demanda com capacidade é considerado um desafio pelos gestores (SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009). Uma das premissas assumidas pelo S-DBR é que a demanda do cliente é sempre uma restrição, que fica disfarçada em alguns momentos por picos de demanda que levam a restrição para dentro do sistema, e que dura um curto período de tempo (SCHRAGENHEIM; PATTERSON, 2000), ou seja, as empresas contam com capacidade ociosa a maior parte do

tempo e, por esta razão, o mercado deve ser encarado sempre como uma restrição do sistema. Assim, é preciso explorar o mercado para aumentar as vendas e o ganho da empresa. Quando há capacidade ociosa, o ganho passa a ser limitado pela demanda.

Olhando por este prisma, faz mais sentido amarrar a corda à demanda de mercado ao invés de considerar as utilizações dos recursos de produção. Além disso, ao se aceitar que o mercado é sempre uma restrição do sistema, se está afirmando que ele é parte do sistema cujo propósito é, dentre outros, fazer mais dinheiro. Restrições de capacidade, portanto, devem ser entendidas como restrições interativas à restrição principal do mercado, enfraquecendo o sistema como um todo.

Reconhecendo que a demanda de mercado é a restrição do sistema, é importante manter excesso de capacidade no RRC e, conseqüentemente, em todos os demais recursos. O sistema não deve ser totalmente carregado, mesmo que a demanda exija maior capacidade para atendê-la. A razão é que, quando um processo de produção se aproxima de 100% de carga, as filas de pedidos, ordens de reposição de estoque e WIP começam a aumentar exponencialmente, além de criar atrasos nas entregas aos clientes (SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009). A Figura 6 ilustra esse fenômeno.

Figura 6 – Evolução do tempo de produção *versus* aumento da demanda



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

Invariavelmente, um RRC também pode ser considerado uma restrição sobre a demanda, pois também limita a oferta de produtos ao mercado. A demanda do mercado flutua e há sempre o risco de haver grande carga sobre o RRC. Por este motivo, sua carga deve ser monitorada cuidadosamente, e os compromissos com o mercado devem ser limitados

(SCHRAGENHEIM; DETTMER, 2000). No entanto, Souza e Baptista (2010), citando Goldratt e Cox (2003), afirmam que deve haver apenas uma restrição no sistema, para que ele atinja seu propósito. Como a demanda deve ser entendida como uma restrição permanente, deve-se garantir algum excesso de capacidade no RRC. A esse excesso se dá o nome de Capacidade Protetiva (SCHRAGENHEIM; DETTMER, 2000).

A abordagem da TOC para ambientes MTO não é foco desta pesquisa. Detalhes sobre ela podem ser obtidos em Schragenheim, Dettmer e Patterson (2009), Lee et al. (2010), Schragenheim (2010a) e Souza e Baptista (2010). A abordagem da TOC para ambientes MTS, denominada de MTA (*make-to-availability*) será tratada na seção 2.3.2. Ela recebe especial atenção por ser o objeto central de pesquisa neste estudo.

2.3.1 Simplified Drum-Buffer-Rope: diferenças entre Make-To-Order e Make-To-Stock

Souza e Pires (2014) destacam que há duas formas clássicas de um sistema produtivo atender aos seus clientes. A primeira a surgir foi a chamada produção sob encomenda (MTO – *Make-To-Order*). Com o advento da produção em massa, que surgiu junto com as “sociedades de consumo”, foi necessário pensar em outra maneira de atender a demanda. Neste contexto surgiu a produção para estoque (MTS – *Make-To-Stock*), onde produtos padronizados são produzidos para atender a uma demanda futura, ao contrário da produção MTO que atende a demanda presente. Desde seu início, questões como a previsão da demanda, determinação do nível dos estoques e garantia de níveis de serviço fazem parte dos sistemas que o adotaram (VOLLMAM et al., 2005). Souza e Pires (2014) fazem algumas considerações sobre o MTS. Segundo eles, produzir para estocar traz consigo algo impossível de ser resolvido plenamente: a imprevisibilidade do futuro. Questões sobre o mix de produtos que devem ser produzidos no período e o volume de produção requerem um pesado trabalho de gestão da demanda por meio de métodos de previsão. O grande objetivo da gestão da demanda é de minimizar o erro entre a demanda prevista e a real.

Schragenheim (2010b) escreveu sobre o surgimento da abordagem da TOC para ambientes MTS. Segundo o autor, para o DBR, não há muita diferença entre a produção na forma MTS e MTO, no que diz respeito ao gerenciamento da produção. Na época em que o DBR foi desenvolvido, na década de 1980, não houve contestação sobre o pressuposto de que não havia diferença entre atender ambientes MTO e o MTS. Porém, quando Goldratt estava

tratando do tema MTS e verificando quais as diferenças entre esta forma de produção e o MTO, uma de suas constatações deu origem ao termo produção para disponibilização (MTA – *Make To Availability*), onde foi acrescentado mais uma informação mercadológica ao significado operacional de MTS: “assumimos um compromisso com o mercado por nós escolhido de manter uma disponibilidade correta de um grupo de produtos finais específicos em um armazém específico”. Assim, o objetivo do sistema MTA é oferecer uma oportunidade comercial à empresa, permitindo que ela ofereça e garanta entregas imediatas aos clientes. Em alguns mercados, esse valor oferecido aos clientes se transforma em vantagem competitiva.

O DBR e o S-DBR ainda são melhores aplicados em ambientes de produção MTO, principalmente em pequenas e médias empresas. Elas conseguem melhores resultados com o MTO. Isso não acontece com as grandes empresas, que muitas vezes vendem seus produtos para redes varejistas, que por sua vez são atendidos por centros de distribuição. Assim, a produção está sempre indo para um estoque em algum lugar. Essas indústrias fazem parte de uma cadeia de fornecimento longa e complexa. Por este motivo, a criação de uma abordagem do S-DBR para ambientes MTS foi uma evolução importante e natural (SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009).

2.3.2 Simplified Drum-Buffer-Rope e Make-To-Availability

O tamanho de qualquer inventário é determinado principalmente por duas variáveis: demanda e tempo de reposição (TR). A demanda inclui a média de vendas de um item e sua flutuação. A falta de produtos afeta os clientes, que podem procurar produtos alternativos e outros fornecedores, impactando a demanda. Outro fator que impacta na demanda pode ser o tempo que os clientes toleram esperar pela entrega de um produto, e a variação deste tempo (SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009). Ou seja, não disponibilizar produtos que estão sendo procurados, entregá-los fora do prazo estipulado ou oferecer um prazo que os clientes não estão dispostos a aceitar pode reduzir a demanda.

Se for levado em consideração que o tempo tolerado, pelos clientes, pela entrega de um produto é maior que zero então é possível manter um nível de estoque um pouco menor e ainda assim atender às exigências dos clientes (SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009).

O tempo de reposição é contado a partir do consumo de uma unidade do FGI, até a sua reposição. Portanto, quanto menor o tempo de reposição, menor pode ser o FGI para manter a

disponibilidade. Dada a importância do TR, sua dimensão deve ser confiável e o suficiente para manter a disponibilidade e garantir que o cliente tenha o produto no momento em que precisa (SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009).

Considerando a demanda e o tempo de reposição como variáveis que afetam diretamente o estoque, é possível minimizar os efeitos indesejáveis: excesso ou falta dele. Reduzir o TR é mais fácil do que tentar melhorar a acurácia de uma previsão de vendas (SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009). Isto quer dizer que buscar um TR que ajude a empresa a garantir a disponibilidade é mais fácil do que tentar prever o quanto será vendido em um horizonte de tempo. Mas isto não quer dizer também que o estoque deve se manter com o mesmo nível frente às flutuações da demanda. Esse assunto será retomado mais a diante.

Cinco princípios norteiam o trabalho de produzir para disponibilidade, e que minimizam os riscos de excesso ou falta de estoque (SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009).

- 1) **Estoque e Tempo de Reposição estão intimamente correlacionados:** Quanto menor o TR, menor pode ser o inventário para manter a disponibilidade e evitar vendas perdidas. A dimensão do estoque acompanha a dimensão do TR. O nível de estoque disponível deve ser aproximadamente equivalente à potencial demanda durante o TR. Ou seja, o estoque no sistema deve ser suficiente para atender as vendas enquanto a reposição de um item vendido não chega. Portanto, se o TR aumenta mais estoque é necessário para garantir as disponibilidades. Para que os estoques sejam minimizados, o TR deve ser reduzido.
- 2) **Work-in-process complementa a proteção da disponibilidade:** As ordens de produção que estão a caminho, em produção, também fazem parte da proteção da disponibilidade, juntamente com o estoque final. A lógica por trás desse princípio é que o WIP não está pronto e disponível, porém, deve estar muito próximo disso. Para garantir a efetiva disponibilidade, é preciso manter um nível máximo de estoque no sistema, tanto na forma de estoque final como em produção. Este nível máximo é chamado de Estoque Alvo (EA), como já foi dito. O FGI, ou estoque em mãos, pode flutuar de acordo com variações na demanda e no TR, mas a quantidade de estoque no sistema como um todo deve ser estável.

- 3) **Amanhã será semelhante a hoje:** Um dia é o menor prazo de previsão, tanto para a demanda como para o fornecimento. A menos que haja uma tendência clara de mudança na demanda, o EA estabelecido pode ser mantido para garantir a disponibilidade. Cada produto deve ter definido seu EA em unidades, que pode estar na forma de estoque final ou em produção. Este princípio implica na geração de uma ordem de produção cada vez que algum consumo do estoque final ocorrer. A ideia é responder ao consumo rapidamente (reduzindo o TR), mantendo o estoque no sistema constante e em um nível mínimo que garanta altos níveis de disponibilidade de produtos acabados.
- 4) **O status do FGI dita as prioridades no chão de fábrica:** A diferença entre o FGI e o EA de cada produto define a prioridade tanto na liberação de ordens de produção para o chão de fábrica como para as ordens que estão sendo processadas. Há três níveis de prioridades, diferenciadas por cores:
- a. **Verde:** Se o estoque final for maior ou igual a dois terços do EA, então ele está preparado para suportar a disponibilidade. As necessidades de reposição não são consideradas urgentes neste caso. Isto pode indicar também que há excesso de estoque para o produto. Se a reposição pode ser realizada a uma velocidade que excede a velocidade da demanda normal, então um nível elevado de estoque pode não ser necessário.
 - b. **Amarelo:** Se o estoque final para um produto específico está entre um terço e dois terços do EA, então ele está normal, mesmo que a cor amarela normalmente conote "cautela". O status amarelo implica que nada é especialmente urgente e que o estoque não é elevado. Esse status indica para as estações de trabalho que ordens amarelas têm prioridade sobre as ordens verdes. Não há necessidade de intervenção no controle em ordens amarelas.
 - c. **Vermelha:** Quando o estoque final é menor ou igual a um terço do EA, o risco de falta de estoque é iminente. É necessária uma ação imediata para restaurar o estoque em vermelho para o amarelo ou verde. Uma intervenção pode ser necessária.
- 5) **Estagnação é indesejável:** É de se esperar que alguns diferentes produtos estejam nas regiões vermelhas ou verdes de vez em quando, porém, estar

permanente em uma das regiões por muito tempo é um sinal de que o EA requer ajuste. Permanecer-se na região vermelha por muito tempo significa que há riscos de ruptura do estoque, e o EA deve ser aumentado. Se permanecer sempre na região verde, isso significa que há mais estoque do que o necessário, e o EA deve ser diminuído.

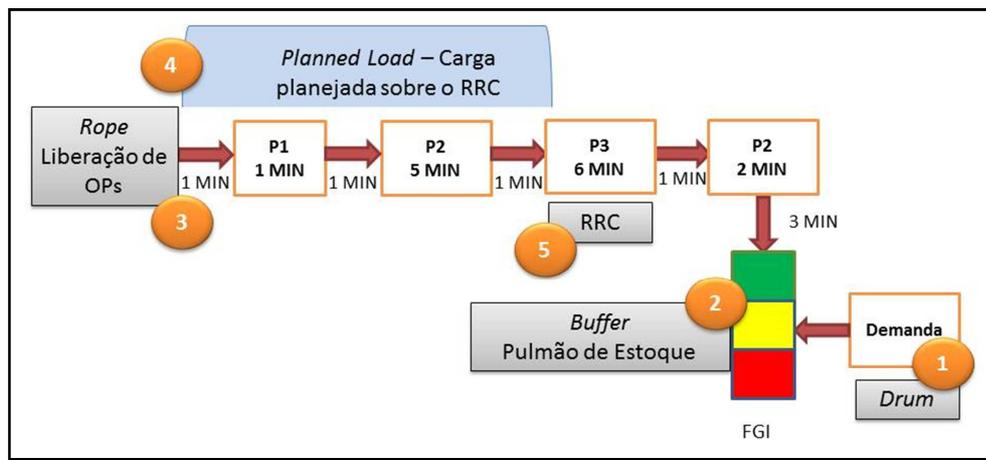
Os cinco princípios são as linhas-guias para um efetivo processo de planejamento e controle da produção com suporte ao MTA. No MTA, os três pulmões do DBR (recurso, mercado e montagem) são substituídos por um só, chamado pulmão de estoque e limitado pelo EA. O excesso de capacidade em todo o sistema, que já foi comentado anteriormente, elimina a necessidade de haver uma programação detalhada sobre o RRC e o tambor passa a corresponder à demanda de mercado, ou mais precisamente à taxa de consumo do FGI. A corda, que controla a liberação de ordens de produção, baseia-se no tambor, mas ainda deve ser ajustada pela carga do RRC. Um controle da carga no RRC, por meio de decisões de gestão de capacidade, também fornece as informações básicas para a identificação e prevenção de um gargalo emergente.

A ilustração na Figura 7 deve ajudar no entendimento do MTA. Cada número dentro do círculo representa uma de suas partes, elencadas na sequência:

- 1) Demanda (Tambor) consumindo o FGI de um produto. Quanto maior e mais rápido o consumo, mais rápido deve ser a reposição do estoque e menor deve ser o TR.
- 2) O pulmão de estoque foi dividido em três regiões (verde, amarela e vermelha). Seu tamanho máximo é limitado pelo EA. Cada produto tem um pulmão de estoque.
- 3) Se, por exemplo, o EA é de 100 unidades e foi consumida 10 unidades, então, idealmente, uma Ordem de Produção de 10 unidades é aberta para sua reposição. Ela faz a priorização pelo status do pulmão. Suponha que há duas OPs, de dois produtos diferentes, PROD1 e PROD2, para serem liberadas para o chão de fábrica. Suponha também que não há WIP destes itens (este caso será tratado oportunamente) e que o pulmão do PROD2 se encontra na região amarela, ou seja, o estoque foi consumido até chegar a essa região. Porém, o pulmão do PROD1 se encontra na região vermelha. Nesta situação a prioridade maior de liberação será da OP do PROD1, pois, o pulmão está menor.

- 4) A Carga Planejada sobre o RRC, círculo 5, determina se uma OP pode entrar na linha de produção ou não. A CP indica para a corda o quão carregado está o RRC. A CP é composta por todas as OPs liberadas, mas ainda não processadas pelo RRC P3.
- 5) O RRC é quem tem o maior tempo de processamento na linha de produção, 6 minutos.

Figura 7 – Ilustração de um exemplo do *Make-To-Availability*



Fonte: Autor

Este é um exemplo simples para demonstrar como é o mecanismo básico de funcionamento do MTA. Schragenheim, Dettmer e Patterson (2009) detalharam o procedimento para operar o MTA, que é composto por quatro passos que estabelecem como deve ser a parametrização e o controle da produção.

Passo 1: Definir o Estoque Alvo inicial

O EA é a soma do FGI mais o WIP. Dessa forma, ele estabelece o estoque total no sistema para cada produto. O grande desafio do MTA é atender os pedidos e ao mesmo tempo evitar a falta ou excesso de estoque. Um resultado natural do enfrentamento deste desafio é a busca pela maximização do giro de estoque - custo das mercadorias vendidas em um período dividido pelo valor do estoque médio (COMEZ DOLGAN; TANYERI, 2015). Isto implica em encontrar um nível adequado para o EA de cada item no qual se pretende oferecer a disponibilidade.

Uma das maneiras de definir o EA é igualá-lo à maior demanda esperada dentro do tempo de reposição médio somado a um pulmão de segurança contra possível atraso na reposição. Na Tabela 1 há uma ilustração com um exemplo numérico do cálculo. No exemplo,

é assumindo que o Item-1 tem demanda média de 60 unidades por semana e o tempo de reposição médio é de quatro semanas. Em quatro semanas a demanda média é de 240 unidades, porém, informações históricas mostram que pode chegar a 80 unidades por semana (320 a cada quatro semanas). Informações históricas também indicam que o maior tempo de reposição é 10% maior que a média. Este cálculo deve ser feito para cada item que se pretende manter a disponibilidade.

Tabela 1 – Exemplo de cálculo do Estoque Alvo inicial

Produto	Tempo de Reposição Médio	Demanda Máxima Estimada para 4 semanas	Fator de Seguranças contra atrasos na reposição	Estoque Alvo Inicial
Item-1	4 semanas	320	1,1	352

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

Outra maneira de definir o EA é aplicando um fator de segurança (FS) à demanda média durante o TR. Esse FS deve considerar a variabilidade do tempo de reposição e também da demanda. A fórmula para o cálculo do EA de acordo com a segunda abordagem é:

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

Onde:

EA_i é o Estoque Alvo do produto i .

FS é o fator de segurança.

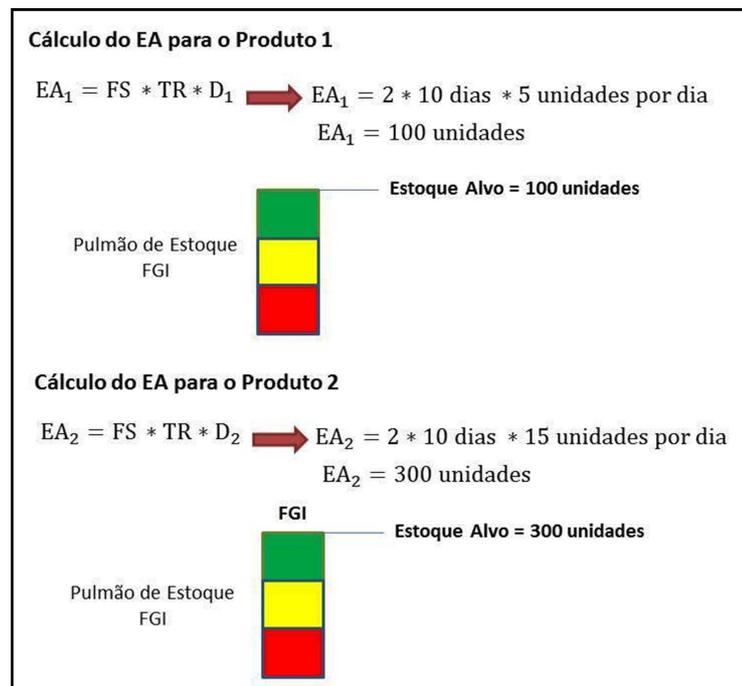
TR é o tempo de reposição médio.

D_i é a demanda média do produto durante uma unidade de tempo do TR. Se a unidade de tempo TR é “dias”, então D_i é a demanda média diária.

A definição do FS pode envolver várias questões como: Quanto de segurança oferecer? Em quanto as vendas podem se exceder além da média? E se isso acontecer, o tempo de reposição pode se tornar mais lento? Mas não é necessário ser preciso na definição, pois, este é o ponto inicial. O EA é ajustado dinamicamente pelo Gerenciamento do Pulmão à medida que variabilidades no tempo de reposição e na demanda acontecem (SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009). O FS de 1,5 é próprio para um grande estoque que serve vários clientes dentro de uma cadeia de suprimentos, onde a

variabilidade é menor. Em pontos que atendem um número menor de clientes a variabilidade pode ser mais acentuada, e a sugestão é que o fator seja de 2 ou 3 (SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009). No exemplo onde a demanda média semanal é de 60 unidades, e tempo de reposição médio é de 4 semanas, o EA é de 360 se multiplicada a demanda média durante o tempo de reposição (240 unidades) pelo FS 1,5. Um exemplo de cálculo do EA é ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Exemplo de cálculo do Estoque Alvo



Fonte: Autor

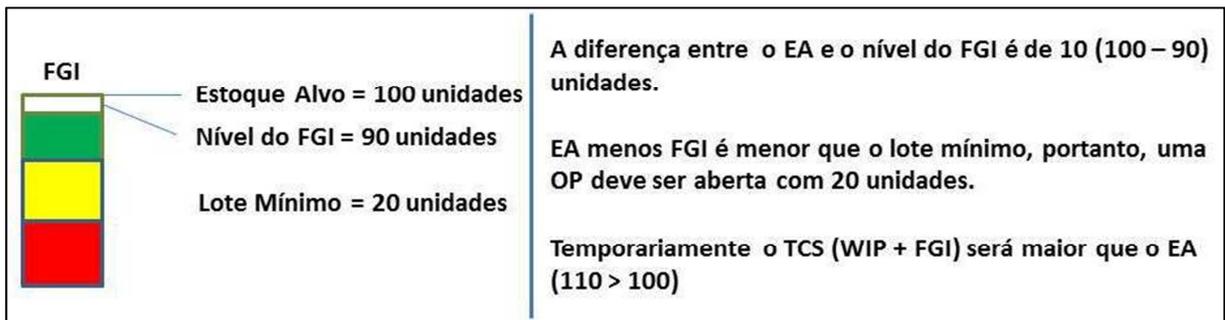
Passo 2: Geração, Priorização e Liberação de Ordens de Produção

Uma OP deve ser gerada sempre que a soma do FGI mais WIP de um produto estiver abaixo do EA. Esta soma é aqui chamada de TCS (*Total Current Stock*). O FGI precisa ser repostado para que o pulmão volte a ficar igual ao EA. A quantidade a repor é calculada subtraindo o TCS do EA. Desta forma muitas OPs pequenas são geradas, e OPs pequenas são produzidas de forma mais rápida. Porém, isso implica em mais *setups*. Um grande número de *setups* pode consumir rapidamente a capacidade do RRC. Para resolver este conflito, Schragenheim, Dettmer e Patterson (2009) sugerem dois mecanismos.

O primeiro se baseia na definição de um lote mínimo de produção. De acordo com este mecanismo, sempre que o TCS for menor que o EA, a OP é aberta com a quantidade de seu lote mínimo ou de acordo com a diferença entre EA e TCS, o que for maior. Quando o valor

do lote mínimo for o maior, a sua soma com o TCS deve ultrapassar o EA. Nesta situação, não será permitida a abertura de uma nova OP até que ocorra o consumo do FGI e o TCS volte a ficar abaixo do EA. Esta abordagem deverá garantir um lote mínimo que mantém um tempo de *Setup* total baixo o suficiente para evitar a sobrecarga dos recursos. A Figura 9 exemplifica o primeiro mecanismo.

Figura 9 – Exemplo de abertura de uma Ordem de Produção utilizando Lote Mínimo



Fonte: Autor

O segundo mecanismo, sugerido por Schragenheim (2002), Schragenheim, Dettmer e Patterson (2009), define dinamicamente o momento certo para liberar ordens de produção de acordo com a carga de trabalho sobre o RRC. A carga é composta pelas OPs que estão na linha de produção e ainda não foram processadas pelo RRC. Denominada de Carga Planejada (CP), ela é medida em horas. Nesta abordagem, uma OP não pode ser liberada para o chão de fábrica se a carga, em horas, sobre o RRC corresponder a mais do que 80% do tempo de reposição médio. Enquanto uma OP aguarda a diminuição da carga sobre o RRC, seu tamanho aumenta, pois, a demanda continua a consumir o FGI. Assim, uma OP pode ter um tamanho maior no momento de sua liberação para o chão de fábrica em comparação ao seu tamanho no momento em que foi gerada. Segundo este mecanismo, deve-se verificar diariamente os estoques de todos os produtos que serão fabricados no modo MTA.

Há uma regra para o sequenciamento das OPs que aguardam na fila da liberação. Cada uma delas tem uma prioridade para sua liberação, que é definida de acordo com o Status do Pulmão. O SP é calculado assim (SCHRAGENGEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009):

$$SP \text{ para liberação de uma nova OP} = \frac{(EA - TCS)}{EA} \quad (2)$$

De acordo com o quarto princípio do MTA, as ordens que estão na região vermelha (SP maior ou igual a 66,7%) têm prioridade sobre aquelas que estão na região amarela (SP entre 33,3% e 66,7%) que, por sua vez, têm prioridade sobre aquelas que estão na região verde (SP inferior ou igual a 33,3%). Na Tabela 2 há um exemplo de priorização pelo SP, onde 5 OPs de produtos diferentes aguardam para serem liberadas. Todos os produtos possuem EA iguais a 100 unidades, e cada um possui um determinado estoque em processo (WIP) e estoque de produtos acabados (FGI). O SP é calculado com esses números.

Tabela 2 – Exemplo de priorização pelo Status do Pulmão

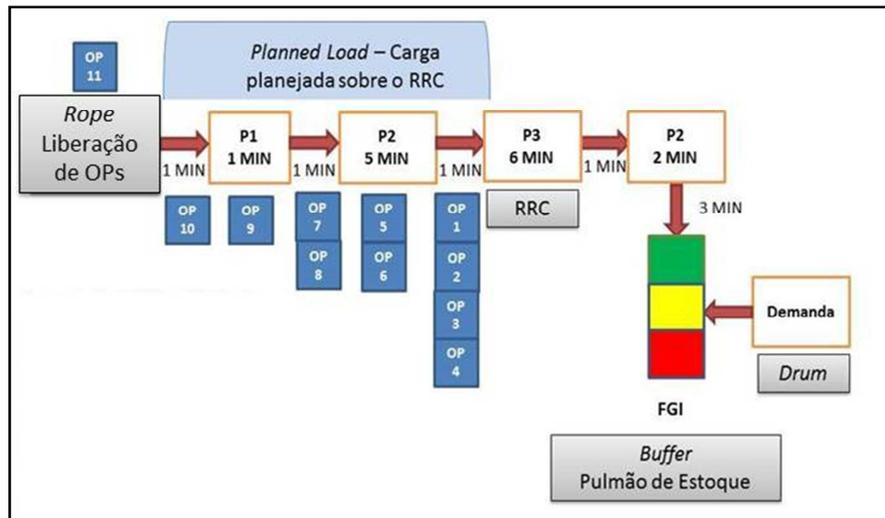
OP	FGI	WIP	TCS	EA	CÁLCULO DO SP	SP
PRODUTO1	50	10	60	100	$(100-60)/100$	0,4
PRODUTO2	20	10	30	100	$(100-30)/100$	0,7
PRODUTO3	30	20	50	100	$(100-50)/100$	0,5
PRODUTO4	0	40	40	100	$(100-40)/100$	0,6
PRODUTO5	60	30	90	100	$(100-90)/100$	0,1
LISTA DE PRIORIDADES						
	1	OP PRODUTO 2		0,7		
	2	OP PRODUTO 4		0,6		
	3	OP PRODUTO 3		0,5		
	4	OP PRODUTO 1		0,4		
	5	OP PRODUTO 5		0,1		

Fonte: Autor

Todos os pedidos de reposição são liberados até o momento em que a CP sobre o RRC se aproxima do limite máximo de tempo permitido. Estando o RRC com carga igual ou acima deste limite, a liberação de uma nova OP para a fábrica deve aguardar até que a carga retorne a um nível abaixo daquele limite. Neste momento, pedidos de reposição serão liberados de acordo com as prioridades estabelecidas pelo SP. Schragenheim, Dettmer e Patterson (2009) sugerem que o CP máximo aceitável sobre o RRC deve estar sempre abaixo ou igual a 80% do tempo de reposição médio.

No exemplo contido na Figura 10 há 10 OPs – de apenas um produto – presentes entre o início da linha de produção e o RRC (P3), o que resulta em uma carga planejada de 60 minutos, já que cada OP leva 6 minutos em média para ser processada em P3. Considerando que o TR médio é de 60 minutos também, então a CP é de 100%. Assim, a OP 11, que está para ser liberada precisa aguardar até que alguma ou várias OPs sejam processadas pelo RRC (P3) e a CP seja reduzida a 80% (48 minutos) ou menos.

Figura 10 – Exemplo da Carga Planejada

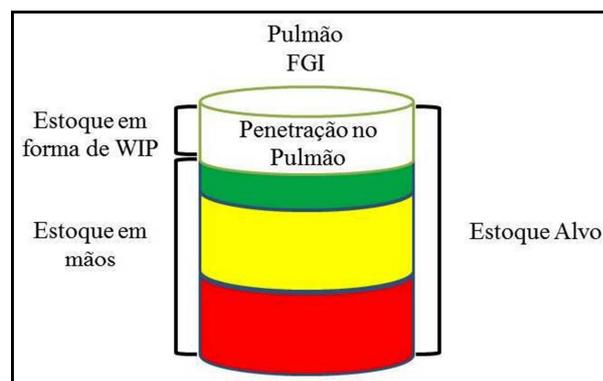


Fonte: Autor

Passo 3: Gerenciamento do Pulmão (GP)

No MTA não há prazos para finalizar as OPs, mas é preciso saber qual OP é preciso executar primeiro. O papel do GP é fornecer as prioridades adequadas e alertar quando é necessário realizar alguma ação para acelerar a produção de uma OP. O pulmão é dividido em três partes iguais, denominadas regiões, e cada produto tem seu pulmão. Quando o FGI é igual ou superior a dois terços do EA, o Status do Pulmão (SP) é considerado verde. Neste caso, um terço ou menos do EA deve estar em produção, na forma de WIP, ou na forma de ordens de produção ainda não liberadas – OPA. Esta quantidade faltante (EA - FGI) é chamada de Penetração no Pulmão. Quando o FGI está entre um terço e dois terços do EA, ele se encontra na região amarela. Se o FGI é menor ou igual a um terço do EA, seu estado é considerado vermelho. A Figura 11 ilustra o conceito.

Figura 11 – Ilustração do conceito de Penetração no Pulmão



Fonte: Autor

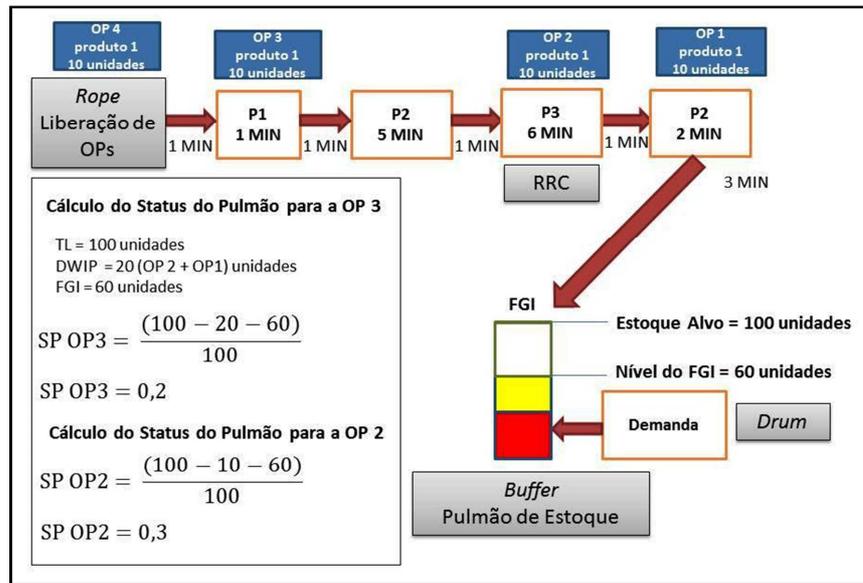
É importante acompanhar o Status do Pulmão diariamente a fim de realizar ajustes ou evitar uma situação de extrema urgência que comprometa a disponibilidade do produto diante ao mercado. Para realizar o cálculo do SP, de uma OP no chão de fábrica, é preciso introduzir mais um conceito, o *Downstream Work-In-Process* (DWIP). O DWIP é aqui definido como o WIP de um produto que está à frente (*downstream*) de uma OP, do mesmo produto, na linha de produção. O SP de uma OP na linha de produção é dado por (SCHRAGENHEIM, 2010c):

$$\text{SP da OP} = \frac{(\text{EA} - \text{DWIP} - \text{FGI})}{\text{EA}} \quad (3)$$

Além de informar o status da OP, essa fórmula é utilizada para priorizá-las. Se o SP for maior ou igual a 66,7%, isso indica que a OP está na região vermelha e tem prioridade sobre aquelas que estão nas regiões amarelas e verdes. Na região amarela estão as ordens com SP entre 33,3% e 66,7%. Na região verde estão as OPs com SP inferior ou igual a 33,3%. Uma OP da região amarela tem prioridade sobre aquelas que estão na região verde. As OPs da região vermelha exigem ações para acelerar sua conclusão (SCHRAGENHEIM, 2010b).

No exemplo colocado na Figura 12, há 4 OPs abertas do Produto 1 com 10 unidades cada. O cálculo de “SP OP3” e “SP OP2” mostra que a OP2 tem um status maior que a OP3, que está atrás na linha de produção. Isso acontece por que o DWIP é maior para a OP3, ou seja, quanto menor o DWIP de uma OP, maior será sua prioridade. A OP3 tem as OPs 1 e 2 à sua frente, somando vinte unidades. A OP2 tem apenas a OP1 à sua frente, somando 10 unidades. Assim, o SP da OP3 é de 0,2 e da OP2 é de 0,3. Se em uma estação de trabalho houver uma fila de ordens aguardando, o Status do Pulmão será aplicado na priorização destas OPs, e aquela com menor status será a última da fila.

Figura 12 – Exemplo de cálculo do Status do Pulmão



Fonte: Autor

Passo 4: Manutenção do Estoque Alvo

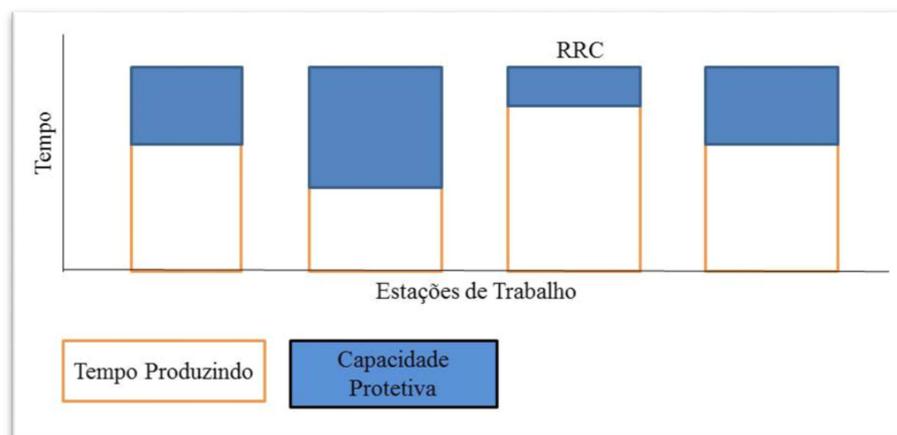
A frequência e o grau das variações no nível do FGI durante um período de tempo demonstra a eficácia do EA em garantir a disponibilidade de produtos acabados para pronta entrega. A primeira estimativa do EA pode não ser adequada, pois mudanças na demanda ou no TR podem ter mudado ao ponto de inviabilizar o EA original. Mas quais os sinais que indicam que o nível do EA está baixo ou alto? Um claro sinal é quando o pulmão permanece com frequência ou por um longo período de tempo na região verde ou vermelha. Quando isso acontece com a região verde, o EA pode estar superestimado. Se ocorrer na região vermelha pode estar pequeno demais. Diante dessas situações, o EA deve ser ajustado, sendo diminuído ou aumentado. Schragenheim (2010b) recomenda que o nível do EA deve ser diminuído em 15% se o tempo de permanência na região verde for duas vezes o tempo de reposição médio. O recomendado para o aumento é de 20%, somente quando, ao longo de um tempo de reposição médio, as penetrações na região vermelha forem iguais ou superiores ao próprio tamanho de uma região vermelha do pulmão. Para isso, é preciso registrar o nível de penetração, em unidades, cada vez que ela ocorre. Para Goldratt (2003), os ajustes devem ser feitos na ordem de 33%. Schragenheim (2010c) não aponta uma regra fixa para a diminuição, apenas sugere que ela ocorra depois do pulmão estar por três tempos de reposição na região verde, e também não recomenda qualquer regra para o aumento.

Notou-se que não há consenso entre os autores sobre o grau de ajuste do EA. Assim, os parâmetros de ajustes podem ser adaptados ou modificados conforme as condições do ambiente de produção.

2.3.3 Capacidade Protetiva

Algo muito importante para a operação do MTA é a capacidade protetiva. Ela é definida como uma capacidade extra. Basicamente, ela protege o fluxo do sistema contra as variabilidades (SULLIVAN; REID; CARTIER, 2007). No MTA, a restrição é a demanda de mercado, portanto, todos os recursos da produção devem ter capacidade protetiva, inclusive o RRC. Isso ajuda o MTA a manter a disponibilidade dos produtos diante das flutuações. Quem faz com que todo o mecanismo do MTA se mova é a demanda, e sem ela não há sentido do sistema existir. Por isso, é considerada a restrição, algo que deve ser explorado constantemente para aumentar o ganho do sistema. A Figura 13 mostra um gráfico sobre estações de trabalho de uma linha de produção que mantém capacidade protetiva (área azul), e pode ser entendida como uma ociosidade necessária e controlada.

Figura 13 – Ilustração sobre Capacidade Protetiva



Fonte: Autor

O exemplo da Figura 13 mostra que até o RRC tem capacidade protetiva, pois a restrição, a demanda do mercado, pode exigir o uso dessa capacidade por conta de um aumento repentino, por exemplo. O RRC é quem mantém a menor capacidade protetiva. Mas não é só isso, a capacidade protetiva tem a função também de ajudar a manter o fluxo e assim tornar os resultados da linha de produção mais previsíveis. Quanto menor a capacidade

protetiva, mais lenta a linha será por conta das filas que se formarão na frente das estações de trabalho, e menos capacidade de responder às variabilidades ela terá. Para Kadipasaoglu et al. (2000), a capacidade protetiva desempenha um papel importante na determinação do desempenho do sistema. Para saber mais sobre este assunto consulte Godinho Filho e Utiyama (2015).

2.3.4 Situações críticas para o MTA

Situações críticas são aquelas que colocam em risco a disponibilidade dos produtos e que são de difícil gerenciamento por meio do MTA. Schragenheim (2010c) e Schragenheim (2012) destacam quatro dessas situações.

A primeira é relativa à presença da demanda sazonal e a segunda situação envolve a operação de um ambiente híbrido com MTA e MTO. O terceiro fator está relacionado com a capacidade do sistema de produção para garantir a disponibilidade dos produtos finais, em ambientes em que os tempos de reposição são muito longos.

A quarta situação é resultado da segmentação da oferta do MTA ao mercado. Há algumas razões que podem levar a uma decisão para a produção MTS, sem qualquer tipo de compromisso. Exemplo disso é a presença de altos picos sazonais de vendas, ou situações em que as flutuações da demanda são elevadas. Segundo o autor, os ambientes MTS puros devem ser tratados com o uso de regras específicas. EA e GP podem ser estabelecidos para esses itens, mas o EA pode ser menor, as invasões na região vermelha seriam mais comuns, os esforços para acelerar uma OP seriam mais limitados e recomendações do GP não poderiam ser concedidas.

O foco desta pesquisa está no estudo do MTA operando com mudanças acentuadas na demanda e aumento na variabilidade dos tempos de processamento. Não foram tratadas pela pesquisa as situações sobre a segmentação da oferta do MTA ao mercado e ambiente de produção híbrido com MTA e MTO. Nas seções subsequentes estão detalhadas as situações envolvidas pela pesquisa.

2.3.4.1 Picos de Demanda e Aumento do Tempo de Reposição

Na baixa demanda, as OPs podem ser liberadas sem qualquer obstrução, mesmo sendo pequenas. À medida que a demanda aumenta, o monitoramento da liberação – realizado pela

CP – se torna mais importante. Sem o monitoramento, pode haver a obstrução do fluxo na produção (SCHRAGENHEIM, 2010b). No entanto, se há um pico de demanda que consuma o pulmão rapidamente, o sistema como um todo ficará sobrecarregado. Se a carga sobre o RRC alcançar 80% rapidamente, a fila de OPAs aumentará também. O que provavelmente acontecerá é o aumento do tamanho médio das OPs, causado pelo atraso na liberação.

Essa é uma situação que faz com que o tempo de reposição aumente e afete a disponibilidade dos produtos. Aumentar a capacidade com horas extras ou terceirização é uma ação que ajuda a diminuir o impacto. Mas, e quando não é possível aumentar a capacidade? Como o MTA reage ao pico de demanda? O sistema demora a se recuperar? Essas questões foram respondidas pelos resultados da pesquisa.

2.3.4.2 *Sazonalidade*

A sazonalidade traz problemas para o gerenciamento do estoque. Ter uma demanda sazonal implica ter a demanda que aumenta e diminui em períodos bem definidos, respeitando o padrão ao longo do tempo (SCHRAGENHEIM, 2010b). O problema é quando esse aumento é muito acentuado (pico) e exige capacidade maior que a disponível no RRC. A priorização pelo SP deveria amenizar esta situação acelerando as OPs dos produtos com menor pulmão. Quando o aumento é por um tempo curto, como dois dias ou quatro, por exemplo, os estoques ficarão baixos, mas talvez não a ponto de afetar a disponibilidade. Porém, se o aumento perdurar por um longo período de tempo, o risco da falta de estoque será bem maior.

Uma questão que pode ser levantada é: até que ponto o MTA consegue manter a disponibilidade por meio do GP em situações de sazonalidade?

Schrageheim (2010b) diz que “o maior risco ao bom desempenho do MTA é o aumento da demanda de mercado, que exige uma capacidade maior que aquela que o RRC é capaz de suportar”. Resta saber o quanto o MTA perde de desempenho quando a demanda aumenta e quanto tempo é necessário para se recuperar quando a demanda começa a cair. Uma sugestão para lidar com esta situação é aumentar os níveis do EA antes do período de pico. Outra sugestão é prever a quantidade mínima a ser vendida no período de pico sobre os produtos com maior venda. Essas sugestões não foram consideradas na pesquisa (SCHRAGENHEIM, 2010b), pois a intenção é testar o MTA sem intervenções.

2.3.4.3 Variabilidades na Produção

As variabilidades na demanda já foram abordadas, e algumas questões foram levantadas sobre o comportamento do MTA diante delas. Variabilidades na produção também podem comprometer a disponibilidade dos produtos. Hopp e Spearman (2000) citam que as principais causas de variabilidade na produção são:

- Pequenas flutuações nos tempos de processamento causadas por diferenças de operadores, máquinas e materiais. São chamadas pelos autores de variabilidade “natural”.
- Paradas aleatórias.
- *Setups*.
- Disponibilidade de operadores.
- Retrabalhos.

A variabilidade tratada pela pesquisa é a “natural”, que é inerente ao tempo de processamento. Por ela é desconsiderada paradas aleatórias, *setups* e qualquer outra influência externa. Essas não são variabilidades explícitas e estão, em grande parte, relacionadas aos operadores (HOPP; SPEARMAN, 2000).

Hopp e Spearman (2000, p. 252) utilizaram uma classificação para a variabilidade com base no coeficiente de variação (CV). A variabilidade é considerada baixa quando o CV é menor que 0,75, e moderada quando for maior ou igual que 0,75 e menor que 1,33. Um CV acima de 1,33 representa uma alta variabilidade. Na maioria dos sistemas o coeficiente desse tipo de variabilidade é baixa, menor do que 0,75 (HOPP; SPEARMAN, 2000).

Aqui surge outra pergunta: Mas, e se a variabilidade “natural” se tornar alta, a cima de 1,33, em quanto ela pode comprometer a disponibilidade dos produtos?

2.4 Modelagem e Simulação de Sistemas de Coordenação de Ordens

A representação de um sistema real é chamada de modelo (LAW; KELTON, 2000). Para Bratley, Fox e Schrage (2011), o modelo de um sistema tem como objetivo prever o resultado de uma, ou várias ações, que seriam executadas sobre ele. Os modelos de simulação podem ser classificados como estático, dinâmico, discreto, contínuo, determinístico e estocástico (MOURTZIS et al., 2015).

A simulação estática é a representação de um sistema em um dado momento, e pode ser realizada por meio do método de Monte Carlo. A simulação dinâmica é a representação de um sistema em intervalos de tempo (LAW; KELTON, 2000). Modelos determinísticos são aqueles onde as variáveis de entrada assumem valores escalares. Dessa forma, os resultados serão sempre iguais independentemente do número de execuções do modelo. Nos modelos estocásticos as variáveis de entrada terão valores aleatórios, gerados por uma distribuição de probabilidades. Os resultados gerados pelos modelos estocásticos são diferentes a cada execução, em função da aleatoriedade dos valores das variáveis de entrada (PEREIRA, 2000). A simulação contínua modela sistemas em que suas variáveis mudam continuamente de valor durante um intervalo de tempo. Na simulação discreta os eventos ocorrem em momentos diferentes no tempo (STRACK, 1984). Sistemas de produção podem ser modelados como sistemas de eventos discretos.

Existem algumas dificuldades para modelar sistemas, como: determinar os recursos e suas características que mais afetam o desempenho, formulação de um modelo ou descrição representando estes recursos e seus relacionamentos, e determinar os valores das medidas de desempenho sob determinadas situações (WANG; CHATWIN, 2005). Modelos de simulação de eventos discretos podem conter componentes estocásticos para testar as variabilidades do sistema. Para estimar valores de entrada para modelos estocásticos, pode-se utilizar um conjunto de dados existentes. Exemplos de tais entradas incluem a taxa de chegada de entidades no sistema, os tempos de processamento das máquinas e o tempo necessário para a reparação das máquinas. A análise de dados de entrada é um dos procedimentos mais importantes entre as tarefas de um projeto de modelagem e simulação. Um fator crítico em um estudo de simulação é quando os dados para modelar o sistema não existem por não ser possível extraí-los do sistema real ou o sistema é idealizado para estudos. Para apoiar na estimação de valores, podem-se utilizar algoritmos geradores de números aleatórios de acordo com distribuições de probabilidade (WANG; CHATWIN, 2005), como Normal, Poisson, LogNormal ou Weibull.

Para esta pesquisa foi formulado um modelo de simulação dinâmico e estocástico com eventos discretos, que forneceu dados estatísticos para a avaliação do MTA e suas técnicas. Os modelos de simulação podem ser implementados em uma linguagem de programação, linguagem de simulação ou em um pacote de simulação. As primeiras simulações em computador foram escritas em linguagens de programação como o FORTRAN, o PASCAL e o C. As linguagens de simulação se assemelham às linguagens de programação, mas são

usadas especificamente para aplicações em simulação. Dentre as primeiras linguagens de simulação, encontram-se o GASP, DYNAMO, GPSS, SIMULA, SIMSCRIPT II-5, SLAM e SIMAN. Existem muitos softwares de simulação disponíveis no mercado, entre eles o ARENA, EXTEND, STELLA, AUTOMOD, PROMODEL e POWERSIM (GAVIRA, 2003). Para criar o modelo de simulação da pesquisa foi utilizado o software Promodel, na versão 9.1, cuja linguagem de programação é o Pascal.

A simulação é uma ferramenta valiosa para a manufatura, podendo ser utilizada para modelar um ambiente de produção e observar seu comportamento e desempenho diante de mudanças na sua configuração, como alterações na forma de liberar OPs, gerenciar o estoque, gerenciar a capacidade dos recursos ou flutuações na demanda (HOSSEINPOUR; HAJIHOSSEINI, 2009). É considerada uma das técnicas mais populares para se analisar problemas complexos de ambientes de produção (O’KANE; SPENCELEY; TAYLOR, 2000).

A simulação computacional pode ser definida como a representação virtual de um sistema elaborado para fins de pesquisas ou da vida real por meio de um modelo. Essa ferramenta torna possível o estudo do sistema sem que seja necessário fazer modificações ou construí-lo na realidade, permitindo estudar os resultados dessas modificações sem a necessidade de se alterá-lo previamente (HARREL; GHOSH; BOWDEN, 2000). Para Law e Kelton (2000), simulação computacional é a representação de um sistema real criada através de um software para a posterior realização de experimentos e avaliação das melhorias e de seu desempenho. A simulação é utilizada para descrever e analisar o comportamento dos sistemas através de questões do tipo “o que aconteceria se”. Tanto sistemas existentes como conceituais podem ser modelados por meio da simulação. Estudos podem ser realizados sobre a produção, como a análise da necessidade de material e pessoal, avaliação do desempenho de um processo, avaliação dos procedimentos operacionais, como programação da produção, revisão das políticas de inventário e políticas de controle da qualidade (LAW; MCCOMAS, 1999).

3 MÉTODOS DA PESQUISA

Nesta seção é abordado o método de Pesquisa Experimental e todas as etapas do estudo, quais sejam:

- 1) Escolha do Sistema Real de Produção;
- 2) Desenho dos Processos da Linha de Produção;
- 3) Reunião de Validação do Desenho;
- 4) Coleta de Dados sobre a Linha de Produção;
- 5) Modelagem Conceitual do MTA;
- 6) Definição dos Parâmetros da Simulação;
- 7) Definição dos Cenários da Simulação;
- 8) Implementação da Simulação do Sistema Real e do MTA e validação dos modelos;
- 9) Definição do Warm-up e do Número de Replicações;
- 10) Execução do Experimento e Coleta de Dados

3.1 Pesquisa Experimental

Gil (2010) coloca que em pesquisas experimentais é preciso haver a determinação de um objeto de estudo, das variáveis que o influenciam e das formas de controle e observação dos efeitos que produzem no objeto. A abordagem MTA foi o objeto estudado, que sofreu a influência das variáveis Demanda Média e Tempo de Processamento, com alterações em seus níveis, gerando quatro cenários. Os métodos empregados foram a Simulação e a Revisão Bibliográfica.

A pesquisa foi desenvolvida com base na estrutura lógica demonstrada por Martins (2010), para pesquisas quantitativas. A estrutura consiste nas seguintes etapas:

1. Teoria – Explica e prevê o problema estudado.
2. Hipóteses – Definidas a partir da teoria, como sendo soluções provisórias para o problema. As hipóteses são testadas através de variáveis mensuráveis.
3. Observações/Coleta de Dados – Os dados, referentes às variáveis mensuráveis, são coletados para posterior análise.
4. Análise dos Dados – Os dados são analisados com o uso da estatística.

5. Resultados – A interpretação dos dados gera resultados que se somarão à base teórica existente, corroborando-a ou modificando-a.

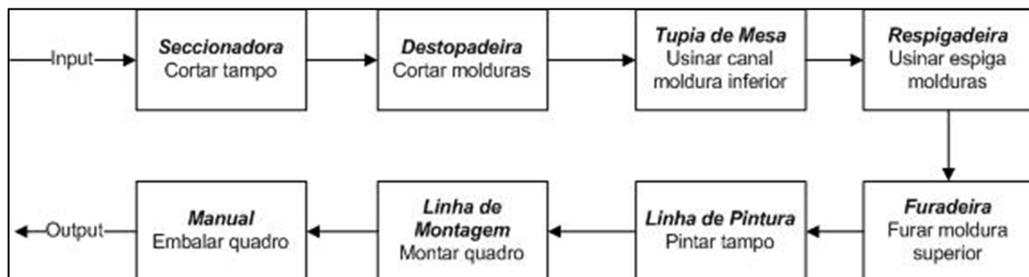
Na primeira etapa, foi definido o problema de pesquisa e realizada a Pesquisa Bibliográfica. Também nesta etapa, elaborou-se a justificativa da pesquisa, o problema e os objetivos. Na segunda etapa foram definidas as hipóteses que deveriam ser verificadas. Na etapa 3, foi realizada a coleta de dados utilizando os relatórios gerados pelo software, ao final da simulação. A quarta etapa, que prevê a análise dos dados, foi executada por meio da estatística descritiva. Os resultados – quinta etapa – surgiram da interpretação dos dados coletados à luz da literatura a fim de tornar consistente a conclusão da pesquisa.

3.2 Escolha do sistema para simulação

Com o intuito de simular um cenário inspirado em um ambiente real de manufatura, foi escolhida uma linha de produção de quadros de madeira de uma empresa localizada no interior do estado de São Paulo. O objetivo não foi de comparar os resultados da linha de produção real com os resultados da pesquisa, mas sim transmitir maior credibilidade sobre os resultados. Mediante acompanhamento dos gestores da empresa, foi realizada uma visita à fábrica para conhecer o processo produtivo.

Vários tipos de quadros escolares são produzidos, dos quais foram escolhidos oito para simplificar o trabalho de simulação. Existem quatro dimensões diferentes para os quadros e para cada uma delas duas cores, verde e branca. Nas Figuras 14 e 15 estão sequenciados os processos para a produção dos quadros verdes e brancos, respectivamente.

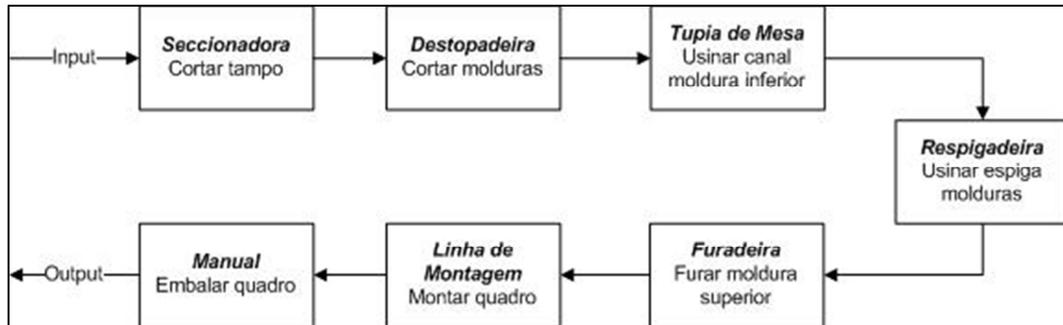
Figura 14 – Representação da linha de produção para quadros da cor verde



Fonte: Autor

Na linha de produção dos quadros brancos, representada pela Figura 15, não há o processo “Pintar tampo”, contido na linha de produção dos quadros da cor verde. Os outros processos são idênticos.

Figura 15 – Representação da linha de produção para quadros da cor branca

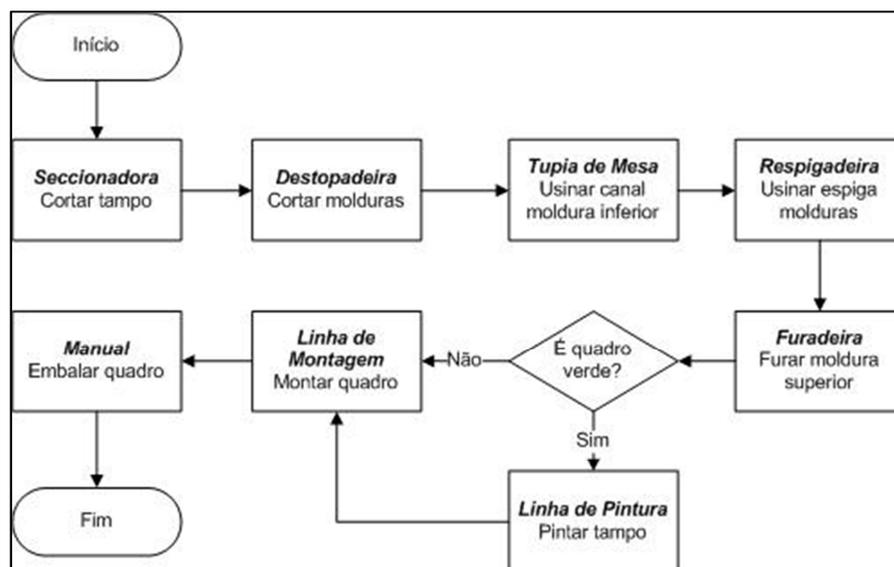


Fonte: Autor

3.2.1 Desenho dos processos da linha de produção

Juntando os processos de produção dos quadros verdes e brancos o resultado é o que aparece na Figura 16, um fluxograma que mostra que a fabricação dos quadros verdes passa pela linha de pintura, enquanto que os quadros da cor branca vão direto da furadeira para a linha de montagem.

Figura 16 – Fluxograma da linha de produção de quadros



Fonte: Autor

Descrição das etapas:

- a) **Cortar tampo:** a matéria-prima para fabricar o tampo são chapas de fibra de madeira. Elas são cortadas pela seccionadora de acordo com a quantidade, tamanho e dimensões especificadas na ordem de produção.
- b) **Cortar molduras:** A matéria-prima para as molduras são perfis de pinus, que são cortados nas medidas indicadas na ordem de produção. São processadas pela destopadeira as molduras laterais, inferior e superior.
- c) **Usinar canal:** a tupia de mesa faz um canal na moldura inferior, onde será fixado o porta canetas, além de um canal nas extremidades onde serão encaixadas as molduras laterais.
- d) **Usinar espiga:** a respigadeira cria espigas nas molduras laterais para que elas se encaixem nas molduras superior e inferior.
- e) **Furar moldura:** a furadeira faz furos na moldura superior onde serão colocados os ganchos utilizados para fixação do quadro.
- f) **Pintar tampo:** os quadros verdes devem passar pela linha de pintura para que sua superfície receba a tinta verde.
- g) **Montar quadro:** com todas as peças já fabricadas, o quadro é montado manualmente.
- h) **Embalar quadro:** a embalagem é feita manualmente. São utilizados grampos, cola branca, embalagens de polietileno e afixados rótulos para o transporte e com especificações do produto.

3.2.2 Reunião de validação com gestores da linha

A validação do modelo do processo produtivo foi realizada em reunião com os gestores da linha de produção. Antes de chegar ao modelo exposto na Figura 16, foi apresentado um modelo preliminar e as descrições de cada processo. Algumas inconsistências foram apontadas pelos gestores, o que exigiu correções no fluxograma e nas descrições dos processos da produção. Essa etapa do método é importante, pois evita que mudanças sejam necessárias durante o desenvolvimento do programa de simulação, ou até depois de finalizado.

3.2.3 Coleta de dados sobre a produção

Após desenhar e validar o processo produtivo, uma reunião foi realizada juntamente com os diretores da empresa para identificar os dados disponíveis no sistema ERP (*Enterprise Resources Planning*) sobre a produção. Havia disponíveis relatórios dos pedidos de vendas, estrutura dos produtos, rotas de produção, apontamento das ordens de produção e quantidade das vendas. Em vista disso, foram solicitados relatórios com detalhes dos pedidos sobre um período de três anos, da estrutura dos produtos, rotas de produção e apontamentos das ordens de produção. Foram solicitados também dados sobre a carga de trabalho dos operários e das estações de trabalho, a fim de conhecer o tempo disponível dos recursos para a produção dos quadros. Por uma questão de política de segurança da empresa, nem todas as informações foram fornecidas. Os dados foram enviados por e-mail em forma de planilha eletrônica e arquivos com a extensão pdf, onde se encontrava o total de unidades vendidas por dia de cada produto referente ao ano de 2013, rotas de produção, estrutura dos produtos, tempos médios de processamento das estações de trabalho e apontamentos das ordens de produção.

Os dados foram analisados e algumas inconsistências foram encontradas no relatório de apontamentos das ordens de produção que, por isso, foi descartado. Não foi permitido o acesso aos dados sobre a carga horária de trabalho, o que levou, por simplificação, a adotar um valor de oito horas diárias efetivas de trabalho, ignorando as paradas planejadas. A empresa trabalhou 288 dias em 2013, ou 2304 horas. Sem informações detalhadas sobre os pedidos, adotou-se que a soma dos pedidos recebidos em um dia corresponderia às demandas diárias desse produto. É importante ressaltar que cada pedido foi relacionado a apenas um tipo de produto, e a quantidade demandada varia de pedido para pedido. Na Tabela 3 estão expressas as demandas médias diárias de cada um dos oito produtos escolhidos. Os códigos referentes a cada um deles são os mesmos utilizados pela empresa. A pedido da empresa, os números foram mascarados, sendo mantidas as proporções de participação de cada produto sobre a demanda total. As demandas foram mascaradas multiplicando-as por um fator.

Tabela 3 – Médias das demandas diárias dos quadros de madeira

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
	Total	110
	Média	13,75

Fonte: Autor

O lote mínimo de produção (LM) foi definido por meio da média aritmética das demandas médias diárias, que é de 13,75, e foi arredondado para 14 unidades. O LM foi calculado desta maneira por não haver informações suficientes para calcular de outras maneiras propostas pela literatura, como o Lote Econômico de Produção. Foi assumido que a dimensão do lote de transferência seria igual à dimensão do lote mínimo de produção.

Os tempos de processamento de cada operação para confecção do produto final, em cada estação de trabalho, se encontram na Tabela 4 e Tabela 5, e foram fornecidos pela empresa. Eles foram mascarados multiplicando-se os tempos originais por um fator.

Tabela 4 – Tempos de processamento para os quadros brancos

Estações de Trabalho	Códigos dos Produtos				Total (horas)
	8164	8166	8167	8168	
Seccionadora	0,0377	0,0440	0,0543	0,0770	0,2130
Destopadeira	0,0462	0,0525	0,0525	0,0653	0,2165
Tupia de Mesa	0,0500	0,0500	0,0500	0,0500	0,2001
Respigadeira	0,0462	0,0462	0,0462	0,0462	0,1847
Furadeira	0,0600	0,0600	0,0600	0,0600	0,2401
Linha de Montagem	0,0491	0,0491	0,0561	0,0561	0,2103
Embalagem	0,0487	0,0422	0,0487	0,0548	0,1945
Inspeção	0,0494	0,0494	0,0494	0,0494	0,1974
Total (horas)	0,3873	0,3933	0,4172	0,4588	

Fonte: Autor

Os tempos dos quadros da cor verde estão separados, pois passam pela linha de pintura, enquanto que os quadros da cor branca não passam por esse processo.

Tabela 5 – Tempos de processamento para os quadros verdes

Estações de Trabalho	Produtos				Total (horas)
	8164	8166	8167	8168	
Seccionadora	0,0377	0,0440	0,0543	0,0770	0,2130
Destopadeira	0,0462	0,0525	0,0525	0,0653	0,2165
Tupia de Mesa	0,0500	0,0500	0,0500	0,0500	0,2001
Respigadeira	0,0462	0,0462	0,0462	0,0462	0,1847
Furadeira	0,0600	0,0600	0,0600	0,0600	0,2401
Linha de Pintura	0,0621	0,1168	0,1291	0,2337	0,5417
Linha de Montagem	0,0491	0,0491	0,0561	0,0561	0,2103
Embalagem	0,0487	0,0422	0,0487	0,0548	0,1945
Inspeção	0,0494	0,0494	0,0494	0,0494	0,1974
Total (horas)	0,4494	0,5101	0,5464	0,6924	

Fonte: Autor

Comparando as Tabelas 4 e 5, nota-se que os tempos de processamento são idênticos para quadros de mesma dimensão. Os quadros são compostos pelas peças especificadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Composição dos quadros verdes e brancos

Descrição	Quantidade
Moldura lateral	2
Moldura superior	1
Moldura inferior	1
Tampo	1
Porta canetas	1

Fonte: Autor

Multiplicando os tempos de processamento apresentados nas tabelas 4 e 5, pela demanda média diária (Tabela 3), obtém-se a carga de trabalho diária, em horas, de cada estação de trabalho (Tabela 7).

Tabela 7 – Carga de trabalho das estações de trabalho para cada produto

Estações de Trabalho	8164	8166	8167	8168	8175	8177	8178	8180	Total (horas)
Seccionadora	1,1310	0,9237	0,5433	1,0006	0,3016	0,3079	0,7607	0,5388	5,5075
Destopadeira	1,3855	1,1021	0,5248	0,8490	0,3695	0,3674	0,7347	0,4572	5,7901
Tupia de Mesa	1,5009	1,0507	0,5003	0,6504	0,4002	0,3502	0,7004	0,3502	5,5034
Respigadeira	1,3855	0,9698	0,4618	0,6004	0,3695	0,3233	0,6466	0,3233	5,0801
Furadeira	1,8005	1,2603	0,6002	0,7802	0,4801	0,4201	0,8402	0,4201	6,6018
Linha de Pintura					0,4969	0,8178	1,8078	1,6356	4,7581
Linha de Montagem	1,4721	1,0304	0,5608	0,7290	0,3926	0,3435	0,7851	0,3926	5,7060
Embalagem	1,4624	0,8859	0,4875	0,7129	0,3900	0,2953	0,6825	0,3839	5,3004
Inspeção	1,4807	1,0365	0,4936	0,6416	0,3949	0,3455	0,6910	0,3455	5,4293

Fonte: Autor

A Tabela 8 mostra o tempo, em um dia de trabalho (8 horas), qual é a carga de trabalho de cada estação.

Tabela 8 – Carga das estações de trabalho

Estações de Trabalho	Horas de Trabalho em um dia (8 horas)	Carga de Trabalho
Seccionadora	5,5075	68,84%
Destopadeira	5,7901	72,38%
Tupia de Mesa	5,5034	68,79%
Respigadeira	5,0801	63,50%
Furadeira	6,6018	82,52%
Linha de Pintura	4,7581	59,48%
Linha de Montagem	5,7060	71,33%
Embalagem	5,3004	66,26%
Inspeção	5,4293	67,87%

Fonte: Autor

A Tabela 8 mostra que não há gargalos na linha, porém, a furadeira tem a maior carga de trabalho e é considerado o RRC.

3.3 Modelagem conceitual do MTA

Essa é uma etapa importante e necessária para o desenvolvimento dos programas de simulação. A seguir são descritas todas as regras que foram implementadas na simulação

sobre o MTA. Para facilitar a leitura e compreensão, os processos e regras modelados foram colocados em forma de tópicos. No Apêndice A está o fluxograma do modelo conceitual da linha de produção com o MTA.

- a) Logo que um pedido de venda de um determinado produto i chega ao sistema, é feita uma verificação na lista de demandas não atendidos (DNA). Se a lista estiver vazia e o estoque de produtos acabados (FGI i) for maior que zero, a quantidade equivalente ao solicitado no pedido é retirada do estoque e enviada para a expedição. Caso não haja quantidade suficiente do produto para atender ao pedido, o número de itens pendentes fica na lista de demandas não atendidas até que a produção reponha o estoque e nova expedição seja realizada. Se a DNA for maior que zero para i , então a quantidade total de itens pedidos será incluída na lista.
- b) Se após retirar um produto do FGI i , houve a penetração na região vermelha (SP i é maior ou igual a 0,6667) do pulmão, a quantidade penetrada é registrada.
- c) Todos os dias é verificada a quantidade penetrada na região vermelha do pulmão em um período de tempo passado equivalente a um tempo de reposição. Se a penetração equivale às unidades de uma região vermelha, o EAI é aumentado. É verificado também se o pulmão permaneceu, ininterruptamente, na região verde por um tempo de reposição. Se isso ocorrer, o EAI é diminuído. Esses são os detalhes da regra de Gerenciamento do Pulmão, onde é realizado o ajuste do EAI:
 - a. No início do dia é executada a rotina de Gerenciamento do Pulmão (GP i). Se for verificado que o nível do FGI i está maior que o EAI a execução é abortado. Não sendo abortada, ocorrerá a verificação do SP i .
 - b. Se a quantidade penetrada na região vermelha (QPRVM i), em um tempo de reposição, é igual ou maior que a região vermelha em unidades (RVM i), o Estoque Alvo é aumentado em 20% e o GP i é congelado por um tempo de reposição.
 - c. Se o SP i for menor ou igual a 0,3333, então é somado 1 no TPIRVD i . Se TPIRVD i for igual a dois tempos de reposição, o EAI é reduzido em 15% e o GP i é congelado por um tempo de reposição.
 - d. Se o SP i é maior que 0,3333 e menor que 0,6667, então a contagem de permanência na região verde é reiniciada (TPIRVD i).
- d) Após a execução da rotina do GP i , é o momento de fazer a abertura das ordens de produção para reposição do FGI i consumido, e para que o pulmão alcance novamente

- o E_{Ai} . Se a soma do FGI_i com o WIP_i for maior ou igual ao E_{Ai} , esse processo não será executado. Porém, se a soma do FGI_i com o WIP_i estiver abaixo do E_{Ai} , uma OP_i de reposição será aberta, priorizada e enviada para a linha de produção.
- e) A prioridade para liberação de uma OP_i é feita pelo SP_i . Quanto maior o SP_i , maior a prioridade (ver equação 2 na seção 2.3.2).
 - f) Uma OP_i só é liberada para a produção se a carga planejada sobre o RRC estiver abaixo ou igual a 80% do tempo de reposição médio.
 - g) Enquanto aguarda, o SP_i de uma OP_i poderá variar em função da demanda ocorrida nesse intervalo e a CP sobre o RRC pode diminuir, permitindo sua liberação. Da mesma forma, para garantir que a quantidade mantida no sistema fique constante e igual ao E_{Ai} , a demanda ocorrida enquanto a OP_i aguardava liberação é somada a ela, aumentando a quantidade a ser produzida.
 - h) No momento da liberação, a OP_i é ajustada para atender a regra de uso do lote mínimo. O lote mínimo de produção é também o lote mínimo de transferência. Isso significa que uma OP_i pode ser dividida em vários lotes mínimos, dependendo da sua dimensão. Para isso, divide-se o tamanho da OP_i pelo lote mínimo, e arredonda-se o resultado para baixo. Chamemos este valor de N . Assim, $N-1$ lotes serão transferidos em quantidades iguais ao lote mínimo e a última transferência será feita na quantidade restante. Por exemplo, imagine que o lote mínimo seja de 100 unidades e chega uma OP_i com 590 unidades. Dividindo 590 por 100 o resultado é de 5,9. Neste caso, $N = 5$ e $N-1 = 4$ lotes de 100 unidades e um quinto lote de 190 unidades serão transferidos para a estação de trabalho cliente.
 - i) Antes de entrar na primeira estação, os lotes divididos conforme item “h” são separados e cada um recebe um novo número de OP_i .
 - j) No chão de fábrica, a priorização de uma OP_i também é feita pelo SP_i , de acordo com a equação 3 na seção 2.3.2. Assim, se durante o processamento de uma OP houver um consumo acima da média do FGI_i referente ao produto ao qual ela pertence, tal OP passará na frente das outras com menor prioridade para repor o FGI_i mais rapidamente. Portanto, as OPs, divididas no item “h”, não necessariamente percorrerão o roteiro de produção unidas.
 - k) Ao finalizar uma OP_i , o FGI_i é atualizado apenas se não houver demanda não atendida aguardando o produto. Caso contrário, a demanda é atendida e os produtos vão para a expedição.

3.3.1 Parâmetros da Simulação

São abordados nesta etapa todos os parâmetros utilizados na simulação, como o nível inicial de estoque, tempo de reposição, escolha da distribuição de probabilidades para variação da demanda e tempos de processamento. A começar pelo nível inicial de estoque.

- Tempo de Reposição médio

O TR médio, utilizado no cálculo do EA, foi encontrado por meio da simulação do MTA. O processo consistiu em definir um TR inicial e aplicá-lo em uma rodada de 30 replicações da simulação. Ao final da simulação o TR real médio é dado como resultado, e que pode ser diferente do inicial. Como regra para ser aceito, o TR inicial deveria ser menor que o TR real em no máximo um dia. Quando o TR inicial era maior, uma nova rodada era executada, substituindo o TR inicial pelo TR real da rodada anterior. Esse ciclo se repetiu até que a condição imposta fosse satisfeita. O TR médio encontrado, e arredondado para cima, foi de 3 dias. Ele foi aplicado em todos os cenários simulados.

- Estoque Alvo inicial

O EA inicial foi calculado com a equação 1, da seção 2.3.2. O FS_i aplicado foi 2, conforme sugerido na seção 2.3.2, passo 1. O TR médio é de 3 dias, conforme tópico anterior, e a demanda média diária foi retirada da Tabela 3. Na Tabela 9 estão os EAs calculados, e que foram utilizados na simulação.

Tabela 9 – Estoque Alvo inicial

Códigos	D_i	FS_i	TR	EA_i
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: Autor

- Variabilidade na demanda e nos tempos de processamento

São comuns linhas de produção apresentarem variabilidades. Para Hopp e Spearman (2000, p. 248), a variabilidade existe em quase todos os sistemas de produção e podem causar grande impacto em seu desempenho. Para que a variabilidade de um sistema, ou parte dele, seja conhecida é preciso medi-la. Medidas padrões da estatística como a variância (σ^2), o

desvio padrão (σ) e o coeficiente de variação são medidas de variabilidade. A variância e o desvio padrão são medidas absolutas, e o coeficiente de variação (CV) é uma medida relativa (HOPP; SPEARMAN, 2000, p. 252). O CV é calculado dividindo o desvio padrão pela média aritmética.

O software utilizado no trabalho para programar a simulação, o Promodel, oferece funções para simular variações com base em parâmetros como média e desvio padrão. O tempo entre chegadas dos pedidos é de 8 horas em média, e para variar esse valor foi aplicada a função da distribuição exponencial, que recebe como parâmetro a média. Para simular a variação da quantidade de itens dos pedidos aplicou-se a função da distribuição lognormal, que recebe como parâmetro a demanda média diária e o desvio padrão, calculado pela multiplicação da demanda média - retirada da Tabela 3 - pelo CV igual a 0,5, escolhido para simular uma demanda com variabilidade baixa. Aos tempos de processamento também foi aplicada a distribuição lognormal – retirados da Tabela 4 e Tabela 5 – e o desvio padrão foi calculado multiplicando-se as médias por um CV igual a 0,5 e 3, para simular variabilidades baixa e alta. Sendo assim, foram dois níveis de variação nos tempos de processamento. No Quadro 1 estão resumidos os parâmetros que foram informados às funções do Promodel para gerar números aleatórios.

Quadro 1 – Parâmetros para causar a variabilidade no sistema

Variável	Função de Distribuição	Parâmetros da Função
Tempo entre chegadas dos pedidos	Exponencial	Média = 8 horas
Itens por pedido	Lognormal	Média = Tabela 3 Desvio padrão = multiplicação da média pelo CV 0,5
Tempo de processamento	Lognormal	Média = Tabela 4 e Tabela 5 Desvio padrão = multiplicação da média pelo CV 0,5 e 3

Fonte: Autor

Demandas reais, em sua maioria, estão associadas a valores positivos e contínuos, e não tendem a seguir uma distribuição normal ou poisson, como muitas vezes é assumido na literatura (JUAN et al., 2011). Pelo contrário, devem ser modelados por qualquer distribuição que ofereça valores ou assimetrias com caudas longas para a direita e não negativos, como, por exemplo, a lognormal, weibull ou gama (JUAN et al., 2011).

A distribuição lognormal é uma escolha mais natural do que a distribuição normal na modelagem de demandas (JUAN et al., 2011). A distribuição normal é muitas vezes usada para modelar a demanda por uma questão de conveniência. No entanto, na prática, as demandas reais podem ser melhor representadas por distribuições de probabilidade assimétricas, ou enviesadas, como a lognormal. Kamath e Pakkala (2002) observam que a distribuição lognormal é um bom modelo para representar a demanda. Brown (1959) apresenta evidências empíricas de que a demanda para vários tipos de produtos podem ser bem representados pela distribuição lognormal e Sharma e Agrawal (2009) afirmam que uma demanda de baixa variabilidade pode ser representada pela distribuição lognormal.

A distribuição lognormal também pode ser aplicada aos tempos de processamento dos centros de trabalho de uma linha de produção, como fez Hillier (2013). O autor desenvolveu um estudo com simulação computacional de linhas longas (sete estações) onde os parâmetros da distribuição lognormal variavam de acordo com diferentes coeficientes de variação, que, por sua vez, eram multiplicados pela média de tempo de processamento das estações para encontrar os desvios padrões, assim como foi realizado nesta pesquisa.

3.3.2 Cenários da Simulação

O Quadro 2 mostra os quatro cenários simulados. O cenário 1 está ligado à hipótese 1, e essa mesma relação há entre os outros três cenários e hipóteses. Todas as hipóteses afirmam que o MTA tem melhor desempenho sobre suas derivações, criadas para a pesquisa, onde suas principais técnicas são retiradas. Essas técnicas são Gerenciamento do Pulmão, Priorização pelo Status do Pulmão e Carga Planejada.

Quadro 2 – Cenários simulados

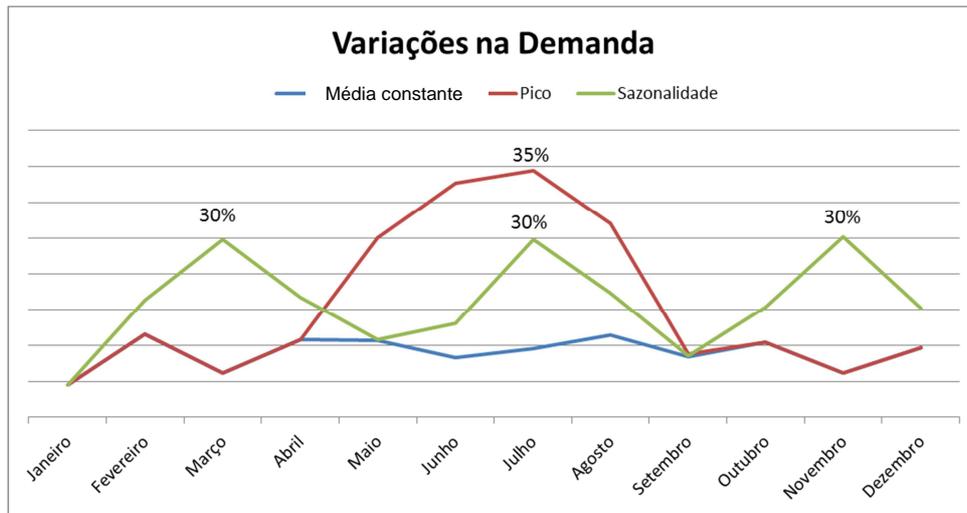
Cenários	Demanda	CV Demanda	CV Tempo de Processamento	Derivações
1	MÉDIA CONSTANTE	0,5	0,5	MTA
				MTA SEM GP
				MTA SEM CP
				MTA SEM PRIORIDADES
2	COM PICO	0,5	0,5	MTA
				MTA SEM GP
				MTA SEM CP
				MTA SEM PRIORIDADES
3	COM SAZONALIDADE	0,5	0,5	MTA
				MTA SEM GP
				MTA SEM CP
				MTA SEM PRIORIDADES
4	MÉDIA CONSTANTE	0,5	3	MTA
				MTA SEM GP
				MTA SEM CP
				MTA SEM PRIORIDADES

Fonte: Autor

As médias das demandas são iguais para todos os cenários, assim como os tempos de processamentos. Ambos estão na Tabela 3, Tabela 4 e Tabela 5, na seção 3.2.1. Na Tabela 8, também na seção 3.2.1, há as cargas de trabalho estimadas para as estações de trabalho da linha de produção de quadros de madeira. A carga estimada para o RRC, que é a Furadeira, no sistema real é de 82,53%.

O cenário 1 foi criado para avaliar o MTA em uma demanda de baixa variação – CV igual a 0,5 – e média constante durante toda a simulação. No cenário 2, a demanda média teve um aumento, o que gerou um pico. No cenário 3 foram gerados três períodos sazonais de demanda, também com o aumento da média da demanda. Na cenário 4 a demanda média é igual ao do cenário 1, porém, os tempos médios de processamento tiveram um coeficiente de variação maior, que passou de 0,5 para 3. A Figura 17 ilustra as variações na demanda ocorrida em cada cenário. O gráfico mostra que a demanda com pico acompanha a demanda média constante de Janeiro à Abril e de Setembro à Dezembro.

Figura 17 – Variações nas demandas dos cenários

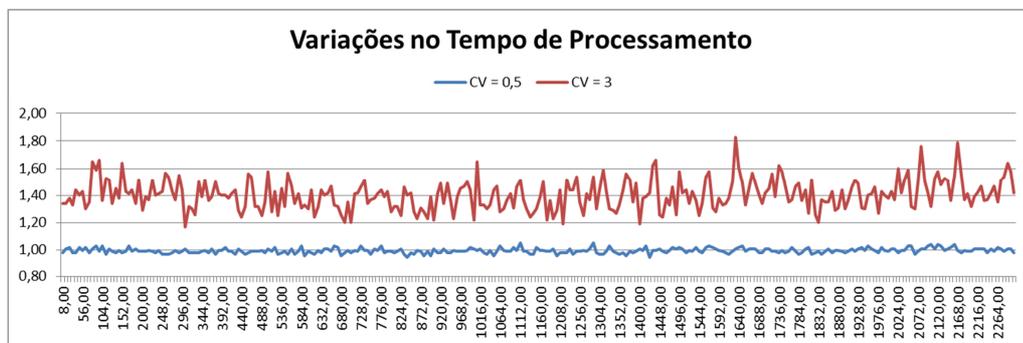


Fonte: Autor

Nos cenários 2 e 3, com demanda sazonal (linha verde) e demanda com pico (linha vermelha), a demanda média dos produtos foram se alterando durante o período, o que não aconteceu com os cenários 1 e 4 (linha azul), com demanda média constante. No cenário 3 o aumento chegou a trinta por cento com relação à demanda inicial. No cenário 2 a demanda aumentou até trinta e cinco por cento sobre a demanda inicial. Nos cenários 1 e 4 a demanda média foi constante, porém o coeficiente de variação nos tempos de processamento é maior no cenário 4.

Na Figura 18 estão ilustrados os efeitos das variações baixa - CV igual a 0,5 - e alta - CV igual a 3 - nos tempos de processamento. Esses dados se referem à Furadeira, porém, o CV de 3 foi aplicado em todas as estações de trabalho.

Figura 18 – Variações no Tempo de Processamento



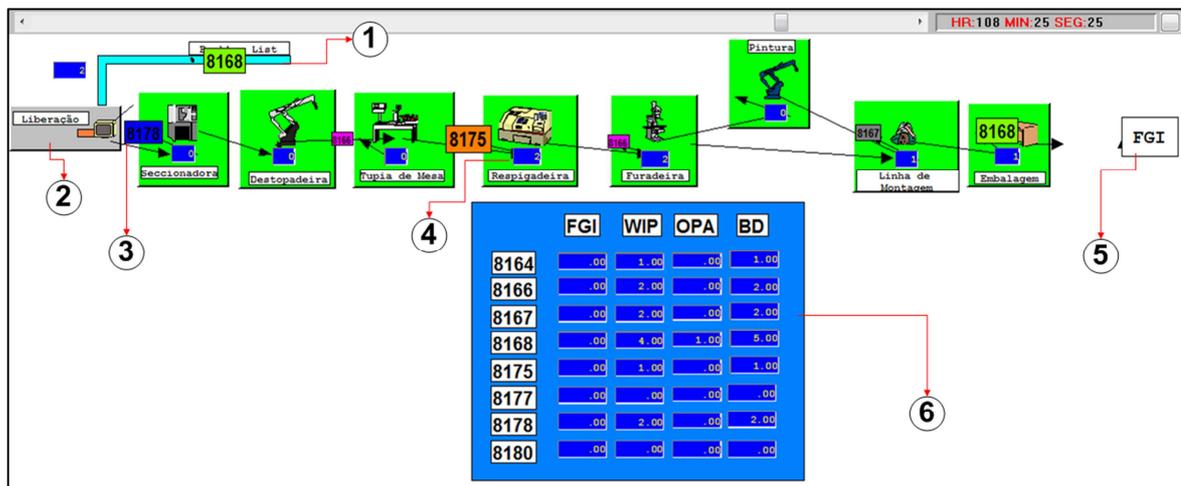
Fonte: Autor

3.4 Simulação do sistema real

A implementação da simulação aconteceu de forma gradativa, partindo da programação do sistema real e depois para a implementação dos mecanismos do MTA. A cada avanço uma nova verificação era realizada para garantir que não houvesse erros de programação que comprometessem sua execução ou causasse algum desvio nos resultados.

O sistema real foi implementado no ProModel de acordo com as regras e parâmetros estabelecidos nas seções 3.1 e 3.2. A Figura 19 mostra como ficou o layout da linha de produção depois de implementada e já em funcionamento.

Figura 19 – Linha de produção de quadros de madeira implementada no ProModel.



Fonte: Autor

Cada círculo enumerado indica uma parte do sistema, descritas aqui:

- 1) É a fila onde as ordens de produção ficam aguardando para serem liberadas. É chamada de backlog list.
- 2) É onde é feita a liberação das ordens de produção para a linha de produção.
- 3) O círculo 3 mostra uma OP do produto 8178 liberada e pronta para ser processada pela seccionadora.
- 4) Contador que mostra quantas OPs estão na fila da estação de trabalho, aguardando processamento.
- 5) Representa o FGI, para onde os produtos são encaminhados após saírem da produção.
- 6) A posição do estoque de cada produto, representados pelos seus códigos, é mostrada nesse painel. A coluna FGI mostra as unidades no estoque de

produtos acabados. A coluna WIP mostra as unidades que ainda estão em fabricação. Na coluna OPA está a soma dos itens em OPs aguardando liberação. Na coluna BD está o número de itens dos pedidos não atendidos pelo FGI, e que aguardam a produção.

O funcionamento da linha de produção pode ser resumido como uma sequência de atividades do sistema, que começa com o recebimento do pedido (que não é visível), a geração da OP_i e sua priorização, liberação para a fábrica, produção e expedição do produto acabado. Nessa implementação o sistema atende a demanda sob encomenda, e não contempla as regras do MTA. O que acontece é que o pedido chega, é processado e entregue. Foi assumido que a quantidade de matéria prima é infinita, e por isso, ela não foi tratada.

3.5 Validação da simulação do sistema real

Para facilitar o trabalho de validação, a simulação do sistema real foi programada para se comportar como um sistema de filas M/M/1. A distribuição dos tempos entre chegadas dos pedidos é exponencial, assim como os tempos de processamento, cujas médias estão no Apêndice B na Tabela 54 e Tabela 55. Os parâmetros para variabilidade estão no Quadro 4, também no Apêndice B, assim como os tempos entre as chegadas, que estão na Tabela 56. Para se chegar aos tempos entre chegadas dos itens, multiplicou-se a demanda real diária por uma máscara. O resultado foi dividido por 8 horas – um dia de trabalho – e chegou-se nos valores da Tabela 56. Cada chegada representa um item vendido pela empresa.

A validação foi realizada pelas medidas “tempo médio no sistema” e “número de usuários no sistema”, definidas na Teoria das Filas. Foram validadas as estações de trabalho, assim como o sistema. No modelo de fila M/M/1 a taxa de chegada ao sistema (λ) e tempo médio de serviço (μ) - Tabela 54 e Tabela 55 - devem seguir uma distribuição exponencial. A taxa de chegada é o inverso do tempo entre chegadas.

A taxa de ocupação do sistema (ρ) é dada pela divisão da taxa de chegada (λ) pelo tempo médio de serviço (μ). Sua equação fica assim $\rho = \lambda/\mu$ (ARENALES; ARMENTANO; MORABITO, 2007).

O tempo médio no sistema $E(W)$ é calculado pela Equação 4.

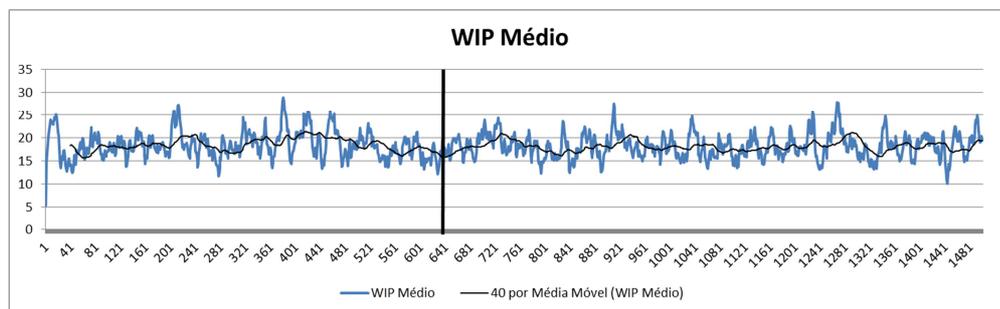
$$E(W) = \frac{\rho}{\lambda * (1-\rho)} \quad (4)$$

O número médio de usuários no sistema $E(L)$ é dado pela Equação 5.

$$E(L) = \lambda * E(W) \quad (5)$$

Antes de coletar os resultados para a validação, foi calculado o *warm-up* com dez replicações. Pela Figura 20 o período de aquecimento termina em 641 horas, quando o WIP médio passa a ficar mais estável.

Figura 20 – Gráfico de warm-up da simulação do sistema real



Fonte: Autor

Depois de encontrado o tempo de aquecimento, foi executado mais uma rodada com mais 10 replicações e os resultados foram comparados com os cálculos realizados pelas equações 4 e 5 do modelo de filas M/M/1, utilizando os dados da Tabela 54, Tabela 55 e Tabela 56 do Apêndice B. Veja os resultados na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultados da Validação do Sistema Real

Estações de Trabalho	Resultados da simulação		Equações do modelo M/M/1 aplicada aos dados do Apêndice B	
	Tempo médio no Sistema	Número de Usuários no Sistema	Tempo médio no Sistema $E(W) = \frac{\rho}{\lambda * (1-\rho)}$	Número de Usuários no Sistema $E(L) = \lambda * E(W)$
Seccionadora	0,1566	1,7608	0,1568	1,7604
Destopadeira	0,2219	2,4955	0,2211	2,4814
Tupia de Mesa	0,2115	2,3786	0,2102	2,3590
Respígadeira	0,0988	1,1109	0,0993	1,1142
Furadeira	0,2682	3,0159	0,2660	2,9859
Pintura	0,2227	1,2515	0,2327	1,3059
Linha de Montagem	0,1881	2,1150	0,1869	2,0980
Embalagem	0,1839	2,0670	0,1830	2,0542

Fonte: Autor

A partir da Tabela 10 foram calculadas as diferenças entre os resultados da simulação e os resultados dos cálculos do modelo de filas M/M/1, que estão na Tabela 11. Para que o modelo fosse considerado válido, a diferença entre os valores deveria ser pequena, menos de 1%. Isso foi o que ocorreu, portanto, a simulação do sistema real foi considerada válida.

Tabela 11– Diferenças entre os resultados da simulação e do modelo de filas M/M/1

Estações de Trabalho	Diferença Absoluta		Diferença Percentual	
	Tempo médio no Sistema	Número de Usuários no Sistema	Tempo médio no Sistema	Número de Usuários no Sistema
Seccionadora	0,0002	-0,0004	0,15%	-0,02%
Destopadeira	-0,0009	-0,0141	-0,39%	-0,57%
Tupia de Mesa	-0,0014	-0,0196	-0,66%	-0,82%
Respigadeira	0,0005	0,0033	0,46%	0,30%
Furadeira	-0,0022	-0,0301	-0,83%	-1,00%
Pintura	0,0100	0,0544	0,47%	0,35%
Linha de Montagem	-0,0012	-0,0170	-0,64%	-0,80%
Embalagem	-0,0008	-0,0128	-0,46%	-0,62%

Fonte: Autor

Pela da lei de Little (Equação 6) o sistema foi validado também pelas medidas *throughput* (TH), tempo de ciclo (CT) e WIP médio (HOPP; SPEARMAN, 2000). *Throughput* é a taxa de saída de produtos acabados da linha de produção, e o tempo de ciclo da produção é o tempo em que uma Ordem de Produção leva para atravessar a linha.

$$WIP = TH * CT \quad (6)$$

A Tabela 12 mostra os resultados dessa validação com as diferenças entre os resultados da Lei de Little e os da simulação. Os cálculos pela Lei de Little (Equação 6) foram realizados substituindo as variáveis pelos resultados da simulação. Para encontrar o WIP, foi substituído o TH e o CT da equação pelos resultados da simulação. Da mesma forma foi feita para encontrar o TH e o CT. Para que o modelo fosse considerado válido, a diferença entre os valores deveria ser pequena, menos de 1%. Isso foi o que ocorreu, portanto, a simulação do sistema real foi considerada válida.

Tabela 12 – Comparação do WIP, TH e CT de produção (Simulação vs. Lei de Little)

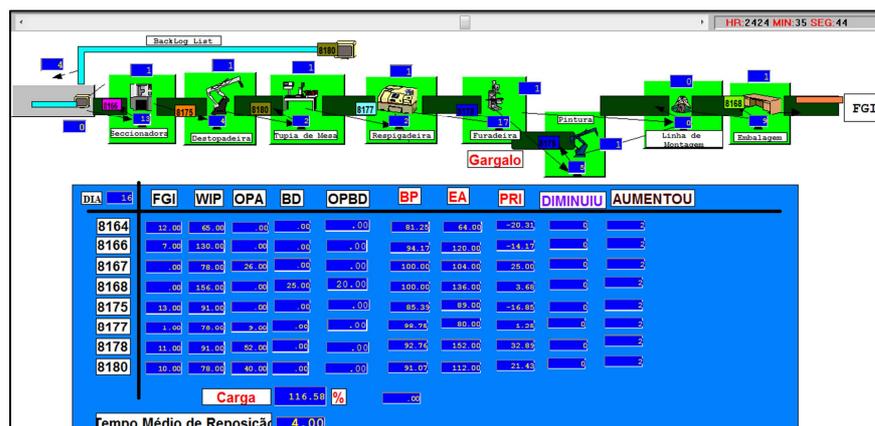
	WIP	TH	CT de Produção
Resultado da Simulação	18,0972	89,9386	0,2009
Calculado pela Lei de Little	18,0687	90,0806	0,2012
Diferença Absoluta	0,0285	-0,1420	-0,0003
Diferença Percentual	0,1579%	-0,1577%	-0,1577%

Fonte: Autor

3.6 Simulação do Make-To-Availability

As regras do MTA foram implementadas sobre o programa do sistema real. O sistema passou a receber pedidos a cada 8 horas em média e cada pedido com um único tipo de produto, com quantidade variável. As variabilidades passaram a acontecer de acordo com os parâmetros do Quadro 1 (seção 3.2.1). A Figura 21 mostra como ficou o layout da linha de produção depois de implementada e já em funcionamento.

Figura 21 – Linha de produção de quadros de madeira com o MTA implementado



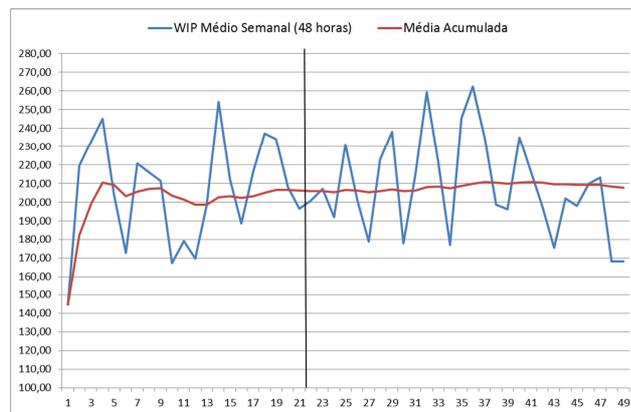
Fonte: Autor

3.7 Warm up

O período de aquecimento da simulação (warm-up) foi encontrado pela variável WIP médio com períodos de 48 horas, o que corresponde a uma semana de trabalho. Foram

executadas 30 replicações e a média da variável foi plotada na Figura 22. Para encontrar o momento exato em que ele termina, foi calculada a média acumulada do WIP médio semanal. Visualmente o período de aquecimento termina no final da vigésima primeira semana, porém, ele será considerado como 48 semanas, ou 2304 horas, ou ainda 1 ano de trabalho. Essa é uma margem de segurança para ter o máximo de garantia de que todas as replicações da simulação tenham um bom período de aquecimento.

Figura 22 – Warm-up da simulação do MTA



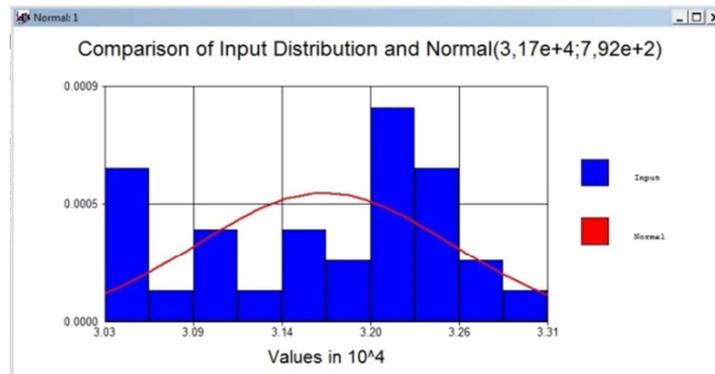
Fonte: Autor

3.8 Número de Replicações

O número de replicações foi calculado aplicando o Teorema do Limite Central (TLC). Conforme o TLC, à medida que o tamanho de uma amostra aumenta a distribuição de probabilidades se aproxima dos moldes de uma distribuição normal (LEVINE et al., 2012). A sugestão é que o tamanho da amostra seja de pelo menos 30 para se aproximar da distribuição normal (LEVINE et al., 2012). Seguindo essa sugestão, a simulação foi replicada 30 vezes e um teste de aderência foi realizado com os resultados da variável “demanda total”, a qual possui o valor de toda a demanda recebida pelo sistema no tempo de simulação. A amostra dessa variável foi colocada no software BestFit e foi realizado o teste de aderência.

O histograma, na Figura 23, mostra como ficou a distribuição da amostra com relação à distribuição normal. A média e o desvio-padrão foram 31706,37 e 792. O nível de significância foi de 0,01 para os testes Chi-quadrado, Kolmogorov-Smirnov e Anderson-Darling. Porém, para que a amostra fosse aceita, ela deveria ter um nível de significância de 0,05 ou maior. Portanto, ela precisou ser aumentada.

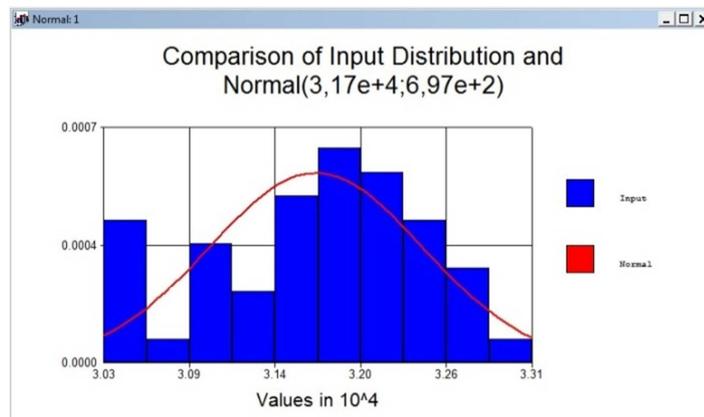
Figura 23 – Distribuição da amostra (30 replicações) da demanda total *versus* a distribuição normal.



Fonte: Autor

Uma nova amostra foi gerada com 50 replicações. No histograma da Figura 24 a distribuição da amostra - barras azuis - está mais próxima da linha da distribuição normal, comparada ao histograma da Figura 23.

Figura 24 – Distribuição da amostra (50 replicações) da demanda total *versus* distribuição normal.



Fonte: Autor

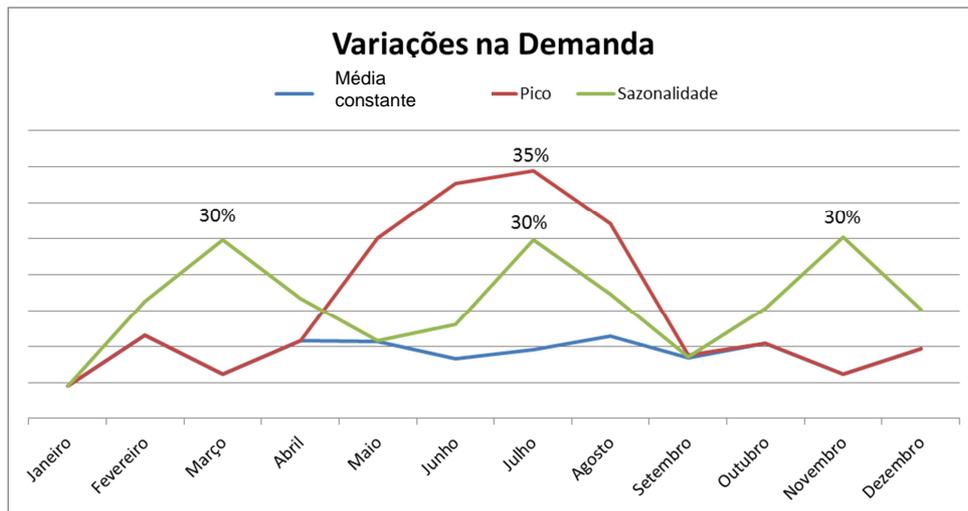
A média e o desvio-padrão foram 31706,18 e 697. O nível de significância para os testes Chi-quadrado, Kolmogorov-Smirnov e Anderson-Darling foram de 0,05, 0,15 e 0,1. Todos os testes estão com nível de significância maior ou igual a 0,05, portanto, o tamanho da amostra pode ser aceito. Consequentemente, o número de replicações da simulação foi de 50 vezes. A demanda real é de 31680, que dá uma diferença de 26 itens com relação a demanda média real. Esse resultado mostra um viés pequeno, em números absolutos, da média a

amostra em comparação com a média da demanda real. Assim, espera-se que o número de replicações ofereça precisão nos resultados para a avaliação do MTA.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

As análises começarão com um cruzamento dos resultados do MTA, em sua forma completa. O objetivo é comparar seu desempenho sem a retirada das técnicas e mostrar como foi seu comportamento nos quatro cenários. Em seguida são apresentados os resultados de cada cenário, com todas as derivações. A Figura 25 ilustra as variações nas demandas que ocorrem em cada cenário. Os meses com maior demanda no cenário 3, com Sazonalidade, são Março, Julho e Novembro. Para o cenário 2, com pico, a demanda começa a aumentar no mês de Maio, alcança seu máximo nos meses de Junho e Julho e cai nos meses subsequentes de Agosto e Setembro.

Figura 25 – Variações nas demandas

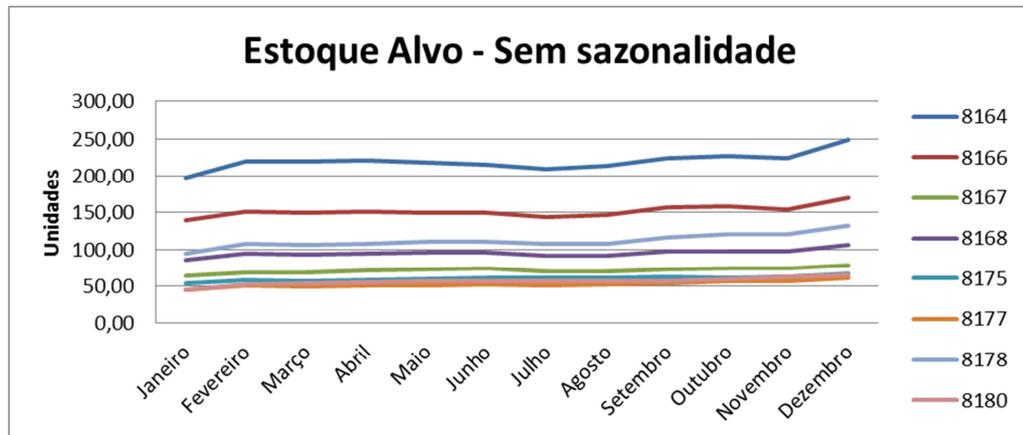


Fonte: Autor

4.1 Avaliando o MTA

Esta avaliação não tem o objetivo de comparação, mas de destacar o comportamento do MTA durante a simulação. Nas Figuras 26, 27, 28 e 29 estão representados os ajustes feitos no EA pelo Gerenciamento do Pulmão. A Figura 26 mostra que, com média constante na demanda, o EA se mantém estável, com poucos ajustes. A diferença entre o EA no início do período e no final é relativamente pequena.

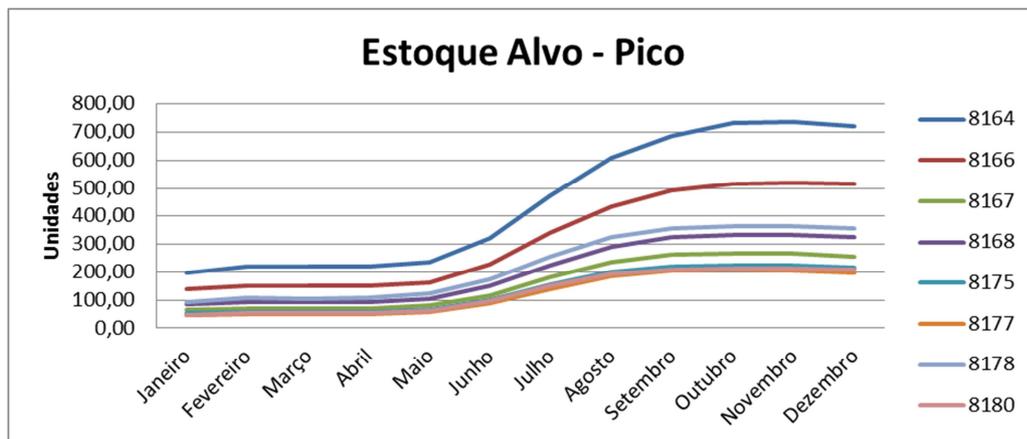
Figura 26 – Ajustes do Estoque Alvo no Cenário 1



Fonte: Autor

O pico faz com que o EA aumente significativamente, como aparece na Figura 27. Para o produto 8164, por exemplo, ele salta de 200 para um pouco mais de 700, no final do período. Os EAs param de aumentar em Outubro, quando a demanda volta ao normal, porém, em Dezembro eles continuam quase que no mesmo nível. O sistema fica tão sobrecarregado que o MTA não consegue se recuperar rapidamente.

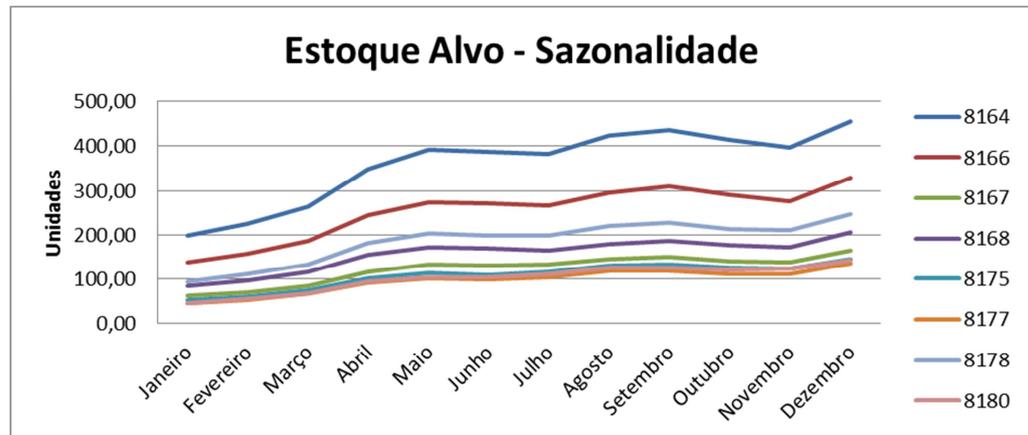
Figura 27 – Ajustes do Estoque Alvo no Cenário 2



Fonte: Autor

Para a demanda com sazonalidade, os EAs tiveram um aumento maior nos meses de Janeiro à Maio, e se mantiveram com uma leve tendência de aumento após esse período, como pode ser visto na Figura 28. Não houve grandes quedas após as demandas máximas nos meses de Março, Julho e Novembro.

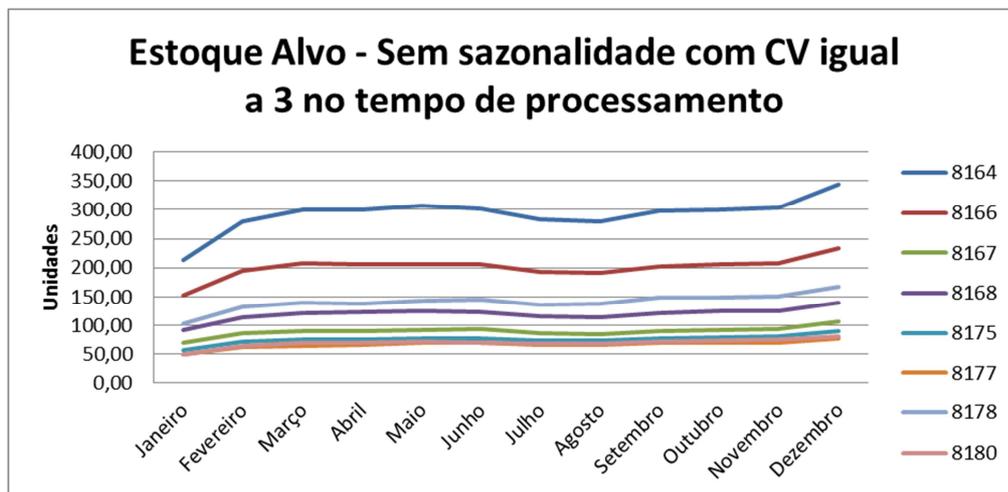
Figura 28 – Ajustes do Estoque Alvo no Cenário 3



Fonte: Autor

Para a demanda média constante com CV de 3 nos tempos de processamento, Figura 29, os EAs são aumentados nos meses de Janeiro a Março, e depois se estabilizam. Fazendo uma comparação com a demanda média constante com CV de 0,5, percebe-se que é necessário ter maiores EAs. O produto 8164, por exemplo, chegou a ter um EA de 250 unidades no cenário um e quase 350 unidades no cenário quatro.

Figura 29 – Ajustes do Estoque Alvo no Cenário 4

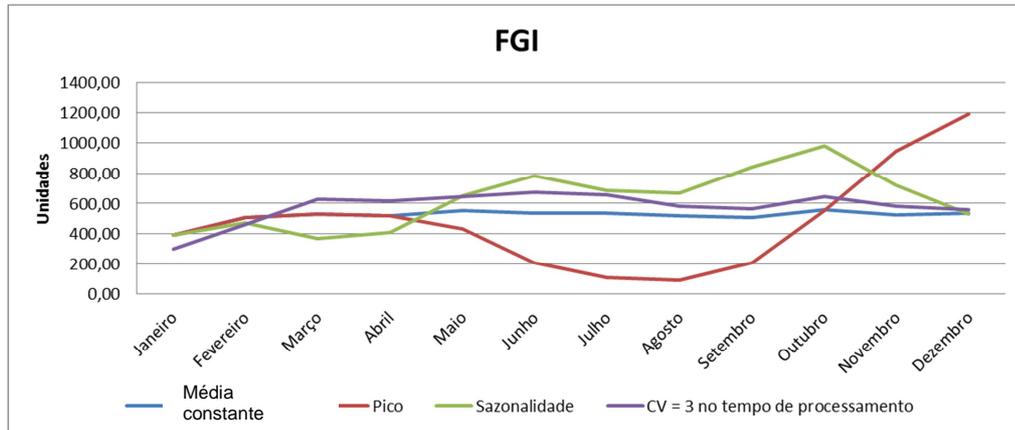


Fonte: Autor

O gráfico da Figura 30 mostra que quando há um pico na demanda o FGI cai bruscamente, como aconteceu nos meses de Julho e Agosto, quando chega perto de zero. Os outros cenários não alcançam esse ponto crítico e a disponibilidade dos produtos não é comprometida. O FGI, na demanda com pico, apresenta grande aumento após o mês de

Setembro e vai para um patamar maior que o anterior à sua redução. Isso mostra que houve reação por parte do MTA, mais precisamente, por parte do Gerenciamento do Pulmão, que aumentou os EAs.

Figura 30 – Movimentação do FGI durante a simulação

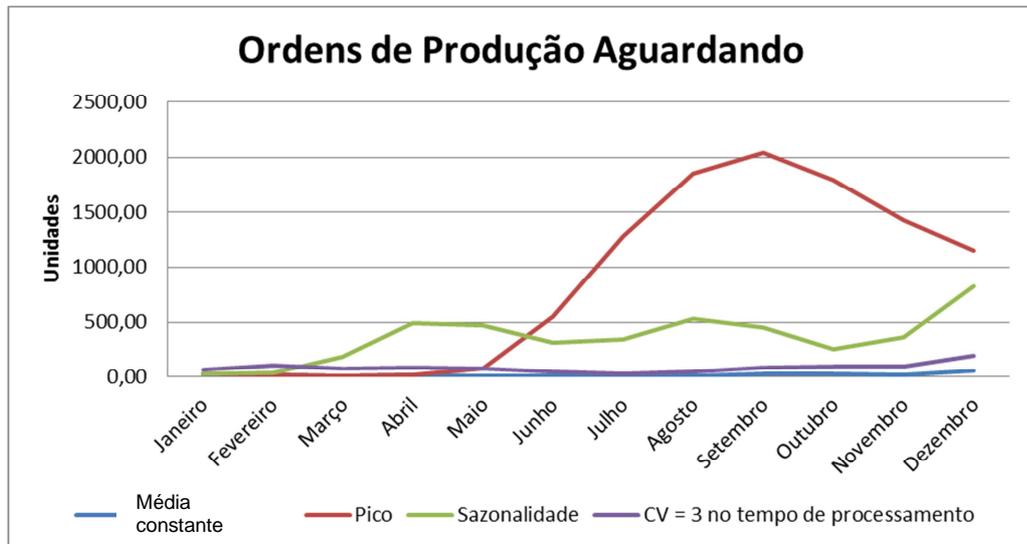


Fonte: Autor

A carga sobre o RRC está diretamente ligada à quantidade de ordens de produção que ficam aguardando liberação para o chão de fábrica. Pode-se notar pela Figura 31 que a quantidade de ordens de produção aumenta conforme a demanda aumenta. No cenário com pico, as ordens de produção começam a aumentar no mês de Junho e começam a cair no mês de setembro. Porém, por conta do aumento repentino na demanda, há uma sobrecarga no RRC – considerando apenas as OPs que estão no chão de fábrica – que alcança 80% em Junho e cai abaixo deste limite apenas em Outubro, como mostra a Figura 32.

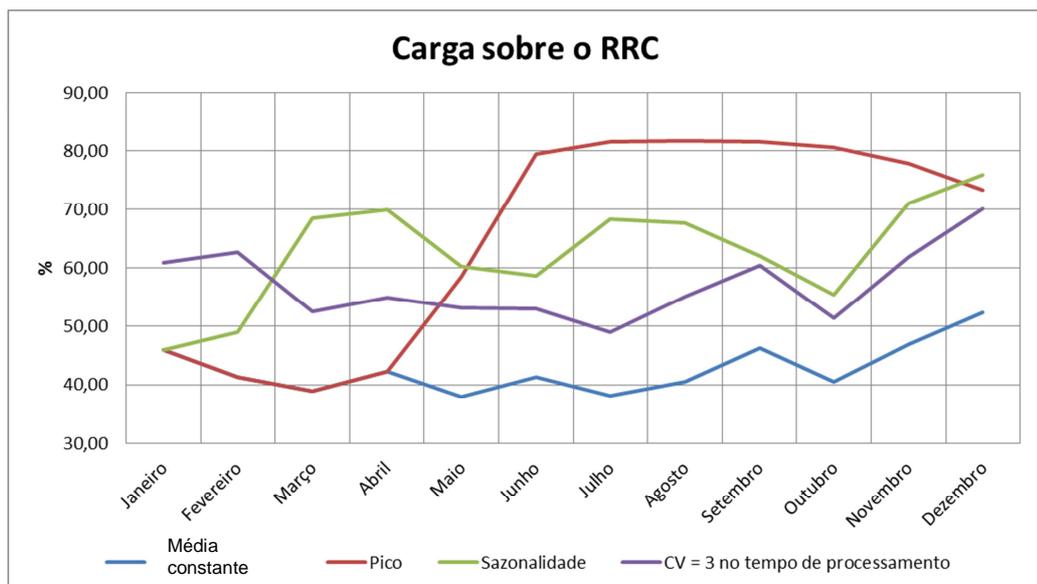
Com média constante, mesmo com CV de 3 nos tempos de processamento, o número de OPAs permanece próximo de zero durante todo o período. Isso acontece quando a carga sobre o RRC fica abaixo de 80% e as OPs são liberadas para o chão de fábrica quase que no mesmo momento em que são criadas. Com a sazonalidade o número de OPAs é maior, mas fica estável sem tendência de queda ou aumento. Com pico na demanda há uma explosão de OPAs e a carga sobre o RRC permanece acima de 80% de Julho a Outubro.

Figura 31 – Ordens de Produção Aguardando liberação



Fonte: Autor

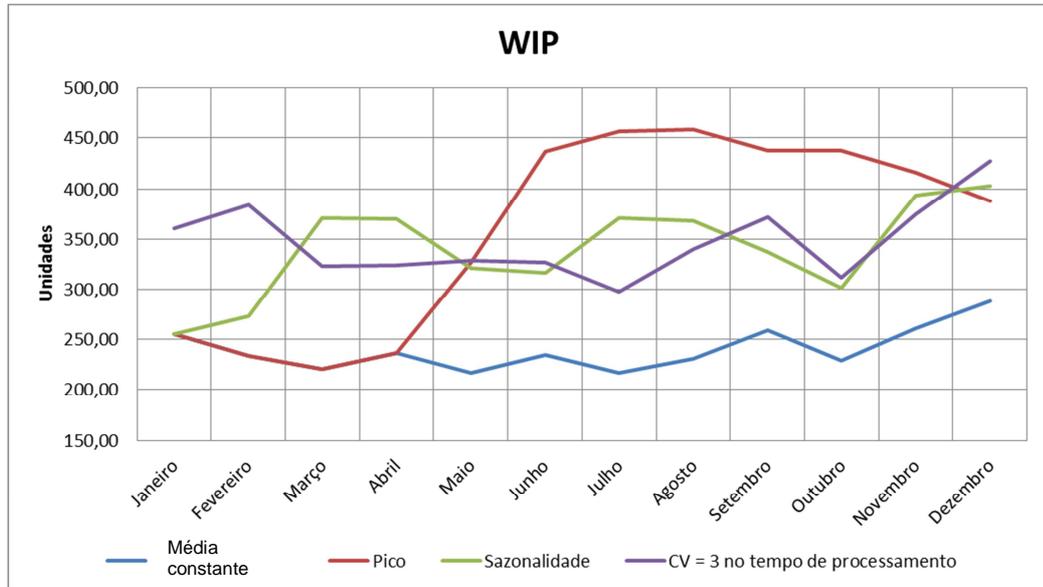
Figura 32 – Carga sobre o Recurso com Restrição de Capacidade (Furadeira)



Fonte: Autor

O WIP também varia de acordo com as mudanças na demanda, como mostra a Figura 33. Nos cenários com demanda média constante, o WIP se mantém maior quando o CV é igual a 3. No cenário com pico, o WIP aumenta até um limite e se mantém estável por um período até começar a cair. O cenário com Sazonalidade não apresenta tendência de aumento ou queda, assim como no FGI. Em alguns momentos o nível de WIP é até menor que no cenário com CV de 3 no tempo de processamento.

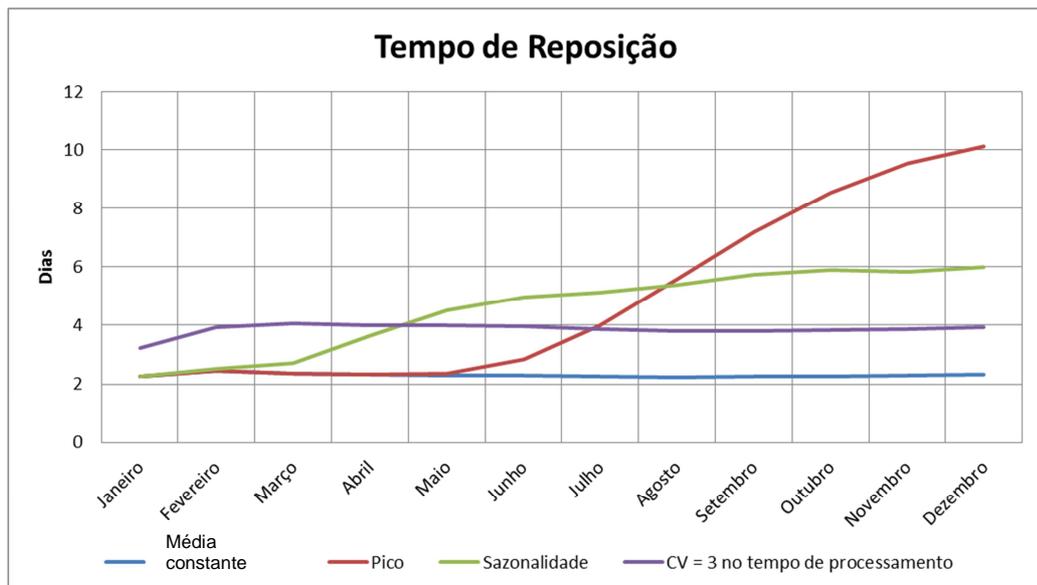
Figura 33 – WIP do MTA



Fonte: Autor

O gráfico da Figura 34 mostra que, quando não há sazonalidade, o TR é estável, o que não acontece quando a demanda oscila. Se a demanda aumenta consideravelmente, o TR aumenta, atrasando a reposição do estoque e diminuindo a disponibilidade. Aqui, o cenário com Sazonalidade apresenta tendência de aumento.

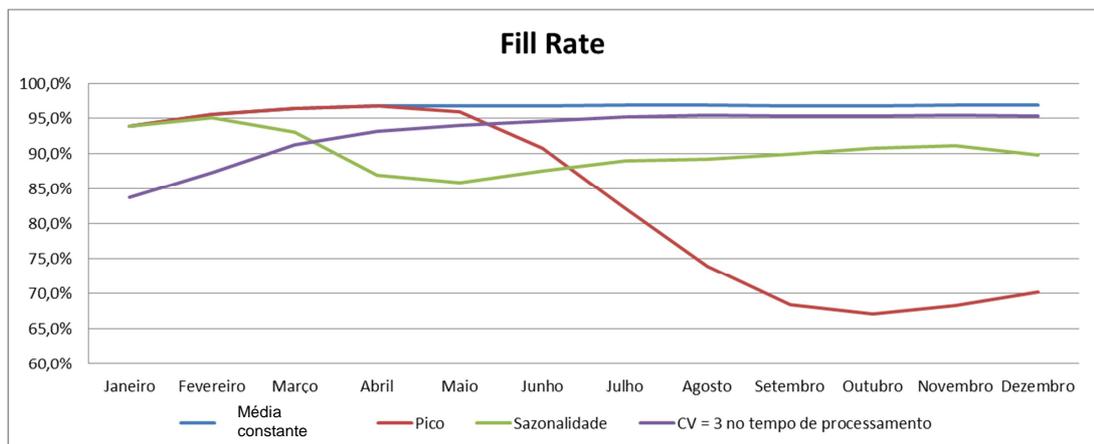
Figura 34 – Tempo de Reposição do MTA



Fonte: Autor

O gráfico do *Fill Rate*, Figura 35, resume o desempenho dos outros indicadores. Ele mostra que para o MTA, uma situação onde a demanda cresce rapidamente pode ser a pior delas. A disponibilidade dos produtos é comprometida e o nível de serviço cai drasticamente. Nos cenários com demanda média constante o *Fill Rate* se tornou estável após o mês de Julho e ficaram próximos um do outro.

Figura 35 – Nível de Serviço do MTA



Fonte: Autor

Na Tabela 13 estão os resultados finais médios de cada cenário para o MTA. Eles mostram que os cenários onde o MTA apresenta melhor desempenho são aqueles onde a demanda tem menos flutuações, cenários 1 e 4. O pior desempenho ficou com o cenário 2, onde há um pico na demanda. O *Fill Rate* foi mais comprometido nos cenários 2 e 3, com maiores variabilidades na demanda, do que no cenário 4 que, com variações nos tempos de processamento.

Tabela 13 – Resultados do MTA sobre os quatro cenários.

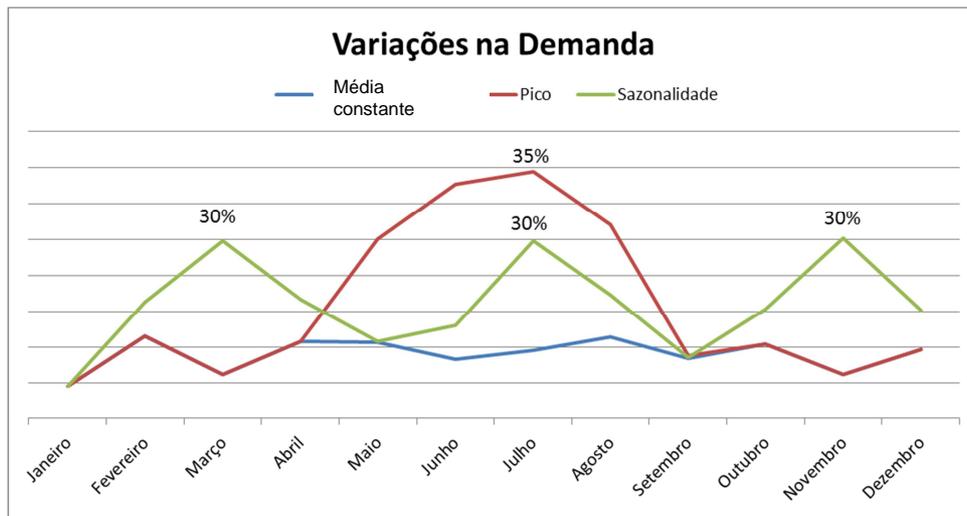
Padrões de Demanda	WIP médio	FGI médio	TR médio	Fill Rate
Média Constante – Cenário 1	240,19	518,56	2,34	96,82%
Pico – Cenário 2	358,68	474,02	10,27	71,25%
Sazonalidade – Cenário 3	340,20	625,47	6,10	89,22%
CV = 3 no tempo de processamento – Cenário 4	347,62	576,97	4,00	95,27%

Fonte: Autor

4.2 Cenário 1: Demanda Média Constante

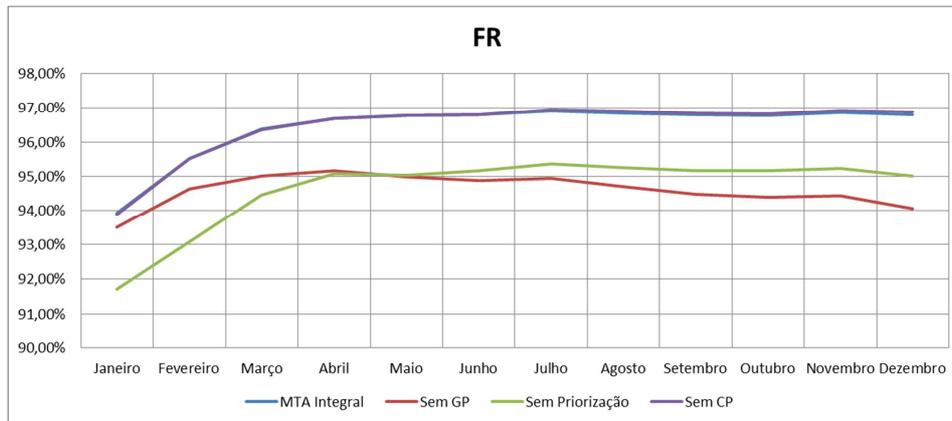
Na Figura 36 a demanda com média constante é representada pela linha azul, que é sobreposta pela linha da demanda com pico em parte do período. Esse é o padrão de demanda que foi aplicado no cenário 1.

Figura 36 – Variações nas demandas



Fonte: Autor

O principal indicador para o MTA é o *Fill Rate*, que está ligado diretamente à disponibilidade dos produtos acabados. A Figura 37 mostra que o desempenho do MTA e Sem CP ficaram próximos quanto ao *Fill Rate*, e no gráfico suas linhas se sobrepõem durante quase todo o período. Nos meses de Janeiro a Abril o MTA Sem Priorização teve o menor *Fill Rate*, mas se recuperou em Maio e se manteve estável até o final do período. Já o MTA Sem GP teve um aumento no período de Janeiro à Abril, e depois se manteve em queda até Dezembro.

Figura 37 – *Fill Rate* no Cenário 1

Fonte: Autor

Na Tabela 14 estão os dados do gráfico da Figura 37.

Tabela 14 – *Fill Rate* no Cenário 1

Meses	MTA (%)	Sem GP (%)	Sem Priorização (%)	Sem CP (%)
Janeiro	93,92	93,49	91,71	93,87
Fevereiro	95,52	94,62	93,09	95,52
Março	96,37	95,00	94,46	96,35
Abril	96,69	95,15	95,06	96,69
Maio	96,77	94,99	95,03	96,77
Junho	96,79	94,86	95,17	96,79
Julho	96,91	94,94	95,37	96,94
Agosto	96,85	94,70	95,25	96,90
Setembro	96,79	94,47	95,15	96,83
Outubro	96,78	94,38	95,16	96,83
Novembro	96,87	94,44	95,22	96,92
Dezembro	96,81	94,05	95,01	96,88

Fonte: Autor

A Tabela 15 é um resumo (dados médios anuais) da Tabela 14. Ela mostra que o desempenho do MTA e Sem CP estão bem próximos. O MTA Sem Priorização teve o maior desvio padrão, 1,11%. O MTA Sem GP teve o menor desvio padrão, 0,47%, porém obteve o menor *Fill Rate* médio.

Tabela 15 – Estatística descritiva sobre o *Fill Rate* no Cenário 1

	MTA (%)	Sem GP (%)	Sem Priorização (%)	Sem CP (%)
Média	96,42	94,59	94,64	96,44
Mediana	96,78	94,66	95,11	96,81
Mínimo	93,92	93,49	91,71	93,87
Máximo	96,91	95,15	95,37	96,94
Desvio Padrão	0,88	0,47	1,11	0,90

Fonte: Autor

Pela diferença entre as medidas da estatística descritiva (Tabela 16), o MTA Sem GP é quem apresentou o pior desempenho, e o MTA Sem CP o melhor.

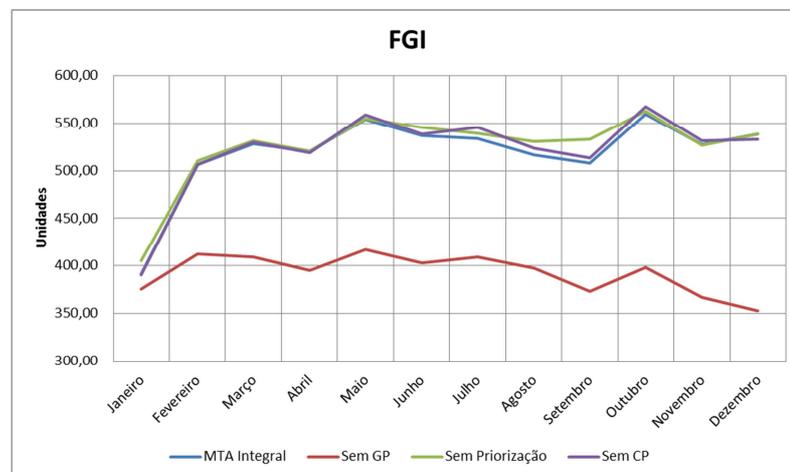
Tabela 16 – Diferença entre o *Fill Rate* médio do MTA e suas derivações no Cenário 1

	Sem GP (%)	Sem Priorização (%)	Sem CP (%)
Média	-1,83	-1,78	0,02
Mediana	-2,12	-1,68	0,03
Mínimo	-0,43	-2,21	-0,05
Máximo	-1,76	-1,55	0,03

Fonte: Autor

O MTA Sem GP manteve o menor FGI, como pode ser visto na Figura 38 e Tabela 17. As derivações mantiveram valores próximos ao do MTA.

Figura 38 – FGI no Cenário 1



Fonte: Autor

Tabela 17 – FGI no Cenário 1

Meses	MTA	Sem GP	Sem Priorização	Sem CP
Janeiro	391,23	375,41	405,68	390,64
Fevereiro	506,63	412,31	510,18	506,39
Março	528,77	409,37	531,49	529,65
Abril	520,66	395,24	520,91	519,30
Mai	554,17	417,11	554,75	559,24
Junho	536,66	403,01	545,29	538,73
Julho	533,94	409,07	539,22	545,98
Agosto	516,87	397,82	530,75	523,62
Setembro	508,08	373,36	533,25	513,49
Outubro	559,96	397,94	562,77	567,84
Novembro	527,39	366,69	526,99	531,75
Dezembro	538,32	352,39	538,52	532,73
Média	518,56	392,48	524,98	521,61

Fonte: Autor

Pela diferença entre as médias (Tabela 18) do FGI, conclui-se que as derivações Sem Priorização e Sem CP mantiveram aproximadamente o mesmo nível de disponibilidade dos produtos. Isso vai de encontro com a análise feita sobre o Fill Rate, Figura 37. A derivação Sem GP teve 24,31% menos estoque de produtos acabados contra 1,24% e 0,59% a mais do MTA Sem Priorização e Sem CP. O MTA Sem Priorização teve seu *Fill Rate* médio próximo do MTA Sem GP (Tabela 16), porém, seu FGI médio ficou próximo do MTA. Isso mostra que a priorização pelo status do pulmão ajuda a preencher o estoque dos produtos que realmente necessitam, e quando ele não está em uso, o estoque dos produtos que menos precisam são preenchidos ante outros com menor disponibilidade. A retirada do Gerenciamento do Pulmão fez o FGI cair mais do que caiu seu *Fill Rate* médio (-1,83%). A retirada da Carga Planejada fez aumentar pouco o FGI médio, o que mostra que o fato de não controlar a carga sobre o RRC não aumenta significativamente a disponibilidade dos produtos.

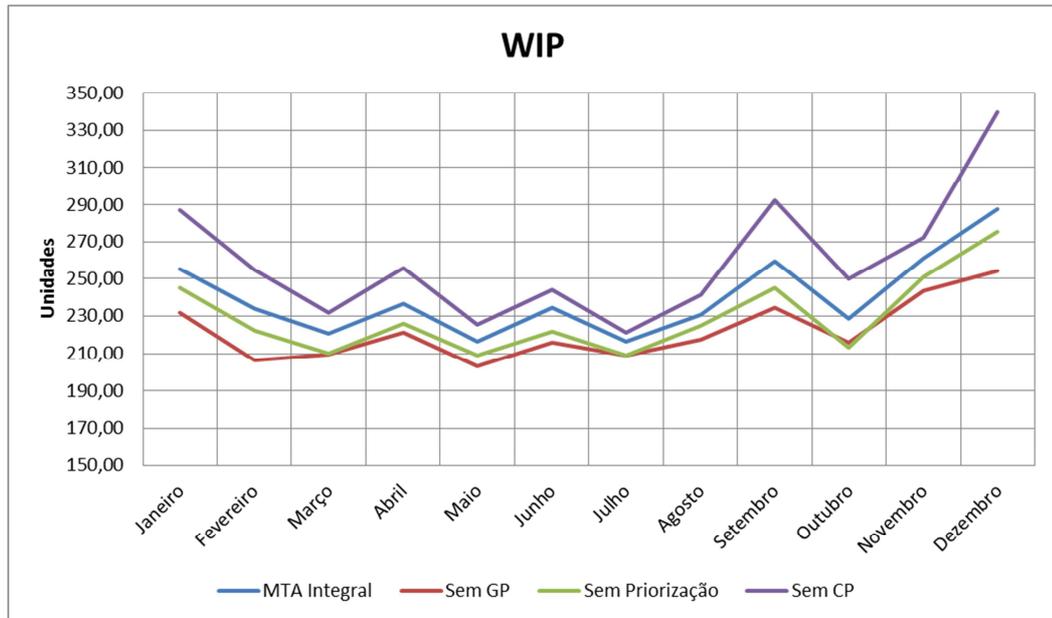
Tabela 18 – Diferença entre o FGI do MTA e suas derivações no Cenário 1

	Sem GP		Sem Priorização		Sem CP	
	Absoluto	%	Absoluto	%	Absoluto	%
Média de FGI	-126,08	-24,31	6,43	1,24	3,06	0,59

Fonte: Autor

O gráfico sobre o WIP médio (Figura 39) mostra que o MTA Sem CP manteve o maior estoque em processo. A Tabela 19 mostra que o menor WIP médio é da derivação Sem GP. Sendo assim a derivação Sem GP é quem manteve o menor nível de estoque no sistema (WIP+FGI), conforme Tabela 20.

Figura 39 –WIP no Cenário 1



Fonte: Autor

Tabela 19 –WIP no Cenário 1

Meses	MTA	Sem GP	Sem Priorização	Sem CP
Janeiro	255,27	231,62	245,32	287,24
Fevereiro	234,04	206,61	222,06	254,54
Março	220,44	209,30	210,32	231,70
Abril	236,86	221,25	225,79	255,82
Maio	216,68	203,26	208,91	225,50
Junho	234,26	215,73	222,00	244,22
Julho	216,44	209,15	208,81	221,47
Agosto	231,05	217,56	224,77	241,68
Setembro	259,52	234,58	245,25	292,59
Outubro	228,78	215,74	213,37	249,92
Novembro	261,06	243,52	251,23	272,21
Dezembro	287,87	253,98	275,26	339,95
Média	240,19	221,86	229,42	259,74

Fonte: Autor

Tabela 20 – Estoque total no sistema no Cenário 1

Meses	MTA	Sem GP	Sem Priorização	Sem CP
Janeiro	646,50	607,03	651,00	677,88
Fevereiro	740,67	618,92	732,24	760,93
Março	749,21	618,67	741,81	761,35
Abril	757,52	616,49	746,70	775,12
Mai	770,85	620,37	763,66	784,74
Junho	770,92	618,74	767,29	782,95
Julho	750,38	618,22	748,03	767,45
Agosto	747,92	615,38	755,52	765,30
Setembro	767,60	607,94	778,50	806,08
Outubro	788,74	613,68	776,14	817,76
Novembro	788,45	610,21	778,22	803,96
Dezembro	826,19	606,37	813,78	872,68
Média	758,75	614,34	754,41	781,35

Fonte: Autor

A diferença do WIP médio entre o MTA e suas derivações mostra que o MTA Sem GP manteve 7,63% a menos de estoque em processo. Já o MTA Sem CP manteve 8,14% a mais. O MTA Sem Priorização manteve 4,48% a menos, e foi o que ficou mais próximo do MTA, como mostra a Tabela 21. O MTA Sem GP apresentou melhor resultado e o MTA Sem CP o pior. A falta da Carga Planejada fez com que houvesse mais estoque em processo. A retirada do Gerenciamento do Pulmão fez com que menos OPs fossem abertas, o que é provado pelo seu WIP médio, o menor de todos. O MTA Sem Priorização também teve um resultado melhor que o MTA, e neste caso a explicação é que as OPs menos prioritárias não são ultrapassadas por outras OPs com maior prioridade na fila das estações de trabalho. Isso pode ter contribuído para esse resultado. Por fim, embora o MTA Sem CP tenha um *Fill Rate* médio estatisticamente igual ao do MTA, o WIP médio é maior.

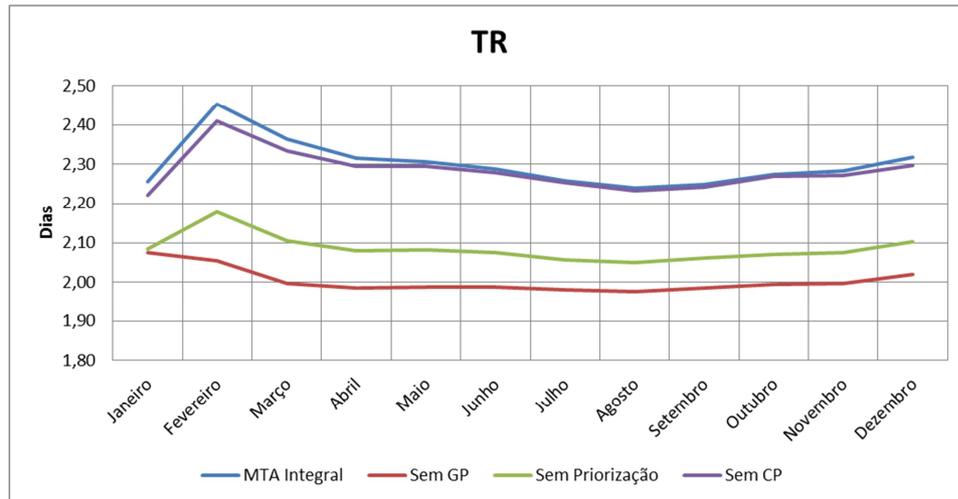
Tabela 21 – Diferença entre o WIP do MTA e suas derivações no Cenário 1

	Sem GP		Sem Priorização		Sem CP	
	Absoluto	%	Absoluto	%	Absoluto	%
Média	-18,33	-7,63	-10,77	-4,48	19,55	8,14

Fonte: Autor

O menor Tempo de Reposição médio ficou com a derivação MTA Sem GP, e a maior com o MTA, como aparece no gráfico da Figura 40 e a Tabela 22. A medida Tempo de Reposição já foi conceituada, mas vale reforçar que ela considera o tempo entre o consumo dos itens e sua reposição.

Figura 40 – Tempo de Reposição no Cenário 1



Fonte: Autor

Tabela 22 – Tempo de Reposição no Cenário 1

Meses	MTA	Sem GP	Sem Priorização	Sem CP
Janeiro	2,26	2,08	2,08	2,22
Fevereiro	2,45	2,05	2,18	2,41
Março	2,36	2,00	2,11	2,33
Abril	2,32	1,99	2,08	2,30
Maio	2,31	1,99	2,08	2,29
Junho	2,29	1,99	2,08	2,28
Julho	2,26	1,98	2,06	2,25
Agosto	2,24	1,98	2,05	2,23
Setembro	2,25	1,99	2,06	2,24
Outubro	2,28	1,99	2,07	2,27
Novembro	2,28	2,00	2,07	2,27
Dezembro	2,32	2,02	2,10	2,30
Média	2,30	2,00	2,08	2,28

Fonte: Autor

A derivação com menor diferença, como mostra a Tabela 23, com relação ao MTA foi o MTA Sem CP, com -0,75%, seguido do MTA Sem Priorização, -9,38%, e do MTA Sem GP, que teve a maior diferença, -12,92% e o menor Tempo de Reposição médio. A não abertura de OPs de ajuste do EA fez com que o MTA Sem GP apresentasse o menor Tempo de Reposição médio, pois, com menos OPs para serem processadas, as filas nas estações de trabalho são menores também, resultando em uma reposição mais rápida. A retirada da priorização pelo status do pulmão também fez reduzir o TR médio. Isso foi causado pela diminuição no tempo em que uma OP fica aguardando nas filas até que outras OPs com maior prioridade sejam processadas. A retirada da Carga Planejada não trouxe diferença significativa nos Tempo de Reposição médio. Isso também indica que liberar OPs além da capacidade do RRC não trás benefícios quanto ao TR.

Tabela 23 – Diferença do TR médio do MTA e suas derivações no Cenário 1

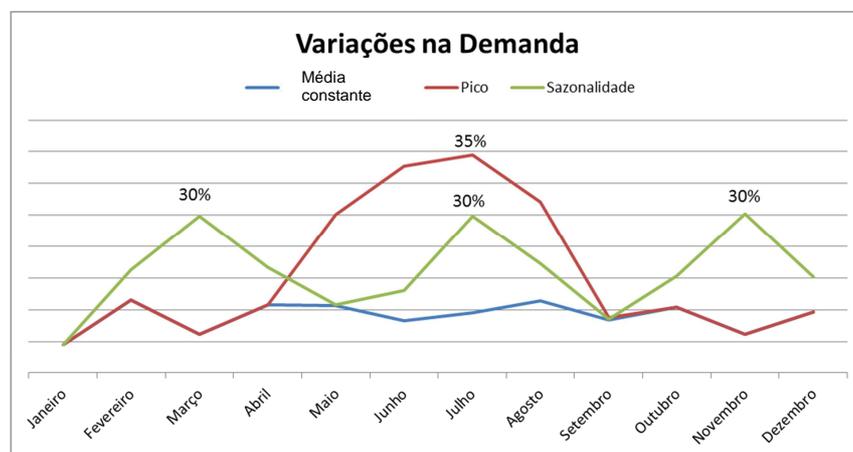
	Sem GP		Sem Priorização		Sem CP	
	Absoluto	%	Absoluto	%	Absoluto	%
Média	-0,30	-12,92	-0,22	-9,38	-0,02	-0,75

Fonte: Autor

4.3 Cenário 2: Demanda com Pico

Na Figura 41 a demanda com pico é representada pela linha vermelha. A demanda começa a aumentar no mês de Maio, alcança seu máximo nos meses de Junho e Julho, cai em Agosto e volta ao normal em Setembro.

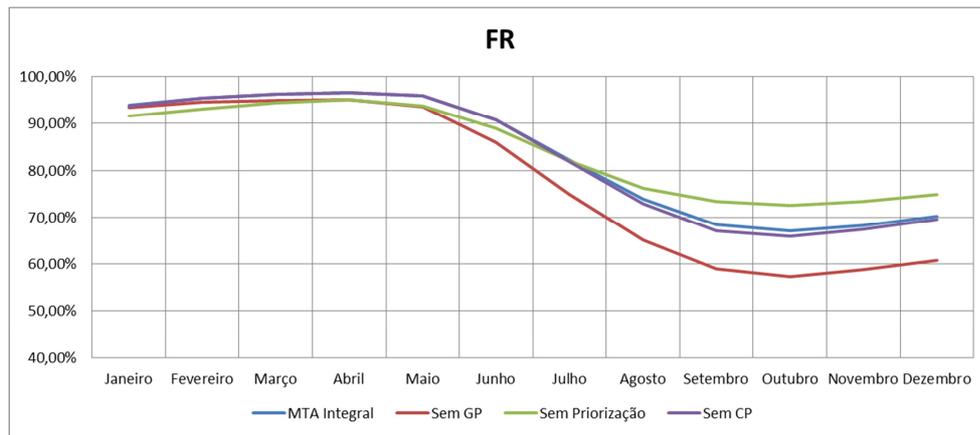
Figura 41 – Variações nas demandas



Fonte: Autor

A Figura 42 e a Tabela 24 mostram que até o mês de Maio o *Fill Rate* era muito próximo entre o MTA e as derivações, mas depois desse período cada derivação começou a apresentar desempenho diferente. A maior queda foi do MTA Sem GP, e o melhor foi do MTA Sem Priorização. O MTA Sem CP se manteve próximo do MTA. Nos meses de Novembro e Dezembro houve uma leve recuperação.

Figura 42 – *Fill Rate* no Cenário 2



Fonte: Autor

Tabela 24 – *Fill Rate* no Cenário 2

Meses	MTA (%)	Sem GP (%)	Sem Priorização (%)	Sem CP (%)
Janeiro	93,92%	93,49%	91,71%	93,87%
Fevereiro	95,52%	94,62%	93,09%	95,52%
Março	96,37%	95,00%	94,46%	96,35%
Abril	96,69%	95,15%	95,06%	96,69%
Maio	95,89%	93,56%	93,88%	95,92%
Junho	90,83%	86,09%	88,97%	90,80%
Julho	82,16%	74,81%	82,02%	81,79%
Agosto	73,81%	65,12%	76,20%	72,88%
Setembro	68,42%	58,99%	73,32%	67,12%
Outubro	67,05%	57,24%	72,58%	65,90%
Novembro	68,26%	58,84%	73,34%	67,49%
Dezembro	70,16%	60,78%	74,81%	69,65%

Fonte: Autor

A Tabela 25 mostra que o *Fill Rate* médio do MTA Sem Priorização foi o melhor, seguido do MTA, MTA Sem CP e MTA Sem GP. Foi também quem apresentou o menor

desvio padrão, o que mostrou que houve certa estabilidade na disponibilidade dos produtos durante o período.

Tabela 25 – Estatística descritiva sobre o *Fill Rate* no Cenário 2

	MTA (%)	Sem GP (%)	Sem Priorização (%)	Sem CP (%)
Média	83,26	77,81	84,12	82,83
Mediana	86,49	80,45	85,50	86,29
Mínimo	67,05	57,24	72,58	65,90
Máximo	96,69	95,15	95,06	96,69
Desvio Padrão	12,80	16,62	9,55	13,26

Fonte: Autor

Pela diferença entre as medidas da estatística descritiva (Tabela 26) o MTA Sem GP é quem apresenta menor desempenho, e o MTA Sem Priorização é quem apresentou melhor resultado.

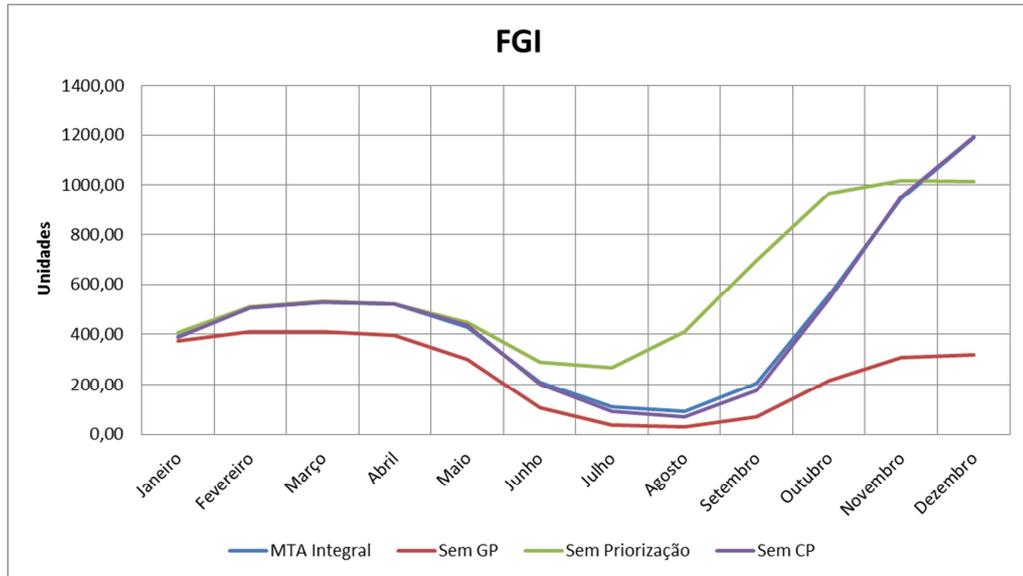
Tabela 26 – Diferença do *Fill Rate* entre o MTA e suas derivações no Cenário 2

	Sem GP (%)	Sem Priorização (%)	Sem CP (%)
Média	-5,45	0,86	-0,43
Mediana	-6,04	-1,00	-0,20
Mínimo	-9,81	5,52	-1,16
Máximo	-1,54	-1,63	-0,01

Fonte: Autor

O MTA Sem GP manteve o menor FGI médio, como pode ser visto na Figura 43 e Tabela 27. Entre os meses de Maio a Novembro o MTA Sem Priorização conseguiu manter o maior FGI, sem deixar que ele se aproximasse de zero, como aconteceu com o MTA e outras derivações.

Figura 43 – FGI no Cenário 2



Fonte: Autor

Tabela 27 – FGI no Cenário 2

Meses	MTA	Sem GP	Sem Priorização	Sem CP
Janeiro	391,23	375,41	405,68	390,64
Fevereiro	506,63	412,31	510,18	506,39
Março	528,77	409,37	531,49	529,65
Abril	520,66	395,24	520,91	519,30
Mai	431,04	302,06	446,27	435,23
Junho	208,62	107,06	290,73	201,94
Julho	109,39	37,08	269,23	92,83
Agosto	92,13	31,26	409,59	71,92
Setembro	205,65	71,79	697,06	175,85
Outubro	556,31	218,60	965,62	541,83
Novembro	946,70	307,35	1016,59	953,98
Dezembro	1191,13	318,02	1013,47	1195,14
Média	474,02	248,80	589,74	467,89

Fonte: Autor

Pela diferença entre as médias (Tabela 28) do FGI conclui-se que a derivação Sem CP manteve aproximadamente um nível de disponibilidade muito próximo ao do MTA. A derivação Sem GP teve 47,51% menos estoque de produtos acabados contra 24,41% a mais do MTA Sem Priorização. O MTA e MTA Sem CP tiveram *Fill Rate* médio próximo do MTA Sem Priorização – respectivamente 83,26%, 82,83% e 84,12% – porém, o FGI ficou

abaixo. Isso mostra que a retirada da priorização pelo status do pulmão aumenta bastante o FGI, mas não aumenta o *Fill Rate* significativamente. A retirada do Gerenciamento do Pulmão fez o FGI cair e por isso, o *Fill Rate* médio foi comprometido, com pelo menos 5% a menos. A retirada da Carga Planejada não fez aumentar o FGI médio, o que mostra que a liberação das OPs deve seguir o ritmo do RRC.

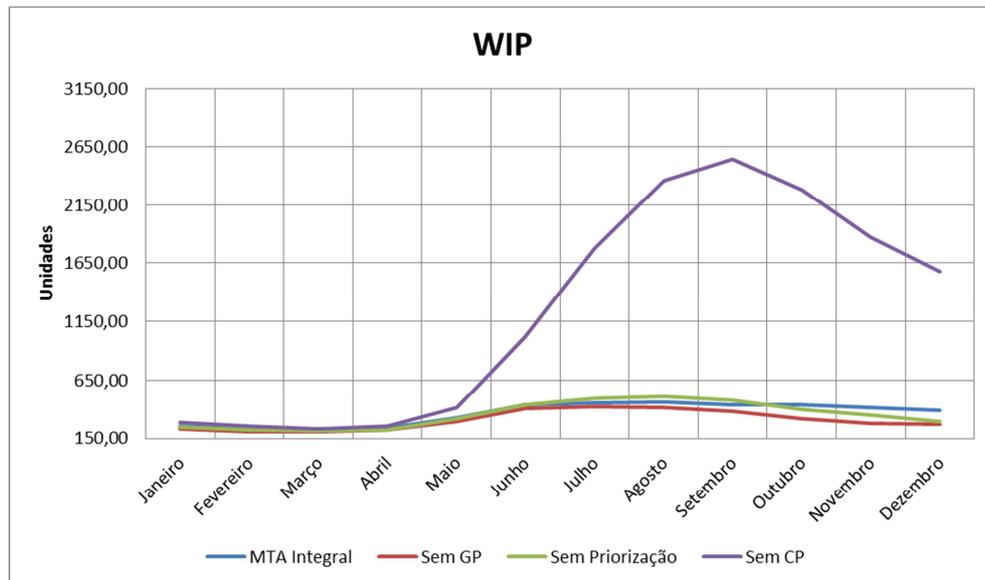
Tabela 28 – Diferença entre o FGI do MTA e suas derivações no Cenário 2

	Sem GP		Sem Priorização		Sem CP	
	Absoluto	%	Absoluto	%	Absoluto	%
Média	-225,23	-47,51	115,71	24,41	-6,13	-1,29

Fonte: Autor

O gráfico sobre o WIP médio (Figura 44) mostra que a falta da Carga Planejada gera aumento exageradamente do estoque em processo quando a demanda aumenta repentinamente. Pela Tabela 29 o menor WIP médio é da derivação Sem GP. A Tabela 30 mostra que, novamente, o MTA Sem GP é quem manteve o menor nível de estoque no sistema (WIP+FGI).

Figura 44 – WIP no Cenário 2



Fonte: Autor

Tabela 29 –WIP no Cenário 2

Meses	MTA	Sem GP	Sem Priorização	Sem CP
Janeiro	255,27	231,62	245,32	287,24
Fevereiro	234,04	206,61	222,06	254,54
Março	220,44	209,30	210,32	231,70
Abril	236,86	221,25	225,79	255,82
Mai	327,22	290,54	315,62	413,97
Junho	436,38	402,03	436,81	1017,44
Julho	456,10	424,36	494,42	1775,34
Agosto	458,75	413,05	512,49	2360,94
Setembro	437,92	385,24	478,98	2544,85
Outubro	437,38	317,36	396,98	2279,67
Novembro	415,81	276,09	353,72	1875,65
Dezembro	387,97	273,05	294,76	1577,07
Média	358,68	304,21	348,94	1239,52

Fonte: Autor

Tabela 30 – Estoque total no sistema no Cenário 2

Meses	MTA	Sem GP	Sem Priorização	Sem CP
Janeiro	646,50	607,03	651,00	677,88
Fevereiro	740,67	618,92	732,24	760,93
Março	749,21	618,67	741,81	761,35
Abril	757,52	616,49	746,70	775,12
Mai	758,26	592,60	761,89	849,20
Junho	645,00	509,09	727,54	1219,38
Julho	565,49	461,44	763,65	1868,17
Agosto	550,88	444,31	922,08	2432,86
Setembro	643,57	457,03	1176,04	2720,70
Outubro	993,69	535,96	1362,60	2821,50
Novembro	1362,51	583,44	1370,31	2829,63
Dezembro	1579,10	591,07	1308,23	2772,21
Média	832,70	553,00	938,67	1707,41

Fonte: Autor

A diferença do WIP médio entre o MTA e as derivações mostra que o MTA Sem GP manteve 15,19% a menos de estoque em processo. Já o MTA Sem CP manteve 245,58% a mais. O MTA Sem Priorização manteve 2,72% a menos, e foi o que ficou mais próximo do

MTA, como mostra a Tabela 31. O MTA Sem GP apresentou melhor resultado e o MTA Sem CP o pior. A retirada da Carga Planejada fez com que houvesse um grande excesso de estoque em processo. A não abertura de OPs resultantes de aumentos disparados pelo Gerenciamento do Pulmão fez com que o WIP médio do MTA Sem GP fosse o menor de todos. O MTA Sem Priorização conseguiu um resultado melhor que o MTA, mas com uma diferença pequena. Talvez seja por que todos, ou quase todos, os produtos tiveram a região vermelha do pulmão invadida no pico, o que fez com que a priorização não tivesse muito efeito. Ou, de outra forma, a tentativa de priorizar OPs em situações em que um alto número delas tem status vermelho (ausência de capacidade protetiva) em nada auxilia os indicadores Fill Rate ou WIP, talvez levando a um aumento de desordem no chão de fábrica sem benefício aparente naqueles indicadores. A retirada da Carga Planejada, por sua vez, mostrou o quanto ela pode ser eficiente para manter um nível menor de WIP com o aumento excessivo da demanda.

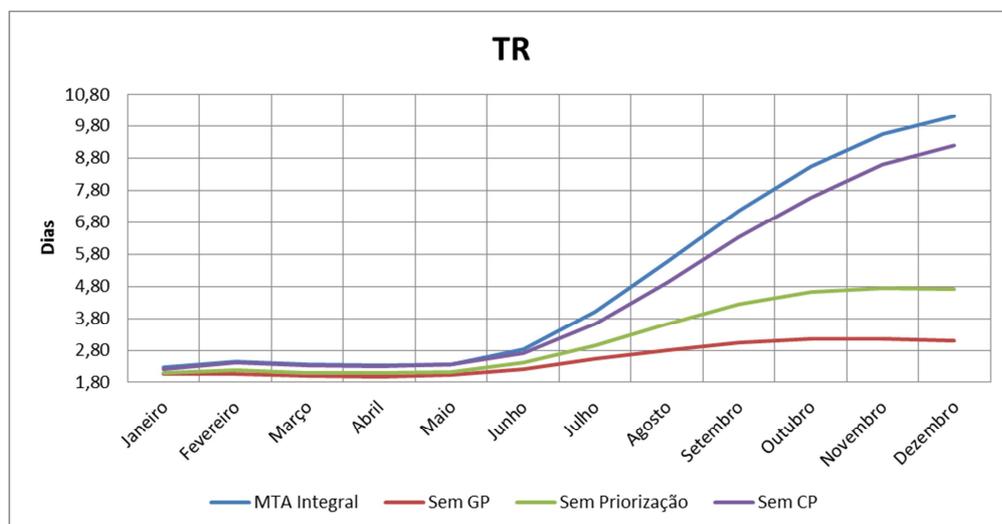
Tabela 31 – Diferença entre o WIP médio do MTA e suas derivações no Cenário 2

	Sem GP		Sem Priorização		Sem CP	
	Absoluto	%	Absoluto	%	Absoluto	%
Média	-54,47	-15,19	-9,74	-2,72	880,84	245,58

Fonte: Autor

O menor Tempo de Reposição médio ficou, assim como no cenário com a demanda média constante, com a derivação MTA Sem GP, e a maior com o MTA. Veja a Figura 45 e a Tabela 32.

Figura 45 – Tempo de Reposição no Cenário 2



Fonte: Autor

Tabela 32 – Tempo de Reposição no Cenário 2

Meses	MTA	Sem GP	Sem Priorização	Sem CP
Janeiro	2,26	2,08	2,08	2,22
Fevereiro	2,45	2,05	2,18	2,41
Março	2,36	2,00	2,11	2,33
Abril	2,32	1,99	2,08	2,30
Mai	2,37	2,03	2,13	2,35
Junho	2,83	2,20	2,41	2,71
Julho	4,01	2,52	2,96	3,62
Agosto	5,57	2,81	3,63	4,92
Setembro	7,18	3,04	4,25	6,33
Outubro	8,54	3,16	4,63	7,59
Novembro	9,55	3,14	4,74	8,60
Dezembro	10,12	3,10	4,72	9,21
Média	4,96	2,51	3,16	4,55

Fonte: Autor

Pela Tabela 33 a derivação com menor diferença com relação ao MTA foi o MTA Sem CP, com -8,22%, seguido do MTA Sem Priorização, -32,85%, e do MTA Sem GP, que teve a maior diferença, -45,35% e o melhor Tempo de Reposição médio. A não abertura de OPs de ajuste do EA fez com que o MTA Sem GP apresentasse o menor Tempo de Reposição médio, pois, com menos OPs para serem processadas, as filas nas estações de trabalho são menores também, resultando em uma reposição mais rápida. A retirada da priorização pelo status do pulmão também fez reduzir o TR médio, diminuindo o tempo que uma OP fica aguardando nas filas até que outras OPs com maior prioridade sejam processadas. A retirada da Carga Planejada não trouxe diferença significativa nos Tempo de Reposição médio. Isso ajuda a explicar que liberar OPs além da capacidade do RRC não trás benefícios quanto ao TR.

Tabela 33 – Diferença entre o TR médio do MTA e suas derivações no Cenário 2

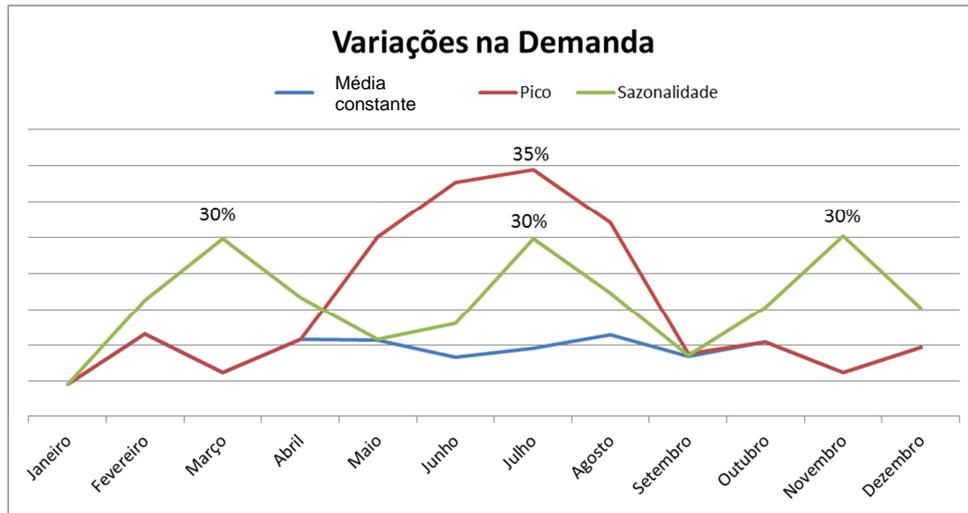
	Sem GP		Sem Priorização		Sem CP	
	Absoluto	%	Absoluto	%	Absoluto	%
Média	-2,04	-45,35	-1,48	-32,85	-0,37	-8,22

Fonte: Autor

4.4 Cenário 3: Demanda com Sazonalidade

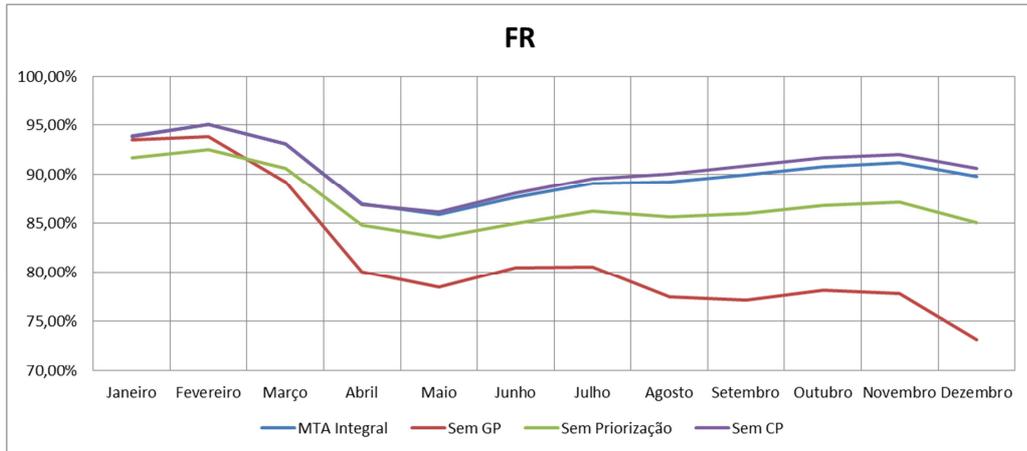
Na Figura 46 a demanda com sazonalidade é representada pela linha verde. São três períodos sazonais, que alcança a demanda máxima nos meses de março, julho e novembro.

Figura 46 – Variações nas demandas



Fonte: Autor

A Figura 47 e a Tabela 34 mostram que, até o mês de Março, o *Fill Rate* era próximo entre o MTA e as derivações. Após este período, a maior queda de desempenho foi do MTA Sem GP, assim como na demanda com pico. O MTA Sem Priorização entrou em queda, mas se recuperou e a partir do mês de Junho se manteve estável. O MTA Sem CP se manteve próximo do MTA durante todo o período. Teve uma queda até o mês de maio, conseguiu se recuperar e apresentou uma tendência de aumento até o final do período.

Figura 47 – *Fill Rate* no Cenário 3

Fonte: Autor

Tabela 34 – *Fill Rate* no Cenário 3

Meses	MTA (%)	Sem GP (%)	Sem Priorização (%)	Sem CP (%)
Janeiro	93,92	93,49	91,71	93,87
Fevereiro	95,11	93,84	92,46	95,09
Março	93,07	89,22	90,58	93,09
Abril	86,96	80,07	84,76	86,90
Maio	85,84	78,45	83,52	86,07
Junho	87,61	80,48	84,98	88,01
Julho	88,99	80,59	86,17	89,53
Agosto	89,23	77,45	85,62	90,04
Setembro	89,90	77,14	85,95	90,82
Outubro	90,73	78,19	86,81	91,65
Novembro	91,17	77,81	87,13	92,04
Dezembro	89,77	73,13	85,07	90,62

Fonte: Autor

A Tabela 35 mostra que o *Fill Rate* do MTA Sem CP foi o melhor, seguido do MTA, MTA Sem Priorização e MTA Sem GP.

Tabela 35 – Estatística descritiva sobre o *Fill Rate* no Cenário 3

	MTA (%)	Sem GP (%)	Sem Priorização (%)	Sem CP (%)
Média	90,19	81,66	87,06	90,65
Mediana	89,84	79,26	86,06	90,72
Mínimo	85,84	73,13	83,52	86,07
Máximo	95,11	93,84	92,46	95,09
Desvio Padrão	2,80	6,73	2,92	2,74

Fonte: Autor

Pela diferença entre as medidas da estatística descritiva (Tabela 36), o MTA Sem GP é quem apresentou menor desempenho e o MTA Sem CP, o melhor.

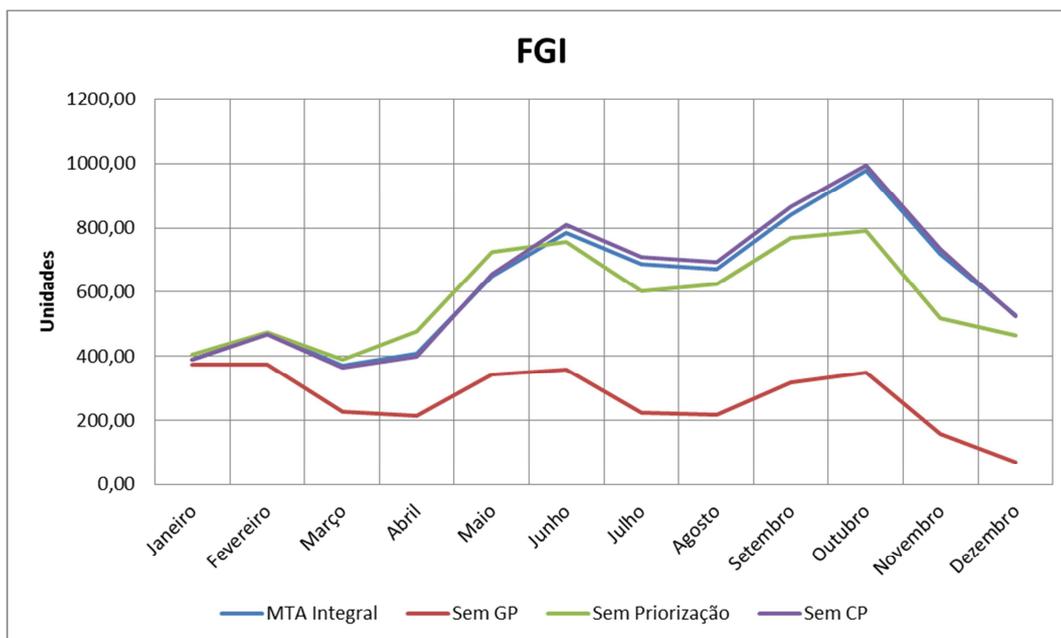
Tabela 36 – Diferença entre o *Fill Rate* do MTA e suas derivações no Cenário 3

	Sem GP (%)	Sem Priorização (%)	Sem CP (%)
Média	-8,54	-3,13	0,45
Mediana	-10,58	-3,77	0,88
Mínimo	-12,71	-2,32	0,23
Máximo	-1,26	-2,64	-0,02

Fonte: Autor

O MTA Sem GP manteve o menor FGI durante todo o período, como pode ser visto na Figura 48 e Tabela 37. No período de Maio a Novembro, o MTA Sem Priorização apresentou o maior FGI. No mês de maio houve aumento do FGI no MTA e nas derivações, depois do primeiro período sazonal, com demanda máxima em março. No mês de julho houve queda no FGI e o MTA e MTA Sem CP tiveram a menor queda. Após o mês de Agosto houve um grande aumento do FGI no MTA e MTA Sem CP, causado provavelmente pelo GP, como resposta ao segundo período de sazonalidade. Depois do mês de Outubro houve uma diminuição geral no FGI.

Figura 48 – FGI no Cenário 3



Fonte: Autor

Tabela 37 – FGI no Cenário 3

Meses	MTA	Sem GP	Sem Priorização	Sem CP
Janeiro	391,23	375,41	405,68	390,64
Fevereiro	471,26	373,13	474,56	469,54
Março	369,75	227,63	389,11	365,78
Abril	409,07	214,50	478,23	400,55
Mai	651,36	342,87	725,41	657,36
Junho	786,07	359,68	757,42	808,90
Julho	686,39	223,58	603,91	709,53
Agosto	670,95	217,74	625,64	693,83
Setembro	841,78	316,35	768,79	867,04
Outubro	980,77	348,73	791,24	995,81
Novembro	718,72	156,95	516,92	736,24
Dezembro	528,34	68,64	466,33	524,30
Média	625,47	268,77	583,60	634,96

Fonte: Autor

Pela diferença entre as médias (Tabela 38) do FGI, conclui-se que o MTA Sem CP manteve um nível de FGI muito próximo ao do MTA. A derivação Sem GP teve 57,03% a menos de FGI e foi quem apresentou o melhor resultado. O MTA Sem Priorização também teve um resultado melhor que o MTA, mas com uma diferença bem menor, de apenas 6,69%.

A retirada da Carga Planejada não fez aumentar significativamente o FGI, o que mostra que a liberação das OPs deve seguir o ritmo do RRC também quando a demanda é sazonal.

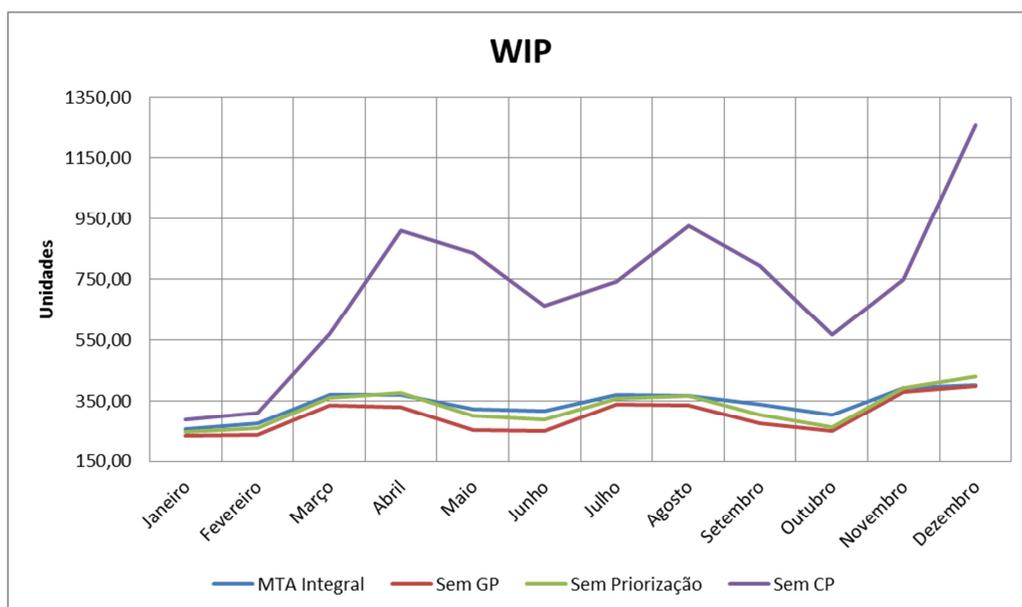
Tabela 38 – Diferença entre o FGI do MTA e suas derivações no Cenário 3

	Sem GP		Sem Priorização		Sem CP	
	Absoluto	%	Absoluto	%	Absoluto	%
Média	-356,71	-57,03	-41,87	-6,69	9,49	1,52

Fonte: Autor

O gráfico sobre o WIP (Figura 49) mostra que a falta da Carga Planejada impacta no aumento exagerado do estoque em processo, assim como no Cenário 2, com pico de demanda. Neste cenário, o menor WIP médio é do MTA Sem GP, como mostra a Tabela 39, e novamente ele é quem manteve o menor nível de estoque no sistema (WIP e FGI), conforme Tabela 40.

Figura 49 – WIP no Cenário 3



Fonte: Autor

Tabela 39 –WIP no Cenário 3

Meses	MTA	Sem GP	Sem Priorização	Sem CP
Janeiro	255,27	231,62	245,32	287,24
Fevereiro	273,23	237,18	258,65	310,88
Março	371,10	336,14	359,85	570,65
Abril	370,24	330,11	377,94	908,90
Mai	321,56	253,26	299,62	834,30
Junho	316,85	250,35	287,26	664,07
Julho	371,02	338,78	357,53	742,28
Agosto	368,33	336,61	368,42	925,02
Setembro	336,85	274,51	302,82	795,61
Outubro	301,77	250,18	260,66	566,41
Novembro	393,08	378,55	391,80	750,93
Dezembro	403,05	400,34	431,38	1257,04
Média	340,20	301,47	328,44	717,78

Fonte: Autor

Tabela 40 – Estoque total no sistema no Cenário 3

Meses	MTA	Sem GP	Sem Priorização	Sem CP
Janeiro	646,50	607,03	651,00	677,88
Fevereiro	744,49	610,31	733,21	780,42
Março	740,85	563,77	748,96	936,43
Abril	779,31	544,61	856,17	1309,45
Mai	972,92	596,13	1025,03	1491,66
Junho	1102,92	610,03	1044,68	1472,97
Julho	1057,41	562,36	961,44	1451,81
Agosto	1039,28	554,35	994,06	1618,85
Setembro	1178,63	590,86	1071,61	1662,65
Outubro	1282,54	598,91	1051,90	1562,22
Novembro	1111,80	535,50	908,72	1487,17
Dezembro	931,39	468,98	897,71	1781,34
Média	965,67	570,24	912,04	1352,74

Fonte: Autor

A diferença de quantidade de WIP entre o MTA e as derivações, apresentadas na Tabela 41, mostra que o MTA Sem GP manteve 11,38% a menos de estoque em processo. Já o MTA Sem CP manteve 110,99% a mais. O MTA Sem Priorização manteve 3,46% a menos,

e foi quem ficou mais próximo do MTA. O MTA Sem GP apresentou melhor resultado e o MTA Sem CP o pior. A retirada da Carga Planejada fez com que houvesse excesso de estoque em processo. A não abertura de OPs de aumento pelo Gerenciamento do Pulmão fez com que o WIP médio do MTA Sem GP fosse o menor entre todas as derivações e o MTA. Com sazonalidade, a retirada da Priorização não trouxe muita diferença no resultado final, apenas melhorou um pouco em termos de redução de WIP. Talvez seja por que todos, ou quase todos, os produtos alcançaram a região vermelha do pulmão nos períodos sazonais, o que fez com que a priorização não tivesse muito efeito. A retirada da Carga Planejada mostrou o quanto ela pode ser eficiente para manter um nível menor de WIP.

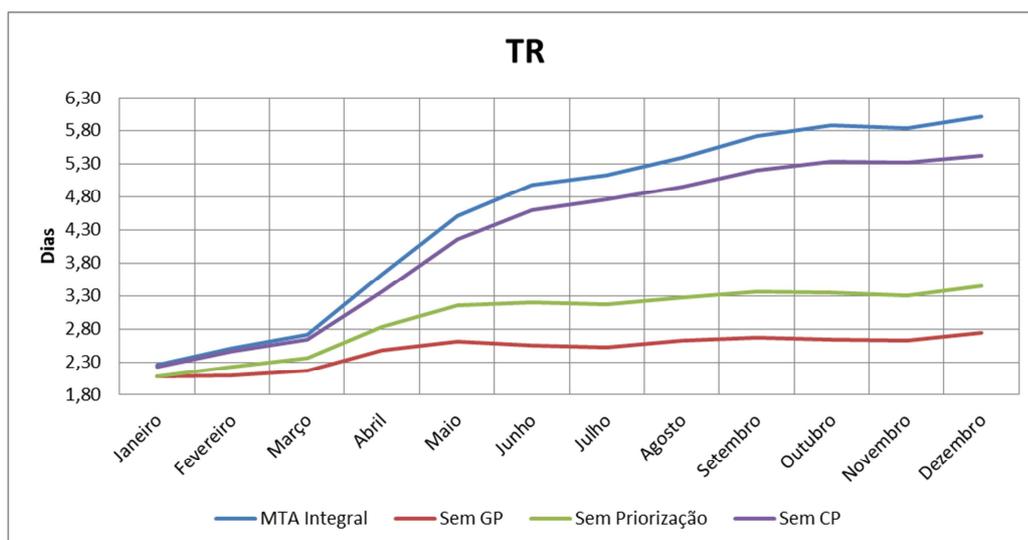
Tabela 41 – Diferença entre o WIP do MTA e suas derivações no Cenário 3

	Sem GP		Sem Priorização		Sem CP	
	Absoluto	%	Absoluto	%	Absoluto	%
Média	-38,73	-11,38	-11,76	-3,46	377,58	110,99

Fonte: Autor

O menor Tempo de Reposição ficou, assim como nos cenários com a demanda média constante e com Pico, com a derivação MTA Sem GP, e a maior com o MTA, conforme a Figura 50 e a Tabela 42.

Figura 50 – Tempo de Reposição no Cenário 3



Fonte: Autor

Tabela 42 – Tempo de Reposição no Cenário 3

Meses	MTA	Sem GP	Sem Priorização	Sem CP
Janeiro	2,26	2,08	2,08	2,22
Fevereiro	2,51	2,09	2,22	2,46
Março	2,72	2,17	2,36	2,64
Abril	3,63	2,48	2,83	3,37
Mai	4,51	2,61	3,15	4,16
Junho	4,98	2,56	3,20	4,61
Julho	5,13	2,53	3,17	4,77
Agosto	5,39	2,62	3,27	4,95
Setembro	5,72	2,66	3,36	5,20
Outubro	5,89	2,64	3,34	5,34
Novembro	5,84	2,63	3,31	5,32
Dezembro	6,01	2,75	3,44	5,42
Média	4,55	2,49	2,98	4,21

Fonte: Autor

A Tabela 43 mostra que a derivação com menor diferença do TR, com relação ao MTA, foi o MTA Sem CP, com -7,28%, seguido do MTA Sem Priorização, com -33,51%, e do MTA Sem GP, que teve a maior diferença, -44,28%, e o melhor Tempo de Reposição. A não abertura de OPs de aumento do EA fez com que o MTA Sem GP apresentasse o menor Tempo de Reposição, pois, com menos OPs para serem processadas, as filas nas estações de trabalho são menores também, resultando em uma reposição mais rápida. A retirada da priorização pelo status do pulmão também fez reduzir o TR. Isso foi causado pela diminuição no tempo em que uma OP fica aguardando nas filas até que outras OPs com maior prioridade sejam processadas. A retirada da Carga Planejada não trouxe diferença significativa nos Tempo de Reposição médio. Isso ajuda a ilustrar por que liberar OPs além da capacidade do RRC não traz benefícios quanto ao TR.

Tabela 43 – Diferença entre o TR do MTA e suas derivações no Cenário 3

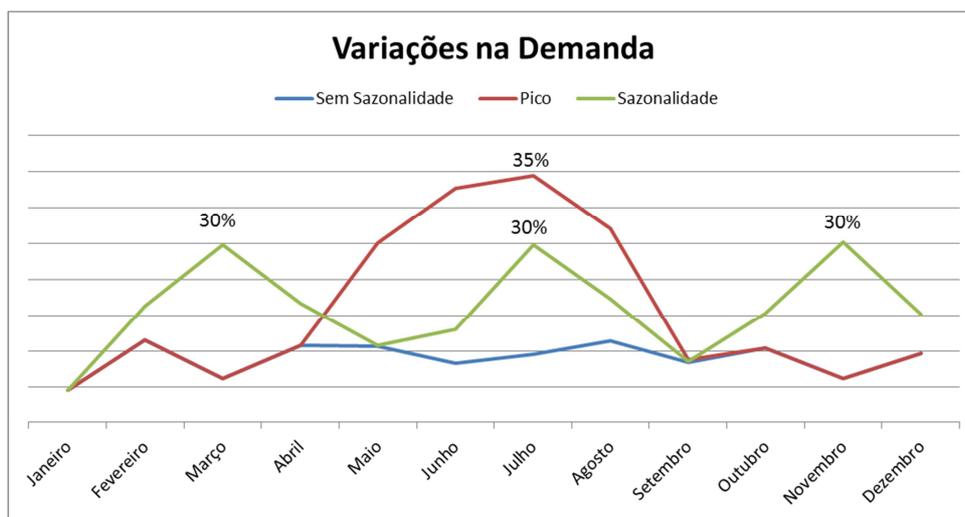
	Sem GP		Sem Priorização		Sem CP	
	Absoluto	%	Absoluto	%	Absoluto	%
Média	-1,96	-44,28	-1,48	-33,51	-0,32	-7,28

Fonte: Autor

4.5 Cenário 4: Demanda Média Constante e CV igual a 3 nos tempos de processamento

Na Figura 51 a demanda com média constante é representada pela linha azul, que está sobreposta pela linha vermelha em parte do período.

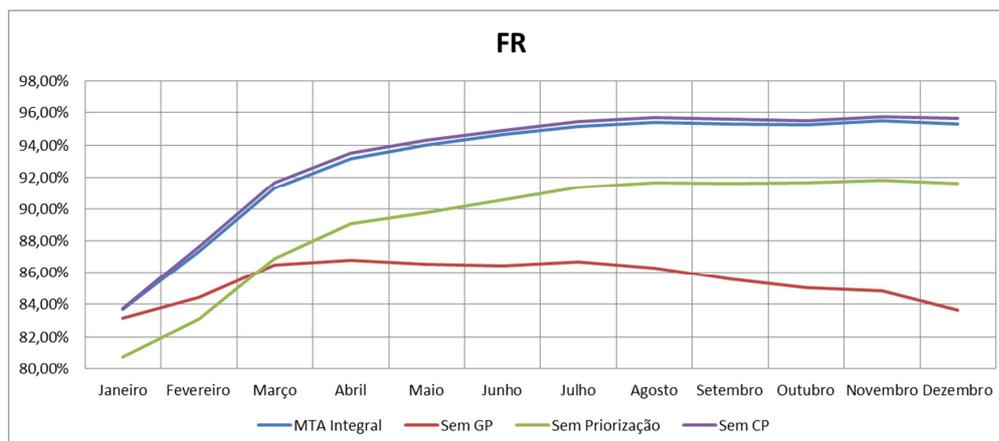
Figura 51 – Variações nas demandas



Fonte: Autor

Neste cenário a demanda não sofreu alterações e se comporta da mesma maneira que no cenário 1. A mudança aconteceu no coeficiente de variação dos tempos de processamento. No cenário 1, o CV era de 0,5 e passou a ser de 3 no cenário 4. Os resultados e as análises mostram como foi o comportamento do MTA com esta variabilidade.

A medida para o indicador *Fill Rate* das derivações MTA, Sem Priorização e Sem CP começou apresentando resultados baixos no mês de Janeiro, mas foram evoluindo e se estabilizaram no mês de Agosto, como mostram a Figura 52 e a Tabela 44. O MTA Sem GP teve uma evolução de Janeiro à Abril e depois entrou em queda até o final do período.

Figura 52 – *Fill Rate* no Cenário 4

Fonte: Autor

Tabela 44 – *Fill Rate* no Cenário 4

Meses	MTA (%)	Sem GP (%)	Sem Priorização (%)	Sem CP (%)
Janeiro	83,72	83,16	80,76	83,77
Fevereiro	87,33	84,45	83,09	87,62
Março	91,30	86,48	86,87	91,64
Abril	93,16	86,76	89,07	93,48
Maio	93,99	86,51	89,78	94,30
Junho	94,63	86,42	90,57	94,91
Julho	95,16	86,66	91,38	95,44
Agosto	95,39	86,27	91,67	95,69
Setembro	95,28	85,58	91,62	95,60
Outubro	95,26	85,02	91,66	95,51
Novembro	95,48	84,82	91,83	95,73
Dezembro	95,31	83,66	91,63	95,63

Fonte: Autor

A Tabela 45 mostra que o MTA Sem CP apresentou o melhor desempenho, pela média, e o MTA ficou um pouco abaixo com apenas 0,28% de diferença. O terceiro resultado foi do MTA Sem Priorização e depois vem o MTA Sem GP. A retirada da Carga Planejada aumentou pouco o nível de serviço. A retirada da priorização pelo Status do Pulmão fez cair o desempenho em 3,8%, enquanto que a retirada do Gerenciamento do Pulmão fez cair 7,5% aproximadamente, como pode ser visto pelas médias da Tabela 45.

Tabela 45 – Estatística descritiva sobre o *Fill Rate* no Cenário 4

	MTA (%)	Sem GP (%)	Sem Priorização (%)	Sem CP (%)
Média	93,00	85,48	89,16	93,28
Mediana	94,89	85,92	90,98	95,18
Mínimo	83,72	83,16	80,76	83,77
Máximo	95,48	86,76	91,83	95,73
Desvio Padrão	3,78	1,24	3,71	3,83

Fonte: Autor

A Tabela 46 mostra a diferença entre os dados da estatística descritiva entre o MTA e as suas derivações.

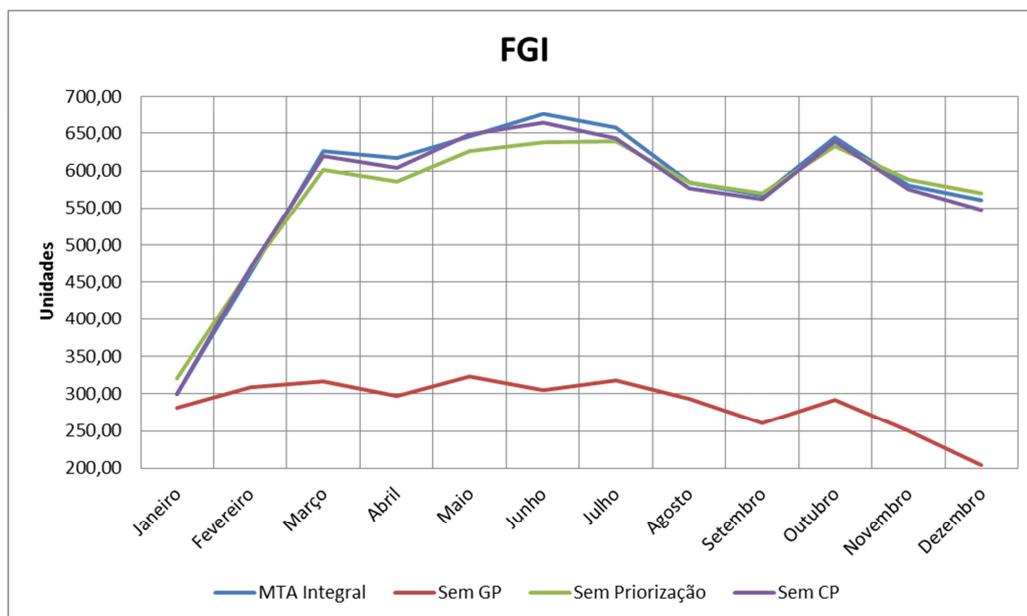
Tabela 46 – Diferença entre o *Fill Rate* do MTA e suas derivações no Cenário 4

	Sem GP (%)	Sem Priorização (%)	Sem CP (%)
Média	-7,52	-3,84	0,28
Mediana	-8,97	-3,92	0,29
Mínimo	-0,56	-2,96	0,05
Máximo	-8,72	-3,65	0,26

Fonte: Autor

O gráfico da Figura 53 e a Tabela 47 mostram que o FGI do MTA, Sem Priorização e Sem CP foram próximos em todo o período, e bem a cima do MTA Sem GP. Essa diferença entre o MTA Sem GP e as outras derivações, inclusive o MTA, mostra que o GP elevou bastante o FGI. O maior aumento do FGI ocorreu nos meses de Fevereiro e Março nas derivações com o GP, causado provavelmente por que o EA inicial era pequeno para a variabilidade que seria enfrentada.

Figura 53 – FGI no Cenário 4



Fonte: Autor

Tabela 47 – FGI no Cenário 4

Meses	MTA	Sem GP	Sem Priorização	Sem CP
Janeiro	299,24	281,11	321,23	299,44
Fevereiro	463,12	308,61	468,74	468,97
Março	626,41	316,30	601,94	619,20
Abril	617,33	297,08	586,24	604,78
Maio	645,72	323,33	626,43	648,24
Junho	675,53	304,95	638,21	664,74
Julho	657,69	318,22	639,30	643,53
Agosto	584,50	293,06	584,08	577,28
Setembro	567,67	260,03	570,15	562,11
Outubro	644,60	291,63	632,71	639,95
Novembro	580,75	250,35	588,68	576,04
Dezembro	561,10	204,97	569,59	547,77
Média	576,97	287,47	568,94	571,00

Fonte: Autor

A Tabela 48 mostra a diferença entre as derivações e o FGI do MTA. Chama a atenção a diferença do MTA Sem GP, de -50,18%.

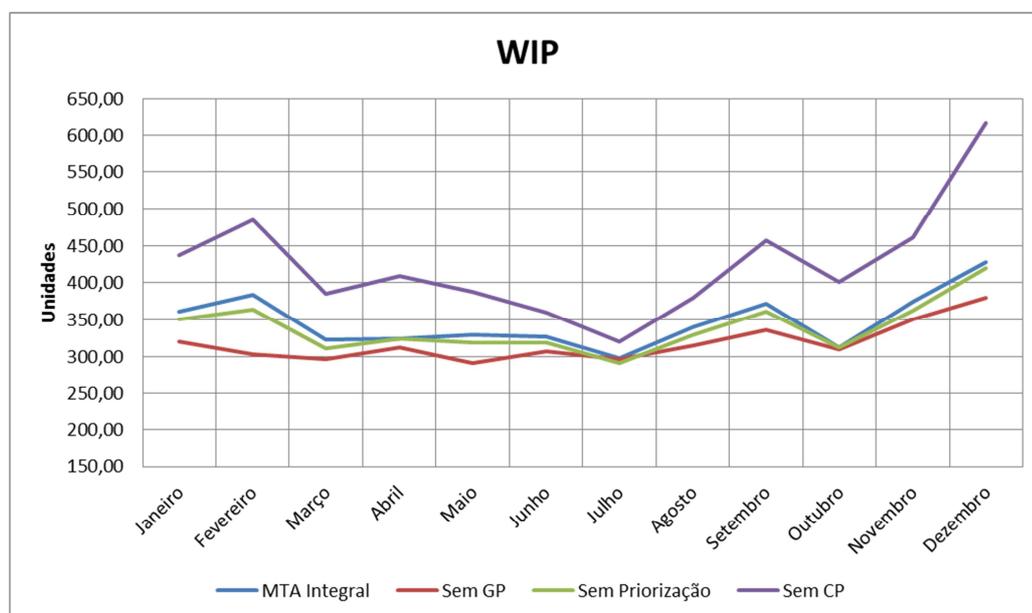
Tabela 48 – Diferença entre o FGI do MTA e suas derivações no
Cenário 4

	Sem GP		Sem Priorização		Sem CP	
	Absoluto	%	Absoluto	%	Absoluto	%
Média	-289,50	-50,18	-8,03	-1,39	-5,97	-1,03

Fonte: Autor

O nível WIP do MTA, Sem Priorização e Sem GP se manteve próximo durante o período. O MTA Sem CP apresentou WIP superior para todo o período, e um grande aumento após o mês de Julho. Veja a Figura 54 e a Tabela 49.

Figura 54 – WIP no Cenário 4



Fonte: Autor

Tabela 49 – WIP no Cenário 4

Meses	MTA	Sem GP	Sem Priorização	Sem CP
Janeiro	360,78	319,80	351,22	436,45
Fevereiro	384,06	303,15	364,56	484,51
Março	322,92	295,87	310,79	385,23
Abril	324,44	312,55	323,69	409,67
Mai	329,08	290,95	319,02	388,49
Junho	327,24	306,94	318,85	360,50
Julho	297,50	296,17	290,96	320,02
Agosto	340,26	314,92	329,18	380,34
Setembro	371,62	336,34	361,64	456,73
Outubro	311,96	309,15	312,38	400,63
Novembro	374,32	350,64	362,22	460,28
Dezembro	427,22	379,69	419,98	616,63
Média	347,62	318,01	338,71	424,96

Fonte: Autor

A Tabela 50 mostra que o MTA Sem GP obteve o menor estoque no sistema (WIP mais FGD).

Tabela 50 – Estoque total no sistema no Cenário 4

Meses	MTA	Sem GP	Sem Priorização	Sem CP
Janeiro	660,02	600,91	672,45	735,89
Fevereiro	847,18	611,76	833,30	953,48
Março	949,33	612,17	912,73	1004,43
Abril	941,77	609,63	909,93	1014,45
Mai	974,80	614,28	945,45	1036,73
Junho	1002,77	611,89	957,06	1025,24
Julho	955,19	614,39	930,26	963,55
Agosto	924,76	607,98	913,26	957,62
Setembro	939,29	596,37	931,79	1018,84
Outubro	956,56	600,78	945,09	1040,58
Novembro	955,07	600,99	950,90	1036,32
Dezembro	988,32	584,66	989,57	1164,40
Média	924,59	605,48	907,65	995,96

Fonte: Autor

O MTA Sem GP apresentou o melhor desempenho quanto ao nível de WIP. Com uma diferença de -8,52%. O MTA Sem CP obteve 22,25% a mais de WIP com relação ao MTA. Veja a Tabela 51.

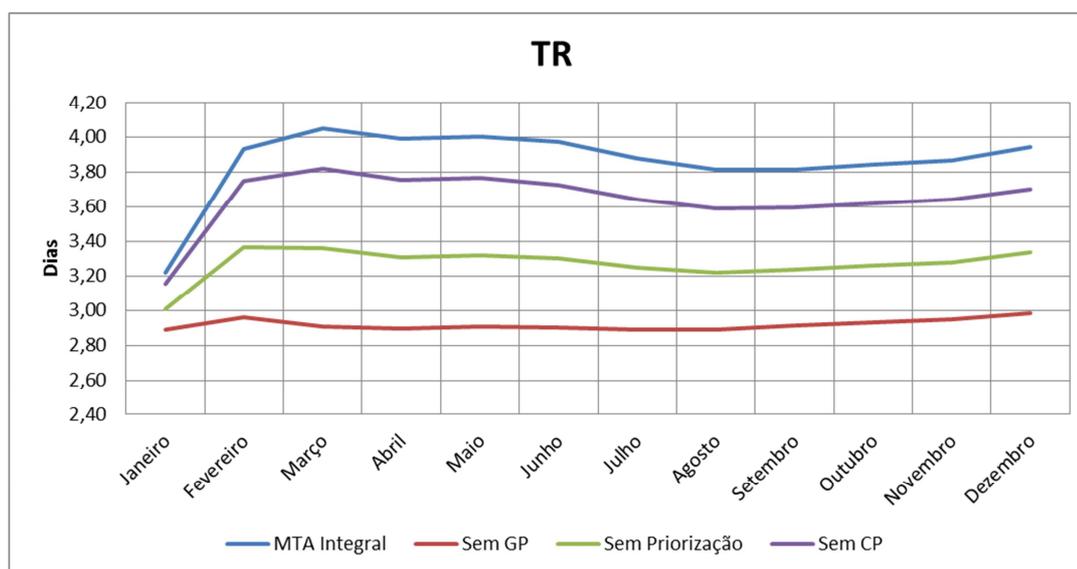
Tabela 51 – Diferença entre o WIP médio do MTA e suas derivações no Cenário 4

	Sem GP		Sem Priorização		Sem CP	
	Absoluto	%	Absoluto	%	Absoluto	%
Média	-29,60	-8,52	-8,91	-2,56	77,34	22,25

Fonte: Autor

Sobre o Tempo de Reposição, o gráfico da Figura 55 apresenta resultados bem diferentes para as quatro derivações e o MTA. O melhor desempenho ficou com o MTA Sem GP, seguido do MTA Sem Priorização, MTA Sem CP e MTA. Os números da Tabela 52 demonstram isso.

Figura 55 – Tempo de Reposição no Cenário 4



Fonte: Autor

Tabela 52 – Tempo de Reposição no Cenário 4

Meses	MTA	Sem GP	Sem Priorização	Sem CP
Janeiro	3,22	2,89	3,01	3,16
Fevereiro	3,93	2,96	3,37	3,75
Março	4,05	2,91	3,36	3,82
Abril	3,99	2,89	3,31	3,76
Mai	4,00	2,91	3,32	3,77
Junho	3,98	2,90	3,30	3,73
Julho	3,88	2,89	3,25	3,65
Agosto	3,81	2,89	3,22	3,59
Setembro	3,82	2,91	3,24	3,59
Outubro	3,84	2,93	3,26	3,62
Novembro	3,87	2,95	3,28	3,64
Dezembro	3,95	2,98	3,34	3,71
Média	3,85	2,91	3,26	3,64

Fonte: Autor

A Tabela 53 mostra que o MTA Sem GP e MTA Sem Priorização tiveram as maiores diferenças quanto ao MTA.

Tabela 53 – Diferença entre o TR médio do MTA e suas derivações no Cenário 4

	Sem GP		Sem Priorização		Sem CP	
	Absoluto	%	Absoluto	%	Absoluto	%
Média	-0,94	-24,46	-0,59	-15,31	-0,21	-5,47

Fonte: Autor

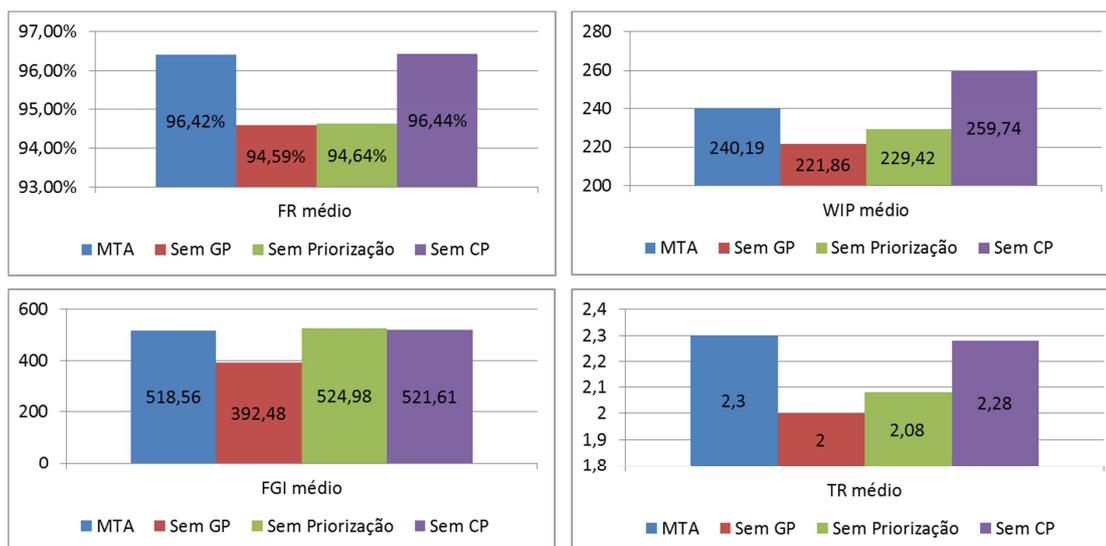
4.6 Resultado Geral

A Figura 56 resume os resultados do Cenário 1 – demanda média constante – e mostra que o MTA Sem CP apresentou o melhor *Fill Rate*, e o MTA Sem GP apresentou melhor desempenho nos indicadores FGI, WIP e TR. A diferença do *Fill Rate* médio do MTA Sem GP com relação ao MTA foi de -1,83%. Isso mostra que o Gerenciamento do Pulmão pode aumentar o estoque no sistema (WIP+FGI) sem com isso melhorar significativamente a disponibilidade dos produtos.

Sendo assim, a hipótese de pesquisa número 1 não pode ser aceita, pois o MTA não alcançou o melhor resultado em nenhum dos indicadores quando comparado às derivações.

Por outro lado, vale destacar que o seu desempenho no indicador *Fill Rate* é muito próximo do melhor desempenho observado – alcançado pelo MTA Sem CP – e o obtém com menos FGI e menos WIP do que o MTA Sem CP, porém, com um TR um pouco superior. Da mesma forma, ainda que a ausência do GP reduza significativamente FGI e WIP, seu desempenho em termos de *Fill rate* é inferior ao do MTA.

Figura 56 - Resumo dos Indicadores de Desempenho no Cenário 1



No Quadro 3 está a classificação do desempenho em cada indicador no Cenário 1.

Quadro 3 – Classificação no Cenário 1

Posição	FR	FGI	WIP	TR
1	Sem CP	Sem GP	Sem GP	Sem GP
2	MTA	MTA	Sem Priorização	Sem Priorização
3	Sem Priorização	Sem CP	MTA	Sem CP
4	Sem GP	Sem Priorização	Sem CP	MTA

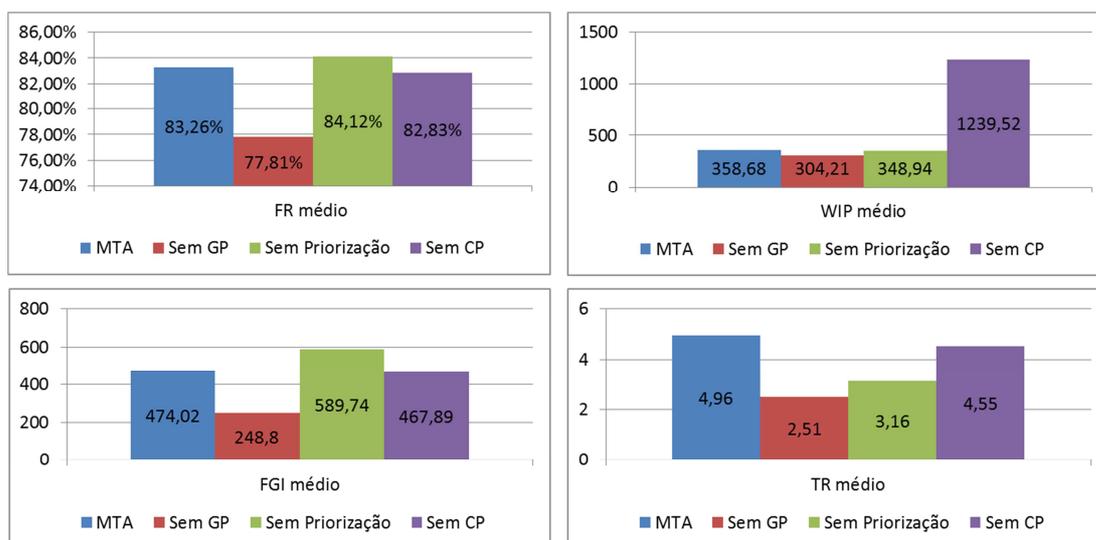
Fonte: Autor

A Figura 57 resume os resultados do Cenário 2 – demanda com pico – e mostra que o MTA Sem Priorização obteve o melhor *Fill Rate* médio, porém, com uma diferença de apenas 0,86% em relação ao MTA, necessitando ainda de menos FGI para manter a disponibilidade. O MTA Sem GP apresentou melhor desempenho nos indicadores FGI médio, WIP médio e TR médio, mas seu *Fill Rate* foi 7,5 % pior que a derivação Sem Priorização. Por outro lado,

se o *Fill Rate* foi 7,5% pior, a quantidade de estoque total mantida por esta derivação foi cerca 41% menor que a quantidade média mantida pelo MTA Sem Priorização. Esse fato mostra que o Gerenciamento do Pulmão, neste cenário, aumenta o estoque no sistema (WIP+FGI), mas não aumenta o nível de serviço na mesma proporção.

Em relação ao sistema MTA, registra-se que ele obteve um *Fill Rate* muito próximo do melhor caso encontrado, e o fez com cerca de 11% menos de estoque total (WIP mais FGI) no sistema. Se comparado com a derivação Sem CP, o MTA obtém um *Fill Rate* um pouco melhor e com menos da metade da quantidade total de estoque no sistema. Por outro lado, quando comprado com a derivação Sem GP, tal quantidade de estoque no sistema é quase 51% maior que a observada na derivação Sem GP, mas seu *Fill Rate* é também maior, em 7%.

Figura 57 - Resumo dos Indicadores de Desempenho no Cenário 2



No Quadro 4 está a classificação do desempenho em cada indicador no Cenário 2.

Quadro 4 – Classificação no Cenário 2

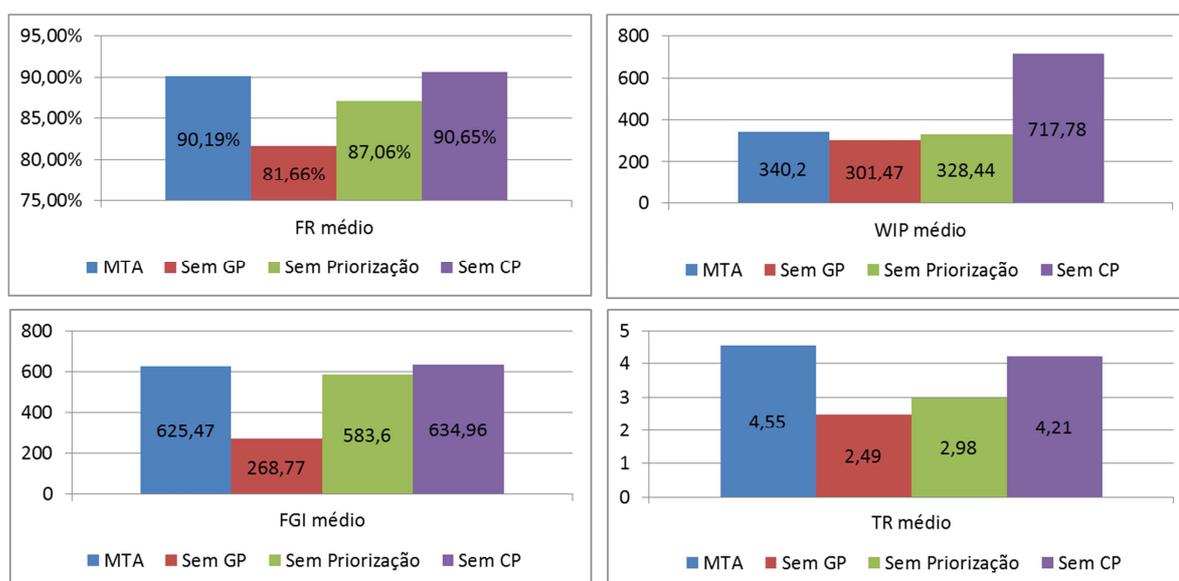
Posição	FR	FGI	WIP	TR
1	Sem Priorização	Sem GP	Sem GP	Sem GP
2	MTA	Sem CP	Sem Priorização	Sem Priorização
3	Sem CP	MTA	MTA	Sem CP
4	Sem GP	Sem Priorização	Sem CP	MTA

Fonte: Autor

No Cenário 3, em termos gerais, o MTA Sem CP obteve o melhor *Fill Rate*, porém, com uma diferença de apenas 0,45% em relação ao MTA, precisando de 1,52% a mais de FGI para manter a disponibilidade. O MTA Sem GP apresentou o melhor desempenho nos indicadores FGI, WIP e TR, mas seu *Fill Rate* foi o pior, com uma diferença de 8,54% em relação ao melhor caso. Porém, a diferença na quantidade estoque foi bem maior: 57% a menos de FGI e 11% a menos de WIP. Novamente, os resultados mostram que o Gerenciamento do Pulmão aumenta o estoque total no sistema (WIP mais FGI), mas não aumenta o nível de serviço na mesma proporção. O MTA não obteve o melhor resultado em nenhum dos indicadores de desempenho, como mostra a Figura 58, que resume os resultados. Sendo assim, a hipótese 3 da pesquisa não pode ser aceita.

Assim como feito nos cenários 1 e 2, vale ressaltar que o sistema MTA obteve um desempenho apenas um pouco inferior (0,51%) ao melhor caso (Sem CP), mas o alcançou com quase 29% a menos de estoque total no sistema (FGI mais WIP). O sistema MTA Sem GP trabalha com baixos níveis de estoque no sistema quando comparado com o MTA (41% a menos), mas ao custo de um *Fill Rate* 9,5% menor. O sistema MTA Sem Priorização é um caso intermediário, com diferença menor em termos de Fill Rate (3,5% menor que o sistema MTA), mas a um custo também menor (5,6%) em termos de estoque total no sistema.

Figura 58 - Resumo dos Indicadores de Desempenho no Cenário 3



No Quadro 5 está a classificação do desempenho em cada indicador no Cenário 3.

Quadro 5 – Classificação no Cenário 3

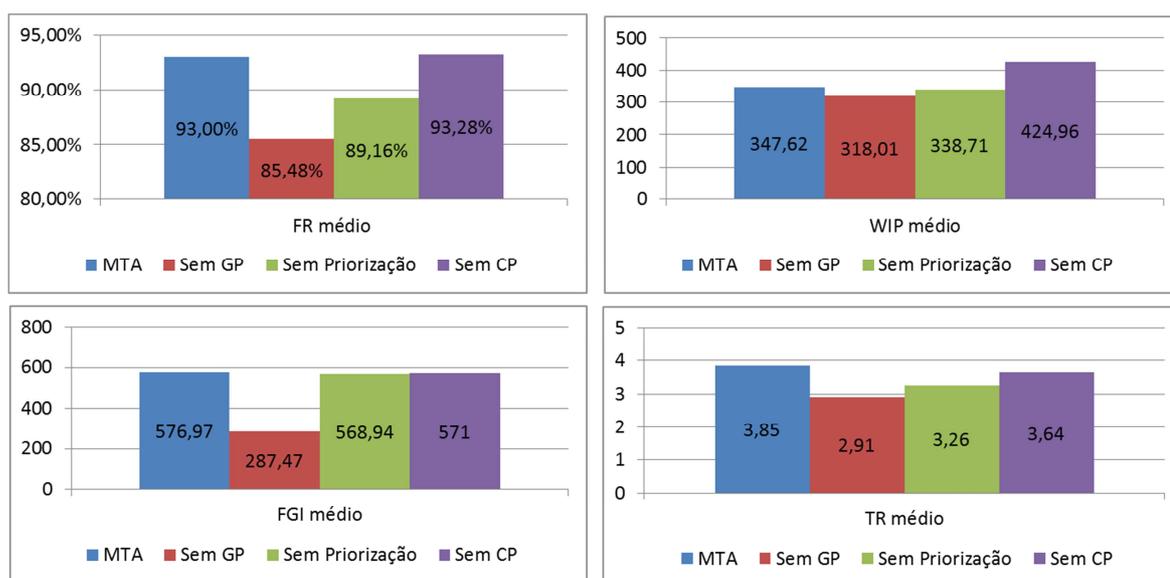
Posição	FR	FGI	WIP	TR
1	Sem CP	Sem GP	Sem GP	Sem GP
2	MTA	Sem Priorização	Sem Priorização	Sem Priorização
3	Sem Priorização	MTA	MTA	Sem CP
4	Sem GP	Sem CP	Sem CP	MTA

Fonte: Autor

A Figura 59 resume os resultados do cenário 4 e mostra que o MTA não obteve o melhor desempenho em nenhum dos indicadores. O melhor *Fill Rate* ficou com MTA Sem CP e o melhor resultado em FGI, WIP e TR foi alcançado pelo MTA Sem GP. Portanto, a hipótese de pesquisa número 4 também não pode ser aceita.

Vale, novamente, complementar a análise observando que, em termos do indicador *Fill Rate*, o MTA obtém um desempenho bastante próximo do MTA Sem CP, melhor desempenho alcançado entre todos. Ainda que o nível de WIP no MTA Sem CP seja também menor quando comparado com o MTA, quando se considera o estoque total no sistema (WIP mais FGI), o sistema MTA faz uso de 7,2% menos estoque total (924,59) que o sistema MTA Sem CP (995,96). A ausência de GP e de um sistema de priorização reduz WIP, FGI e TR, mas paga um preço por apresentar um nível de serviço (*Fill Rate*) significativamente menor.

Figura 59 - Resumo dos Indicadores de Desempenho no Cenário 4



No Quadro 6 está a classificação do desempenho no Cenário 4.

Quadro 6 – Classificação no Cenário 4

Posição	FR	FGI	WIP	TR
1	Sem CP	Sem GP	Sem GP	Sem GP
2	MTA	Sem Priorização	Sem Priorização	Sem Priorização
3	Sem Priorização	Sem CP	MTA	Sem CP
4	Sem GP	MTA	Sem CP	MTA

Fonte: Autor

5 CONCLUSÕES

O sistema MTA é a forma recomendada pela TOC para se obter uma vantagem competitiva decisiva em ambientes MTS que valorizam entregas imediatas e confiáveis, ou de outra forma, em ambientes em que clientes obtêm ganhos importantes em manter relações com fornecedores com elevados níveis de serviço (*fill rate*). Apesar dos primeiros trabalhos publicados a respeito datarem de 2002 (SCHRAGENHEIM, 2002), não foram encontrados até o momento pesquisas voltadas a melhor compreender tal sistema e as técnicas que o compõem. Motivada por esta realidade, o presente trabalho visou avaliar o comportamento do sistema MTA em quatro cenários distintos, assim como o seu comportamento na ausência de algumas de suas técnicas, quais sejam, gerenciamento do pulmão, carga planejada e prioridades segundo o status do pulmão. Neste sentido, a pesquisa cumpriu com os objetivos estabelecidos, pois, além de avaliar o MTA e suas técnicas, também conseguiu destacar sua importância e propósito, identificando sua relevância na manutenção da disponibilidade de produtos acabados e influência no indicador *Fill Rate*. Ademais, a revisão da literatura sobre o sistema MTA, apresentada neste trabalho, pode tornar a abordagem mais próxima da comunidade científica da Engenharia de Produção e outras áreas que tenham interesse em estudá-la.

Quatro hipóteses foram testadas na pesquisa:

- 1) Para uma demanda com média constante, o MTA alcança melhor desempenho nas medidas WIP, FGI, Tempo de Reposição e *Fill Rate* comparado à suas derivações.
- 2) Havendo um pico de demanda, o MTA alcança melhor desempenho nas medidas WIP, FGI, Tempo de Reposição e *Fill Rate* quando comparado à suas à suas derivações.
- 3) Diante de uma demanda sazonal, o MTA alcança melhor desempenho nas medidas WIP, FGI, Tempo de Reposição e *Fill Rate*, quando comparado à suas derivações.
- 4) Em situações onde há aumento na variabilidade dos tempos processamento, o MTA alcança melhor desempenho nas medidas WIP, FGI, Tempo de Reposição e *Fill Rate* quando comparado à suas derivações.

Nenhuma das hipóteses levantadas foi comprovada, uma vez que o MTA não apresentou melhor desempenho em nenhum dos indicadores, em nenhum dos quatro cenários avaliados. A ausência de alguma técnica (Gerenciamento do Pulmão, Carga Planeja e sistema de Prioridade segundo o status do pulmão) sempre favoreceu algum indicador (WIP, FGI, TR

ou *Fill Rate*). Por outro lado, o favorecimento em um indicador sempre veio às custas de outro, caracterizando um típico *trade-off*. De forma resumida, pode-se dizer que:

- A ausência da técnica Carga Planejada possibilita pequenos ganhos em termos de *Fill Rate*, mas a um custo muito alto de estoque total no sistema (WIP mais FGI). Sua presença, portanto, ajuda a manter níveis mais baixos de estoques. Liberar mais material à linha de produção a uma taxa maior do que a taxa de processamento do RRC só fez aumentar o estoque em processo, mas não a disponibilidade de produtos acabados. O estoque em processo exige espaço para armazená-lo e seu aumento faz com que esse espaço diminua, podendo causar até o bloqueio da produção se ocupado totalmente. OPs aguardando do lado de fora da linha de produção oferecem flexibilidade quanto a eventuais mudanças no pedido e permitem seu cancelamento, quando necessário, sem prejuízos com processamentos já realizados. Ademais, fábricas muito congestionadas podem levar os gestores a mudar seu esquema de prioridades, dando mais atenção a questões locais (visando reduzir os estoques em um determinado setor, por exemplo) e menos a questões globais (como aumentar o fluxo de produtos, por exemplo). O limite de carga sobre o RRC é de 80% do Tempo de Reposição médio, que é de três dias – conforme descrito na seção 3.2.1. Esse parâmetro se mostrou adequado para o modelo simulado, mas não se sabe se é adequado para linhas onde o RRC é mais a jusante ou a montante, ou ainda quando o RRC se move de acordo com o mix de produtos das OPs. Essas questões devem ser estudadas em novos estudos;

- A ausência da técnica Gerenciamento do Pulmão reduz significativamente os estoques no sistema, mas paga um preço relativamente alto em termos de redução no desempenho do indicador *Fill Rate*. Logo, sua presença mostra-se importante para manter bons níveis de *Fill Rate*. Não há como garantir que os estoques alvos iniciais oferecerão cem por cento de disponibilidade à demanda que está por vir. Mudanças inesperadas na demanda podem ocorrer fazendo com que haja falta ou excesso de estoque de produtos acabados. Esse é apenas um dos exemplos que demonstra a importância do Gerenciamento do Pulmão. Ele reage às variações no sistema, tanto no fornecimento, quanto na demanda, ajustando os estoques alvos, em busca de garantir a disponibilidade, e também aumentando os níveis de estoque. Por isso, sua retirada melhora os resultados dos indicadores WIP e FGI, mas piora consequentemente o *Fill Rate*. Porém, diminuir o *Fill Rate* é algo ruim para o MTA, pois vai contra seu propósito. É evidente a necessidade de manter a técnica do GP, mas também novos estudos podem ser desenvolvidos em busca de reduzir o estoque mantendo o mesmo *Fill Rate*;

- A ausência de um sistema de prioridades baseado nas cores do pulmão reduz marginalmente o nível de estoque no sistema, mas paga um pequeno preço em termos de redução de *Fill Rate*. Ainda que de forma moderada, sua presença ajuda a aumentar o *Fill Rate*. Algo que chamou a atenção, e é uma exceção a essa constatação, foi o resultado sobre o *Fill Rate* do cenário 2 para a derivação sem priorização, que obteve melhor desempenho com relação ao MTA. A resposta para essa questão não surgiu nas análises deste trabalho, mas é algo que merece ser estudado em trabalhos futuros. Uma possível explicação é que, quando a disponibilidade está baixa para todos os produtos, muitas OPs estão na região vermelha e com grande prioridade. Isso foi o que aconteceu durante o pico de demanda no cenário 2. Quando há aumento na demanda, as filas e o tamanho das OPs que estão aguardando liberação também aumentam, pois, novas demandas ocorrem enquanto aguardam. O sistema de prioridades do MTA sequencia essas OPs colocando aquelas com a cor vermelha à frente daquelas com a cor amarela, da mesma maneira que as OPs de cor amarela passam à frente daquelas com a cor verde. Essa é uma ação que faz aumentar o Tempo de Reposição, visando garantir a disponibilidade de produtos com pulmões menores. O TR aumenta por dois motivos. Um deles é por conta do aumento do tempo em que a OP fica aguardando toda vez que ela é colocada para trás na fila de liberação. O outro motivo é por que quanto mais tempo elas aguardam para serem liberadas, maior será seu tamanho e conseqüentemente exigirá maior tempo para serem concluídas. O que ocorre neste caso é exatamente o contrário do que acontece quando é aplicada a disciplina de fila denominada SPT (*Shortest Process Time*). Essa disciplina prioriza as OPs com menor tempo de processamento, e assim faz diminuir o tempo de atravessamento pela linha de produção. A maneira de priorizar do MTA é contrária ao SPT, que ao invés de buscar diminuir o tempo de atravessamento, procura manter a disponibilidade priorizando a OP do produto com menor pulmão (portanto, com lotes maiores), ou estoque menores de produtos acabados.

Adicionalmente, vale lembrar que o sistema MTA é um compromisso com o mercado, ou com alguns clientes específicos, para manter uma disponibilidade boa o suficiente de produtos em um armazém específico, e assim ser capaz de entregar imediatamente, mediante pedido, todas às vezes (SCHRAGENHEIM, 2010b). Assim, parece evidente que, na perspectiva do sistema MTA, o principal indicador analisado é o *Fill Rate*, sendo que os demais podem ser entendidos como condicionadores. Os outros indicadores, portanto, são importantes por que a disponibilidade não pode ser mantida ao custo de níveis exagerados de estoque ou altos tempos de reposição, o que também elevam o estoque.

Nos cenários 1 e 4, com demanda média constante, o sistema MTA alcançou um *Fill Rate* melhor do que nos cenários 2 e 3. Isso confirma o que foi colocado na seção 1.2, que diz que o MTA lida melhor com demandas sem grandes picos ou sazonalidades. De fato, como discutido em Schragenheim (2010c), quando a demanda varia de forma muito aguda em um curto período de tempo, o Gerenciamento do Pulmão não consegue ajustar a tempo os níveis de estoque de produtos acabados, não permitindo preservar sua disponibilidade, prejudicando, assim, o *Fill Rate*. Ainda que a disponibilidade acabe sendo prejudicada, muitas outras ordens de produção são geradas como consequência do Gerenciamento do Pulmão, elevando a carga sobre os recursos – em especial sobre o RRC –, o que compromete a capacidade protetiva dos recursos e eleva o nível de WIP e o tempo de reposição. Com o aumento do tempo de reposição, o nível de estoque alvo aparenta ser insuficiente, provocando a liberação de mais ordens de produção, levando o sistema a um círculo vicioso. Em tais situações, conforme observado, todos os indicadores avaliados acabam sendo prejudicados. Como corolário, pode-se afirmar que a preservação de capacidade protetiva dos recursos produtivos é mesmo uma condição básica para o adequado funcionamento do sistema MTA.

Assim, conclui-se que, quando a demanda média aumenta de forma muito repentina ou significativamente, sobrecarregando o sistema, as técnicas avaliadas não são suficientes para manter sua eficiência e eficácia. Uma possível solução para este problema pode ser a adição de mais capacidade aos recursos com baixos níveis de capacidade protetiva. Sinais de tais baixos níveis podem ser obtidos observando-se a Carga Planejada no RRC, que começa a aumentar de forma ininterrupta, ou quando o tempo de reposição alcança um limite superior tolerável (SCHRAGENHEIM; DETTMER; PATTERSON, 2009; SCHRAGENHEIM, 2010b). Uma adequada gestão de capacidade poderia ajudar a dar vazão às Ordens de Produção que ficam aguardando liberação, além de reduzir ou manter estáveis os tempos de reposição. De qualquer forma, alterações nas capacidades disponíveis dos recursos não foram permitidas na presente pesquisa, devendo sua eventual relevância para o desempenho do sistema MTA ser devidamente abordada em pesquisas futuras.

Observou-se também que o Gerenciamento do Pulmão é mais ágil para aumentar o pulmão, mas não tanto para reduzi-lo, depois de havida uma queda na demanda. Isso pode ser causado pelas regras adotadas para os ajustes nos estoques alvos, regras estas, conforme recomendação de Sullivan, Reid e Cartier (2007), que são diferentes para cada situação e que aqui foram aplicadas. Por isso, no cenário com pico de demanda, os estoques alvos se mantêm altos mesmo depois que a demanda cai. Um novo trabalho poderia estudar melhor essa

questão e verificar se os estoques alvos podem ser diminuídos mais rapidamente se forem feitos ajustes nas regras adotadas para o Gerenciamento do Pulmão.

A técnica Gerenciamento do Pulmão foi a que apresentou maior redução nos estoques quando retirada. Pesquisas futuras podem estudar melhor seu comportamento e talvez encontrar uma forma de manter elevada disponibilidade com menos estoque, através de mudanças em suas regras de funcionamento.

Outros cenários podem ser simulados com base no modelo utilizado na pesquisa, como, por exemplo, mudando de lugar o RRC na linha de produção, colocando-o no início ou no fim da linha. Também pode ser simulado um cenário onde o RRC muda de posição conforme o mix de produtos em produção.

A avaliação feita sobre o MTA, na seção 4.1, deixa evidente que mesmo que o estoque alvo inicie com valor baixo, ele é elevado e alcança uma posição mais adequada para manter a disponibilidade, depois de feitos alguns ajustes pelo Gerenciamento do Pulmão. É por isso que, na seção 2.3.2, passo 1, há a recomendação de que o estoque alvo inicial não precisa ser exato, pois ele será ajustado no decorrer do tempo, de acordo com as variabilidades ocorridas no sistema. Da mesma maneira, o fator de segurança aplicado no cálculo do estoque alvo inicial também não necessita ser preciso.

Os cenários 2 e 3, com pico de demanda e sazonalidade, mostraram ser mais críticos para o MTA, pois houve uma queda no *Fill Rate* com relação aos cenários 1 e 4 – com demanda média constante. Nestes casos, a pesquisa mostrou que é difícil manter a disponibilidade e, portanto, ações que vão além do uso de suas técnicas podem ser necessárias. Essas são importantes observações para as empresas que pretendem implantar o MTA, pois, elas devem estar cientes que em algum momento podem precisar de ações adicionais ou ferramentas que não fazem parte do escopo desta abordagem. Esta conclusão também reforça a mensagem dada por Schragenheim (2010c), que recomenda desligar – e posteriormente ligar – o Gerenciamento do Pulmão em alguns momentos específicos quando tais situações são identificadas. Além do que, uma empresa pode enfrentar todas essas situações combinadas, onde um grupo de produtos pode ter sua demanda afetada, enquanto que outros grupos não.

Como um primeiro trabalho de investigação detalhada do sistema MTA, importantes conclusões foram alcançadas, mas há ainda, conforme dito, muitas questões abertas que merecem ser respondidas em trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARENALES, Marcos; ARMENTANO, Vinicius; MORABITO, Reinaldo. **Pesquisa operacional: para cursos de engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.
- BARNARD, Alan. Continuous Improvement and Auditing. In: COX III, James; SCHLEIER, John. **Theory of Constraints Handbook**. New York: McGraw-Hill, p. 403-454, 2010.
- BENAVIDES, M. B.; VAN LANDEGHEM, H. Implementation of S-DBR in four manufacturing SMEs: a research case study. **Production Planning & Control: The Management of Operations**, v.26, n.13, p. 1110-1127, 2015.
- BRATLEY, Paul; FOX, Bennet L.; SCHRAGE, Linus E. **A guide to simulation**. Springer Science & Business Media, 2011.
- BROWN, Robert Goodell. **Statistical forecasting for inventory control**. New York: McGraw-Hill, 1959.
- BUDD, Charlene Spoede. Traditional measures in finance and accounting, problems, literature review, and TOC measures. In: COX III, James; SCHLEIER, John. **Theory of Constraints Handbook**. New York: McGraw-Hill, 2010, p. 335-371.
- CHAKRAVORTY, S. S.; HALES, D. N. Improving Labor Relations Performance Using A Simplified Drum Buffer Rope (S-DBR) Technique. **Production Planning & Control: The Management of Operations**, v.7, n.2, p. 102-113, 2016.
- COMEZ DOLGAN, Nagihan; TANYERI, Başak. Inventory Performance with Pooling: Evidence from Mergers and Acquisitions. **International Journal of Production Economics**, V. 168, p. 331-339, 2015.
- CORRÊA, Henrique Luiz; CORRÊA, Carlos Alberto. **Administração de produção e operações: manufatura e serviços: uma abordagem estratégica**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2010.
- DETTMER, H. William. Constraint Management. **The Complete Guide to the CQM**, p. 1-27, 2000.
- FERNANDES, Flávio Cesar Faria; GODINHO FILHO, Moacir. Sistemas de coordenação de ordens: revisão, classificação, funcionamento e aplicabilidade. **Revista Gestão & Produção**, São Carlos, v. 14, n. 2, 2007.
- GAVIRA, Muriel de Oliveira. **Simulação computacional como uma ferramenta de aquisição de conhecimento**. 2003. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Carlos.
- GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. São Paulo: Atlas, 1999.
- GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

GODINHO FILHO, Moacir; UTIYAMA, Marcel Heimar Ribeiro. Comparing different strategies for the allocation of improvement programmes in a flow shop environment. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 77, n. 5-8, p. 1365-1385, 2015.

GOLDRATT, Eliyahu. M.; FOX, Robert E. **A corrida pela vantagem competitiva**. São Paulo: Educator, 1992.

GOLDRATT, Eliyahu M.; COX, Jeff. **A meta: um processo de melhoria contínua**. São Paulo: Nobel, 2003.

GOLDRATT, Eliyahu M. Moving from Make to Stock (MTS) to Make to Availability (MTA)-GST MTA. **Roelofarendsveen: Goldratt Marketing Group, 2009b. Série Goldratt Webcast. Disponível em vídeo**. 2009.

GOLDRATT, Eliyahu M. Introduction to TOC – My Perspective. In: COX III, James; SCHLEIER, John. **Theory of constraints handbook**. New York: McGraw-Hill, 2010. Cap. 1, p. 3-9.

GONZALEZ-R, Pedro L.; FRAMINAN, Jose M.; RUIZ-USANO, Rafael. A multi-objective comparison of dispatching rules in a drum–buffer–rope production control system. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 23, n. 2, p. 155-167, 2010.

GUPTA, M. ; SNYDER, D.;Comparing TOC with MRP and JIT: a literature review. **International Journal of Production Research**, v. 47, n. 13, p.3705-3739, 2010

HARREL, Charles R.; GHOSH, Biman K.; BOWDEN, Royce. **Simulation Using ProModel**. McGraw-Hill, 2000.

HARROD, Steven; KANET, John J. Applying work flow control in make-to-order job shops. **International Journal of Production Economics**, v. 143, n. 2, p. 620-626, 2013.

HERER, Y. T.; MASIN, M. Mathematical programming formulation of CONWIP based production lines; and relationships to MRP. **International Journal of Production Research**, v. 35, n. 4, p. 1067-1076, 1997.

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

HOPP, Wallace J.; SPEARMAN , Mark L. **Factory Physics Second Edition**. New York : Mc-Graw-Hill, 2000.

HOSSEINPOUR, F.; HAJIHOSSEINI, H. Importance of simulation in manufacturing. **World Academy of Science, Engineering and Technology**, v. 51, p. 285-288, 2009.

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

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

KADIPASAOGLU, Sukran N. et al. A study on the effect of the extent and location of protective capacity in flow systems. **International Journal of Production Economics**, v. 63, n. 3, p. 217-228, 2000.

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

KELTON, W. David; LAW, Averill M. **Simulation modeling and analysis**. Boston: McGraw Hill, 2000.

KHOJASTEH-GHAMARI, Yaghoub. Developing a framework for performance analysis of a production process controlled by Kanban and CONWIP. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 23, n. 1, p. 61-71, 2012.

KIM, Seonmin; ROSCOE DAVIS, K.; COX III, James F. An investigation of output flow control, bottleneck flow control and dynamic flow control mechanisms in various simple lines scenarios. **Production Planning & Control**, v. 14, n. 1, p. 15-32, 2003.

LAVOIE, P.; GHARBI, A.; KENNE, J.-P. A comparative study of pull control mechanisms for unreliable homogenous transfer lines. **International Journal of Production Economics**, v. 124, n. 1, p. 241-251, 2010.

LAW, Averill M.; MCCOMAS, Michael G. Simulation of manufacturing systems. In: **Proceedings of the 19th conference on Winter simulation**. ACM, 1987. p. 631-643.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Fundamentos de metodologia científica**. São Paulo: Atlas, 1993.

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

LEVINE, David M.; BERENSON, Mark L.; STEPHAN, David F.; KREHBIEL, Thimoty C. Estatística: teoria e aplicações. **Usando o Microsoft Excel em português**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

MANIKAS, Andrew; GUPTA, Mahesh; BOYD, Lynn. Experiential exercises with four production planning and control systems. **International Journal of Production Research**, v. 53, n. 14, p. 1-12, 2014.

MARTINS, Roberto Antonio. Abordagens Quantitativa e Qualitativa. In: MIGUEL, Paulo Augusto Cauchick et al. **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010. Cap. 3, p. 47-61.

MOURTZIS, Dimitris et al. The role of simulation in digital manufacturing: applications and outlook. **International journal of computer integrated manufacturing**, v. 28, n. 1, p. 3-24, 2015.

NEELY, Andy; GREGORY, Mike; PLATTS, Ken. Performance measurement system design: a literature review and research agenda. **International journal of operations & production management**, v. 25, n. 12, p. 1228-1263, 2005.

NG, Amos HC; BERNEDIXEN, Jacob; SYBERFELDT, Anna. A comparative study of production control mechanisms using simulation-based multi-objective optimisation. **International Journal of Production Research**, v. 50, n. 2, p. 359-377, 2012.

O'KANE, J. F.; SPENCELEY, J. R.; TAYLOR, R. Simulation as an essential tool for advanced manufacturing technology problems. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 107, n. 1, p. 412-424, 2000.

PAYNE, S.; SLACK, N.; WILD, R. A note on the operating characteristics of 'balanced' and 'unbalanced' production flow lines. **International Journal of Production Research**, v. 10, n. 1, p. 93-98, 1972.

PEREIRA, Ivan Costa. **Proposta de sistematização da simulação para fabricação em lotes**. 2000, Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

SCHRAGENHEIM, Eli; DETTMER, H. William. **Manufacturing at warp speed: optimizing supply chain financial performance**. CRC Press, 2000a.

SCHRAGENHEIM, Eli; DETTMER, H. William. **Simplified Drum-Buffer-Rope A Whole System Approach to High Velocity Manufacturing**. Goal Systems International, 2000b.

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

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

SCHRAGENHEIM, Eli. From DBR to Simplified-DBR for Make-to-Order. In: COX III, James; SCHLEIER, John. **Theory of Constraints Handbook**. New York: McGraw-Hill, 2010a. p. 211-238.

SCHRAGENHEIM, Eli. Managing Make-to-Stock and the Concept of Make-to-Availability. In: COX III, James; SCHLEIER, John. **Theory of Constraints Handbook**. New York: McGraw-Hill, 2010b. p. 239-264.

SCHRAGENHEIM, Amir. Supply Chain Management. In: COX III, James; SCHLEIER, John. **Theory of Constraints Handbook**. New York: McGraw-Hill, 2010c. p. 265-301.

SHARMA, Sanjay; AGRAWAL, Narayan. Selection of a pull production control policy under different demand situations for a manufacturing system by AHP-algorithm. **Computers & Operations Research**, v. 36, n. 5, p. 1622-1632, 2009.

SILVER, Edward; PYKE, David F.; PETERSON, Rein. Inventory management and production planning and scheduling. New York: Wiley, 1998.

SLACK, Nigel; CHAMBERS, Stuart; JOHNSTON, Robert. **Administração da produção**. Atlas, 2009.

SOUZA, Fernando Bernardi de; BAPTISTA, Humberto Rossetti. Proposta de avanço para o método Tambor-Pulmão-Corda Simplificado aplicado em ambientes de produção sob encomenda. **Gestão & Produção**, v. 17, n. 4, p. 735-746, 2010.

SOUZA, Fernando Bernardi De; PIRES, Silvio Roberto Ignácio. Produzindo para disponibilidade: uma aplicação da Teoria das Restrições em ambientes de produção para estoque. **Gestão & Produção**, v. 21, n. 1, p. 65-76, 2014.

SRIKANTH, M. L. DBR, buffer management, and VATI flow classification. In: COX III, James; SCHLEIER, John. **Theory of Constraints Handbook**. New York: McGraw-Hill, 2010, p. 175-210.

STRACK, Jair. **GPSS: modelagem e simulação de sistemas**. Rio de Janeiro: LTC, 1984.

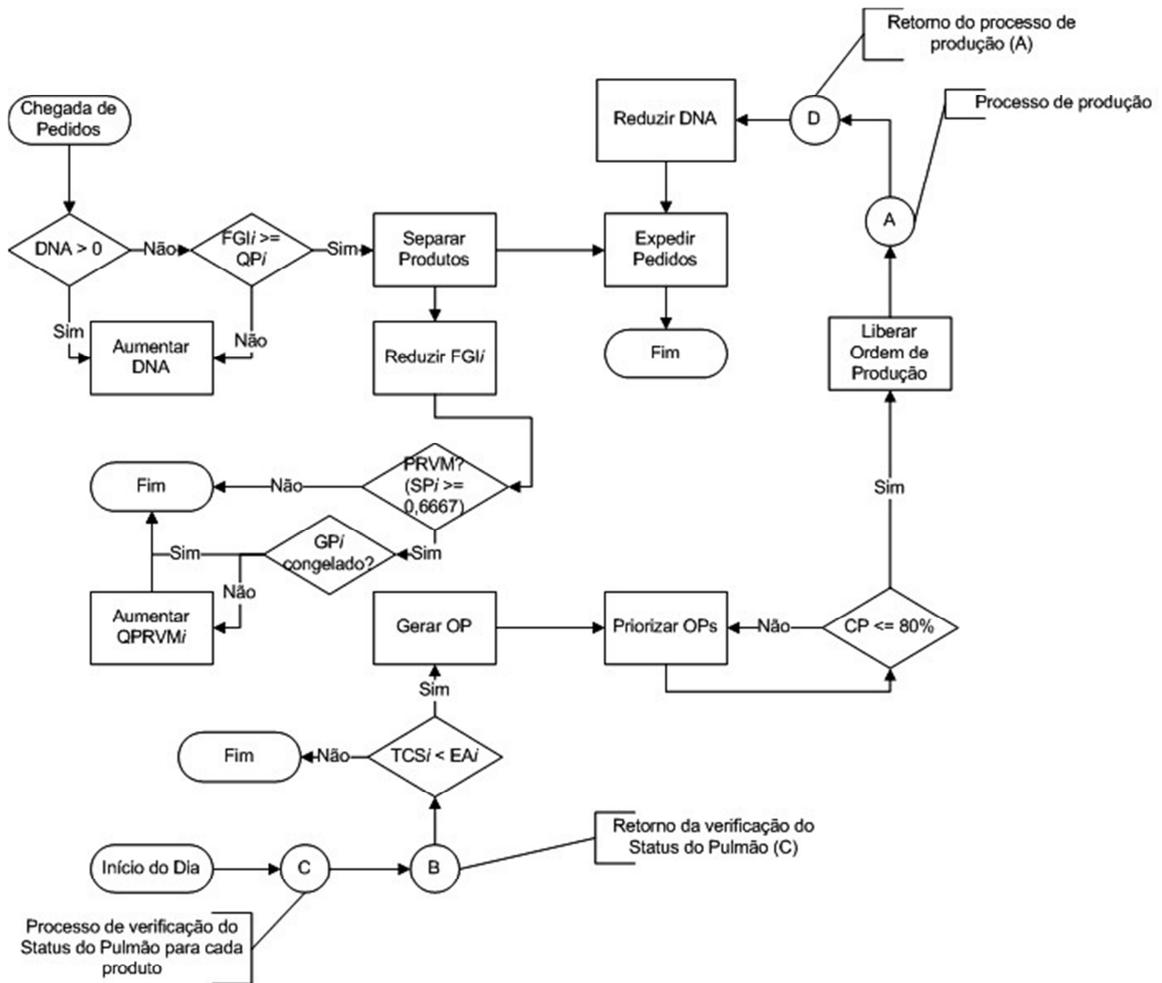
SULLIVAN, Timothy T.; REID, Richard A.; CARTIER, Brad. **The TOCICO Dictionary**. 2007.

TAKAHASHI, Katsuhiko; MORIKAWA, Katsumi; CHEN, Ying-Chuan. Comparing kanban control with the theory of constraints using Markov chains. **International Journal of Production Research**, v. 45, n. 16, p. 3599-3617, 2007.

WANG, Q.; CHATWIN, C. R. Key issues and developments in modelling and simulation-based methodologies for manufacturing systems analysis, design and performance evaluation. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 25, n. 11-12, p. 1254-1265, 2005.

WATSON, Kevin; POLITO, Tony. Comparison of DRP and TOC financial performance within a multi-product, multi-echelon physical distribution environment. **International Journal of Production Research**, v. 41, n. 4, p. 741-765, 2003.

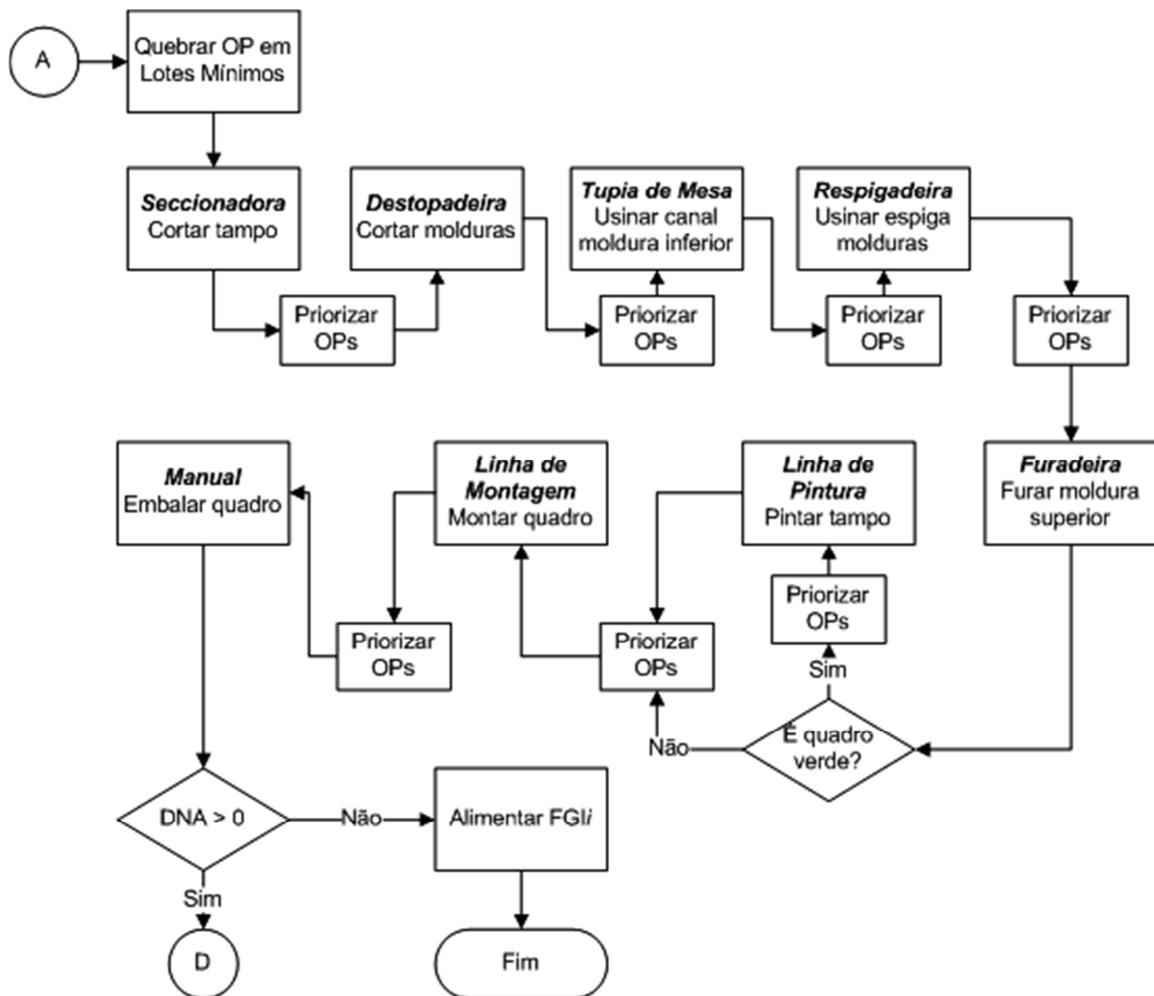
APÊNDICE A – Modelagem do MTA



LM = Lote mínimo de produção
 OP = Ordens de produção
 FGI = FGI de determinado produto
 EAi = Estoque Alvo de determinado produto
 SPi = Status do Pulmão de determinado produto
 TCSi = Total Current Stock (FGI + WIPi)
 QPi = Quantidade de Itens do Pedido de determinado produto
 DNA = Demanda Não Atendida
 PRVM = Houve penetração na região vermelha?

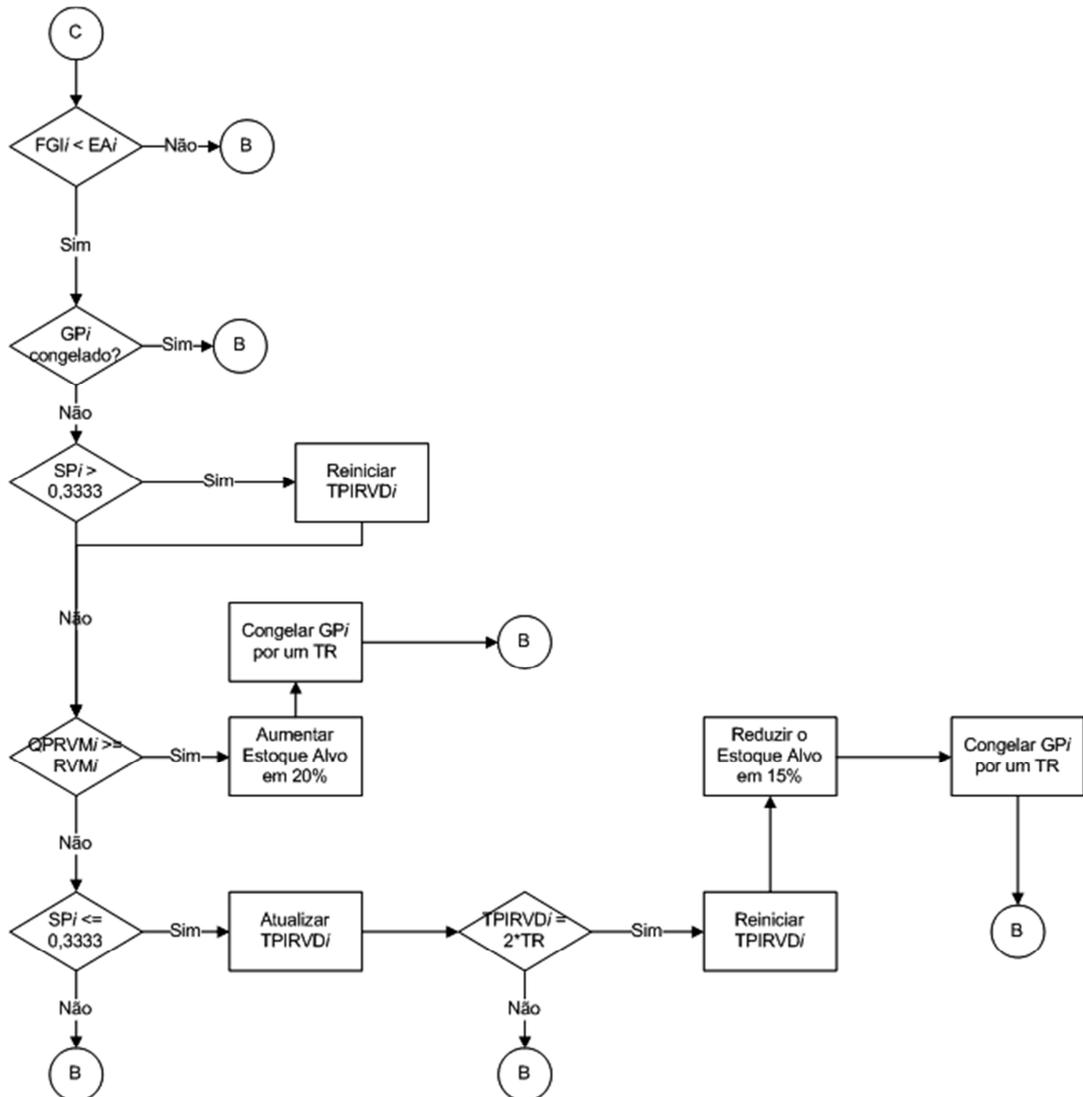
Continua...

Continuação...



Continua...

Continuação...



TPIRVD_i = Tempo de permanência ininterrupta na região verde
 TR = Tempo de Reposição
 QPRVM_i = Unidades penetradas na região vermelha em um tempo de reposição de um determinado produto
 SP_i = Status do Pulmão de determinado produto
 EA_i = Estoque Alvo de determinado produto
 RVM_i = Tamanho da Região vermelha em unidades

APÊNDICE B – Dados da Validação do Sistema Real

Os tempos de processamento colocados na Tabela 54 e Tabela 55 foram utilizados apenas na validação e não na simulação dos cenários. Uma máscara foi aplicada aos tempos de processamento reais para se chegar a esses números, especialmente para a validação diferente da máscara aplicada para a simulação dos cenários.

Tabela 54 – Tempos de processamentos para os quadros brancos (horas)

	Códigos dos Produtos				Total
	8164	8166	8167	8168	
Seccionadora	0,0377	0,0440	0,0543	0,0770	0,2130
Destopadeira	0,0462	0,0525	0,0525	0,0653	0,2165
Tupia de Mesa	0,0500	0,0500	0,0500	0,0500	0,2001
Respigadeira	0,0462	0,0462	0,0462	0,0462	0,1847
Furadeira	0,0600	0,0600	0,0600	0,0600	0,2401
Linha de Montagem	0,0491	0,0491	0,0561	0,0561	0,2103
Embalagem	0,0487	0,0422	0,0487	0,0548	0,1945
Inspeção	0,0494	0,0494	0,0494	0,0494	0,1974
Total	0,3873	0,3933	0,4172	0,4588	

Fonte: Autor

Tabela 55 – Tempos de processamentos para os quadros verdes (horas)

	Produtos				Total
	8175	8177	8178	8180	
Seccionadora	0,0377	0,0440	0,0543	0,0770	0,2130
Destopadeira	0,0462	0,0525	0,0525	0,0653	0,2165
Tupia de Mesa	0,0500	0,0500	0,0500	0,0500	0,2001
Respigadeira	0,0462	0,0462	0,0462	0,0462	0,1847
Furadeira	0,0600	0,0600	0,0600	0,0600	0,2401
Linha de Pintura	0,0621	0,1168	0,1291	0,2337	0,5417
Linha de Montagem	0,0491	0,0491	0,0561	0,0561	0,2103
Embalagem	0,0487	0,0422	0,0487	0,0548	0,1945
Inspeção	0,0494	0,0494	0,0494	0,0494	0,1974
Total	0,4494	0,5101	0,5464	0,6924	

Fonte: Autor

Para se chegar aos tempos entre chegadas dos itens, multiplicou-se a demanda real diária por uma máscara. O resultado foi dividido por 8 horas – um dia de trabalho – e chegou-se nos valores da Tabela 56.

Tabela 56 – Tempo médio entre chegadas dos itens

Código do Quadro	Tempo entre chegadas (horas)
8164	1,1569
8166	0,6171
8167	0,7357
8168	0,5593
8175	0,8965
8177	0,9803
8178	0,4964
8180	0,6930

Fonte: Autor

Quadro 7 – Parâmetros para a variabilidade do sistema real

Variável	Função de Distribuição	Parâmetros da Função
Tempo entre chegadas dos pedidos	Exponencial	Para se chegar aos tempos entre chegadas dos itens, multiplicou-se a demanda real diária por uma máscara. O resultado foi dividido por 8 horas – um dia de trabalho – e chegou-se nos valores da Tabela 56.
Tempo de processamento	Exponencial	Tabela 54 e Tabela 55

Fonte: Autor