

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

CLARISSA FULLIN BARCO

**O EFEITO DO TAMANHO DO LOTE DE TRANSFERÊNCIA
NO *LEAD TIME* EM UM AMBIENTE *FLOW SHOP*: UMA
ANÁLISE QUANTITATIVA**

TESE DE DOUTORADO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**O EFEITO DO TAMANHO DO LOTE DE
TRANSFERÊNCIA NO *LEAD TIME* EM UM
AMBIENTE *FLOW SHOP*: UMA ANÁLISE
QUANTITATIVA**

CLARISSA FULLIN BARCO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutora em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Planejamento e Controle de Sistemas Produtivos.

ORIENTADOR: PROF. DR. MOACIR GODINHO FILHO

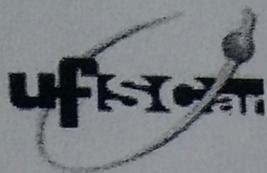
**SÃO CARLOS
2016**

Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da Biblioteca Comunitária UFSCar
Processamento Técnico
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

B242e Barco , Clarissa Fullin
O efeito do tamanho do lote de transferência no
lead time em um ambiente flow shop: uma análise
quantitativa / Clarissa Fullin Barco . -- São Carlos
: UFSCar, 2016.
161 p.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São
Carlos, 2016.

1. Lead time. 2. Lote de transferência . 3.
Factory Physics. 4. Flow shop . 5. Gargalo. I. Título.

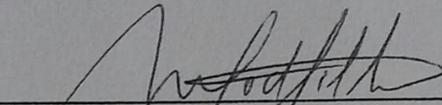


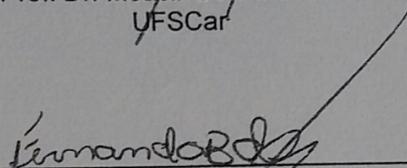
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

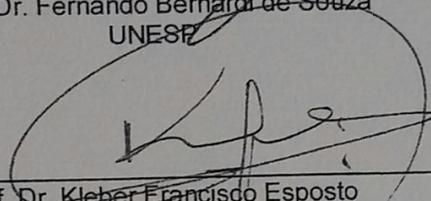
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

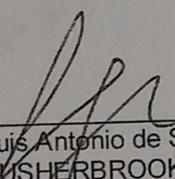
Folha de Aprovação

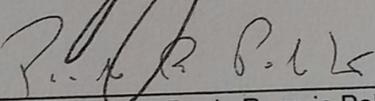
Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Tese de Doutorado da candidata Clarissa Fullin Barco, realizada em 14/10/2016:

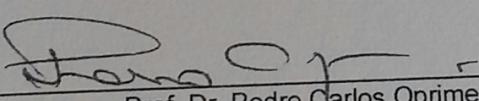

Prof. Dr. Moacir Godinho Filho
UFSCar


Prof. Dr. Fernando Bernardi de Souza
UNESP


Prof. Dr. Kleber Francisco Esposto
USP


Prof. Dr. Luis Antonio de Santa Eulalia
USHERBROOKE


Prof. Dr. Paulo Rogerio Politano
UFSCar


Prof. Dr. Pedro Carlos Oprime
UFSCar

RESUMO

Esta tese se propõe a avaliar o efeito do tamanho do lote de transferência na redução do *lead time* em ambientes *flow shop* (balanceado e não balanceado, com a presença de um recurso gargalo). Para atingir tal objetivo, foi utilizado como método de pesquisa o *Design Science*, no qual um modelo de simulação estático é proposto e diversos cenários são analisados e avaliados em relação a grandes teorias da Gestão da Produção. O modelo aqui proposto para representar um *flow shop* utiliza as equações do *Factory Physics* (HOPP; SPEARMAN, 2008) e considera as seguintes variáveis de chão-de-fábrica: i) tempo médio de *setup*; ii) taxa média de defeitos; iii) tempo médio entre falhas; iv) tempo médio de reparo da máquina; v) variabilidade do tempo de processamento; vi) variabilidade do tempo entre as chegadas de ordens e vii) tamanho do lote de transferência. Os resultados demonstram que tanto para um ambiente balanceado quanto para um ambiente desbalanceado, o tamanho do lote de transferência tem pouco efeito no *lead time*, quando se opera com um tamanho de lote de produção longe do tamanho de lote ótimo (ponto mínimo da curva *lead time* – tamanho de lote de produção, proposta por Karmarkar et al. (1985)). Para se obter um bom desempenho em relação ao *lead time*, é preciso primeiramente reduzir o tamanho do lote de produção, antes de se empreender esforços para a redução do lote de transferência. Em relação a um ambiente desbalanceado, a redução do tamanho do lote de produção apenas no recurso gargalo, aliada à redução do tamanho do lote de transferência em toda a linha, proporcionou uma redução no *lead time* da ordem de 30%, quando o restante da linha operava com grandes lotes de produção. Nessa configuração, a contribuição da redução do tempo de *setup* da máquina gargalo gerou um efeito pequeno na redução do *lead time*, para os parâmetros utilizados nesse trabalho.

Palavras-chave: *Lead time*, lote de transferência, *Factory Physics*, *flow shop*, gargalo.

ABSTRACT

This thesis proposes to evaluate the effect of transfer batch size on lead time reduction in flow shop environments (balanced and unbalanced, with a bottleneck). In order to achieve this objective, Design Science was used as a research method, in which a static simulation model is proposed and several scenarios are analyzed and evaluated in relation to important Production Management theories. The model proposed to represent a flow shop uses the Factory Physics equations (HOPP; SPEARMAN, 2008) e considers the following shop-floor variables: i) the average setup time; ii) average defect rate; iii) mean time between failures; iv) mean time to repair the machine; v) variability in processing time; vi) variability of the time between arrivals of orders and vii) transfer batch size. The results demonstrate that for both balanced and unbalanced environment, transfer batch size has little effect on lead time, when operating with a process batch size away from optimal batch size (minimum point of the lead time - lot size curve proposed by Karmarkar et al. (1985)). To get a good lead time performance, it is first necessary to reduce process batch size before making efforts to reduce transfer batch. For an unbalanced environment, reducing process batch size only at the bottleneck, coupled to transfer batch size reduction across the flow shop, provided a lead time reduction on the order of 30%, while the remainder flow shop operated with large process batches. In such configuration, the contribution from setup time reduction at the bottleneck machine has generated a small effect on the lead time performance considering the parameters used in this work.

Keywords: Lead time, transfer batch, Factory Physics, flow shop, bottleneck.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Moacir Godinho Filho, pela paciência, pelos ensinamentos, por ser uma inspiração para que eu seguisse a carreira de docente e pesquisadora e pela orientação desde a graduação.

Aos Professores Fernando Bernardi, Kleber Esposto, Paulo Politano, Pedro Oprime pelas valiosas contribuições à melhoria desse trabalho. Um agradecimento especial ao Professor Luis Antônio de Santa-Eulália, pelas contribuições a esse trabalho e por me receber com tanta hospitalidade na *Université de Sherbrooke*.

À CAPES pelo apoio financeiro a esta pesquisa. E também ao FRQNT (*Fonds de Recherche Nature et Technologies du Québec*) pelo apoio financeiro no período de doutorado-sanduíche no Canadá.

A todos os funcionários do DEP pela ajuda e solicitude. Sou grata também a todos os Professores do DEP que, de diferentes maneiras, muito contribuíram para minha formação.

Aos meus pais pela incansável dedicação, amor e paciência. Aos meus irmãos, pelo amor e apoio ao longo de toda a minha vida.

À Deus, pela oportunidade da vida.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1- DIAGRAMA QUE ILUSTRA OS FATORES QUE CONSTITUEM O MODELO GODINHO FILHO E UZSOY (2009).	28
FIGURA 2.2 - TRABALHOS QUE UTILIZAM A ABORDAGEM <i>FACTORY PHYSICS-SYSTEM DYNAMICS</i> NA REDUÇÃO DE <i>LEAD TIME</i>	29
FIGURA 2.3 - O SISTEMA TOYOTA DE PRODUÇÃO.....	32
FIGURA 2.4 - REPRESENTAÇÃO DE PARTE PRINCIPAL DO MODELO.....	49
FIGURA 2.5 - RECORTE DO MODELO GODINHO FILHO E UZSOY (2009), NO VENSIM - DETALHE DOS PARÂMETROS QUE IMPACTAM A TAXA MÉDIA DE CHEGADA E DAS VARIÁVEIS QUE SÃO IMPACTADAS POR ELA.....	50
FIGURA 2.6 - ESTRUTURA MODELADA EM SD PARA REPRESENTAR O MECANISMO DE MELHORIA NO TEMPO MÉDIO ATÉ A FALHA.....	51
FIGURA 2.7 - REPRESENTAÇÃO DOS RELACIONAMENTOS ENTRE AS VARIÁVEIS DE UM SISTEMA DE MÁQUINA ÚNICA, NO MODELO GODINHO FILHO E UZSOY (2009).	52
FIGURA 2.8 - ILUSTRAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE TAMANHO DE LOTE DE PRODUÇÃO E <i>LEAD TIME</i>	54
FIGURA 2.9 - FORMATO PADRÃO DE UMA CURVA DE OPERAÇÃO LOGÍSTICA.	57
FIGURA 3.1 - PRODUÇÃO DE 100 PEÇAS COM LOTE DE TRANSFERÊNCIA DE 100 PEÇAS.	64
FIGURA 3.2 - PRODUÇÃO DE 100 PEÇAS COM LOTE DE TRANSFERÊNCIA DE 50 PEÇAS.	64
FIGURA 3.3 - REPRESENTAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE: I) AS VARIÁVEIS TAXA DE ENTRADA E TAXA DE PARTIDA E II) COEFICIENTE DE VARIAÇÃO ENTRE PARTIDAS E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO ENTRE CHEGADAS.	73
FIGURA 3.4 - ILUSTRAÇÃO DA MODELAGEM PROPOSTA NO <i>SOFTWARE MAPLE 13</i>	77
FIGURA 3.5 - EFEITO DE 50% DE MELHORIA NA CURVA TAMANHO DE LOTE - <i>LEAD TIME</i>	80
FIGURA 3.6 - IMPACTO DOS PROGRAMAS DE GRANDES MELHORIAS NO <i>LEAD TIME</i> PARA UM TAMANHO DE LOTE DE 200 PEÇAS.....	81
FIGURA 3.7 - LOTE DE TRANSFERÊNCIA E LOTE DE PRODUÇÃO EM UMA LINHA COM CINCO ESTAÇÕES DE TRABALHO (ET).....	83
FIGURA 3.8 - ILUSTRAÇÃO DO MODELO DESENVOLVIDO NESTE TRABALHO COM O USO DO <i>SOFTWARE MAPLE 13</i> , CONSIDERANDO A VARIÁVEL K.	86

FIGURA 3.9 - CURVA LT- TL PARA DIFERENTES POLÍTICAS DE LOTE DE TRANSFERÊNCIA EM UM CENÁRIO DETERMINÍSTICO.....	90
FIGURA 3.10 - CURVA LT-TL PARA DIFERENTES POLÍTICAS DE LOTE DE TRANSFERÊNCIA NA FAIXA DO TAMANHO DO LOTE DE PRODUÇÃO ÓTIMO.	93
FIGURA 3.11 - CURVA LT-TL PARA DIFERENTES POLÍTICAS DE LOTE DE TRANSFERÊNCIA CONSIDERANDO QUE A DEMANDA SEGUE UMA DISTRIBUIÇÃO DE POISSON.	95
FIGURA 3.12 - CURVA LT-TL PARA DIFERENTES POLÍTICAS DE LOTE DE TRANSFERÊNCIA CONSIDERANDO QUE O TEMPO DE REPARO SEGUE UMA DISTRIBUIÇÃO LOGNORMAL.....	97
FIGURA 3.13 - CURVA LT-TL PARA DIFERENTES POLÍTICAS DE LOTE DE TRANSFERÊNCIA CONSIDERANDO QUE O TEMPO ENTRE FALHAS SEGUE UMA DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL.	99
FIGURA 4.1 - MECANISMO DE FUNCIONAMENTO NO CENÁRIO INICIAL. DESTAQUE PARA O RECURSO GARGALO (MÁQUINA 3).....	117
FIGURA 4.2 - MECANISMO DE FUNCIONAMENTO NO CENÁRIO 1.	123
FIGURA 4.3 - CURVAS LT X TL PARA O CENÁRIO 1.....	124
FIGURA 4.4 - MECANISMO DE FUNCIONAMENTO NO CENÁRIO 2.	125
FIGURA 4.5 - CURVA LT X TL PARA O CENÁRIO 2.....	126
FIGURA 4.6 - MECANISMO DE FUNCIONAMENTO NO CENÁRIO 3: ALTERAÇÕES NA MÁQUINA GARGALO E NA MÁQUINA ANTERIOR AO GARGALO (SITUAÇÃO 1).....	128
FIGURA 4.7 – MECANISMO DE FUNCIONAMENTO NO CENÁRIO 3: ALTERAÇÕES NA MÁQUINA GARGALO E NA MÁQUINA POSTERIOR AO GARGALO (SITUAÇÃO 2).....	129
FIGURA 4.8 - CURVA LT X TL PARA O CENÁRIO 3 – SITUAÇÃO 1	130
FIGURA 4.9 - CURVA LT X TL PARA O CENÁRIO 3 – SITUAÇÃO 2.	131
FIGURA 4.10 – CONFIGURAÇÃO ADOTADA NO CENÁRIO 4.....	134
FIGURA 4.11 - CURVA LT X TL PARA O CENÁRIO 4.....	135
FIGURA 4.12 - CONFIGURAÇÕES UTILIZADAS NO CENÁRIO 5. O TERMO TLG UTILIZADO NESTE CENÁRIO SIMBOLIZA O TAMANHO DO LOTE DE PRODUÇÃO APLICADO AO GARGALO.	137
FIGURA 4.13 - CURVAS LT X TL PARA AS SIMULAÇÕES TESTADAS NO CENÁRIO 5.....	138
FIGURA 4.14 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS CINCO CENÁRIOS TESTADOS, CONSIDERANDO O LOTE DE TRANSFERÊNCIA NA LINHA IGUAL A 30 PEÇAS.	141

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 - PARÂMETROS INICIAIS DO MODELO.....	79
TABELA 3.2 - VALORES DO <i>LEAD TIME</i> PARA OS PROGRAMAS DE MELHORIA APLICADOS NA LINHA DE PRODUÇÃO MODELADA.	81
TABELA 3.3 - VALORES DE ENTRADA UTILIZADOS PARA O CENÁRIO DETERMINÍSTICO.	89
TABELA 3.4 – VALORES OBTIDOS PARA O <i>LEAD TIME</i> EM CADA SIMULAÇÃO, EM FUNÇÃO DOS TAMANHOS DE LOTE DE PRODUÇÃO (TL) E DE TRANSFERÊNCIA (K).....	89
TABELA 3.5 – VALORES DO <i>LEAD TIME</i> OBTIDOS PARA TAMANHOS DE LOTE PRÓXIMOS AO VALOR MÍNIMO DA CURVA LT-TL.	92
TABELA 3.6 - VALORES DA MÉDIA DO <i>LEAD TIME</i> E DESVIO PADRÃO DE CEM SIMULAÇÕES REALIZADAS PARA AS 60 COMBINAÇÕES TL-K, CONSIDERANDO QUE A DEMANDA SEGUE UMA DISTRIBUIÇÃO DE POISSON.	94
TABELA 3.7 - VALORES DA MÉDIA DO <i>LEAD TIME</i> E DESVIO PADRÃO DAS CEM SIMULAÇÕES REALIZADAS PARA COMBINAÇÕES DE TL-K, CONSIDERANDO QUE O TEMPO DE REPARO SEGUE UMA DISTRIBUIÇÃO LOGNORMAL.	96
TABELA 3.8 - VALORES DA MÉDIA DO <i>LEAD TIME</i> E DESVIO PADRÃO DAS CEM SIMULAÇÕES REALIZADAS PARA COMBINAÇÕES DE TL-K, CONSIDERANDO QUE O TEMPO ENTRE FALHAS SEGUE UMA DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL.....	98
TABELA 3.9 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA PARA AS SIMULAÇÕES REALIZADAS NOS CENÁRIOS ESTOCÁSTICOS.	101
TABELA 4.1 - VALORES ADOTADOS PARA OS TEMPOS MÉDIOS DE PROCESSAMENTO DE CADA MÁQUINA (TPVET) E INTERVALO DE UTILIZAÇÃO (U) MEDIDOS EM CADA RECURSO.	120
TABELA 4.2 - VALORES DE ENTRADA UTILIZADOS NOS CENÁRIOS SIMULADOS.....	121
TABELA 4.3 - <i>LEAD TIME</i> TOTAL DA LINHA OBTIDO, NO CENÁRIO INICIAL, EM FUNÇÃO DOS TAMANHOS DOS LOTES DE TRANSFERÊNCIA E DE PRODUÇÃO.....	122
TABELA 4.4 - VALORES DOS <i>LEAD TIMES</i> OBTIDOS NO CENÁRIO 1. OS VALORES PERCENTUAIS SE REFEREM À DIFERENÇA ENTRE OS RESULTADOS DO CENÁRIO 1 E DO CENÁRIO INICIAL.	123

TABELA 4.5 – VALORES DOS <i>LEAD TIMES</i> OBTIDOS NO CENÁRIO 2. OS VALORES PERCENTUAIS SE REFEREM À DIFERENÇA ENTRE OS RESULTADOS DO CENÁRIO 2 E DO CENÁRIO INICIAL.	126
TABELA 4.6 - VALORES DOS <i>LEAD TIMES</i> OBTIDOS NA SITUAÇÃO 1 DO CENÁRIO 3.	129
TABELA 4.7 - VALORES DOS <i>LEAD TIMES</i> OBTIDOS NA SITUAÇÃO 2 DO CENÁRIO 3.	130
TABELA 4.8 - VALORES DOS <i>LEAD TIMES</i> OBTIDOS NA SITUAÇÃO 1 DO CENÁRIO 3, CONSIDERANDO O MESMO NÍVEL DE UTILIZAÇÃO PARA AS MÁQUINAS NÃO GARGALO.....	132
TABELA 4.9 - VALORES DOS <i>LEAD TIMES</i> OBTIDOS NA SITUAÇÃO 2 DO CENÁRIO 3, CONSIDERANDO O MESMO NÍVEL DE UTILIZAÇÃO PARA AS MÁQUINAS NÃO GARGALO.....	132
TABELA 4.10 - VALORES DOS <i>LEAD TIMES</i> OBTIDOS NO CENÁRIO 4.	134
TABELA 4.11 - VALORES DOS <i>LEAD TIMES</i> (EM HORAS) OBTIDOS NO CENÁRIO 5.....	137
TABELA 4.12 - DIFERENÇAS PERCENTUAIS NO <i>LEAD TIME</i> OBTIDAS NO CENÁRIO 5 EM RELAÇÃO AO CENÁRIO INICIAL	138

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1.1 - CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA REALIZADA.....	24
QUADRO 3.1 – SIMILARIDADES E DIVERGÊNCIAS ENTRE <i>LEAN</i> , <i>TOC QRM</i> E <i>FACTORY PHYSICS</i>	69
QUADRO 3.2 - DEFINIÇÃO DA NOTAÇÃO UTILIZADA NO MODELO DO <i>SOFTWARE MAPLE</i>	71
QUADRO 3.3 - NOTAÇÃO UTILIZADA NO MODELO PROPOSTO CONSIDERANDO O LOTE DE TRANSFERÊNCIA.	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CI: Melhoria Contínua (do inglês, *Continuous improvement*)

CONWIP: *Constant Work in Process*

CV: Coeficiente de Variação

DBR: sistema de coordenação de ordens da TOC. Tradução: tambor-pulmão-corda (do inglês, *drum-buffer-rope*)

FP: *Factory Physics*

ID: Incerteza na demanda do sistema produtivo

IF: Incerteza no tempo entre falhas de uma máquina

IR: Incerteza no tempo de reparo de uma máquina

JIT: *just int time*

k: tamanho do lote de transferência

LT: *Lead Time*

MCT: Tempo do caminho crítico para a manufatura (do inglês, *Manufacturing Critical-Path*)

MTO: produzir sob encomenda (do inglês, *Make to Order*)

MTS: produzir para estoque (do inglês, *Make to Stock*)

OPT: sistema de controle da produção proposto pela Teoria das Restrições (do inglês, *Optimized Production Technology*)

QRM: *Quick Response Manufacturing*

Setup: preparação da máquina

SD: *System Dynamics*

SMED: metodologia para redução do tempo de *setup* (do inglês, *Single Minute Exchange of Die*)

TBC: Competição Baseada no Tempo (do inglês, *Time-Based Competition*)

TOC: Teoria das restrições (do inglês, *Theory of Constraints*)

TL: tamanho do lote de produção

TPM: Manutenção Preventiva Total (do inglês, *Total Productive Maintenance*)

WIP: Estoque em processo ou estoque intermediário (do inglês, *Work In Process*)

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	14
1.1 Motivação	14
1.2 Questões de pesquisa e objetivos.....	17
1.3 Metodologia de pesquisa	18
1.3.1 Abordagem de pesquisa.....	19
1.3.2 Método de pesquisa	21
1.3.3 Técnica de pesquisa.....	22
1.4 Estrutura da tese.....	24
CAPÍTULO 2 - EMBASAMENTO TEÓRICO BÁSICO	26
2.1 Histórico do tema abordado na tese.....	26
2.2 Abordagens para redução do <i>lead time</i>	30
2.2.1 Melhoria Contínua.....	30
2.2.2 <i>Lean Manufacturing</i>	31
2.2.3 <i>Quick Response Manufacturing</i>	33
2.2.4 <i>Teoria das Restrições (TOC)</i>	36
2.2.5 <i>Factory Physics: o chão de fábrica do ponto de vista científico</i>	39
2.2.5.1 Definições e parâmetros:	41
2.3 Lógica de funcionamento do modelo Godinho Filho e Uzsoy (2009)	44
2.4 Resultados obtidos pelos trabalhos que utilizam a abordagem híbrida <i>System Dynamics</i> – <i>Factory Physics</i>	53
CAPÍTULO 3 - O EFEITO DO TAMANHO DO LOTE DE TRANSFERÊNCIA NO LEAD TIME EM UM <i>FLOW SHOP</i> BALANCEADO	61
3.1 Introdução.....	61
3.2 A Literatura sobre o lote de transferência	63
3.3 O modelo proposto	69
3.3.1 Etapas seguidas para construção e validação do modelo	70
3.3.2 Apresentação do modelo proposto	84

3.4 Resultados.....	87
3.4.1 Cenário determinístico.....	88
3.4.2 Cenário estocástico	93
3.5 Discussão dos resultados	103
3.6 Conclusão	106
CAPÍTULO 4 - O EFEITO DO LOTE DE TRANSFERÊNCIA NA REDUÇÃO DO LEAD TIME EM UM <i>FLOW SHOP</i> NÃO BALANCEADO.....	109
4.1 Introdução.....	109
4.2 A literatura sobre o tema	111
4.3 Metodologia da pesquisa realizada neste capítulo.....	117
4.4 Resultados e discussões	120
4.4.1 Cenário inicial	122
4.4.2 Cenário 1: reduzindo o lote de transferência em toda a linha de produção.....	122
4.4.3 Cenário2: reduzindo o lote de produção na máquina gargalo	125
4.4.4 Cenário 3: reduzindo o lote de produção em duas máquinas da linha	128
4.4.5 Cenário 4: reduzindo o tempo de <i>setup</i> na máquina gargalo.....	133
4.4.6 Cenário 5: testando a configuração proposta pela TOC	136
4.5 Conclusões.....	142
CAPÍTULO 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	146
REFERÊNCIAS	149

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Dentro do contexto da Competição Baseada no Tempo (do inglês *Time-Based Competition* – TBC), as empresas têm buscado na redução do *lead time*, uma vantagem competitiva para se destacar no mercado em que estão inseridas. A TBC foi primeiramente proposta por Stalk e Hout (1990) e posteriormente denominada Manufatura Responsiva por Kritchanchai e MacCarthy (1998).

Embora o termo Competição Baseada no Tempo seja intuitivo e permita entender que as empresas estejam compelidas em melhorar a sua agilidade para ganhar ou manter sua participação no mercado, o termo *lead time* pode ser interpretado de mais de uma maneira. No presente trabalho, entende-se *lead time* como sinônimo do termo MCT (*Manufacturing Critical-Path*; do inglês, tempo do caminho crítico para a manufatura) proposto por Ericksen e Suri (2001). De acordo com esses autores, MCT é o típico tempo, medido em dias corridos (contando fins de semana e feriados), desde a criação de uma ordem, passando pelo caminho crítico, até o momento em que pelo menos uma peça da ordem é entregue ao cliente, que pode ser a próxima etapa no fluxo de produção.

Considerando a definição de *lead time*, reduzir o tempo de resposta ao cliente quando se produz contra pedido (MTO, sigla para *make to order*) é claramente algo que as empresas buscam atingir. No entanto, mesmo para empresas que trabalham com a forma de resposta à demanda MTS (produzir para estoque, do inglês *make to stock*), reduzir o *lead time* de produção também pode gerar uma melhor reação ao mercado, uma vez que permite manter menores níveis de estoque de produtos acabados.

Melhorias com o foco na redução do *lead time* (LT) têm sido amplamente abordadas pelo *Lean Manufacturing* (WOMACK; JONES, 1998; LIKER, 2005) e *Quick Response Manufacturing* ou QRM (SURI, 1998, 2010). Nessas duas abordagens, algumas das

técnicas e metodologias usualmente associadas com a redução do *lead time* incluem o *one-piece-flow*, *takt time*, o sistema kanban, seis sigma, métodos *poka-yoke*, *Single Minute Exchange of Die* (SMED), Manutenção Preventiva Total (*Total Preventive Maintenance - TPM*), redução do tamanho de lote e manufatura celular, dentre outras. Basicamente, essas técnicas e metodologias melhoram algumas das variáveis do chão-de-fábrica (como tempo de *setup*, taxa de defeitos, tempo de processamento, tempo de reparo e tempo entre falhas de uma máquina) e essas melhorias obtidas contribuem, em última análise, para a redução do *lead time*. A redução do *lead time* também pode ser obtida por programas de melhoria contínua (*Continuous Improvement* ou CI), que é um envolvimento amplo da empresa para realizar mudanças relativamente pequenas que são direcionadas às metas organizacionais de uma forma contínua (CAFFYN,1999).

Embora seja reconhecido que a CI e as metodologias do *Lean Manufacturing* e do QRM contribuam para a redução do *lead time*, poucas pesquisas tinham se dedicado a quantificar seus efeitos até o surgimento dos trabalhos de Suri (1998), o QRM, e de Hopp e Spearman (2001, 2008), o *Factory Physics*. Esse último tem sua base na Teoria de Filas e traz uma série de princípios matemáticos para a determinação do *lead time*. Ou seja, a partir do trabalho desses autores foi possível relacionar matematicamente as variáveis do chão-de-fábrica com o *lead time*.

No entanto, conhecer as equações matemáticas que relacionam uma variável do chão-de-fábrica com o *lead time* não implica em conhecer o comportamento do sistema produtivo (que pode ser uma máquina, uma linha de produção, uma célula de manufatura) como um todo, pois o chão-de-fábrica é um ambiente complexo, com várias interações entre os agentes desse sistema. De acordo com Sterman (2000), em sistemas complexos, as causas e os efeitos estão distantes, no tempo e no espaço, o que torna difícil antecipar alguns efeitos não previstos em uma primeira análise (o que são conhecidos como efeitos colaterais). Esta característica de sistemas complexos (como o chão-de-fábrica), faz com que o cérebro humano não consiga processar todos esses relacionamentos e portanto, a análise intuitiva do que aconteceria com o sistema falhe. Sendo assim, o uso da Dinâmica de Sistemas ou *System Dynamics* (FORRESTER, 1961) para investigar o ambiente fabril representa um grande potencial.

Foi justamente observando esse potencial e as contribuições dos trabalhos de Suri (1998) e de Hopp e Spearman (2001, 2008) que Godinho Filho e Uzsoy (2009) propuseram um modelo que utiliza uma abordagem híbrida constituída pela Dinâmica de Sistemas e *Factory Physics* para investigar o relacionamento entre as variáveis do chão-de-

fábrica e o *lead time*. Este modelo, realizado em um *software* de Dinâmica de Sistemas (o Vensim), pode simular os efeitos no *lead time* das ações de melhoria nas seguintes variáveis de chão-de-fábrica: i) tempo médio de *setup*; ii) taxa média de defeitos; iii) tempo médio entre falhas; iv) tempo médio de reparo da máquina; v) variabilidade do tempo de processamento; vi) variabilidade do tempo entre as chegadas de ordens. O histórico e as contribuições obtidas com este modelo são apresentadas no Capítulo 2 desta tese.

A utilização conjunta dessas teorias, aliada à simulação, despontou uma nova perspectiva para se explorar quantitativamente a Manufatura Responsiva. Diversos aspectos dessa temática foram abordados até o momento (e estão apresentados no Capítulo 2), mas ainda há *gaps* a serem estudados. Um exemplo é a variável lote de transferência, cuja redução é reconhecida pela literatura por impactar positivamente no *lead time*. O lote de transferência, embora muito estudado em trabalhos de otimização (onde questões como o tamanho ótimo do lote de transferência ou *scheduling* são abordadas), ainda é pouco explorado quantitativamente em trabalhos que não visam a otimização. Uma exceção é o trabalho de Arbós et al. (2015) que faz uso de uma abordagem quantitativa para analisar o relacionamento entre tamanho de lote de produção, lote de transferência, tempo de *setup*, WIP e *lead time* em um sistema de manufatura discreto. Porém, Arbós et al. (2015) não consideram variáveis importantes como a variabilidade de chegadas, variabilidade de processamento e taxa de defeitos, que também têm efeito no *lead time*.

Devido a esta lacuna na literatura e à importância que o lote de transferência pode ter para a redução do *lead time*, a presente tese visa explorar, de um ponto de vista quantitativo, o efeito do tamanho do lote de transferência na redução do *lead time*. O ambiente de estudo será o *flow shop*, sujeito a incertezas. Como a variabilidade é uma constante em um ambiente de manufatura, é necessário entender o comportamento desse ambiente quando as variáveis estão sujeitas a incertezas, ou seja, quando temos um cenário estocástico.

Assim, de forma a explorar quantitativamente a redução do *lead time* e dar continuidade ao trabalho de Godinho Filho e Uzsoy (2009), a presente tese visa analisar os seguintes aspectos de um ambiente *flow shop*: i) o efeito do tamanho do lote de transferência para a redução do *lead time* em uma linha balanceada; ii) o efeito do tamanho do lote de transferência para a redução do *lead time* em uma linha onde exista um gargalo. Neste trabalho, considera-se um gargalo, uma máquina cujo nível de utilização está acima das demais máquinas da linha.

A próxima seção apresenta os objetivos e questões de pesquisa deste trabalho.

1.2 Questão de pesquisa e objetivos

Primeiramente, é importante esclarecer ao leitor dois pontos, a saber: o ambiente estudado e a variável lote de transferência.

O ambiente escolhido para estudo, o *flow shop*, é direcionado para altos volumes de produção e apresenta pouca flexibilidade, uma vez que todos os produtos processados em um ambiente *flow shop* seguem uma sequência de operações. O *flow shop* está presente em empresas de diversos setores, tais como na indústria de eletrodomésticos ou na indústria automobilística. Este ambiente também é conhecido na literatura como um *layout* orientado para produto, e de acordo com Black (1991), é caracterizado por equipamentos dedicados e especializados, organizados em linha, de forma a processar a sequência necessária para fazer um *mix* de produtos. Neste trabalho, o *flow shop* foi escolhido por representar o cenário mais simples para um trabalho inicial no tema. Trabalhos futuros podem explorar ambientes de produção com padrões de fluxos mais complexos, como um *job shop* ou um *layout* celular.

Além das variáveis consideradas no modelo de Godinho Filho e Uzsoy (2009), a saber: i) tempo médio de *setup*; ii) taxa média de defeitos; iii) tempo médio entre falhas; iv) tempo médio de reparo da máquina; v) variabilidade do tempo de processamento; vi) variabilidade do tempo entre as chegadas de ordens; a presente tese estudará também a variável vii) lote de transferência. O lote de transferência é o número de peças que são transportadas ao mesmo tempo para a próxima estação de trabalho, de acordo com Askin e Goldberg (2002). O Capítulo 3 apresenta uma maior discussão sobre essa variável.

Considerando o que foi apresentado até aqui, esta tese visa responder à seguinte questão:

- **Questão de Pesquisa** : Qual o efeito do tamanho do lote de transferência no *lead time* em um ambiente *flow shop* ?

A partir dessa questão de pesquisa, podem-se enunciar os objetivos que nortearão o desenvolvimento dessa tese.

- **Objetivo 1**: Desenvolver uma plataforma de simulação que permita testar o efeito do tamanho do lote de transferência no *lead time*.

- **Objetivo 2**: Analisar quantitativamente, por de uma série de experimentos, o efeito do tamanho do lote de transferência no *lead time* em ambientes *flow shop* balanceados e não balanceados, onde há a presença de um gargalo.

Além desses dois objetivos gerais, também podem ser considerados três objetivos específicos, a saber:

- Objetivo específico 1: testar diferentes condições (determinística e estocásticas) para o ambiente balanceado.
- Objetivo específico 2: para um ambiente não balanceado, onde há a presença de uma máquina gargalo: a) testar o efeito da redução do lote de produção somente no gargalo ou em máquinas próximas ao gargalo; b) avaliar os efeitos da redução do *setup* na máquina gargalo; c) avaliar os pressupostos da Teoria das Restrições (GOLDRATT, COX, 2014) com pequenos lotes de produção nas máquinas não gargalo e grandes no gargalo.
- Objetivo específico 3: realizar análises comparativas dos cenários considerados e avaliar os pressupostos fundamentais das teorias de *Lean*, QRM e Teoria das Restrições (TOC).
- Objetivo específico 4: gerar recomendações para gerentes de produção que visem a redução do *lead time*, considerando cenários que se aproximem da realidade do chão-de-fábrica.

A próxima seção apresenta a metodologia a ser utilizada na presente tese para atingir os objetivos propostos acima.

1.3 Metodologia de pesquisa

Esta seção está dividida em quatro tópicos. Os três primeiros tópicos contêm a classificação da pesquisa realizada, e o último, por sua vez, apresenta os passos seguidos para a execução da mesma.

Primeiramente, é importante destacar que a atividade de pesquisa, de acordo com Lakatos e Marconi (1995), é um procedimento formal, com método de pensamento reflexivo, que requer um tratamento científico. Dessa definição decorre que a pesquisa é uma

atividade que exige um método a ser seguido, ou seja, o método científico. De acordo com Neuman (2003), o método científico não é algo único. Ele se refere a ideias, regras, técnicas e abordagens que a comunidade científica utiliza. Para Gay e Diehl (1992), o método científico é um processo bastante ordenado, em que alguns passos, dependendo da pesquisa, podem ser necessários: reconhecimento e definição do problema; formulação da hipótese, coleta de dados, análise dos dados e conclusões em função da confirmação ou rejeição da hipótese.

Assim, para melhor apresentar o método de pesquisa utilizado no presente trabalho, as seções seguintes apresentam seus componentes assim como a justificativa das escolhas feitas.

1.3.1 Abordagem de pesquisa

De acordo com Berto e Nakano (2000), as abordagens de pesquisa são formas ou maneiras de aproximação e focalização do problema que se pretende estudar. Essas podem ser quantitativas ou qualitativas ou ainda, segundo Martins (2010), é possível a utilização de uma terceira abordagem que faz uso das duas abordagens citadas e denomina-se abordagem combinada.

A abordagem quantitativa envolve a utilização de medições e procedimentos estatísticos. Segundo Creswell (1994), tal abordagem inicia-se com a verificação do problema e a posterior elaboração de uma teoria, com a formulação de variáveis. A teoria em questão pode ser generalizada ou não, de acordo com os resultados obtidos por meio de medição e utilizando métodos estatísticos.

O ato de mensurar variáveis de pesquisa é a característica mais marcante da abordagem quantitativa, no entanto, não é uma característica distintiva dessa abordagem. O rigor de uma pesquisa científica pode ser atingido pela linguagem matemática, mas a mensuração obtida dessa forma, pelo uso de variáveis, não é um critério bom para diferenciar as abordagens quantitativas e qualitativas.

De acordo com Bryman (1989), as principais preocupações da abordagem quantitativa são:

- i) a mensurabilidade: definir bem um conjunto de variáveis passível de ser mensurado;
- ii) a causalidade: provar a existência de tal relacionamento entre as variáveis;
- iii) a generalização: trata da possibilidade de os resultados obtidos serem generalizados para além os limites de pesquisa;

- iv) a replicação: por meio da possibilidade de se repetir a pesquisa de outro pesquisador e encontrar os seus resultados é possível verificar a existência de viés ou predileção dos pesquisadores na coleta de dados.

Segundo Bryman (1989, pág.24) “a característica que distingue a pesquisa quantitativa da qualitativa é a ênfase da segunda na perspectiva do indivíduo que está sendo estudado”. De acordo com esse autor, é um erro afirmar que a diferença entre as duas abordagens seja a ausência de quantificação na abordagem qualitativa. Essa abordagem visa interpretar o ambiente em que a problemática acontece e a realidade subjetiva dos indivíduos envolvidos na pesquisa é considerada relevante e contribui para o desenvolvimento da pesquisa. Segundo Berto e Nakano (2000), a abordagem qualitativa busca aproximar a teoria e os fatos, por meio da descrição e interpretação de eventos isolados ou únicos, buscando a obtenção de resultados particularizados.

A abordagem qualitativa tende a ser menos estruturada que a quantitativa, para poder captar as perspectivas e as interpretações das pessoas pesquisadas. Porém, isso não significa que é menos rigorosa. Algumas características da pesquisa qualitativa são definidas por Bryman (1989):

- i) ênfase na interpretação subjetiva do ambiente dos indivíduos;
- ii) delineamento do contexto do ambiente da pesquisa;
- iii) abordagem não muito estruturada;
- iv) múltiplas fontes de evidências;
- v) importância da concepção da realidade organizacional;
- vi) proximidade com o fenômeno estudado.

Pode-se perceber que o interesse dessa abordagem é desvendar a forma, o “como” se chegou aos resultados e não apenas os resultados propriamente ditos.

Conforme citado anteriormente, há ainda a abordagem combinada. Segundo Creswell (1994), Amaratunga et al. (2002), Creswell e Clark (2006) a combinação de abordagens se justifica pela complementaridade das concepções metodológicas de pesquisa científica e possibilita um melhor entendimento dos problemas de pesquisa que cada uma das abordagens permitiria isoladamente. Algumas situações são mais propícias para o uso de uma abordagem combinada. Creswell e Clark (2006) apontam quatro situações: i) quando uma das abordagens, sozinha, pode não responder à pergunta de pesquisa; ii) quando existe a necessidade de melhorar a pesquisa com uma segunda fonte de dados; iii) quando existe a necessidade de explicar os resultados de uma pesquisa quantitativa e iv) quando existe a necessidade de explorar primeiro qualitativamente.

Este trabalho utiliza uma abordagem quantitativa uma vez que tem como principais preocupações as mesmas citadas por Bryman (1989), ou seja, a mensurabilidade, a causalidade e a replicação. Dentro dessa abordagem, foram utilizados os métodos de modelagem e simulação, que serão apresentados na próxima seção.

1.3.2 Método de pesquisa

Há na literatura uma diversidade de métodos de pesquisa, que podem ser mais ou menos aderentes, de acordo com a área do conhecimento que está sendo pesquisada. Os principais métodos de pesquisa utilizados na Engenharia de Produção, de acordo com Filippini (1997) e Berto e Nakano (2000) são: desenvolvimento teórico-conceitual, estudo de caso, levantamento tipo *survey*, modelagem ou simulação, pesquisa-ação, revisão da literatura e pesquisas experimentais. No presente trabalho são utilizadas a modelagem e a simulação, além da revisão da literatura (método teórico-conceitual) como um passo inicial da pesquisa.

A revisão da literatura consiste em buscar o conhecimento existente sobre uma questão a ser estudada. Tal conhecimento, previamente acumulado, pode ser acessado por meio de livros, revistas, publicações avulsas, imprensa escrita ou via internet. Segundo Neuman (2003), revisar a literatura é uma etapa essencial no processo de pesquisa, independente da abordagem adotada. Na presente pesquisa, a revisão da literatura será empregada para sumarizar o conhecimento já existente sobre o tema trabalhado e identificar os *gaps* existentes, de forma a apontar direções para pesquisas na área.

Segundo Martins (2010), os métodos de pesquisa mais adequados à Engenharia de Produção para se conduzir uma pesquisa quantitativa, são:

- a. pesquisa de avaliação (*survey*): o pesquisador não manipula os níveis das variáveis de pesquisa e pode ter proximidade com o objeto de estudo ou não;
- b. modelagem/simulação: o pesquisador manipula as variáveis e os seus níveis, por meio de um modelo de pesquisa, ou seja, uma abstração da realidade;
- c. experimento: o pesquisador delinea um experimento de forma a testar o relacionamento entre as variáveis de pesquisa operacionalizada das hipóteses. As variáveis que não fazem parte do experimento são isoladas.
- d. quase-experimento: diferencia-se do experimento pelo fato de o pesquisador não isolar as variáveis que não fazem parte do experimento. O acompanhamento do efeito das variáveis não manipuláveis é tão importante quanto das manipuláveis;

Os métodos acima citados estão inseridos em uma perspectiva Positivista. Porém, de acordo com Vaishnavi e Kuechler (2004), há ainda um método de pesquisa denominado *Design Science* (HENVER, 2007; AKEN; ROMME, 2009) para se realizar pesquisa em diversas áreas, como por exemplo Engenharia, Administração ou Ciência da Computação. O *Design Science*, conhecido também pelo termo Pesquisa Instrumental (MATTESICH, 1978; MATEL, 1986), está inserido em outra perspectiva, que é complementar às perspectivas Positivista e Interpretativa. Conforme destacam Vaishnavi e Kuechler (2004), este método de pesquisa envolve a criação de novos conhecimentos por meio do desenvolvimento de artefatos inovadores e analisa o uso e/ou o desempenho desses artefatos junto com a reflexão e abstração para melhorar e entender o comportamento dos aspectos pesquisados. De acordo com esses autores, o método *Design Science* tem basicamente quatro fases, que são: i) *design*/desenvolvimento do artefato; ii) construção iii) análise e iv) avaliação.

A partir do que foi exposto anteriormente, pode-se considerar que o método de pesquisa do presente trabalho se enquadra no método *Design Science*, uma vez que uma plataforma de simulação (i.e., o artefato) é desenvolvida e construída no *software* Maple 13. Ainda, esta plataforma é utilizada para a análise de questões relacionadas à Gestão da Produção (como o efeito da redução do lote de transferência no *lead time*). Conforme descrito por Vaishnavi e Kuechler (2004), a última etapa do método *Design Science* consiste na avaliação. E é justamente o que é realizado nesta tese, quando a análise dos resultados é confrontada com as principais teorias de Gestão da Manufatura (como *Lean*, TOC e QRM). Ou seja, há uma avaliação do artefato desenvolvido e da questão de pesquisa explorada. Assim, as quatro fases do método *Design Science* são necessárias para cumprir com os objetivos iniciais e foram, portanto, realizadas ao longo da presente tese.

1.3.3 Técnica de pesquisa

Nas primeiras fases do método de pesquisa utilizado nesta tese (*Design Science*), a modelagem e a simulação foram utilizadas como técnicas de pesquisa.

Na Gestão da Produção, área na qual este trabalho está inserido, a utilização de modelos permite compreender melhor o ambiente em questão, identificar problemas, formular estratégias e oportunidades e apoiar e sistematizar o processo de tomada de decisões. De acordo com Morabito e Pureza (2010), um modelo pode ser definido como uma representação

de uma situação ou realidade, conforme vista por uma pessoa ou um grupo de pessoas, e construída de forma a auxiliar o tratamento daquela situação de uma maneira sistemática. Em particular, modelos quantitativos, como o modelo utilizado nesta tese, são modelos abstratos descritos em linguagem matemática e computacional, que utilizam técnicas analíticas (matemáticas, estatísticas) e experimentais (simulação) para calcular valores numéricos das propriedades do sistema em questão. Assim, é possível utilizar modelos quantitativos para analisar os resultados de diferentes ações possíveis no sistema.

De acordo com Meredith et al. (1989), a pesquisa em Gestão da Produção baseada em modelos quantitativos pode ser classificada como uma abordagem de geração de conhecimento racional (isto é, dedutiva, axiomática). Morabito e Pureza (2010) destacam que uma pesquisa axiomática quantitativa pode ser normativa (i.e. prescritiva) ou descritiva. Ainda de acordo com esses autores, a pesquisa axiomática normativa desenvolve estratégias e ações para melhorar os resultados disponíveis na literatura, encontrar uma solução ótima para um problema novo ou comparar o desempenho de estratégias que tratam um mesmo problema. Já a pesquisa axiomática descritiva, preocupa-se em analisar modelos quantitativos, principalmente com o propósito de entender o processo modelado ou explicar suas características. Ou seja, baseia-se em modelos que descrevem o comportamento do sistema modelado. É justamente nesta classe, ou seja, pesquisa axiomática descritiva, que a presente tese se enquadra.

O modelo proposto neste trabalho, na etapa de modelagem, pode ser classificado como um modelo de simulação estático, que são modelos usados para analisar um sistema complexo em um instante de tempo particular. Os modelos de simulação também podem ser considerados dinâmicos, quando imitam as operações do sistema real à medida que este evolui no tempo (MORABITO; PUREZA, 2010).

Para a construção do modelo de simulação estático será utilizado o *software* Maple 13 como ferramenta de pesquisa. O Maple é um sistema de matemática computacional comercial de uso geral e que permite ao usuário escrever seus próprios programas com uma linguagem de programação procedural além de permitir a inserção de dados na forma de uma distribuição de probabilidade. (MAPLESOFT, 2014). Na presente tese, os dados inseridos na forma de distribuição de probabilidade se referem a algumas variáveis do chão-de-fábrica, a saber: o tempo médio entre falhas e o tempo de reparo, além da demanda.

Por fim, o Quadro 1.1 sumariza a classificação da pesquisa realizada de acordo com os fundamentos metodológicos descritos nessa seção.

QUADRO 1.1 - Classificação da pesquisa realizada.

Abordagem de pesquisa	Quantitativa
Método de pesquisa	Revisão da Literatura/ <i>Design Science</i> / Pesquisa Instrumental
Técnicas de Pesquisa	Modelagem/Simulação
Ferramenta de pesquisa	<i>Software</i> Maple 13

Fonte: próprio autor.

1.4 Estrutura da tese

A presente tese foi construída no formato de artigos, seguindo uma tendência internacional que visa tornar mais ágil a divulgação dos resultados obtidos nas pesquisas acadêmicas. Neste formato, há dois capítulos introdutórios, com a apresentação do tema e uma revisão da literatura geral da tese. Os capítulos seguintes são formados cada um por um artigo, com a mesma estrutura de publicações científicas internacionais. Nesta tese, os Capítulos 3 e 4 contém cada um, a questão de pesquisa a ser respondida, a introdução ao tema, a revisão de literatura, as suas simulações, resultados e conclusões. Portanto, neste momento se faz necessário um pedido de desculpas ao leitor, caso em algum momento o texto tenha se tornado repetitivo, pois esse parece ser o ônus da escolha deste formato. Feita esta consideração, os seis capítulos desta tese serão apresentados a seguir:

No Capítulo 1 há a apresentação do trabalho, suas questões de pesquisa e objetivos. Também se apresenta a motivação da pesquisa e sua justificativa, assim como os aspectos metodológicos utilizados para a realização da mesma. No Capítulo 2, serão apresentados os fundamentos teóricos necessários para a compreensão da presente pesquisa assim como o panorama atual da literatura sobre o tema pesquisado. Estes dois capítulos iniciais orientam toda a tese e os dois próximos capítulos são estruturados na forma de um artigo científico, sendo suas seções constituídas de acordo com o seu tema específico. Assim, no Capítulo 3, será abordada a questão do efeito no *lead time* do tamanho do lote de transferência, em um ambiente *flow shop* balanceado. O Capítulo 4 explora a mesma temática

do capítulo anterior, porém, explora um ambiente não balanceado, com a presença de uma máquina gargalo. Finalizando as análises desse trabalho, o Capítulo 5 visa apresentar as respostas às questões de pesquisa propostas nessa tese assim como as conclusões a cerca da pesquisa realizada e as possíveis extensões deste trabalho. Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas na pesquisa.

Capítulo 2

EMBASAMENTO TEÓRICO BÁSICO

2.1 Histórico do tema abordado na tese

Conforme brevemente apresentado no capítulo anterior, esta tese aborda o paradigma da Manufatura Responsiva. Nesta seção serão apresentados alguns aspectos históricos do tema redução de *lead time* e um panorama dos trabalhos publicados sobre este tema.

A idéia de priorizar o *lead time* como medida de desempenho de uma organização ganhou força na década de 1990 com a Competição Baseada no Tempo (STALK; HOUT, 1990). Desde então, esforços empresariais e acadêmicos têm sido intensificados para tornar a manufatura mais responsiva.

Até o início dos anos 2000, os trabalhos realizados sobre redução de *lead time* não foram, em sua maioria, retratados de forma quantitativa, de acordo com a constatação de Treville et al. (2004). No entanto, duas exceções se destacaram, a saber: i) o trabalho de Hopp e Spearman (2001, 2008), baseado na teoria de filas e *Factory Physics* que traz uma série de princípios matemáticos para a determinação do *lead time* e ii) o trabalho de Suri (1998) na redução do *lead time* por meio de uma estratégia denominada *Quick Response Manufacturing*. Ambas estratégias (*Factory Physics* e *Quick Response Manufacturing*) apresentam uma série de relações entre variáveis do chão-de-fábrica que contribuem para a melhoria do nível de conhecimento e intuição dos gerentes de produção em relação à dinâmica de produção do chão-de-fábrica.

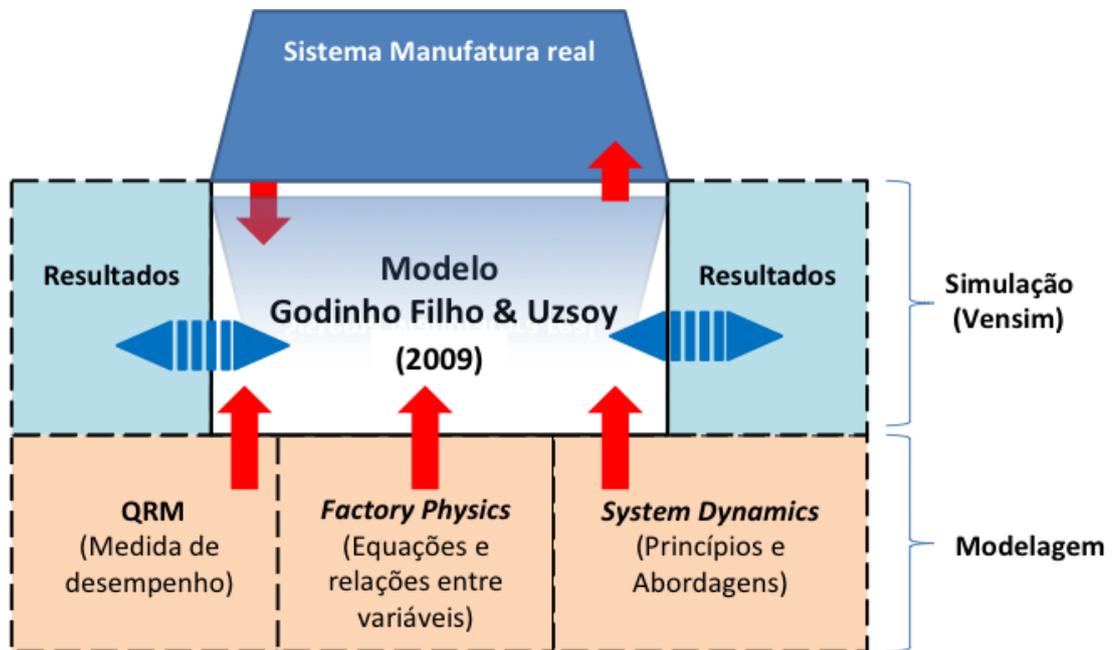
No ano de 2007, o professor Dr. Moacir Godinho Filho deu início a uma série de trabalhos, de caráter quantitativo, em redução de *lead time*. Estes trabalhos se iniciaram a partir de dois períodos de pós doutoramento. Um, em aplicação conjunta de *System Dynamics*

e *Factory Physics* à gestão de sistemas de produção na *North Carolina State University* (USA) e outro, em *Quick Response Manufacturing* na *University of Wisconsin*, em Madison (USA). Após esse período de pós-doutorado, o professor Godinho liderou a criação do grupo de pesquisa GePRELT, o qual é o produto de uma cooperação entre a Universidade Federal de São Carlos e a *University of Wisconsin at Madison* com a finalidade de pesquisa e aplicação prática de técnicas de redução de *lead time* no Brasil.

Considerando o potencial das contribuições de Suri (1998, 2010) e Hopp e Spearman (2001, 2008), Godinho Filho e Uzsoy (2009) apresentam um modelo com a proposta de utilizar a abordagem *Factory Physics* juntamente com a abordagem *System Dynamics* (SD), proposta por J.W. Forrester, em 1950, para investigar o relacionamento entre variáveis do chão-de-fábrica e o *lead time*. Este modelo tem sido pioneiro em explorar quantitativamente a redução do *lead time*.

A Figura 2.1 mostra a estrutura do modelo Godinho Filho e Uzsoy (2009). Nela, encontram-se os três pilares fundamentais da etapa de modelagem, que tem como produto final o modelo Godinho Filho e Uzsoy (2009). Cada um desses pilares contribui para a formação do modelo, a saber: i) QRM: fornece a medida de desempenho utilizada no modelo (o *lead time*) assim como um suporte por meio de ações, políticas e procedimentos para que os programas de Melhoria Contínua considerados na simulação sejam viabilizados; ii) *Factory Physics*: fornece as equações matemáticas utilizadas no modelo, que por sua vez representam as inter-relações existentes entre as variáveis de chão-de-fábrica consideradas; iii) *System Dynamics*: são utilizados os princípios desta teoria para construção do modelo em questão. Cabe destacar neste ponto que foi utilizada a abordagem *Hard* da SD (STERMAN, 2000). Ou seja, a partir de diagramas estoque-fluxo e o uso de equações para a quantificação das interações entre os elementos do sistema, é possível analisar quantitativamente as simulações realizadas.

FIGURA 2.1- Diagrama que ilustra os fatores que constituem o modelo Godinho Filho e Uzsoy (2009).

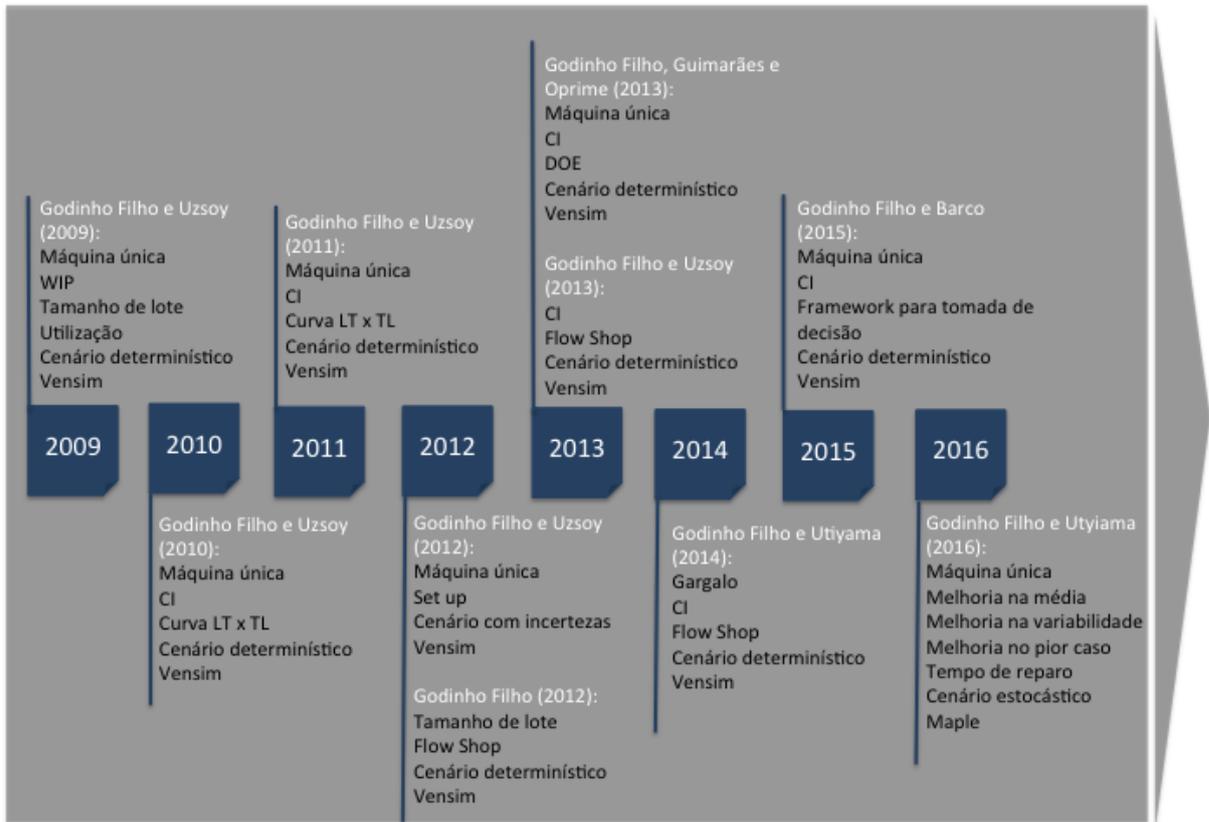


Fonte: próprio autor.

A modelagem, como uma ferramenta de pesquisa, visa representar um ambiente real com algumas simplificações que viabilizem o estudo desse ambiente, por meio de simulações de diferentes cenários. As simulações visam encontrar potenciais resultados ou soluções para as questões analisadas assim como fornecer recomendações para os tomadores de decisão do ambiente real. No modelo Godinho Filho e Uzsoy (2009), o ambiente real de manufatura está representado por uma máquina única, caracterizada pelas seguintes variáveis de chão-de-fábrica: i) tempo médio de *setup*; ii) taxa média de defeitos; iii) tempo médio entre falhas; iv) tempo médio de reparo da máquina; v) variabilidade do tempo de processamento; vi) variabilidade do tempo entre as chegadas de ordens. As simulações foram realizadas por meio do *software* de *System Dynamic*, Vensim.

A partir desse modelo de Godinho Filho e Uzsoy (2009), outros trabalhos foram publicados pelo grupo de pesquisa GePRELT e se destinaram a explorar o desempenho do chão-de-fábrica, a saber: Godinho Filho e Uzsoy (2010, 2011, 2012, 2013), Godinho Filho, Guimarães e Oprime (2013), Godinho Filho e Utiyama (2014), Godinho Filho e Barco (2015) e Godinho Filho e Utiyama (2016). A Figura 2.2 a seguir apresenta, de forma cronológica, os trabalhos em redução do *lead time* do grupo GePRELT.

FIGURA 2.2 - Trabalhos que utilizam a abordagem *Factory Physics-System Dynamics* na redução de *lead time*.



Fonte: próprio autor.

Os principais resultados dos trabalhos mostrados na Figura 2.2 serão apresentados na Seção 2.4. Na Seção 2.2 a seguir, faz-se uma breve apresentação das abordagens existentes na Literatura para redução de *lead time*. Em seguida, a Seção 2.3 apresentará a lógica de funcionamento do modelo Godinho Filho e Uzsoy (2009) para que o leitor possa se familiarizar com os termos e nomenclaturas deste trabalho.

2.2 Abordagens para redução do *lead time*

2.2.1 Melhoria Contínua

Uma das formas de uma empresa se manter competitiva no mercado atual é investir em esforços para a melhoria da sua função produção. De acordo com Carpinetti et al. (2000), a melhoria contínua (do inglês, *Continuous Improvement* – CI) da função produção tem um papel complementar importante na questão da competitividade no longo prazo. A razão para esse impacto na competitividade é que a CI é um conceito simples, facilmente compreendido e com um baixo nível de investimento (BESSANT et al. 1994).

Conforme destacado por Jabnoun (2001), a intensidade da competição global causou um interesse ainda maior na melhoria contínua de produtos, serviços e processos (GARVIN, 1982, 1993; PARASURAMAN et al. 1985; MISTEREK et al. 1990). A expressão melhoria contínua se tornou muito popular nos últimos anos e está associada com abordagens como a Gestão da Qualidade Total (*Total Quality Management*) e *Lean Production*. Este conceito se desenvolveu ao longo dos anos e se apresenta bem estruturado nos dias atuais. (ATTADIA; MARTINS, 2003).

Caffyn (1999) define melhoria contínua como “... um amplo envolvimento para realizar mudanças relativamente pequenas que são direcionadas às metas organizacionais de uma forma contínua.” De acordo com Bessant et al. (1994), CI é “ um processo empresarial de inovação incremental, focado e contínuo.” Bhuiyan e Baghel (2005) destacam a definição de Deming para melhoria contínua, isto é, uma filosofia que consiste de iniciativas de melhoria que aumentam o sucesso e reduzem as falhas. Conforme destacado por Bessant et al. (1994, 2001), a idéia da CI está relacionada à capacidade de resolução de problemas por meio de pequenos passos, alta frequência e ciclos curtos de mudanças (ATTADIA; MARTINS, 2003).

De acordo com Li (2003), para tornar os esforços de melhoria continua mais efetivos, o desenvolvimento de métodos científicos e quantitativos para análise e melhoria dos sistemas de manufatura tem se tornado cada vez mais importante. E esta é exatamente a questão abordada em vários trabalhos que utilizam o modelo Godinho Filho e Uzsoy (2009).

Por fim, outro ponto importante, destacado por Liker (2005), é o fato de que a filosofia da melhoria contínua é o elemento mais crítico do Sistema Toyota de Produção (STP) e representa seu valor fundamental. Devido à sua importância, a próxima seção

apresenta uma breve apresentação do STP ou *Lean Manufacturing*, como é mundialmente conhecido.

2.2.2 *Lean Manufacturing*

O termo *Lean Manufacturing*, hoje conhecido como sinônimo de uma abordagem que proporciona mais competitividade para as empresas, teve sua origem no Sistema Toyota de Produção (STP). De acordo com Liker (2005, pág. 26), a Toyota inventou o STP ou o *Lean Manufacturing*, que desencadeou uma transformação mundial nas indústrias em relação à filosofia e aos métodos de produção ao longo da última década.

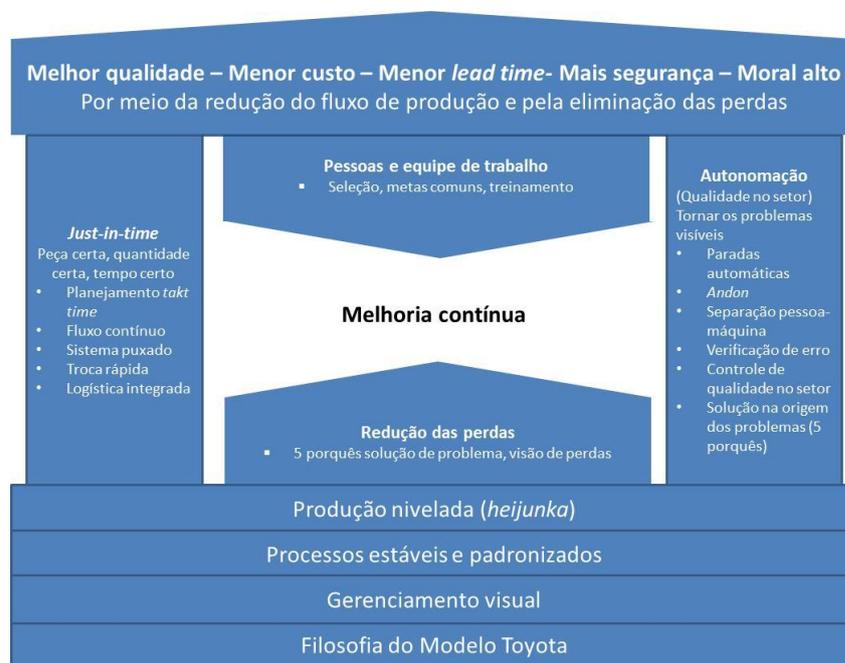
A Toyota chamou a atenção mundial pela primeira vez na década de 1980, quando ficou claro que havia algo de especial sobre a qualidade e a eficiência japonesa. E na década de 1990, tornou-se evidente que havia algo ainda mais especial sobre a Toyota em comparação com outras fábricas de automóveis no Japão (WOMACK, JONES e ROOS, 1991). O diferencial da Toyota e o segredo do seu sucesso é um resultado direto da sua excelência operacional, que se tornou uma arma estratégica. Essa excelência é baseada nos métodos de melhoria da qualidade, nas ferramentas (tais como o *just in time*, *kaizen*, fluxo unitário de peças, autonomia, nivelamento da produção) e principalmente na filosofia empresarial baseada na compreensão das pessoas e na motivação humana (LIKER, 2005).

Devido ao contexto no qual se desenvolveu após a Segunda Guerra Mundial, a Toyota enfrentou um pequeno mercado quando comparado às condições de outras empresas como Ford e GM. O mercado japonês ainda demandava uma variedade de veículos o que exigiu da Toyota determinada flexibilidade produtiva, uma vez que tinha que produzir na mesma linha de montagem a variedade requerida pelos clientes. De acordo com Liker (2005), isto ajudou a Toyota a fazer uma descoberta fundamental: quando você reduz o *lead time* e concentra-se em manter flexíveis as linhas de produção, realmente obtém uma melhor qualidade, melhor resposta dos clientes, melhor produtividade e melhor utilização dos equipamentos e do espaço. Para Taiichi Ohno, que pode ser considerado o pai do Sistema Toyota de Produção, tudo o que o STP faz é olhar para a linha do tempo, do momento em que o cliente coloca um pedido até quando o pagamento desse pedido é recebido. E este tempo é reduzido removendo os desperdícios (OHNO, 1997).

Embora o STP tenha atraído a atenção de muitas empresas, poucos foram capazes de alcançar o sucesso no nível atingido pela Toyota (WOMACK et al., 1991). Para

Spear e Bowen (1999), a razão é que a maioria das empresas associa o STP apenas às ferramentas que a Toyota utiliza, em vez de reconhecer que existem métodos sistemáticos subjacentes e princípios que incorporam o STP. Prova disso é a representação do STP por meio de um diagrama conhecido como “Casa do STP”. De acordo com Liker (2005), a utilização de uma casa se justifica por esta ser um sistema estrutural, ou seja, a casa só é forte se o telhado, as colunas e as fundações são fortes. A Figura 2.3 a seguir representa uma das diversas versões desse diagrama.

FIGURA 2.3 - O Sistema Toyota de Produção



Fonte: adaptado de Liker (2005).

A “Casa do STP” tem como telhado, as metas de melhor qualidade, menor custo e menor *lead time*. Há duas colunas externas – *just-in-time*, provavelmente a característica mais popularizada do STP (LIKER, 2005) e autonomação. No centro do sistema de produção estão as pessoas e o direcionamento para a melhoria contínua. No alicerce estão os princípios da produção nivelada, processos estáveis e padronizados e gerenciamento visual.

2.2.3 Quick Response Manufacturing

Rajan Suri propôs, em 1998, uma abordagem denominada *Quick Response Manufacturing* (QRM), voltada para alcançar a redução de *lead time* em empresas de manufatura. O trabalho de Suri (1998) ganhou destaque ao longo dos anos, sendo que em 2010, o pesquisador Rajan Suri entrou para o *Hall* da Fama da Manufatura (INDUSTRY WEEK, 2012) pela criação da abordagem QRM. Uma ampla revisão sobre Manufatura Responsiva (MR) e Competição Baseada no Tempo (TBC), que inclui trabalhos sobre QRM, pode ser encontrada em Saes (2010).

O QRM pode ser definido como uma estratégia de melhoria com foco na contínua redução do *lead time* ao longo de toda a empresa, abordando todos os aspectos operacionais da empresa, tanto externos quanto internos. De acordo com Suri (2010), o QRM se baseia em quatro conceitos-chave, que são: i) entender e explorar o poder do tempo; ii) alterar a estrutura organizacional para conseguir redução do *lead time*; iii) utilizar os conceitos e ferramentas de dinâmica de sistemas (*System Dynamics*) e iv) fazer com que a redução de *lead time* compreenda a empresa como um todo. Diferentemente da Manufatura Enxuta, o QRM é uma abordagem que visa a melhoria de ambientes com alta variedade de produtos.

De acordo com Suri (1998), o objetivo do QRM é reduzir o *lead time* desde a ordem do pedido até a expedição do produto com destino ao cliente, o que inclui todos os processos dentro desse ciclo. Para isso, os conceitos, princípios e ferramentas do QRM podem ser aplicados a diferentes áreas de uma organização, tais como planejamento de materiais, compras, gestão da cadeia de suprimentos, operações de escritório (como por exemplo, processamento de pedidos) e desenvolvimento de produtos. Novamente, destaca-se que o conceito de *lead time* empregado por Suri (1998) também resulta da definição de *Manufacturing Critical-path Time* (MCT), proposta por Ericksen et al. (2007): é a típica quantidade de tempo, em dias corridos, desde a criação da ordem, passando pelo caminho crítico, até que pelo menos uma peça do pedido seja entregue ao cliente. Em relação à área de produção, Suri (1998) apresenta alguns princípios que permitem a compreensão do funcionamento do chão-de-fábrica, identifica a relação existente entre algumas variáveis do chão-de fábrica e também permite a identificação dos principais *trade-offs* dos objetivos de desempenho. Os princípios apresentados por Suri (1998) se referem a: i) entender que a alta utilização da capacidade não proporciona baixos *lead times*; ii) entender que a variabilidade encontrada em um sistema produtivo (seja ela variabilidade referente ao processo ou à

chegada de peças ou ordens de produção) gera um efeito no sistema produtivo; iii) encontrar o tamanho de lote de produção mais adequado para a redução do *lead time*; iv) Manutenção Preventiva Total (TPM) e redução de *setup*; v) utilização de manufatura celular e tecnologia de grupo e vi) utilização do sistema de coordenação de ordens denominado por Suri (1998) de *Paired-cell Overlapping Loops of Cards with Authorization* (POLCA).

Mais especificamente, os dez princípios apresentados por Suri (1998) estão apresentados a seguir:

Princípio 1: Encontrar uma maneira totalmente nova para executar uma tarefa, com foco na redução do *lead time*: esse princípio se refere à necessidade que as organizações tem de abandonar a mentalidade baseada apenas no custo e adotar práticas, em toda a companhia, que tenham a redução do *lead time* como foco. O pensamento de que cada pessoa deveria trabalhar mais rapidamente, mais arduamente e por longas horas para realizar o trabalho no menor tempo é um equívoco do ponto de vista do QRM. De acordo com Suri (1998) é preciso uma mudança de mentalidade e uma completa revisão da base sobre a qual a produção está organizada;

Princípio 2: Planejar a capacidade dos recursos críticos em 80% ou mesmo 70%: esse princípio destaca que altas taxas de utilização (máquinas e pessoas ocupadas o tempo todo) muitas vezes almeçadas pela gerência prejudicam a obtenção de baixos *lead times* ao gerar filas e altos níveis de WIPs, por exemplo. A relação entre utilização e *lead time* é advinda da Teoria de Filas, mas ainda, muito desconhecida no mundo corporativo e até entre acadêmicos. Um nível de utilização entre 80% e 70% gera menores *lead times*;

Princípio 3: Fazer da redução do *lead time* a principal medida de desempenho: Suri (1998) destaca a importância de se conhecer as relações dinâmicas entre as variáveis do chão-de-fábrica e seus efeitos no *lead time* e ainda, fazer do *lead time* a principal medida de desempenho. Muitas empresas utilizam a eficiência como principal medida de desempenho. Porém, eficiência não leva obrigatoriamente a redução do *lead time*;

Princípio 4: Medir e recompensar as reduções no *lead time* e não, entregas no tempo devido: no QRM, conforme destacado no princípio anterior, a principal medida de desempenho é a redução do *lead time*, ela é a meta; nas demais abordagens de gestão da manufatura, a redução do *lead time* é consequência das medidas de desempenho adotadas, como, por exemplo, utilização dos recursos, ou qualidade, dentre outras; reduzindo o *lead time*, as medidas de desempenho tradicionais, como redução de estoques, redução dos custos de produção, aumento da qualidade, produtividade, entre outras, também serão melhoradas. Também as entregas no tempo devido são resultados desejáveis, entretanto não devem ser

elegidas como medidas de desempenho, pois podem prejudicar os esforços de redução do *lead time*;

Princípio 5: Utilizar o MRP (*Material Requirements Planning*) somente para planejar e coordenar materiais no alto nível (planejamento da produção): o MRP é uma poderosa ferramenta para planejamento e coordenação de materiais, porém não é voltada para a redução do *lead time*. Para que isso seja realizado, é necessário que o MRP seja reestruturado para somente ser utilizado como ferramenta de planejamento em nível mais alto e para fornecer autorizações. Para o controle da produção nas células Suri (1998) recomenda que seja utilizado um sistema de controle da produção denominado POLCA (*Paired-cell Overlapping Loops of Cards with Authorization*), que é um sistema híbrido que puxa e empurra a produção, combinando os melhores fatores dos sistemas MRP (empurra) e Kanban (puxa), ao mesmo tempo em que corrige algumas limitações do Kanban. O sistema POLCA necessita que o *layout* seja celular;

Princípio 6: Motivar os fornecedores a implementar o QRM: para que ocorram maiores reduções no *lead time*, é necessário que os fornecedores entendam o programa QRM e não tomem medidas que atuem contra a política de redução de *lead time*;

Princípio 7: Fazer com que os clientes entendam o programa de QRM: o cliente precisa conhecer as vantagens do QRM para que possa adotá-lo. É preciso esclarecer aos clientes que pedidos em grandes quantidades levam a piora de medidas de desempenho relativas ao tempo. O objetivo deve ser o estabelecimento de uma parceria com os clientes visando pequenos lotes de produção a baixos custos;

Princípio 8: Eliminar as barreiras funcionais implementando células no escritório: esse princípio se refere à formação de células nas operações de escritório, com equipes multifuncionais (os chamados Q-ROC, *Quick Response Office Cell*), as quais deverão fazer reduções globais de *lead time*;

Princípio 9: Deixar claro a todos na empresa que a razão do programa QRM não é simplesmente reduzir o tempo para poder cobrar mais por trabalhos mais rápidos, mas sim, reduzir o tempo para criar uma empresa com sucesso no longo prazo:este princípio está relacionado à ideia de que a adoção do QRM visa estabelecer poder competitivo no longo prazo, por meio da competição baseada no tempo;

Princípio 10: Treinar as pessoas da empresa para mudar de mentalidade, pois o maior obstáculo do QRM é o preconceito: para que o programa QRM tenha sucesso

é necessário uma mudança de mentalidade dos gerentes. Isso deve ser feito por meio de treinamentos a respeito dos potenciais do QRM e de seus benefícios.

Uma análise mais profunda acerca dos princípios anteriormente apresentados pode ser encontrada em Suri (1998, 2010).

A próxima seção visa apresentar outra grande teoria de Gestão da Manufatura, a Teoria das Restrições.

2.2.4 Teoria das Restrições (TOC)

A Teoria das Restrições, conhecida pelo termo TOC, do inglês *Theory of Constraints* é uma abordagem de gestão apresentada na primeira versão do livro “A meta”, em 1984. Neste livro, que em 2014 teve sua edição de 30º aniversário publicada, Goldratt e Cox (2014) definem a meta de uma empresa como sendo obter lucro no presente assim como no futuro. E a TOC visa justamente proporcionar um caminho para que as empresas atinjam essa meta. O que hoje é conhecido como Teoria das Restrições é o resultado dos esforços, principalmente do Dr. Goldratt, e contém conceitos e metodologias para que a empresa aumente o *throughput*, reduza o estoque e corte despesas operacionais de forma simultânea (SIPPER; BULFIN, 1997).

De acordo com Gupta e Boyd (2008), a TOC é composta por três dimensões, a saber: mentalidade, medidas de desempenho e metodologia. Mas, de uma forma geral, a TOC pode ser definida como um meio de lidar com as restrições de um sistema (SIPPER; BULFIN, 1997). Naor, Bernardes e Coman (2013) destacam que há uma rica literatura que promove e dissemina os princípios da TOC, a saber: Goldratt e Cox (2014); Goldratt e Fox (1986), Goldratt (1990, 1994, 2002, 2008); Goldratt et al. (2000, 2009); Cox e Scheleier (2010); Gupta (2003); Watson; Blackstone e Gardiner (2007).

A teoria proposta por Eliyahu Goldratt é baseada na idéia de que cada sistema tem algumas restrições para atingir suas metas e em todo sistema, existe sempre pelo menos uma restrição (MOHAMMADI et al. 2015). Uma restrição é, segundo Goldratt e Cox (2014), tudo aquilo que limita o sistema de atingir um alto desempenho na busca pela sua meta. O sucesso consiste em gerenciar essas restrições e o sistema, na medida em que este interage com as restrições, de forma a obter o melhor resultado para o sistema como um todo (BALDERSTONE; MABIN, 1998). A TOC identifica três categorias de restrições, que são: i) restrições de recursos internos: que é o clássico gargalo, ou seja, uma máquina, um trabalhador ou uma ferramenta; ii) restrições de mercado: o mercado passa ser uma restrição

quando a demanda é menor que a capacidade produtiva. Neste caso, o mercado dita o ritmo da produção e iii) restrições de políticas: a política dita a taxa de produção como, por exemplo, uma política de não fazer hora extra (SIPPER; BULFIN, 1997).

Para melhorar o desempenho de um sistema produtivo, que tem seu potencial limitado por esses gargalos, a TOC propõem dois tipos de medidas de desempenho: medidas financeiras e medidas operacionais. As medidas financeiras utilizadas são clássicas, ou seja, lucro líquido, retorno sob investimento e fluxo de caixa. Já em relação às medidas operacionais, a TOC sugere três medidas, que são: i) *Throughput*: que é a taxa que o dinheiro é gerado pelo sistema por meio das vendas. E, nesse caso, produtos não vendidos não é um *throughput*; ii) Estoque: é o dinheiro que o sistema investiu na compra de coisas que pretende vender; iii) Despesas operacionais: é o dinheiro que o sistema gasta para transformar estoque em *throughput* (GOLDRATT, 1990).

Um componente técnico da TOC, que visa realizar a programação de operações é denominado OPT (*Optimized Production Technology*). A premissa da OPT é que os gargalos do sistema de produção são a base para a programação das operações e para o planejamento de capacidade. Os recursos são classificados em gargalo e não gargalo. Os recursos gargalo são programados na sua utilização máxima enquanto que os recursos não gargalo são programados para atender as necessidades dos recursos gargalo. E como destacam Ronen e Starr (1990), para atingir esse propósito de programação, a OPT é baseada em nove regras, a saber :

Regra 1 : Balacear o fluxo, não a capacidade;

Regra 2 : As restrições determinam a utilização dos recursos não-gargalo;

Regra 3 : Utilização e ativação de um recurso não são sinônimos;

Regra 4 : Uma hora perdida no gargalo é uma hora perdida em todo o sistema;

Regra 5 : Uma hora economizada em um recurso não-gargalo é uma miragem;

Regra 6 : Gargalos governam tanto o *throughput* quanto o estoque no sistema;

Regra 7 : O lote de transferência pode não ser e, muitas vezes, não deve ser igual ao lote de produção;

Regra 8 : O lote de produção deve ser variável, não fixo;

Regra 9 : Programações devem ser estabelecidas olhando todas as restrições. *Lead times* são o resultado da programação e não podem ser pré-determinados.

Historicamente, o OPT antecede a Teoria das restrições como hoje é conhecida. Foi nos meados da década de 1980 que os trabalhos do Dr. Goldratt se empenharam em transformar a ferramenta OPT em uma filosofia de gestão mais abrangente, ou seja, a TOC. Goldratt (1988) destaca que o resultado mais importante de seus esforços foi a formulação do que ele denominou como Teoria das Restrições e que considera tudo o que ele havia proposto anteriormente como um mero derivativo dessa teoria.

E como uma filosofia de gestão, a TOC propõe um meio para as empresas realizarem a melhoria contínua. São cinco passos desenvolvidos por Goldratt e Cox (2014), a saber :

1. Identificar as restrições do sistema;
2. Decidir como explorar as restrições do sistema;
3. Subordinar tudo às decisões tomadas no passo 2;
4. Elevar a restrição do sistema. O termo elevar significa tornar possível que o gargalo atinja um desempenho melhor em relação à meta;
5. Se nos passos anteriores uma restrição foi quebrada, voltar ao passo 1. Não deixar que a inércia se torne a restrição.

A partir desses cinco passos, Goldratt e Cox (2014) desenvolvem uma metodologia para a realização do controle do chão-de-fábrica dentro do contexto da TOC: o *drum-buffer-rope* (DBR), em português, tambor-pulmão-corda. De acordo com Watson, Blackstone e Gardiner (2007), a restrição, ou tambor (*drum*) determina o ritmo da produção. A corda (*rope*) é o mecanismo de liberação de material. O material é liberado para a primeira operação (ou estação) a um ritmo determinado pelo gargalo. A liberação do material é separada da programação do gargalo por um período de tempo fixo, o pulmão (*buffer*). Os pulmões são colocados estrategicamente para proteger as datas de envio de materiais e prevenir que os gargalos do processo fiquem ociosos devido a falta de materiais (o que é conhecido pelo termo *starvation*). Para mais informações sobre o DBR, o leitor pode consultar Blackstone (2010), assim como na vasta literatura da TOC.

Por fim, toda mentalidade, medidas de desempenho e metodologia propostas pela TOC podem ser condensadas em apenas uma palavra. E, de acordo com Goldratt (2010), essa palavra seria foco. Ainda de acordo com o Dr. Goldratt, foco é fazer o que deve ser feito e não fazer o que não deve ser feito. Isso enfatiza mais uma vez que os esforços em um sistema produtivo devem ser direcionados ao que realmente pode aproximar a empresa de atingir a sua meta, ou seja, esses esforços devem ser direcionados às restrições do sistema.

2.2.5 *Factory Physics: o chão de fábrica do ponto de vista científico*

Esta seção visa apresentar alguns aspectos da teoria de Hopp e Spearman (2001, 2008), denominada *Factory Physics*. Assim como no trabalho de Godinho Filho e Uzsoy (2009), as equações consideradas neste trabalho e, que descrevem o relacionamento entre as variáveis do chão-de-fábrica, foram retiradas desta abordagem.

Para Hopp e Spearman (2001, 2008) a gestão da manufatura é uma ciência aplicada e seu objetivo é o desempenho financeiro, no entanto, ela deve se apoiar na ciência, assim como a medicina se apoia na biologia e na química, por exemplo. Para esses autores, o fundamento científico promove uma série de ferramentas para a gestão da manufatura, tais como: i) precisão no entendimento de como os sistemas funcionam; ii) intuição por meio de modelos e iii) facilidade na síntese de sistemas complexos.

A manufatura pode se considerada um sistema complexo que envolve pessoas, equipamentos e dinheiro. E, a ciência, por meio de suas características quantitativa, simples e indutiva fornece à gestão da manufatura equações e modelos científicos que proporcionam recomendações valiosas. E é por meio das equações, que permitem a construção de um modelo para representar um sistema de manufatura real, que Hopp e Spearman (2001, 2008) contribuem para esse trabalho.

Segundo Hopp e Spearman (2001, 2008), a Gestão da Manufatura é falha em duas questões centrais: no entendimento da estrutura de um sistema e também no entendimento da causa final do mesmo, ou seja, o propósito pelo qual o sistema foi criado. Goldratt e Cox (2014) contribuíram com o entendimento da causa final dos sistemas de produção ao definir a meta de uma empresa: obter lucro agora e no futuro. No entanto, os autores destacam a necessidade de especificar essa meta em termos mais operacionais, o que é proposto pela teoria denominada *Factory Physics*.

O padrão de um sistema, de acordo com Hopp e Spearman (2001, 2008), envolve dois elementos fundamentais: demanda e transformação. Tais elementos contribuem para a definição da essência da produção, ou seja: transformar materiais em produtos ou serviços para atender a demanda. No entanto, a demanda varia o que torna impossível o perfeito alinhamento entre a demanda e a transformação que acaba por gerar estoques.

Segundo Hopp e Spearman (2001, 2008), um pulmão (ou *buffer*, em inglês) pode existir de três formas distintas, a saber:

- estoque em processo: material em transformação;

- tempo: uma diferença entre demanda e atendimento da demanda e
- capacidade: potencial extra de produção necessário para atender uma demanda inesperada ou irregular.

Essas três formas possíveis de *buffer* são utilizadas para ajustar a demanda ao processo de transformação, entretanto, inibem a eficiência da produção. O perfeito alinhamento entre demanda e transformação se torna impossível devido à variabilidade, característica inerente aos sistemas produtivos. Assim, para reduzir os estoques se torna essencial entender as causas da variabilidade e atacá-las (HOPP; SPEARMAN, 2001, 2008).

Hopp e Spearman (2001, 2008) ainda destacam a importância de se entender o relacionamento entre os três tipos de estoques e traduzi-los em políticas operacionais mais detalhadas. Isso requer o uso de modelos que devem ser precisos o suficiente para representar os relacionamentos-chave e fornecer *insights*. Tais relacionamentos se dão por meio de um conjunto de equações matemáticas derivadas da Teoria das Filas. De acordo com Pentillä (2005), a abordagem *Factory Physics* estabelece um conjunto de leis para explicar o comportamento e o relacionamento entre variáveis no chão de fábrica, fornecendo ferramentas para análise das operações existentes, para projeto de possíveis esforços de melhorias e para análise de *trade-offs*.

A definição de objetivos mais delineados, expressos em termos de variáveis usuais para esse nível é de vital importância para que as decisões operacionais de uma empresa estejam de acordo com o objetivo fundamental da mesma. Dessa forma, de acordo com Hopp e Spearman (2001, 2008), um objetivo fundamental pode ser composto por vários objetivos subordinados, que por sua vez, são igualmente importantes do ponto de vista estratégico. Os autores destacam quatro objetivos subordinados que tem elevada importância, sendo considerados ganhadores de pedido, são eles: i) Preço - decisão gerencial que leva em consideração a competição do mercado; ii) Tempo – *lead time* é o componente-chave do valor percebido pelo cliente, e depende do tempo de manufatura e de políticas de controle de estoque; iii) Qualidade – consiste em uma variedade de formas, tais como taxa de refugo; iv) Variedade – pode aumentar a satisfação do cliente, mas oferecer mais produtos implica complexidade e aumento de custo. A ênfase em uma dessas dimensões define a estratégia de negócio da empresa. Uma empresa pode dar ênfase ao preço, oferecendo preços mais baixos ou ao tempo, disponibilizando serviços mais rápidos, no entanto a um preço maior.

De acordo com Standridge (2004), a abordagem *Factory Physics* fornece uma descrição sistêmica, expressa por meio de algumas leis que descrevem o comportamento

básico de um sistema. Este autor também aponta que esta abordagem tem o potencial de contribuir para a realização de estudos utilizando simulação. Tal potencial é explorado por Godinho Filho e Uzsoy (2009), sendo que o modelo desenvolvido por esses autores utiliza equações matemáticas apresentadas por Hopp e Spearman (2001, 2008).

2.2.5.1 Definições e parâmetros:

De acordo com Hopp e Spearman (2001, 2008), o método científico requer uma terminologia precisa; o que não é uma característica encontrada na literatura de gestão de operações e manufatura. Sendo assim, se faz necessária a apresentação e definição de algumas variáveis, parâmetros e medidas de desempenho, que será feito a seguir:

- **Estação de trabalho:** coleção de uma ou mais máquinas ou estações manuais que desempenham funções idênticas. Sinônimos para o termo estação de trabalho são: estação, centro de trabalho e centro de processamento;
- **Peça:** é um pedaço de matéria-prima, um componente, um subconjunto, ou um conjunto que é processado em alguma estação de trabalho na planta. **Matéria-prima** é um termo que se refere a peças compradas fora da planta. **Componentes** são peças individuais que são montadas em produtos mais elaborados. **Subconjuntos** são unidades montadas que serão transformadas em produtos mais complexos. **Conjuntos** são produtos completamente montados ou itens acabados. Itens acabados, por sua vez, são peças que são vendidas para o cliente final; podem estar montados ou não;
- **Materiais de consumo:** são utilizados na estação de trabalho, mas não se tornam parte do produto final. Os materiais de consumo não são indicados na lista de materiais. Exemplos: lubrificantes, gases, dentre outros. Os materiais de consumo geralmente têm um procedimento de compra diferente daquele utilizado para a compra de matéria-prima;
- **Roteiro de fabricação:** descreve a sequência de estações de trabalho pela qual uma peça passa. Roteiros de fabricação se iniciam com matéria-prima, componente, ou estoque de subconjunto e terminam em estoques intermediários ou inventários de itens acabados;
- **Ordem do cliente:** uma ordem é um pedido de um cliente para um determinado produto, em uma determinada quantidade, para ser entregue em uma data prometida;

- **Tarefa:** se refere a um conjunto de materiais que percorrem um roteiro de fabricação, junto com uma informação (desenhos, lista de materiais, etc);
- **Variabilidade:** é a qualidade de não-conformidade de uma classe de entidades. Para uma análise efetiva da variabilidade, devemos saber quantificá-la; o que pode ser feito utilizando medidas-padrão da Estatística;
- **Variância:** simbolizada pela letra grega sigma ao quadrado (σ^2), é uma medida de variabilidade absoluta, assim como o **desvio padrão** – definido como a raiz quadrada da variância;
- **Coefficiente de variação (CV):** medida relativa apropriada de variabilidade para uma variável aleatória e definida como o desvio padrão dividido pela média. Se a média é representada por t e a variância por σ , o coeficiente de variação, denotado por c , pode ser escrito conforme a equação 2.1:

$$c = \frac{\sigma}{t} \quad (2.1)$$

Usualmente pode ser conveniente a utilização do quadrado do coeficiente de variação, conforme apresenta a equação 2.2:

$$c^2 = \frac{\sigma^2}{t^2} \quad (2.2)$$

De acordo com Hopp e Spearman (2001, 2008), a variável coeficiente de variação é capaz de definir um conjunto de classes de variabilidade, a saber: i) **baixa variabilidade:** variáveis com CV menor que 0,7; ii) **média variabilidade:** variáveis com CV entre 0,75 e 1,33 e iii) **alta variabilidade:** quando o CV é superior a 1,33.

A seguir estão definidas algumas medidas de desempenho-chave apresentadas por Hopp e Spearman (2001, 2008):

- **Throughput (TH) ou Taxa de Throughput:** saída média do processo de produção (máquina, linha, planta, estação de trabalho) por unidade de tempo. No nível de vendas, o *throughput* é definido como a produção por unidade de tempo que é vendida. Em uma linha de produção, *throughput* é a quantidade de bens produzidos por unidade de tempo.
- **Capacidade Efetiva (r_e):** é a capacidade efetiva de uma estação de trabalho, representada pela equação 2.3 a seguir:

$$r_e = \frac{n}{t_e} \quad (2.3)$$

Onde:

n é número de máquinas idênticas (com mesmos parâmetros) que compõem a estação de trabalho;

t_e é o tempo de processamento efetivo de uma estação de trabalho;

- **Utilização (u):** a utilização de uma estação de trabalho é a fração de tempo que a estação não está ociosa. Inclui a fração de tempo em que a estação está trabalhando, mas também o tempo em que a mesma está parada devido a falhas de máquinas, *setups*, manutenção, entre outros. A utilização pode ser expressa por meio da equação 2.4:

$$u = \frac{r_a}{r_e} \quad (2.4)$$

Onde:

r_a é a taxa de chegadas, a qual é dada pelo número de ordens que chegam em uma estação de trabalho por unidade de tempo;

r_e é a capacidade efetiva de uma estação de trabalho.

- **Estoque em processo ou WIP (*Work in Process*):** é o inventário entre os pontos inicial e final de um roteiro de fabricação. Envolve todos os produtos entre esses dois pontos, não incluindo apenas os produtos constituintes do estoque final;
- **Lead time global, tempo de ciclo, tempo de fluxo, tempo de *throughput*:** a definição adotada nesse trabalho é a definição proposta por Erickesen et al. (2007): “é a típica quantidade de tempo, em dias corridos, desde a criação da ordem, passando pelo caminho crítico, até que pelo menos uma peça do pedido seja entregue ao cliente”;
- **Disponibilidade:** é a fração do tempo na qual uma estação não está sendo reparada. Matematicamente, é a fração entre o tempo médio entre falhas e o somatório do tempo médio entre falhas e o tempo médio de reparo, conforme apresentado pela equação 2.5 a seguir:

$$A = \frac{m_f}{m_f + m_r} \quad (2.5)$$

Onde: m_f é o tempo médio entre falhas e m_r é o tempo médio de reparo.

Após a apresentação de algumas medidas de desempenho importantes para Gestão da Manufatura, e conseqüentemente, para o presente trabalho, é importante destacar nesse ponto a Lei de Little, dada pela equação 2.6, que relaciona três medidas de desempenho citadas acima:

$$WIP = TH \times TC \quad (2.6)$$

Onde o TC representa o *lead time*, TH, o *throughput* e WIP, o estoque em processo. A demonstração dessa lei e uma explicação mais ampla podem ser encontradas em Little (1961).

Por fim, a teoria desenvolvida por Hopp e Spearman (2001, 2008) constitui um pilar do modelo Godinho Filho e Uzsoy (2009) e uma relevante contribuição para a Gestão da Manufatura. A Seção 2.3 a seguir apresenta as equações, advindas da teoria *Factory Physics*, que são utilizadas no modelo Godinho Filho e Uzsoy (2009).

2.3 Lógica de funcionamento do modelo Godinho Filho e Uzsoy (2009)

No sistema de manufatura representado no modelo Godinho Filho e Uzsoy (2009), os tempos de chegada e de processamento são genéricos, o que na notação da Teoria das Filas, pode ser representado por uma fila do tipo G/G/1.

O ambiente de chão-de-fábrica contém uma estação de trabalho de máquina única, que recebe tarefas a uma determinada **taxa de chegadas** (r_a) e as processa na mesma taxa, denominada taxa de *throughput*. As peças chegam à estação de trabalho em lotes de produção com L peças, em média, e com um **tempo médio entre chegadas** aqui denominado de t_a , cujo **coeficiente de variabilidade é dado por c_a** . A taxa média de chegadas (r_a) é o inverso do tempo médio entre chegadas, de forma que $r_a = 1/t_a$.

A taxa média de chegada de ordens na estação, considerando o sistema em equilíbrio, deve ser igual à demanda média para evitar a formação de filas de tarefas. Matematicamente, a **taxa de chegadas**, r_a , pode ser representada pela equação 2.7:

$$r_a = \frac{D}{LH} \quad (2.7)$$

Onde: D é a demanda média anual; L é o tamanho de lote de produção; H é o número de horas trabalhadas no ano.

A **taxa de produção da estação de trabalho**, r_e , advém de Hopp e Spearman (2001, 2008) e é expressa pela equação 2.8:

$$r_e = \frac{1}{L \times t_e} \quad (2.8)$$

Onde: L é o tamanho do lote de produção, t_e é o tempo de processamento efetivo global e é constituído, de acordo com Godinho Filho e Uzsoy (2009) a partir do tempo de processamento, considerando três efeitos, a saber:

- a) efeito de paradas preemptivas (para o modelo, falha de máquinas);
- b) efeito de paradas não-preemptivas (para o modelo, tempos de *setup*);
- c) efeito de problemas de qualidade (taxa de defeitos).

O coeficiente de variação do tempo natural de processamento, C_0 é dado pela relação entre o tempo natural de processamento, t_0 , e a variância associada a esse tempo, σ_0^2 , conforme a expressão 2.9:

$$C_0 = \frac{\sqrt{\sigma_0^2}}{t_0} \quad (2.9)$$

Onde: t_0 é o tempo natural de processamento e σ_0^2 é a variância do tempo natural de processamento.

O tempo de processamento efetivo considera as paradas preemptivas (falha de máquinas) e é denotado por t_e^f e é apresentado pela equação 2.10:

$$t_e^f = \frac{t_0}{A} \quad (2.10)$$

Onde: A é a disponibilidade da máquina e t_0 o tempo natural de processamento.

A **variância** e o coeficiente de variação de t_e^f são dados pelas expressões 2.11 e 2.12, respectivamente:

$$\sigma_e^f = \left(\frac{\sigma_0}{A} \right)^2 + \frac{(m_r^2 + \sigma_r^2)(1-A)t_0}{Am_r} \quad (2.11)$$

$$(c_e^f) = \sqrt{c_0^2 + (1 + c_r^2)A(1-A) \frac{m_r}{t_0}} \quad (2.12)$$

Onde: σ_r^2 é a variância no tempo de reparo e m_r é o tempo médio de reparo e c_r é o coeficiente de variação do tempo de reparo.

A **disponibilidade da estação de trabalho**, denotada por A , é representada por:

$$A = \frac{m_f}{m_f + m_r} \quad (2.13)$$

Onde: m_f é o tempo médio entre falhas.

O **tempo de processamento efetivo incorporando, além do tempo natural de processamento, o efeito de paradas preemptivas e de paradas não preemptivas**, é denotado por t_e^0 e pode ser denotado conforme a expressão 2.14:

$$t_e^0 = t_e^f + \frac{t_s}{N_s} \quad (2.14)$$

Onde: o termo t_s representa o tempo médio de duração dos *setups* e N_s é o número médio de peças processadas entre *setups* (número de peças presente em um lote de produção).

A **variância de t_e^0** é dada pela equação 2.15:

$$(\sigma_e^0)^2 = (\sigma_e^f)^2 + \frac{\sigma_s^2}{N_s} + \frac{N_s - 1}{N_s^2} t_s^2 \quad (2.15)$$

Onde: σ_s^2 é a variância do tempo de *setup*.

O coeficiente de variação do tempo de processamento efetivo incorporando, além do tempo natural de processamento, o efeito de paradas preemptivas e de paradas não preemptivas, c_e^0 , é dado pela expressão 2.16:

$$c_e^0 = \sqrt{\frac{(\sigma_e^0)^2}{(t_e^0)^2}} \quad (2.16)$$

Onde: $(\sigma_e^0)^2$ é a variância do tempo de processamento efetivo incorporando, além do tempo natural de processamento, o efeito de paradas preemptivas e de paradas não preemptivas, denotado por t_e^0 .

Deve-se ressaltar ainda que o último componente do tempo de processamento efetivo são os problemas de qualidade, nesse caso representado pelo efeito de itens defeituosos. Logo, o **tempo de processamento efetivo, considerando o tempo natural, o efeito de paradas preemptivas e de problemas de qualidade** é denotado pela equação 2.17:

$$t_e = \frac{\frac{t_0}{A} + \frac{t_s}{N_s}}{1-p} \quad (2.17)$$

Onde: p é a taxa de itens defeituosos.

A **variância para o tempo médio de processamento efetivo** é dada pela expressão 2.18:

$$\sigma_e^2 = \frac{(\sigma_e^0)^2}{1-p} + \frac{p(t_e^0)^2}{(1-p)^2} \quad (2.18)$$

Onde: $(\sigma_e^0)^2$ é a variância do tempo de processamento efetivo incorporando, além do tempo natural de processamento, o efeito de paradas preemptivas e de paradas não preemptivas, denotado por t_e^0 e p é a taxa de itens defeituosos.

E o **coeficiente de variação do tempo de processamento efetivo**, c_e , é representado pela equação 2.19 a seguir:

$$c_e = \sqrt{\left(\frac{\sigma_e}{t_e}\right)^2} \quad (2.19)$$

Onde: σ_e ao quadrado é a variância para o tempo médio de processamento efetivo (dada pela equação 2.18) e t_e é o tempo de processamento efetivo, considerando o tempo natural, o efeito de paradas preemptivas e de problemas de qualidade (apresentado pela equação 2.17).

A utilização da estação de trabalho considerada no modelo é representada como em Hopp e Spearman (2001, 2008), por meio da equação 2.20:

$$u = \frac{r_a}{r_e} \quad (2.20)$$

Onde: r_a é a taxa de chegadas de ordens na estação e r_e é a taxa de produção efetiva da estação.

Logo a **utilização da estação** considerada pode ser representada pela equação 2.21:

$$u = \frac{D}{LH} \times Lt_e = \frac{Dt_e}{H} \quad (2.21)$$

Onde: D é a demanda de peças por ano, t_e é o tempo de processamento efetivo, considerando o tempo natural, o efeito de paradas preemptivas e de problemas de qualidade (apresentado pela equação 2.17) e H é o número de horas trabalhadas por ano.

Uma medida de desempenho que tem importância central no modelo desenvolvido por Godinho Filho e Uzsoy (2008) é o *lead time* médio (TC):

$$TC = TC_f + t_e \quad (2.22)$$

Onde: TC_f é o **tempo médio de fila** e o t_e é o tempo de processamento efetivo, considerando o tempo natural, o efeito de paradas preemptivas e de problemas de qualidade (apresentado pela equação 2.17)

O tempo médio de fila, TC_f , para um sistema do tipo G/G/1, pode ser representado por meio da equação de Kingman, ilustrada pela equação 2.23:

$$TC_f(G/G/1) = \left(\frac{c_a^2 + c_e^2}{2} \right) \left(\frac{u}{1-u} \right) t_e \quad (2.23)$$

Onde: c_a é o coeficiente de variabilidade do tempo médio entre chegadas de peças (denominado por t_a), c_e é o coeficiente de variação do tempo de processamento efetivo (apresentado na equação 2.19), u é a utilização (equação 2.21) t_e é o tempo de processamento efetivo (apresentado pela equação 2.17).

Considerando o tempo de processamento de um lote de produção de tamanho L como sendo o produto entre o tamanho do lote de produção (L) e seu tempo de processamento efetivo (t_e), o **lead time médio da estação de trabalho** em estudo pode ser calculado pela expressão 2.24:

$$TC = \left(\frac{c_a^2 + c_e^2}{2} \right) \left(\frac{u}{1-u} \right) Lt_e + Lt_e \quad (2.24)$$

O estoque em processo representa outra medida de desempenho importante no modelo e é dado pela Lei de Little (LITTLE, 1961), mostrada na equação 2.6. Assim, considerando que o *throughput*, TH , é igual à taxa de chegadas de tarefas em uma estação de trabalho, r_a , o **WIP** pode ser expresso matematicamente conforme a equação 2.25:

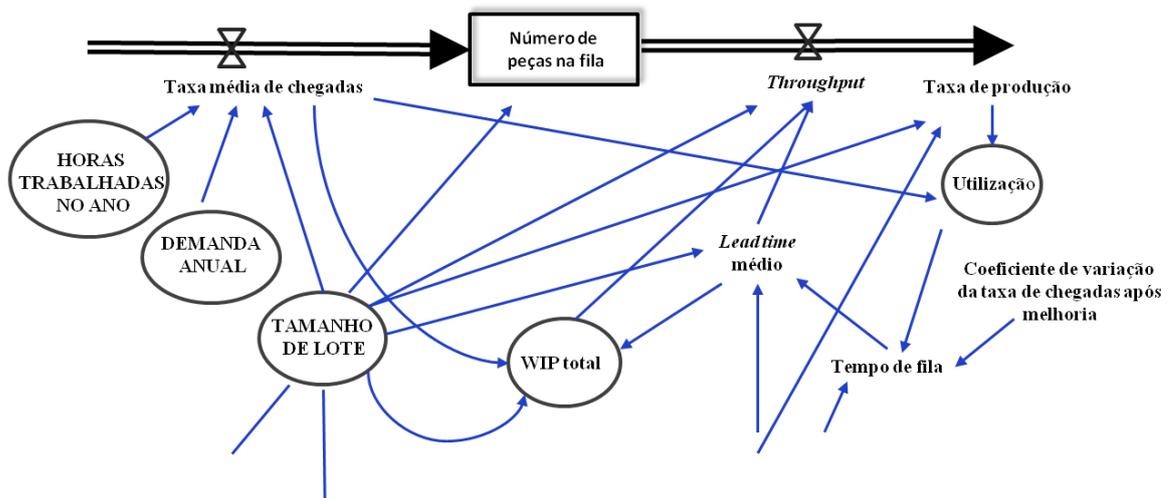
$$WIP = r_a \times TC \times L \quad (2.25)$$

Por fim, as equações acima descritas estão relacionadas e representadas graficamente na Figura 2.4 a seguir, que representa parte principal do modelo de Godinho Filho e Uzsoy (2009).

É importante destacar que a Figura 2.4 apresenta parte dos relacionamentos existentes entre as equações anteriormente apresentadas. Para um melhor entendimento dessas relações, apresenta-se a seguir um recorte do modelo onde será analisada a taxa média de chegadas, conforme pode ser visto na Figura 2.5 (onde estão destacados os parâmetros que impactam na taxa média de chegadas e os parâmetros que dependem da mesma).

De acordo com a equação 2.7 apresentada anteriormente, a taxa média de chegadas tem como *inputs* a demanda anual média, o tamanho do lote de produção e a quantidade de horas trabalhadas no ano e, impacta na utilização e no *WIP* total, como pode ser visto pelas equações 2.01 e 2.25, respectivamente.

FIGURA 2.5 - Recorte do modelo Godinho Filho e Uzsoy (2009), no Vensim - detalhe dos parâmetros que impactam a taxa média de chegada e das variáveis que são impactadas por ela.



Fonte: Adaptado de Godinho Filho e Uzsoy (2009)

Assim, o mesmo raciocínio pode ser aplicado aos demais parâmetros e variáveis envolvidas na modelagem de um sistema de máquina única. A Figura 2.5 representa a abordagem *hard* da teoria *System Dynamics*, onde são utilizados diagramas estoque-fluxo que permitem relacionar as entidades de um modelo por meio de relações matemáticas e, ainda, explorar a evolução de um sistema ao longo do tempo e dentro de um período de interesse.

Além dos diagramas estoque-fluxo de todas as variáveis envolvidas, o modelo Godinho Filho e Uzsoy (2009) apresenta ainda um mecanismo que modela a melhoria contínua, fator crucial para a avaliação das melhorias realizadas. Um modelo de melhoria

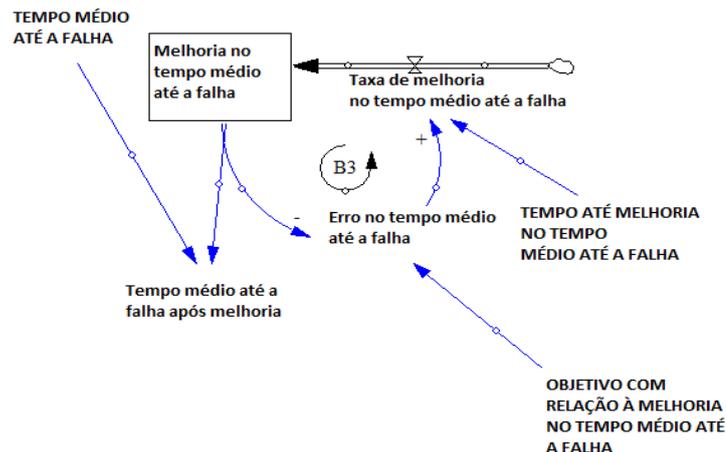
exponencial foi considerado, em que o valor do parâmetro, aqui denominado M , em um dado tempo t é dado conforme a expressão 2.26:

$$M(t) = (M_0 - G)e^{-t/\tau} \quad (2.26)$$

Onde: M_0 denota o valor inicial do parâmetro e G , o nível mínimo para qual o parâmetro pode ser reduzido.

O parâmetro τ representa o tempo necessário para a melhoria ocorrer, após (ou durante) a realização de programas de melhoria contínua nas variáveis contempladas no modelo Godinho Filho e Uzsoy (2009). A Figura 2.6 mostra como foi modelada a estrutura de melhoria para o tempo médio até a falha. Como se observa, a estrutura mostrada é ligada à variável tempo médio até a falha após melhoria. Outras sete estruturas similares à mostrada na Figura 2.6 são utilizadas para modelar as melhorias contínuas nas demais variáveis consideradas (variabilidade da taxa de chegada das ordens no sistema, variabilidade natural do processo, variabilidade do tempo de reparo das máquinas, variabilidade do tempo de *setup*, taxa média de defeitos do processo, tempo de *setup* e tempo médio de reparo da máquina).

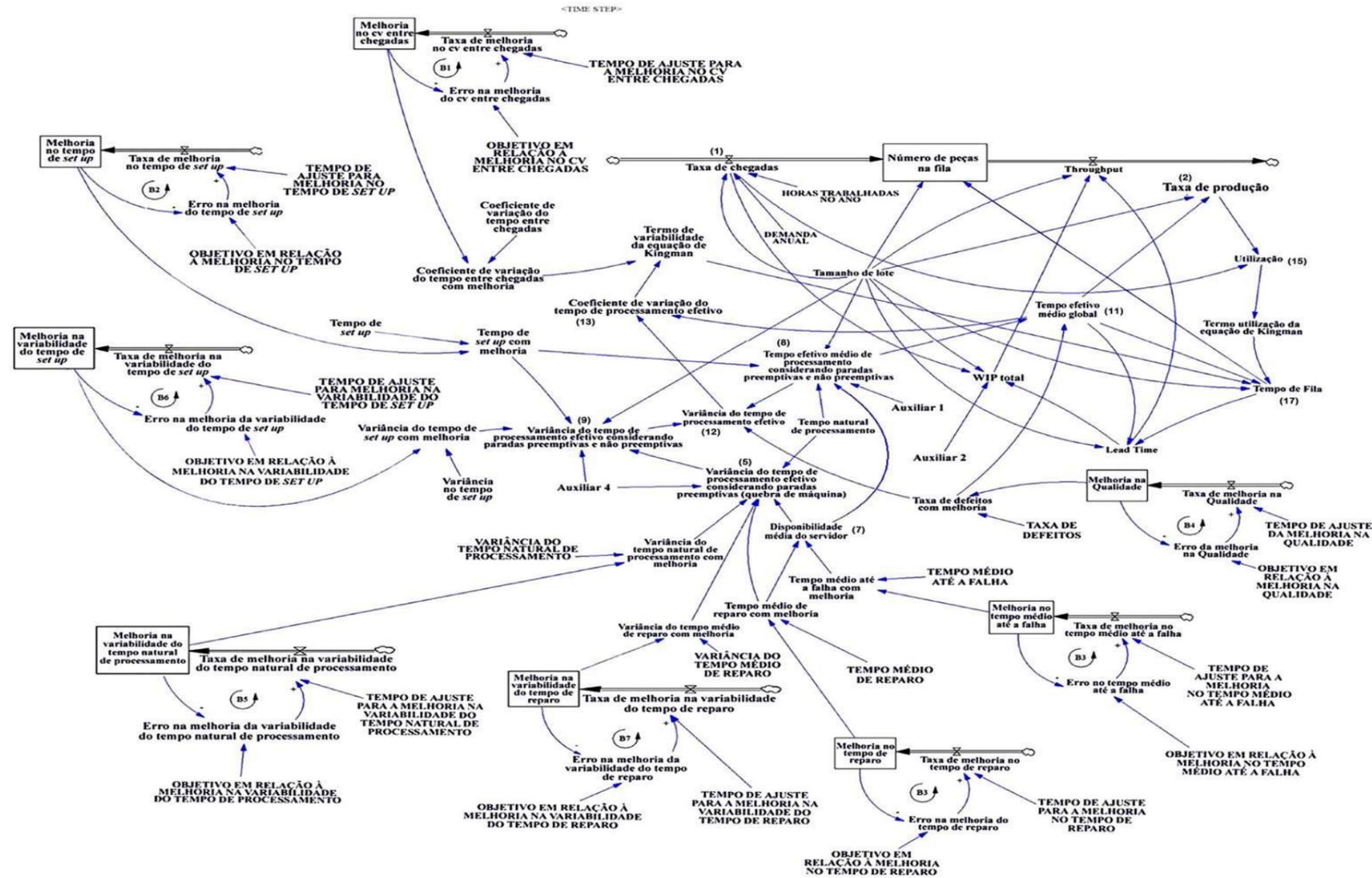
FIGURA 2.6 - Estrutura modelada em SD para representar o mecanismo de melhoria no tempo médio até a falha.



Fonte: Godinho Filho e Uzsoy (2009).

Portanto, o modelo desenvolvido é formado pela junção dos elementos apresentados na Figura 2.5 e na Figura 2.6 para todas as seis variáveis. A Figura 2.7 a seguir ilustra o modelo Godinho Filho e Uzsoy (2009), de forma completa.

FIGURA 2.7 - Representação dos relacionamentos entre as variáveis de um sistema de máquina única, no modelo Godinho Filho e Uzsoy (2009).



Fonte: Godinho Filho e Uzsoy (2009).

2.4 Resultados obtidos pelos trabalhos que utilizam a abordagem híbrida *System Dynamics – Factory Physics*

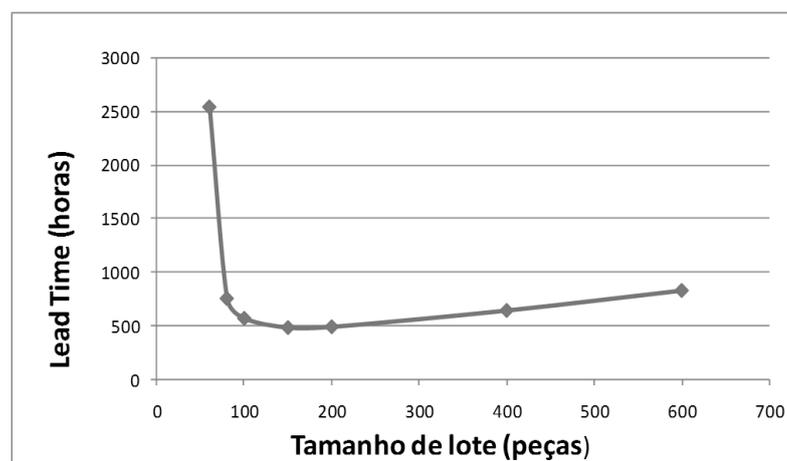
Nesta seção são explicitados os principais resultados dos trabalhos que o grupo de pesquisa GePRELT tem realizado ao longo dos últimos sete anos. Trabalhos estes representados anteriormente pela Figura 2.2 (ver página 27).

Godinho Filho e Uzsoy (2009) estudam o efeito conjunto de seis programas de Melhoria Contínua – CI (variabilidade na taxa de chegada, variabilidade do processo, qualidade, tempo entre falhas, tempo de reparo e tempo de *setup*) e de redução de tamanhos de lote de produção nos níveis médios de estoque em processo (WIP) e utilização em um ambiente produtivo com uma única máquina que processa múltiplos produtos. Como conclusão, os autores constataam que: 1) quando os tamanhos de lote de produção são grandes, a redução da variabilidade do processo contribui largamente para a redução do WIP. Conforme os tamanhos de lote de produção são reduzidos, a importância da variabilidade do processo diminui. Neste contexto, o programa de melhoria no tempo de *setup* passa a ser o programa que mais contribui para a redução do WIP; 2) é preferível, referente à redução no WIP, investir em pequenas melhorias em um grande número de parâmetros do sistema de produção do que se investir na implantação de um grande programa para melhoria de somente um parâmetro do sistema. Esta conclusão independe do tamanho de lote de produção utilizado; 3) existe uma relação convexa entre tamanho de lote de produção e WIP, ou seja, existe um tamanho de lote de produção ótimo para o qual o nível médio de WIP é mínimo. Os autores também destacam a importância de se conhecer a relação entre tamanho de lote de produção e WIP antes de se determinar quanto se deve reduzir no tamanho de lote de produção; 4) com relação ao efeito dos programas de melhoria contínua na utilização, o estudo mostrou que quando grandes tamanhos de lote de produção são utilizados, todos os programas de CI avaliados apresentaram pouco ou nenhum efeito no nível médio de utilização do sistema. Conforme tamanhos de lote de produção menores são utilizados, programas de melhoria no *setup* apresentam o melhor resultado com relação à redução dos níveis médios de utilização do sistema; 5) investimentos em programas de redução de *setup* se mostraram como sendo a melhor alternativa para se tentar manter os níveis de utilização baixos enquanto as reduções de tamanho de lote de produção são efetuadas.

Em Godinho Filho e Uzsoy (2010, 2011) são estudados os efeitos dos seis programas, abordados em Godinho Filho e Uzsoy (2009), na curva que relaciona tamanho de lote de produção e *lead time*. Karmarkar et al. (1985) foram os primeiros a introduzir a relação convexa, em formato U, existente entre tamanho de lote de produção e *lead time*. Basicamente, esta relação baseia-se na Teoria de Filas, mais especificamente na chamada fila G/G/1 (sistema de manufatura modelado como um servidor único com tempos entre chegadas e de processamento genéricos). A Figura 2.8 ilustra basicamente a relação entre tamanho de lote de produção e *lead time*. Lambrecht e Vandaele (1996) descrevem esta relação: tamanhos de lote de produção grandes causarão longos *lead times* (efeito do tamanho de lote de produção); conforme os tamanhos de lote de produção são reduzidos, o *lead time* também decrescerá, mas, uma vez que um tamanho de lote de produção mínimo é alcançado, uma redução do tamanho do lote de produção além deste valor causará um aumento na intensidade do tráfego no fluxo produtivo, também resultando em *lead times* longos (efeito de saturação).

Para uma correta interpretação desse comportamento, faz-se a leitura do eixo das abscissas (“tamanho de lote de produção”) da Figura 2.8 da direita para a esquerda. Assim, à medida que observa-se o decaimento do tamanho do lote de produção que ocorre neste sentido, observa-se a redução do *lead time*, no eixo das ordenadas. No entanto, a partir de certo valor (entre 100 e 150 peças, na Figura 2.8) há uma inversão do comportamento do *lead time*, que passa a crescer caso o tamanho do lote de produção seja reduzido.

FIGURA 2.8 - Ilustração da relação entre tamanho de lote de produção e *lead time*.



Fonte: Godinho Filho e Uzsoy (2010).

As principais conclusões extraídas dos trabalhos de Godinho Filho e Uzsoy (2010, 2011) foram:

- Dos seis programas de melhoria estudados, cinco deles (exceção feita ao programa de melhoria na variabilidade na chegada das ordens) trouxeram a curva tamanho de lote de produção x *lead time* para baixo e para esquerda, fazendo com que o tamanho de lote de produção ótimo com relação ao *lead time* possa ser menor;

- O programa de melhoria na variabilidade da chegada das ordens teve um efeito muito pequeno com relação à curva tamanho de lote de produção x *lead time*. Esse resultado mostra que esforços para redução da variabilidade na chegada das ordens de produção não apresentam grande efeito na redução do *lead time*; portanto é possível se reduzir o *lead time* por meio da implantação de programas de melhoria contínua em outras variáveis do chão de fábrica mesmo em um ambiente caracterizado por alta variabilidade na chegada das ordens. Esse resultado muito provavelmente se deve ao fato de que esse trabalho estudou um ambiente com uma única estação de trabalho;

- A relação convexa entre tamanho de lote de produção e *lead time* mostra que simplesmente reduzir o tamanho de lote de produção (sem se conhecer exatamente o formato da curva tamanho de lote de produção x *lead time*) não garante a redução do *lead time*. Os resultados apresentados nestes artigos mostram que grandes reduções nos tamanhos de lote de produção, mesmo acompanhados por melhorias (por exemplo, na variabilidade do processo, na qualidade e no tempo entre falhas) pode ter efeito pior no *lead time* do que uma redução mais gradual no tamanho de lote de produção. Em termos gerais, a mensagem é que se deve conhecer a relação tamanho de lote de produção x *lead time* antes de se decidir a respeito de reduções no tamanho de lote de produção;

- Se uma empresa trabalha com um tamanho de lote de produção próximo ao tamanho de lote de produção ótimo com relação a *lead time* (valor mínimo da curva tamanho de lote de produção x *lead time*), a necessidade de programas de melhoria com relação à quebra de máquinas diminui; dessa forma, conforme menos se conhece e se utiliza a curva tamanho de lote de produção x *lead time*, mais necessários se fazem programas de melhorias nos tempos de reparo e tempo entre falhas;

- O programa de redução nos tempos de *setup* atinge melhor resultado com relação ao *lead time* quando tamanhos de lote de produção pequenos são utilizados. Na verdade, a melhoria no tempo de *setup* permite que o sistema produtivo trabalhe com tamanhos de lote de produção bem menores do que aqueles que seriam utilizados caso nenhuma melhoria no tempo de *setup* tivesse sido implementada. Este resultado fornece suporte à literatura que

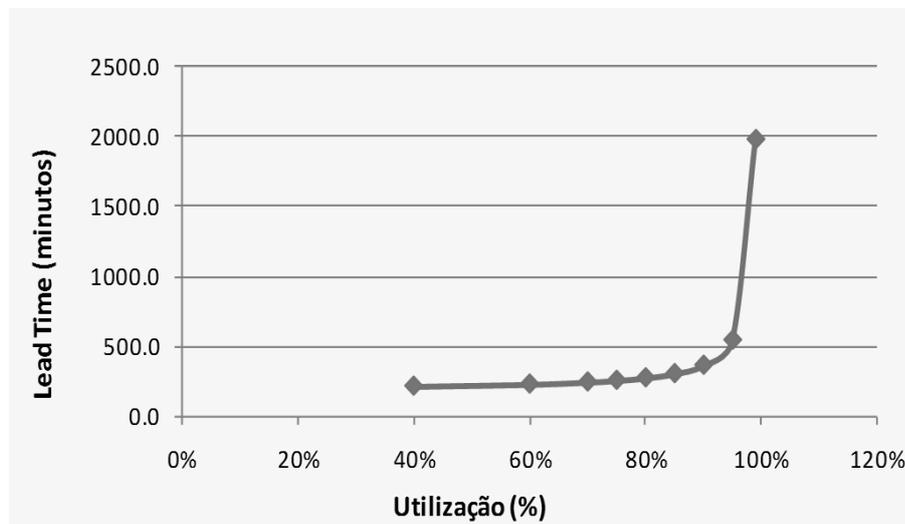
defende a importância da utilização de métodos de redução de *setup*, como, por exemplo, o método SMED (*Single Minute Exchange of Die*) de Shingo (1986).

Além dessas contribuições, Godinho Filho e Uzsoy (2010, 2011) também realizaram uma série de experimentos visando comparar o efeito de grandes melhorias (50%) em somente uma variável com o efeito da implementação de pequenas melhorias (variando de 5% a 20%) em múltiplas variáveis de forma simultânea. Com relação a esse tópico, os autores concluíram que investir em pequenas melhorias em muitas variáveis de forma simultânea é uma política melhor (com relação à melhoria no *lead time* para um mesmo tamanho de lote de produção utilizado) do que realizar uma grande melhoria (a qual, geralmente, pressupõe um investimento maior) em somente uma variável. Verificou-se, por exemplo, que o programa para 15% de melhoria simultânea em todas as variáveis apresenta melhor desempenho em relação à redução de *lead time* do que todos os outros programas para grandes (50%) melhorias em somente uma variável (com exceção do caso no qual um tamanho de lote de produção muito pequeno é utilizado; nesse caso específico, a melhoria de 50% no tempo de *setup* apresentou o melhor desempenho). Estes resultados fornecem suporte à literatura a respeito dos modelos gerenciais japoneses (como por exemplo, *Just in time* e Sistema Toyota de Produção), a qual defende a necessidade e importância da melhoria contínua e simultânea em todas as variáveis do sistema produtivo.

Godinho Filho (2012) utilizam a abordagem híbrida SD-FP para estudar o efeito dos seis programas de melhoria contínua em curvas de operação logística. Godinho Filho e Uzsoy (2013) ampliam esse trabalho para um ambiente *flow shop* com 5 estações de trabalho. As curvas de operação logística (*operation curves*), também denominadas curvas características (*characteristic curves*), relacionam dois indicadores de desempenho fundamentais de um sistema de manufatura: *lead time* e utilização.

Basicamente, uma curva de operação logística pode ser construída baseando-se em uma conhecida equação advinda da Teoria de Filas (chamada fila G/G/1), a qual Hopp e Spearman (2001, 2008) denominam equação de Kingman. O formato básico de uma curva de operação é mostrado na Figura 2.9. Como salientado anteriormente, pode-se notar claramente que conforme a utilização aumenta, o *lead time* cresce rapidamente. Na Figura 2.9 são considerados os seguintes dados: tempo médio de processamento (10 min.); tempo médio entre chegadas (15 min.); variância do tempo de processamento (9 min.); variância do tempo entre chegadas (20.25 min.) e tamanho do lote de produção (20 peças).

FIGURA 2.9 - Formato padrão de uma curva de operação logística.



Fonte : Godinho Filho (2012)

- Tanto para o ambiente de máquina única quanto para o *flow shop*, concluiu-se que os seguintes programas para melhorias de grandes proporções (50%) trazem a curva de operação logística simultaneamente para baixo e para a direita: melhoria na variabilidade de chegada das ordens, no tempo médio até a falha, no tempo médio de reparo, na variabilidade do processo e no tempo médio de *setup*. Em outras palavras, estas melhorias auxiliam a reduzir o lead time do sistema de produção em comparação ao caso base (sem a implementação de nenhuma melhoria), para um mesmo nível de utilização de máquina. O programa de 50% de melhoria de qualidade (taxa de defeito) somente apresenta melhor desempenho que o caso base para níveis mais altos de utilização (acima de 85%);

- Referente ao ambiente de máquina única, com relação aos seis programas estudados, o melhor desempenho (alcança menor *lead time* para o mesmo nível de utilização) é dado pelo programa de 50% de melhoria na variabilidade do processo. Este resultado fornece suporte à literatura que defende a necessidade de redução da variabilidade no atual ambiente produtivo (por exemplo, Newman et al., 1993 e Schoemig, 1999), bem como ao paradigma do *Lean Manufacturing*, o qual tenta reduzir todas as fontes de variabilidade no processo produtivo. Exceção a essa conclusão ocorre para níveis altos de utilização (acima de 90%), nos quais o programa de melhoria no *setup* alcança os melhores resultados;

- Outros programas de melhoria também obtiveram efeitos positivos na curva de operação logística. Para o ambiente de máquina única, o segundo melhor efeito foi dado pela

melhoria no *setup*, seguido pela melhoria no tempo de reparo, tempo entre falhas, variabilidade de chegadas e taxa de defeitos. Para o ambiente *flow shop*, melhoria na variabilidade de chegadas é o segundo melhor programa, seguido pelo programa de melhoria no tempo de *setup*, reparo, falhas e taxa de defeitos;

- Para ambos os ambientes estudados, mostrou-se que a eficácia dos programas de melhoria contínua depende do nível de utilização do sistema. Todos os programas estudados não apresentaram grandes benefícios quando o nível de utilização da máquina é muito baixo. Os resultados também mostraram que em níveis de utilização muito altos, a redução da utilização tem maior potencial em trazer melhorias referentes ao *lead time* do que todos os programas de melhoria estudados. Desses resultados pode-se concluir que, de uma forma geral, os programas de melhoria contínua nas variáveis estudadas (com exceção do programa para melhoria na taxa de defeitos) tem maior potencial de trazer ganhos com relação ao *lead time* se forem implementados em sistemas com níveis médios de utilização (entre aproximadamente 65% e 85%). De acordo com Schonberger (1986), em geral, empresas japonesas que adotam práticas de Melhoria Contínua (CI) procuram manter níveis médios de utilização. Os resultados mostrados no presente trabalho, portanto, ajudam a explicar o porquê as empresas japonesas são tão bem sucedidas em seus esforços relativos à implementação de programas de CI e também podem auxiliar as empresas na prática a trabalhar com níveis de utilização que favoreçam a implementação de programas de CI.

Godinho Filho e Uzsoy (2012) analisam o efeito dos programas de redução do tempo de *setup* e tempo de reparo para um ambiente de máquina única sob condições de incerteza. Esses autores concluem que mesmo pequenas melhorias em ambas as variáveis de forma simultânea trazem mais benefícios para a redução do *lead time* do que grandes melhorias em somente um parâmetro. Essa conclusão se torna ainda mais verdadeira em condições de incertezas a respeito da magnitude da melhoria a ser alcançada e da quantidade de tempo que se consegue manter a melhoria. Para modelar a incerteza, os autores utilizaram um simulador baseado em um modelo de Markov.

Godinho Filho, Guimarães e Oprime (2013) investigam o efeito de características do sistema produtivo no efeito dos seis programas de melhoria visando à redução do *lead time* para um ambiente de máquina única. Para validar estatisticamente as conclusões, os autores utilizam a técnica projeto de experimentos (DOE - *Design Of Experiments*) e a abordagem de modelagem híbrida envolvendo *System Dynamics- Factory Physics*. Os autores constatam que melhorias no tempo entre falhas, no tempo de reparo e no tempo de *setup* são excelentes alternativas para a redução do *lead time* em ambientes de

produção com baixo desempenho (e com dificuldades de melhoria) em algumas variáveis. A melhoria desses três parâmetros juntamente com uma melhoria na variabilidade do processo apresentam efeitos positivos estatisticamente significantes na redução do *lead time*, mesmo em ambientes de produção onde uma grande melhoria em uma única variável foi recentemente realizada. Os autores também concluem que esses programas são ótimas alternativas quando a possibilidade de melhoria em apenas uma variável se torna cara ou inviável.

Godinho Filho e Utiyama (2014) realizam uma simulação para comparar as seguintes estratégias de melhoria em um ambiente *flow shop*, que processa um único tipo de produto: i) a alocação dos programas de melhoria está concentrada no recurso gargalo e; ii) a alocação dos programas de melhoria está distribuída ao longo da linha de produção. Os resultados dos autores mostraram que quando a utilização dos recursos gargalo é alta e a diferença entre o tempo de processamento entre o recurso gargalo e os recursos não gargalo é significativa (maior que 5%), focar a alocação dos programas de melhoria no recurso gargalo é a melhor opção. Os autores também apresentam um algoritmo que permite aos gerentes de produção realizar na prática uma escolha apropriada, no que tange as estratégias testadas.

Godinho Filho e Barco (2015) propõem um *framework* para escolha de programas de melhoria de contínua em um ambiente de máquina única, oriundo de uma empresa do setor aeronáutico. Para o ambiente estudado, uma máquina gargalo do processo de fabricação de móveis para aeronaves, a aplicação do *framework* proposto resultaria em uma melhoria cerca de 84% no *lead time*, o que poderia ser obtido pela melhoria no tempo médio entre falhas, com um esforço de cerca de 6000 h. Alternativamente, com um esforço bem menor, cerca de 1900 h de trabalho poder-se-ia reduzir o coeficiente de variação do tempo de reparo em 72%, o que acarretaria a redução no *lead time* de cerca de 35%. O trabalho proposto por esses autores visa direcionar o processo de escolha de qual programa de melhoria contínua priorizar na presença de restrições financeiras ou de tempo.

Godinho Filho e Utiyama (2016) analisam os efeitos no *lead time* quando o tempo de reparo é reduzido por meio de melhorias em uma das três estratégias seguintes: média do tempo de reparo, variabilidade do tempo de reparo ou a eliminação dos piores casos observados para o tempo de reparo. Os autores realizam simulações para comparar qual das três estratégias permite a melhor redução no *lead time*. Os resultados indicaram que para tarefas simples, em um cenário de variabilidade baixa, a estratégia de reduzir a média do tempo de reparo é a melhor. Quando a variabilidade é moderada, os autores sugerem investir

na estratégia do pior caso, o que geralmente requer baixo investimento e gera um efeito semelhante no *lead time*, quando comparado com o efeito gerado pelas estratégias da média e variabilidade. Já, quando a variabilidade é alta, os autores afirmam que a estratégia de se reduzir a variabilidade é a melhor. Quando se trata de tarefas complexas, a estratégia de melhorar a média do tempo de reparo é a melhor opção. Os autores ainda destacam que quando não é possível reduzir o valor médio do tempo de reparo, a estratégia do pior caso representa uma excelente alternativa para um cenário de baixa variabilidade.

Capítulo 3

O EFEITO DO TAMANHO DO LOTE DE TRANSFERÊNCIA NO *LEAD TIME* EM UM *FLOW SHOP* BALANCEADO

3.1 Introdução

A busca por um bom desempenho ou por um desempenho melhor que o de seus concorrentes é algo que acompanha o cotidiano de gestores de operações ao redor do mundo. E nessa busca, o tempo pode ser visto como uma arma competitiva tanto no que tange a rápida definição de um produto e sua disponibilização no mercado (*time-to-market*) quanto a demais atividades de uma organização, como tempo de desenvolvimento do produto, *lead time* de produção ou tempo de processamento de pedidos (TUNC; GUPTA, 1993). Desde a década de 1990, esse cenário competitivo ficou conhecido como Competição Baseada no Tempo ou TBC, termo proposto por Stalk e Hout (1990). Do ponto de vista da gestão de operações, uma importante tática ao implementar o TBC é a redução do *lead time* de produção (CHANG; CHIU, 2005). E diversas abordagens tem contribuído para viabilizar a redução do *lead time* nas empresas. Abordagens como o *Lean Manufacturing*, *Total Quality Management* (TQM), *Quick Response Manufacturing* (QRM), *System Dynamics* (SD), Teoria das Restrições (*Theory of Constraints* - TOC) e mais recentemente, *Factory Physics* (HOPP; SPEARMAN, 2001, 2008) têm fornecido uma série de ferramentas e estratégias que tem como potencial ajudar os gestores a atingir suas metas relativas à redução do *lead time*.

Reduzir o tamanho do lote de transferência é uma das estratégias que contribuem para essas metas. Porém, há diferentes pontos de vista em relação ao tema, por exemplo: i) o *Lean Manufacturing* defende o lote de transferência unitário, o que ficou conhecido como *one-piece-flow* (MONDEN, 1993); ii) a TOC defende que o tamanho do lote de produção deve ser necessariamente diferente do tamanho do lote de transferência e iii) o

QRM defende que o lote de transferência deve ser menor que o lote de produção, mas não necessariamente deve ser unitário.

Posteriormente a essas abordagens, diversos trabalhos trazem a tona essas diferentes perspectivas em relação à redução do tamanho do lote de transferência. Johnson (2003), por exemplo, afirmam que o lote de produção e o lote de transferência unitários são frequentemente irrealistas devido a restrições de tempo e manuseio de materiais, respectivamente. Para Gupta e Boyd (2008), grandes tamanhos de lote de processamento minimizam o tempo de *setup* no gargalo enquanto pequenos lotes de transferência reduzem o *lead time* e permitem que o material se mova ao longo da fábrica. Hozac e Hill (2010) alertam para o fato de que um número grande de lotes de transferência se movimentando ao longo do sistema produtivo pode tornar difícil o controle do chão de fábrica e também dificultar a rastreabilidade, principalmente em ambientes *job shop* (LITCHFIELD; NARASIMHAN, 2000).

Apesar da contribuição da literatura para o tema, poucos trabalhos visam explorar o efeito da redução do tamanho do lote de transferência no *lead time* de uma forma quantitativa. Desta forma, este trabalho visa contribuir para esta lacuna. Ou seja, explorar essa questão por meio de uma abordagem quantitativa que utiliza a modelagem e a simulação. O objetivo é gerar recomendações para gerentes de produção que visem a redução do *lead time*, considerando um cenário que se aproxime da realidade do chão-de-fábrica. Para isso, serão considerados no modelo proposto, as variáveis que têm participação nessa medida de desempenho, a saber : i) tempo médio de *setup*; ii) taxa média de defeitos; iii) tempo médio entre falhas; iv) tempo médio de reparo da máquina; v) variabilidade do tempo de processamento; vi) variabilidade do tempo entre as chegadas de ordens e vii) lote de transferência. É importante destacar que as variáveis de i) a vi) já foram consideradas em trabalhos anteriores, como Godinho Filho e Uzsoy (2009, 2010, 2011, 2012 e 2013), Godinho Filho, Guimarães e Oprime (2013), Godinho Filho e Utiyama (2014, 2016), Godinho Filho e Barco (2015). O presente capítulo é uma extensão desses trabalhos, mas se torna inédito no sentido de contemplar a variável lote de transferência e explorar o seu efeito na redução do *lead time*.

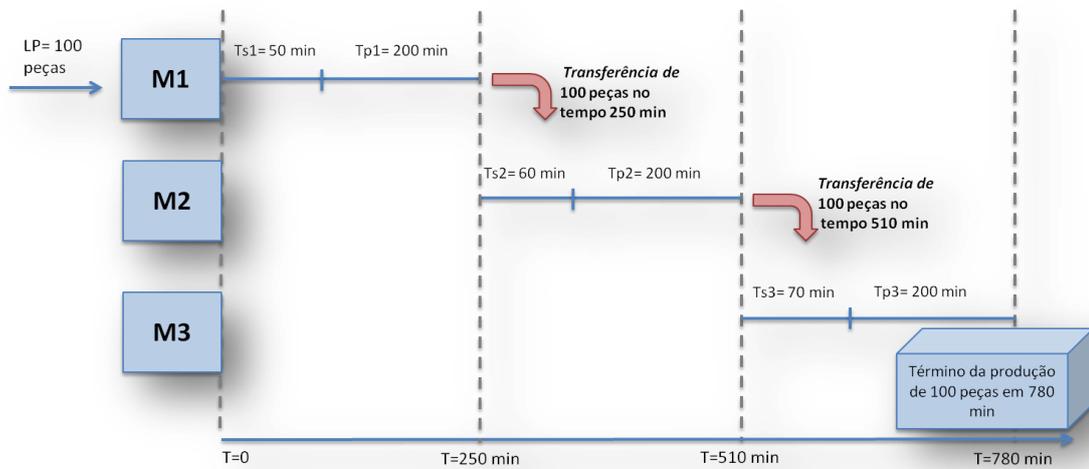
3.2 A Literatura sobre o lote de transferência

Antes de discutir o panorama atual sobre a variável lote de transferência serão apresentados os conceitos de lote de produção e lote de transferência. Em um ambiente de manufatura, a quantidade de produtos processada em uma máquina, sem interrupção por outros itens, é chamada de lote de produção (KROPP; SMUNT, 1990). Já, o lote de transferência é o número de peças que são transportadas ao mesmo tempo para a próxima estação, o que, freqüentemente, pode ser a mesma quantidade de peças processadas ou ser um conjunto de lotes de produção (ASKIN; GOLDBERG, 2002).

Se o lote de transferência é maior que um, cada peça deste lote deve esperar até que as demais sejam processadas. De acordo com Askin e Goldberg (2002), o resultado é óbvio, porém significativo: como cada peça deve ser transportada ao longo do sistema produtivo, a soma dos tempos que essa peça fica na estação de trabalho ou em trânsito entre as estações é o mínimo tempo de atravessamento possível. E este tempo geralmente é acrescido de um tempo de fila, que é dependente da variabilidade do sistema produtivo. Ainda de acordo com Askin e Goldberg (2002), algumas formas de se reduzir o tempo de atravessamento total são reduzir o tempo de fila, reduzir processos desnecessários, reduzir os tempos de processamento e reduzir o número de peças no lote de transferência.

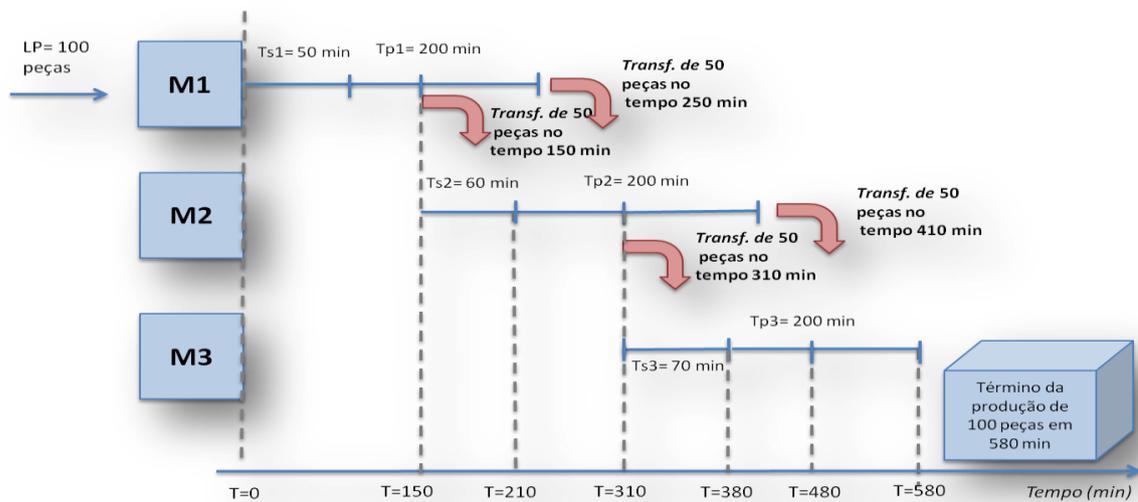
Como um exemplo do benefício da redução do tamanho do lote de transferência, suponha que o lote de produção de um determinado item seja de 100 peças e o seu processamento envolva operações em três máquinas. Considere que os tempos de processamento sejam iguais a 2 minutos por peça nas três máquinas e os tempos de *setup* sejam 50 minutos na máquina 1, 60 minutos na máquina 2 e 70 minutos na máquina 3. Assumindo a condição de que não há atraso e nem tempo de transporte, a produção do lote de 100 peças será finalizada em 780 minutos. Entretanto, se o lote de transferência for de 50 peças, ou seja, assim que essas 50 peças fossem processadas e enviadas para a próxima máquina, o *lead time* das mesmas 100 peças seria 580 minutos. Assim, nesse exemplo, ao reduzir o lote de transferência para 50 peças, mantendo o lote de produção de 100 peças, o *lead time* de processamento reduz cerca de 25%. A Figura 3.1 e a Figura 3.2 a seguir ilustram essa situação.

FIGURA 3.1 - Produção de 100 peças com lote de transferência de 100 peças.



Fonte: próprio autor.

FIGURA 3.2 - Produção de 100 peças com lote de transferência de 50 peças.



Fonte: próprio autor.

Dessa forma, fica claro o potencial que essa estratégia tem para a redução do *lead time*. Como foi dito da seção anterior, abordagens como *Lean*, QRM e TOC consideram, com algumas divergências entre elas, a redução do tamanho do lote de transferência como uma forma de melhorar o desempenho de um sistema produtivo. Além dessas abordagens, há outros trabalhos que exploram o assunto. Em uma busca nas bases de dados *Engineering Village (Compendex)*, *Web of Science* e no site *Google Acadêmico*, realizada entre os meses de março e abril de 2016, utilizando as palavras-chave *transfer lot*, *transfer batch* e *lead time*, foram encontrados 176 trabalhos publicados em periódicos, no idioma inglês. Desse total, foram retirados os trabalhos que se referiam a demais campos da engenharia, restando 38

trabalhos que abordam de fato a questão do lote de transferência. Desses 38 artigos, 3 são artigos que realizam uma Revisão da Literatura sobre o tema, a saber: Chang e Chiu (2005), Cheng, Mukherjee e Sarin (2013) e Gómez-Gasquet, Segura-Andrés e Andrés-Romano (2013). Dos 35 artigos restantes, 32 exploram questões como a otimização do tamanho do lote de transferência ou do *scheduling* desses sublotes visando minimizar o *makespan* ou algum indicador de desempenho financeiro e não mostram, portanto, o efeito do lote de transferência no *lead time*. E, por fim, apenas três trabalhos abordam a relação entre o lote de transferência e o *lead time*, a saber: Ruben e Mahmoodi (2000), Johnson (2003) e Arbós et al. (2015). No entanto, apesar de o trabalho de Ruben e Mahmoodi (2000) abordar a questão de estimativa do *lead time*, o faz do ponto de vista do *scheduling*, que não é o foco desta tese. Assim, dos 38 trabalhos encontrados que exploram a temática do lote de transferência, apenas dois abordam o efeito do lote de transferência no *lead time*. Esses trabalhos são apresentados a seguir.

Johnson (2003) apresenta um *framework* para ilustrar os fatores que influenciam no *lead time*, as ações que podem ser tomadas para a redução desses fatores e suas interações. De acordo com Johnson (2003), esses fatores podem ser classificados em oito categorias, a saber: tempo de *setup*, tempo de processamento por peça; tempo de transferência, tamanho do lote de produção, lote de transferência (sublote), variabilidade de chegada, variabilidade de processo e utilização. No entanto, as contribuições do trabalho de Johnson (2003) permanecem no campo conceitual.

O trabalho de Arbós et al. (2015) faz uso de uma abordagem quantitativa, ausente em Johnson (2003). Os autores analisam o relacionamento entre tamanho de lote de produção, lote de transferência, tempo de *setup*, WIP e *lead time* em um sistema de manufatura discreto. São estabelecidas expressões matemáticas para entender como as mudanças nessas variáveis interferem no desempenho do sistema de produção. Porém, neste trabalho não são consideradas variáveis importantes como a variabilidade de chegadas, variabilidade de processamento (JOHNSON, 2003, HOPP; SPEARMAN, 2001, 2008, GODINHO FILHO; UZSOY, 2009) e taxa de defeitos (HOPP; SPEARMAN, 2001, 2008, GODINHO FILHO; UZSOY, 2009), que também têm efeito no *lead time*.

Apesar de pouco estudada em trabalhos que não visam otimização, a redução do lote de transferência é bastante enfatizada nas modernas abordagens de gestão da manufatura. Assim, a análise conjunta do *Lean*, do QRM e da TOC contribui para o enriquecimento da discussão sobre qual política adotar em relação ao tamanho do lote de transferência, tendo como objetivo final a redução do *lead time*.

Conforme apresentado no Capítulo 2 desta tese, a TOC (GOLDRATT; COX, 2014, GOLDRATT, 1990) propõe um conjunto de nove regras que visam à melhoria do ambiente produtivo. A sétima regra do OPT (*Optimized Production Technology*) definida por Goldratt e Cox (1986, pág. 179) destaca que: “o lote de transferência pode não ser e, muitas vezes, não deve ser igual ao lote de processamento”. Sipper e Bulfin (1997, pág. 571) enfatizam a importância dessa regra: “a regra sete é provavelmente a mais revolucionária. No MRP, todas as técnicas de dimensionamento de lote assumem um tamanho igual para os lotes de produção e transferência”.

Nas palavras de Cox e Schleier (2010, pág. 149):

Ao adotar o lote de transferência menor que o lote de produção, é possível ter várias estações trabalhando em uma única ordem de produção simultaneamente. Isso permite que essa ordem de produção atravesse a fábrica muito rapidamente. Isso pode ser usado alternativamente para reduzir o *lead time* como uma arma competitiva no mercado.

A TOC ainda defende que o lote de processamento deve ser variável (SIPPER; BULFIN, 1997). Gupta e Boyd (2008) apontam para o fato de a TOC ainda sugere uma tratativa diferente para o recurso gargalo do sistema produtivo, isto é, os lotes de processamentos devem ser relativamente grandes no gargalo, para maximizar a eficiência neste recurso, mas devem ser pequenos nos recursos não gargalo, uma vez que estes recursos tem capacidade em excesso e podem realizar *setups* adicionais, que representa o ônus da redução do tamanho do lote de processamento. Porém, no que tange o lote de transferência, a TOC enfatiza que o mesmo deve ser pequeno ao longo de toda a fábrica de forma a reduzir o *lead time*.

Esta é uma visão um pouco diferente daquela proposta pelo Sistema Toyota de Produção (MONDEN, 1993) ou *Lean Manufacturing*, como essa abordagem ficou conhecida após o trabalho de Womack, Jones e Roos (1991). Em um cenário ideal do *Lean Manufacturing*, os lotes de produção e transferência seriam iguais e unitários. Liker (2005, pág. 104) destaca: “no pensamento enxuto, o tamanho ideal do lote é sempre o mesmo: um”. Esse seria o cenário ideal, porém nem sempre se torna possível devido ao tempo de *setup*. Nas palavras de Sekine (1992, pág. 13) “é impossível ter o *one-piece flow* se os tempos de *setup* são longos”.

Para uma situação não ideal, o *Lean Manufacturing* propõe pequenos lotes de produção e o lote de transferência unitário ou *one-piece flow* (ARNHEITER; MALEYEFF, 2005). É importante destacar que a necessidade de utilizar grandes lotes de produção advém

dos altos tempos de *setup*, de tal forma que reduções radicais de tempos de *setup*, possíveis com a troca rápida de ferramentas, eliminarão completamente o motivo para aumentar o tamanho do lote de processamento (SHINGO, 1996).

Do ponto de vista do *Lean*, lotes de transferência contribuem para a redução do ciclo de produção. O reconhecimento do efeito do tamanho do lote de transferência no *lead time* fica claro nessa afirmação de Shingo (1996, pág. 302): “mesmo quando o tamanho do lote processado é de 1000 peças, o ciclo de produção é reduzido ao se entregar lotes de transferência de uma peça para o processo seguinte”. Mas o próprio autor faz a ressalva que a utilização de lotes de transferência de uma peça gera o aumento da frequência de transporte ao processo seguinte, o que exige uma melhoria no *layout* ou nos meios de transporte para que seja viável.

Os diferentes pontos de vista oriundos da TOC e do *Lean* em relação ao tamanho mais apropriado do lote de transferência é um ponto bastante destacado pela literatura. Cook (1994), por exemplo, destaca que justamente por defender lotes de produção e transferência diferentes e não necessariamente unitários, a TOC tem uma maior aplicabilidade do que o Sistema Toyota de Produção.

A política do *one-piece-flow* sugerida pelo *Lean* permite a redução de desperdícios como o estoque em processo (ARBÓS, 2002; OLIVER; DELBRIDGE; LOWE, 1996). E quando se utiliza o sistema de coordenação de ordens proposto pelo *Lean*, o Kanban, opta-se por utilizar um pequeno lote de transferência, o que resulta em uma pequena variância no tamanho das ordens e no tempo de processamento. Em última análise, isso leva a menos desperdícios, porém implica em uma necessidade maior de *setups* (RIEZEBOS, 2013). No contexto do *Lean Manufacturing*, há a necessidade de que esses tempos de *setup* sejam baixos, tanto que a abordagem sugere uma ferramenta para a redução do *setup*, o SMED (*Single-minute Exchange of Die*).

Outra perspectiva, a do QRM, contribui para complementar a discussão. Suri (1998, 2010) ressalta que a idéia do lote de transferência é utilizada quando um lote de peças exige operações em diferentes recursos, em vez de esperar para que todo o lote de produção seja finalizado em um recurso antes de movê-lo, transfere-se cada peça de um recurso a outro assim que a peça seja completada (*one-piece flow*). Porém, se as operações não estão fisicamente próximas isto pode envolver um manuseio de materiais excessivo. Por isso, o QRM defende a mesma idéia do *one-piece flow*, porém com lotes não necessariamente unitários e sim menores que o lote de produção.

De acordo com Vandaele e Boeck (2003) esta estratégia de adotar um lote de transferência menor que o lote de produção pode melhorar o fluxo de material ao longo do sistema de produção. Porém, o efeito não é sempre substancial, uma vez que depende de fatores como o tempo de processamento e o tempo *de setup* de cada equipamento. Como as decisões em termos de lote de transferência tem efeito de longo prazo em alguns investimentos (transporte, embalagem, estoque) e também em políticas (relacionamento de pedido e entrega com clientes e fornecedores), o lote de transferência é considerado por esses autores uma importante decisão gerencial.

Apesar de sua importância, Suri (1998, 2010) destaca que a redução do lote de transferência não deve ser uma estratégia inicial para a redução do *lead time*, mas sim deve ser aplicada dentro do contexto das demais estratégias. Dentro da perspectiva do QRM, o lote de transferência terá pouco impacto na redução do *lead time* se estratégias mais fundamentais como redução do tamanho do lote de produção e a adoção de células de manufatura não forem adotadas primeiramente. Para Johnson (2003), se células de manufatura são utilizadas em detrimento a um *layout job shop*, a redução do tamanho do lote de transferência tem menos impacto na capacidade de manuseio de materiais, controle da produção, *scheduling* e capacidade do sistema de informação.

Nas palavras de Suri (2010, pág.99) :

A primeira prioridade dos times (funcionários das células QRM) deve ser a redução do tamanho do lote de produção, junto com a redução do *setup* ou outra melhoria de suporte se necessário, e o lote de transferência deve vir somente depois que esses esforços tiverem sido realizados.

Para finalizar esta seção, o Quadro 3.1 a seguir apresenta os principais pontos defendidos pelas grandes abordagens aqui exploradas.

QUADRO 3.1 – Similaridades e divergências entre *Lean*, TOC e QRM.

Abordagem	Principais aspectos sobre o lote de transferência	Observações
Lean	<ul style="list-style-type: none"> * Lotes de transferência contribuem para a redução do LT. * Mesmo quando o lote de produção é grande, o <i>lead time</i> é reduzido com a utilização do lote de transferência unitário. * A utilização de lotes de transferência unitário aumenta a frequência de transporte (há a necessidade de melhorar <i>layout</i> e equipamentos de transporte). * O cenário ideal é o lote de produção unitário e lote de transferência unitário, o que requer que os tempos de <i>set up</i> sejam baixos. 	<ul style="list-style-type: none"> * Consenso entre as três abordagens * Não é um consenso entre as demais abordagens, porém há convergências com a TOC e o FP * Consenso entre as três abordagens * Não é um consenso entre demais abordagens.
TOC	<ul style="list-style-type: none"> * O lote de transferência pode não ser e, muitas vezes, não deve ser igual ao lote de processamento. * Adotar o lote de transferência menor que o lote de produção permite que várias estações trabalhem em uma única ordem de produção simultaneamente, o que reduz o tempo de atravessamento. * O lote de produção deve ser variável. Este deve ser grande no gargalo, para maximizar a eficiência nesse recurso, mas deve ser pequeno nos recursos não-gargalo. 	<ul style="list-style-type: none"> * Não é um consenso entre demais abordagens. * Consenso entre as três abordagens * Não é um consenso entre demais abordagens.
QRM	<ul style="list-style-type: none"> * Defende a mesma ideia do <i>one-piece flow</i> (do <i>Lean</i>), porém com lotes não necessariamente unitários e sim menores que o lote de produção. * A redução do lote de transferência não deve ser uma estratégia inicial para a redução do <i>lead time</i>, mas sim deve ser aplicada dentro do contexto das demais estratégias. * A redução do tamanho do lote de transferência terá pouco impacto na redução do <i>lead time</i> se estratégias mais fundamentais como redução do tamanho do lote de produção e a adoção de células de manufatura não forem adotadas primeiramente. 	<ul style="list-style-type: none"> * A utilização do lote de transferência menor que o lote de produção está de acordo com as abordagens <i>Lean</i>. A ressalva que deve ser feita é que no cenário ideal buscado pelo <i>Lean</i> (com características específicas), os lotes de transferência devem ser unitários. * Não é um consenso entre demais abordagens. * Não é um consenso entre demais abordagens.

Fonte: próprio autor.

Dessa forma, considerando a literatura apresentada até aqui, é possível identificar alguns aspectos podem ser mais bem explorados. E é justamente o propósito deste trabalho, que por meio da modelagem e simulação visa explorar as convergências e divergências existentes na literatura sobre o tamanho do lote de transferência.

A seção seguinte apresenta o modelo proposto neste trabalho para explorar o efeito do lote de transferência no *lead time*, em um ambiente *flow shop*.

3.3 O modelo proposto

Para representar um *layout flow shop* onde as máquinas fossem caracterizadas pelas variáveis de chão-de-fábrica usadas em Godinho Filho e Uzsoy (2009) e também pela variável lote de transferência, construiu-se um modelo utilizando o *software* Maple 13.

As etapas seguidas para a construção desse modelo estão apresentadas na Seção 3.3.1 a seguir. O modelo proposto, na forma como foi utilizado nas simulações está apresentado na Seção 3.3.2.

3.3.1 Etapas seguidas para construção e validação do modelo

Para obter o modelo proposto neste trabalho, foram seguidos quatro passos, explicados a seguir:

Passo 1: Migração de um *software* de simulação dinâmica para um *software* de modelagem matemática

Conforme apresentado no Capítulo 2, o modelo Godinho Filho e Uzsoy (2009) e os trabalhos posteriores dos autores utilizam o *software* Vensim, de *System Dynamics*, para modelar um ambiente de manufatura. Porém, neste trabalho optou-se pelo uso do Maple 13 em detrimento ao Vensim por quatro principais motivos:

- i) a presente pesquisa não visa avaliar a melhoria no *lead time* ao longo do tempo, assim, o uso de um *software* de *system dynamics*, como o Vensim, não se torna mandatório;
- ii) os autores consideraram modelagem da variável lote de transferência no *software* Maple menos complexa;
- iii) a inserção de mais máquinas à linha de produção simulada se mostrou mais simples no *software* Maple;
- iv) os autores consideraram a inserção de distribuições de probabilidade mais simples no Maple ;

Ainda, é preciso destacar que existem outros *softwares* similares ao Maple no mercado, como por exemplo, o Matlab. No entanto, acredita-se que a escolha de um em relação ao outro se deva por uma questão de familiaridade dos pesquisadores com a *software*. Este é um critério subjetivo para a ciência, mas que neste caso, acredita-se não impactar no que se espera de uma técnica de pesquisa.

Passo 2: Construção de um modelo de *flow shop* com as mesmas configurações utilizadas em Godinho Filho e Uzsoy (2013)

Nesta etapa foi construído um modelo utilizando as equações propostas por Hopp e Spearman (2001, 2008) e as mesmas configurações utilizadas em Godinho Filho e Uzsoy (2013) para a modelagem de um ambiente *flow shop*. O objetivo desta etapa é replicar no *software* Maple 13 o mesmo modelo que aqueles autores construíram no *software* Vensim. A notação utilizada nesta etapa está representada no Quadro 3.2 a seguir.

QUADRO 3.2 - Definição da notação utilizada no modelo do *software* Maple.

Notação	Descrição
Aj	disponibilidade da máquina j
ccj	coeficiente de variação do tempo entre chegadas na máquina j
cvcVet	vetor que atribui o mecanismo de melhoria ao coeficiente de variação do tempo entre chegadas a cada máquina da linha
cvfj	coeficiente de variação do tempo entre chegadas após a realização de melhorias na máquina j
cvpj	coeficiente de variação de partidas da máquina j
cvtj	coeficiente da variação do tempo efetivo médio global da máquina j
Dm	demanda média
dpadreparoj	desvio padrão do tempo de reparo da máquina j
dpsetup	desvio padrão do tempo de <i>set up</i>
DXr	vetor utilizado para atribuir o desvio padrão do tempo de reparo a cada uma das máquinas da linha
DXs	vetor utilizado para atribuir o desvio padrão do tempo de <i>set up</i> a cada uma das máquinas da linha
H	horas trabalhadas no ano
LTj	<i>lead time</i> da máquina j
mdprVet	vetor que atribui o mecanismo de melhoria ao desvio padrão do reparo a cada uma das máquinas da linha
mfj	tempo entre falhas final da máquina j
mpVet	vetor que atribui o mecanismo de melhoria de produtividade a cada máquina da linha
mrj	tempo de reparo final da máquina j
mvtpVet	vetor que atribui o mecanismo de melhoria à variância do tempo natural de processamento a cada máquina da linha
MXr	vetor utilizado para atribuir o tempo de reparo a cada uma das máquinas da linha
MXs	vetor utilizado para atribuir o tempo de <i>set up</i> a cada uma das máquinas da linha
nmaquinas	número de máquinas na linha
Prj	taxa de processamento da máquina j
raVetj	taxa de chegadas de peças na máquina j
rep	número de replicações
SOMA	soma dos <i>lead times</i> das j máquinas da linha
taxpj	taxa de partida da máquina j
tdmj	taxa de defeitos final da máquina j
tdVet	vetor utilizado para atribuir a taxa de defeitos a cada uma das máquinas da linha
Tej	tempo de processamento efetivo global
Tetj	tempo efetivo de processamento da máquina j, considerando paradas preemptivas e não preemptivas
TFFVet	vetor utilizado para atribuir o tempo médio entre falhas a cada uma das máquinas da linha
TFj	tempo de fila da máquina j
THj	<i>throughput</i> na máquina j
TLj	vetor utilizado para atribuir o tamanho do lote de produção utilizado em cada máquina
TPVet	vetor utilizado para atribuir o tempo médio de processamento a cada uma das máquinas da linha
tsfj	tempo de <i>set up</i> final da máquina j
Uj	utilização da máquina j
UKj	termo utilização da Equação de Kingman para a máquina j
varpfj	variância no tempo de processamento após a melhoria na máquina j
varpVet	vetor utilizado para atribuir a variância do tempo natural de processamento a cada uma das máquinas da linha
varrfj	variância do tempo de reparo da máquina j
varsfj	variância no tempo de <i>setup</i> após a realização de melhoria na máquina j
varsVet	vetor utilizado para atribuir a variância do tempo de <i>set up</i> a cada uma das máquinas da linha
VKj	termo de variabilidade da Equação de Kingman para a máquina j
vtegi	variância do tempo efetivo médio global para a máquina j
vtepnj	variância do tempo de processamento com paradas preemptivas e não preemptivas para a máquina j
vtespj	variância do tempo efetivo considerando somente paradas preemptivas para a máquina j
WIPj	estoque em processo na máquina j

No modelo, os tempos de chegadas de tarefas às estações de trabalho e os tempos de processamento são gerais, e cada uma das estações de trabalho é constituída de apenas uma máquina (um único servidor), logo, o sistema modelado é representado por filas do tipo G/G/1. As máquinas recebem tarefas a uma determinada taxa de chegadas ($raVet_j$) e as processa na mesma taxa, denominada taxa de *throughput* (TH_j). As peças chegam à estação de trabalho em lotes de transferência com tamanho de k_j peças e são processadas de acordo com o tamanho do lote de produção, TL_j . O tempo médio entre chegadas aqui é denominado de ta_j , e seu coeficiente de variabilidade é dado por cc_j . A taxa média de chegadas ($raVet_j$) é o inverso do tempo médio entre chegadas, de forma que $raVet_j = 1/ ta_j$. Para a primeira máquina da linha a taxa de chegadas, $raVet_j$, pode ser representada pela equação 3.1:

$$raVet_j = \frac{Dm}{(H.TL_j)} \quad (3.1)$$

Onde: Dm é a demanda média anual e H é o número de horas trabalhadas no ano.

A taxa de chegadas de tarefas nas máquinas seguintes (genericamente representadas por $j+1$) depende da taxa de partida da máquina anterior (j). Esta taxa de partidas, representada por $taxp_j$ é igual ao *throughput* (TH_j , apresentado na equação 3.19) dessa mesma estação j . A taxa de partida de uma máquina j está sujeita ao coeficiente de variação de partidas, cvp_j , representado pela equação 3.2:

$$cvp_j = \sqrt{(U_j^2 \cdot cvt_j^2 + (1 - U_j^2) \cdot cvf_j^2)} \quad (3.2)$$

Onde: U_j é utilização da máquina j (apresentado na equação 3.9); cvt_j é o coeficiente de variação do tempo de processamento efetivo global da máquina j (apresentado na equação 3.13) e cvf_j é o coeficiente de variação do tempo entre chegadas da estação j . Em um cenário sem melhorias cvf_j é igual a cc_j .

Da segunda máquina em diante, a taxa de chegadas de uma máquina j deve ser igual à taxa com que as tarefas partem da estação anterior ($j - 1$), o que é representado pela equação 3.3:

$$raVet_j = taxp_{j-1} \quad (3.3)$$

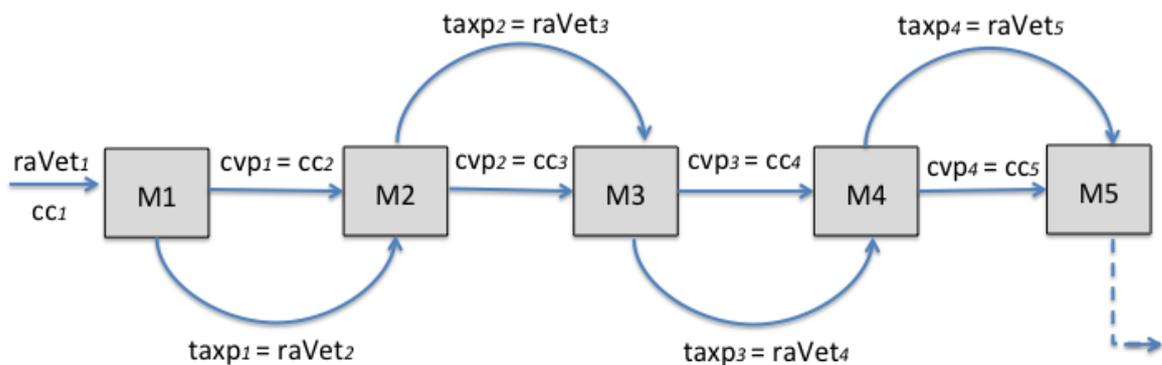
Do mesmo modo, o coeficiente de variação de chegada das tarefas na estação j deve ser igual ao coeficiente de variação de partidas da estação $(j-1)$, de acordo com a equação 3.4:

$$cc_j = cvp_{j-1} \quad (3.4)$$

Esta interdependência entre as máquinas pode ser ilustrada pela Figura 3.3. Nela, as cinco máquinas do modelo estão representadas por M1, M2, M3, M4 e M5. Note que a taxa de chegadas de peças da primeira máquina depende de fatores como a demanda, capacidade produtiva (horas trabalhadas) e o tamanho de lote de produção, conforme apresentado anteriormente pela equação 3.1. Esses parâmetros assim como coeficiente de variação do tempo entre chegadas da primeira máquina são valores inseridos no modelo.

A taxa de chegadas de tarefas na máquina 2 irá depender da utilização e da variabilidade de processamento da máquina 1, dado pela taxa de partidas dessa máquina. O mesmo raciocínio se aplica às demais máquinas da linha. Caso os tamanhos de lote de produção sejam diferentes ao longo da linha, basta que a taxa de partidas da máquina anterior ($taxp_{j-1}$) seja multiplicada pela razão entre o lote de produção utilizado na máquina anterior (TL_{j-1}) e o lote de produção da máquina em questão (TL_j). Para as simulações realizadas neste capítulo, os lotes de produção são idênticos em todas as máquinas da linha. Assim, conforme mostra a Figura 3.3, a taxa de entradas de peças em uma máquina é simplesmente igual à taxa de partidas da máquina anterior. O coeficiente de variação do tempo entre chegadas da segunda máquina em diante, é igual ao coeficiente de partida da máquina anterior. Isso ilustra a propagação da variabilidade ao longo da linha.

FIGURA 3.3 - Representação da relação entre: i) as variáveis taxa de entrada e taxa de partida e ii) coeficiente de variação entre partidas e coeficiente de variação entre chegadas.



Fonte: próprio autor.

A taxa de produção de uma máquina j , Pr_j , advém de Hopp e Spearman (2008) e é expressa pela equação 3.5:

$$Pr_j = \left(\frac{1}{Te_j \cdot TL_j} \right) \quad (3.5)$$

Onde: Te_j é o tempo de processamento efetivo global e é constituído, de acordo com Godinho Filho e Uzsoy (2013) a partir do tempo de processamento, considerando três efeitos, a saber:

- a) efeito de paradas preemptivas (para o modelo, falha de máquinas);
- b) efeito de paradas não-preemptivas (para o modelo, tempos de *setup*);
- c) efeito de problemas de qualidade (taxa de defeitos).

E pode ser calculado pela equação 3.6:

$$Te_j = \left(\frac{Tet_j}{1 - tdm_j} \right) \quad (3.6)$$

Considerando que tdm_j é a taxa de defeitos na máquina j após a realização de melhorias nessa variável. O Tet_j representa o tempo efetivo de processamento na máquina j considerando paradas preemptivas e não preemptivas e é calculado pela equação 3.7:

$$Tet_j = \left(\frac{TPVet_j}{A_j} \right) + \left(\frac{tsf_j}{TL_j} \right) \quad (3.7)$$

Onde: $TPVet_j$ é o tempo de processamento na máquina j ; tsf_j , o tempo de *setup* após a realização de melhoria; TL_j é o tamanho do lote de produção na máquina j e A_j representa a disponibilidade da máquina j e é calculada pela equação 3.8:

$$A_j = \left(\frac{mf_j}{mf_j + mr_j} \right) \quad (3.8)$$

Onde: o mr_j é o tempo de reparo da estação j , após a realização da melhoria e mf_j representa o tempo entre falhas da máquina j , também após a realização da melhoria.

A utilização (U_j) de uma máquina j é dada pela razão entre taxa de chegadas de tarefas nessa máquina ($raVet_j$) e a taxa de processamento (Pr_j) e é apresentada pela equação 3.9:

$$U_j = \left(\frac{raVet_j}{Pr_j} \right) \quad (3.9)$$

O tempo de fila de uma tarefa na máquina j (TF_j) é dado pela expressão 3.10:

$$TF_j = \left(\frac{Te_j.TL_j.UK_j.VK_j}{2} \right) \quad (3.10)$$

Onde: UK_j é o termo de utilização da equação de Kingman e é calculado pela expressão 3.11. E VK_j representa o termo de variabilidade da equação de Kingman e é calculado pela expressão 3.12.

$$UK_j = \left(\frac{U_j}{1-U_j} \right) \quad (3.11)$$

$$VK_j = (cvf_j^2 + cvt_j^2) \quad (3.12)$$

Onde: cvf_j representa o coeficiente de variação do tempo entre chegadas após a realização de melhorias, na máquina j e cvt_j representa o coeficiente da variação do tempo efetivo médio global nessa estação e pode ser calculado pela expressão 3.13:

$$cvt_j = \left(\sqrt{\frac{vteg_j}{Te_j^2}} \right) \quad (3.13)$$

Onde: $vteg_j$ é a variância do tempo efetivo médio global na máquina j e é calculada pela equação 3.14 a seguir:

$$vteg_j = \left(\frac{vtepn_j}{1-tdm_j} \right) + \left(\frac{tdm_j.Tet_j^2}{(1-tdm_j).(1-tdm_j)} \right) \quad (3.14)$$

Onde: $vtepn_j$ é a variância do tempo de processamento com paradas preemptivas e não preemptivas da máquina j e é calculada pela equação 3.15:

$$vtepn_j = \left(vtesp_j + \left(\frac{varsf_j}{TL_j} \right) + \left(\left(\frac{LVet_{j-1}}{TL_j^2} \right) \cdot tsf_j^2 \right) \right) \quad (3.15)$$

Onde: $varsf_j$ é a variância no tempo de *setup* após a realização de melhoria na máquina j e $vtesp_j$ é a variância do tempo efetivo, na máquina j, considerando somente paradas preemptivas e é calculado pela expressão 3.16:

$$vtesp_j = \left(\left(\frac{varpf_j}{A_j^2} \right) + \left(\frac{(mr_j^2 + varrf_j) \cdot (1 - A_j) \cdot TPVet_j}{A_j \cdot mr_j} \right) \right) \quad (3.16)$$

Onde: $varpf_j$ é a variância no tempo de processamento após a melhoria e $varrf_j$ é a variância no tempo de reparo após a melhoria, na máquina j.

O *lead time* em cada estação de trabalho é calculado por meio da expressão 3.17:

$$LT_j = TF_j + (Te_j \cdot TL_j) \quad (3.17)$$

O *lead time* total da linha é dado pela soma dos *lead times* das estações de trabalho, de acordo com a equação 3.18:

$$SOMA = (LT_1 + LT_2 + LT_3 + LT_4 + LT_5) \quad (3.18)$$

De acordo com a lei de Little (LITTLE, 1961)), o estoque em processo na máquina j (WIP_j) é calculado por meio da equação 3.19:

$$WIP_j = LT_j \cdot raVet_j \cdot TL_j \quad (3.19)$$

O *throughput* (taxa de saída) da máquina j é calculado pela equação 3.20:


```

for j from 1 to nmaquinas do if j = 1 then Dm := 11520; raVetj :=  $\frac{Dm}{(H \cdot TL_j)}$ ; ccj := 1.3; dpsetupj := DXs; varsfj
:= dpsetupj · dpsetupj; dpadpreparoj := DXr; mrj := MXr; varrfj := dpadpreparoj · dpadpreparoj; tsfj := MXs; mfj
:= TFFVetj; tdmj := tdVetj · mpVetj; Aj :=  $\left(\frac{mf_j}{mf_j + mr_j}\right)$ ; Tetj :=  $\left(\frac{TPVet_j}{A_j}\right) + \left(\frac{tsf_j}{TL_j}\right)$ ; Tej :=  $\left(\frac{Tet_j}{1 - tdm_j}\right)$ ; Prj
:=  $\left(\frac{1}{Te_j \cdot TL_j}\right)$ ; Uj :=  $\left(\frac{raVet_j}{Pr_j}\right)$ ; if Uj > 1 then UKj := 1 else UKj := Uj / (1 - Uj); end if; varpfj := mvtpVetj
· varpVetj; vtespj :=  $\left(\left(\left(\frac{varpf_j}{A_j \cdot A_j}\right) + \left(\frac{((mr_j \cdot mr_j) + (varrf_j)) \cdot (1 - A_j) \cdot (TPVet_j)}{A_j \cdot mr_j}\right)\right)\right)$ ; vtepnj := (vtespj)
+  $\left(\frac{varsf_j}{(TL_j)}\right) + \left(\left(\frac{(TL_j - 1)}{TL_j \cdot TL_j}\right) \cdot (tsf_j \cdot tsf_j)\right)$ ; vtegj :=  $\left(\left(\frac{vtepn_j}{(1 - tdm_j)}\right) + \left(\frac{(tdm_j \cdot Tet_j \cdot Tet_j)}{(1 - tdm_j) \cdot (1 - tdm_j)}\right)\right)$ ; cvtj
:=  $\left(\sqrt{\frac{vteg_j}{(Te_j \cdot Te_j)}}\right)$ ; cvfj := ccj · cvcVetj; VKj := (cvfj · cvfj) + (cvtj · cvtj); TFj :=  $\frac{(Te_j \cdot TL_j \cdot UK_j \cdot VK_j)}{2}$ ; LTj
:= (TFj + (Tej · TLj)); WIPj := LTj · raVetj · TLj; THj :=  $\frac{WIP_j}{LT_j \cdot TL_j}$ ; cvpj
:=  $\left(\sqrt{(U_j \cdot U_j \cdot cvt_j \cdot cvt_j + (1 - (U_j \cdot U_j)) \cdot cvf_j \cdot cvf_j)}\right)$ ; taxpj := THj; PFj := ((TLj · raVetj) - (THj · TLj)); else Dm
:= 11520; raVetj :=  $\frac{((taxp_j - 1) \cdot TL_{j-1})}{TL_j}$ ; ccj := cvpj-1; dpsetupj := DXs; varsfj := dpsetupj · dpsetupj;
dpadpreparoj := DXr; mrj := MXr; varrfj := dpadpreparoj · dpadpreparoj; tsfj := MXs; mfj := TFFVetj; tdmj := tdVetj
· mpVetj; Aj :=  $\left(\frac{mf_j}{mf_j + mr_j}\right)$ ; Tetj :=  $\left(\frac{TPVet_j}{A_j}\right) + \left(\frac{tsf_j}{TL_j}\right)$ ; Tej :=  $\left(\frac{Tet_j}{1 - tdm_j}\right)$ ; Prj :=  $\left(\frac{1}{Te_j \cdot TL_j}\right)$ ; Uj
:=  $\left(\frac{raVet_j}{Pr_j}\right)$ ; if Uj > 1 then UKj := 1 else UKj := Uj / (1 - Uj); end if; varpfj := mvtpVetj · varpVetj; vtespj
:=  $\left(\left(\left(\frac{varpf_j}{A_j \cdot A_j}\right) + \left(\frac{((mr_j \cdot mr_j) + (varrf_j)) \cdot (1 - A_j) \cdot (TPVet_j)}{A_j \cdot mr_j}\right)\right)\right)$ ; vtepnj := (vtespj) +  $\left(\frac{varsf_j}{(TL_j)}\right)$ 
+  $\left(\left(\frac{(TL_j - 1)}{TL_j \cdot TL_j}\right) \cdot (tsf_j \cdot tsf_j)\right)$ ; vtegj :=  $\left(\left(\frac{vtepn_j}{(1 - tdm_j)}\right) + \left(\frac{(tdm_j \cdot Tet_j \cdot Tet_j)}{(1 - tdm_j) \cdot (1 - tdm_j)}\right)\right)$ ; cvtj :=  $\left(\sqrt{\frac{vteg_j}{(Te_j \cdot Te_j)}}\right)$ ;
cvfj := ccj · cvcVetj; VKj := (cvfj · cvfj) + (cvtj · cvtj); TFj :=  $\frac{(Te_j \cdot TL_j \cdot UK_j \cdot VK_j)}{2}$ ; LTj := (TFj + (Tej · TLj)); WIPj
:= LTj · raVetj · TLj; THj :=  $\frac{WIP_j}{LT_j \cdot TL_j}$ ; cvpj :=  $\left(\sqrt{(U_j \cdot U_j \cdot cvt_j \cdot cvt_j + (1 - (U_j \cdot U_j)) \cdot cvf_j \cdot cvf_j)}\right)$ ; taxpj := THj; PFj
:= ((TLj · raVetj) - (THj · TLj)); end if; end do; end do; for i from 1 to rep do; for j from 1 to nmaquinas do SOMA
:= add(LTj, j = 1 .. nmaquinas); print(i, "M.", j, "LT:", LTj, "LT total:", SOMA, Uj); end do; end do; return taxpj, cvpj;
end proc

```

Fonte: próprio autor.

Passo 3: Validação teórica do modelo contruído no *software* Maple 13

Nesta etapa da pesquisa foram feitas algumas das simulações apresentadas por Godinho Filho e Uzsoy (2011), com o intuito de comparar os resultados obtidos por aqueles autores com os resultados obtidos por meio do modelo apresentado no Passo 2. Para esta etapa, foi utilizado como referência o trabalho de Godinho Filho e Uzsoy (2011) e não o trabalho de Godinho Filho e Uzsoy (2013), usado na construção do modelo (no Passo 2), pois em Godinho Filho e Uzsoy (2011) os autores realizam uma análise da relação tamanho de lote de produção - *lead time*, que é justamente o que se pretende analisar neste trabalho. É importante destacar que apesar de apresentarem análises distintas, tanto Godinho Filho e Uzsoy (2011) quanto Godinho Filho e Uzsoy (2013), fazem uso do mesmo modelo em SD.

Em Godinho Filho e Uzsoy (2011), a relação tamanho de lote de produção – *lead time* é analisada para um ambiente de máquina única. Aqui, a mesma relação será analisada, porém, para um ambiente *flow shop* com cinco máquinas idênticas (ou seja, com os mesmos parâmetros). Os parâmetros utilizados são mesmos usados por Godinho filho e Uzsoy (2011), que foram inspirados em dados de várias empresas reais e estão na Tabela 3.1 a seguir.

TABELA 3.1 - Parâmetros iniciais do modelo.

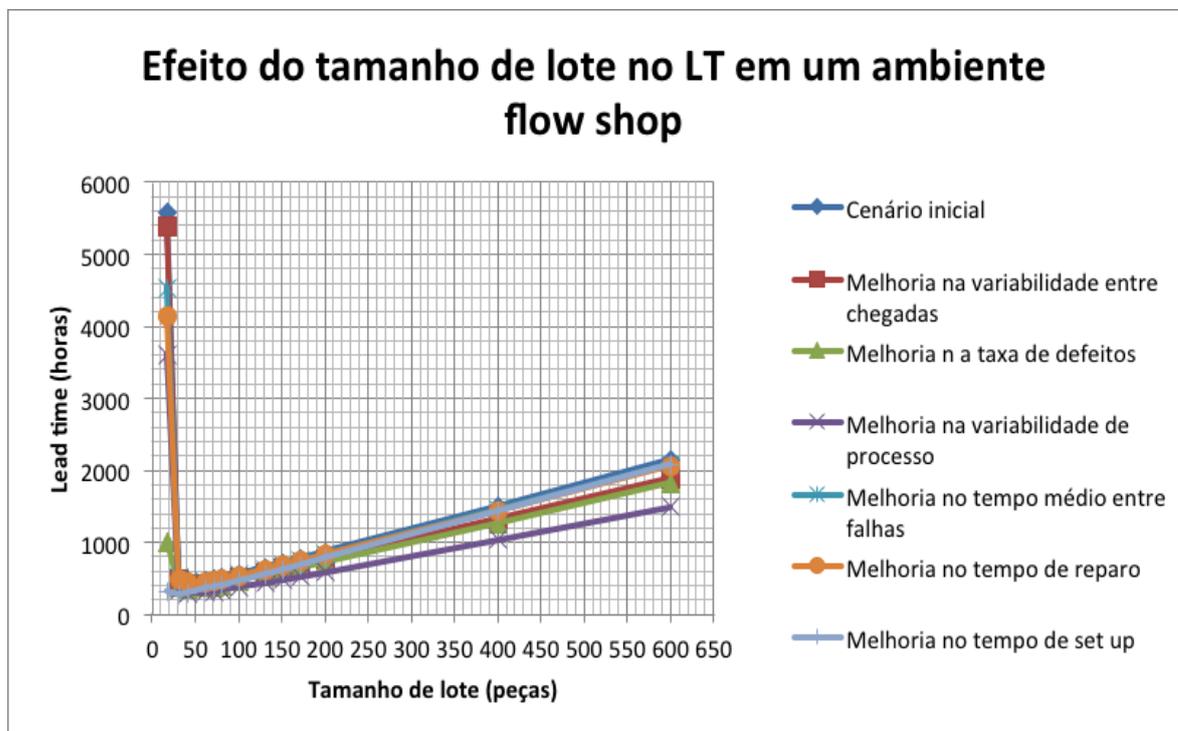
Parâmetro	Valor inicial
Demanda	11.520 peças/ano
Horas trabalhadas no ano	1920
Cv do tempo entre chegadas	1,5
Tempo médio de processamento	0,1 h
Tempo médio entre falhas	80 h
Tempo médio de reparo	1 h
Tempo médio de <i>set up</i>	0,75 h
Taxa de defeitos	0,1
Variância do tempo de <i>set up</i>	1,26
Variância do tempo natural de processamento	0,0225

Utilizando esses parâmetros, foram realizadas simulações variando o tamanho do lote de produção, em toda a linha, para melhorias de 50% realizadas individualmente em cada variável estudada:

- 1) cenário inicial: sem melhorias;
- 2) 50% de melhoria na variabilidade de chegadas;
- 3) 50% de melhoria em cada um dos parâmetros que afetam a variabilidade do processo (variabilidade de processamento, variabilidade do tempo de reparo e variabilidade do tempo de *setup*)
- 4) 50% de redução na taxa de defeitos;
- 5) 50% de melhoria no tempo médio entre falhas;
- 6) 50% de melhoria no tempo médio de reparo;
- 7) 50% de melhoria no tempo de *setup*.

A Figura 3.5 mostra o efeito esperado dessas melhorias no *lead time*, para toda a linha, considerando os seguintes tamanhos de lote de produção: 600, 400, 170, 150, 130, 100, 80, 70, 60, 40, 30, 16. Em todas as simulações, os tamanhos de lotes de produção foram considerados idênticos para todas as cinco máquinas.

FIGURA 3.5 - Efeito de 50% de melhoria na curva tamanho de lote de produção - *lead time*.



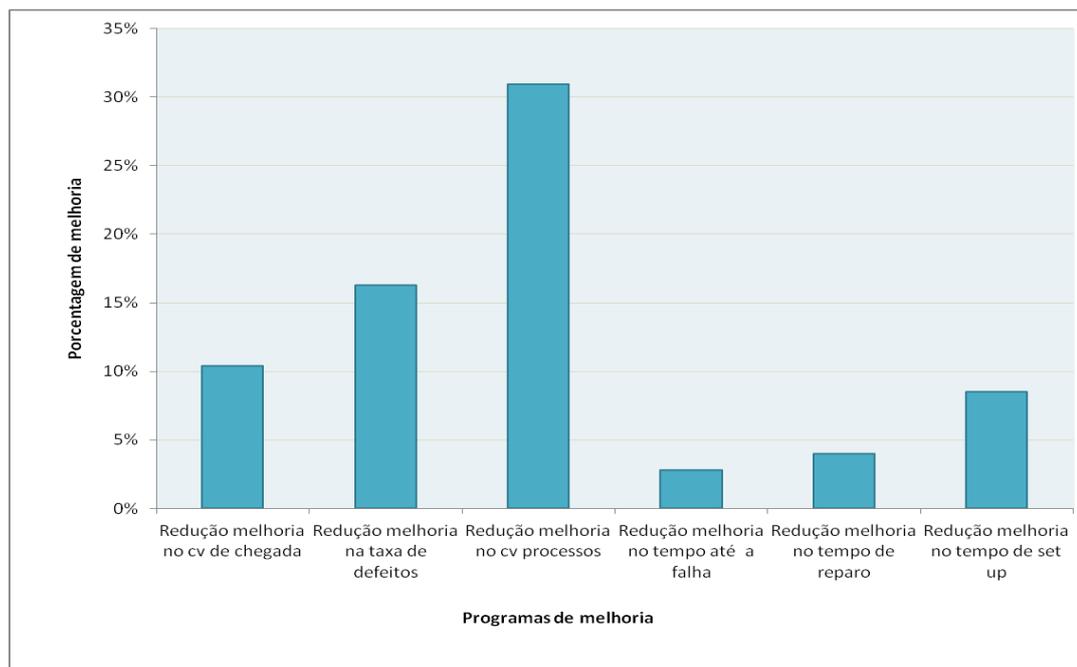
A seguir, a Tabela 3.2 apresenta os dados utilizados para a construção do gráfico da Figura 3.5.

TABELA 3.2 - Valores do *lead time* para os programas de melhoria aplicados na linha de produção modelada.

Tamanho do lote	Lead time (h)						
	Cenário inicial	Melhoria no cv do tempo entre chegadas	Melhoria na taxa de defeitos	Melhoria no cv do tempo de processo	Melhoria no tempo médio entre falhas	Melhoria no tempo de reparo	Melhoria no tempo de set up
600	2153,89	1898,91	1820,28	1501,95	2089,89	2062,68	2088,36
400	1508,53	1335,87	1271,85	1049,16	1464,55	1445,81	1441,03
200	869,72	779,20	727,95	600,59	845,59	835,25	795,87
170	776,03	697,77	647,82	534,68	754,82	745,71	699,78
150	714,44	644,34	595,00	491,30	695,16	686,86	636,00
130	653,99	592,01	542,94	448,66	636,61	629,11	572,56
100	567,18	517,27	467,42	387,21	552,53	546,18	478,52
80	514,66	472,64	420,56	349,70	501,69	496,03	417,31
70	491,76	453,60	399,28	333,12	479,52	474,17	387,58
60	473,09	438,66	380,65	319,28	461,47	456,35	358,86
40	468,98	441,03	363,02	313,09	457,43	452,26	308,27
30	528,63	502,04	387,07	349,93	514,60	508,23	292,47
16	5585,72	5405,72	1016,77	3621,07	4541,92	4153,02	336,66

A redução de 50% na variabilidade de processo é o programa de melhoria que permite a maior redução do *lead time* da linha de produção, conforme mostrado na Figura 3.6. Comparado aos outros cinco, é o programa que mais leva a curva LT-TL para baixo. A Figura 3.6 a seguir mostra, comparativamente, a redução no *lead time* obtida por cada um dos programas de melhoria. Após a redução obtida por meio da melhoria na variabilidade de processo, o programa de melhoria na taxa de defeitos é o que mais contribui para a redução do *lead time*.

FIGURA 3.6 - Impacto dos programas de grandes melhorias no *lead time* para um tamanho de lote de 200 peças.



Os dados obtidos com as simulações permitem observar que a média das reduções no *lead time* obtidas pela melhoria no coeficiente de variabilidade do processo para todos os lotes de produção testados é a que tem melhor desempenho. No entanto, para o menor tamanho de lote de produção simulado, as reduções no LT proporcionadas pelas melhorias no tempo de *setup* (de 0,750h para 0,375h) e taxa de defeitos (de 5% para 1%) atingem uma redução no *lead time* de cerca 94% e 82%, respectivamente. No modelo utilizado para essas simulações, o ponto mínimo da curva TL-LT é encontrado quando o tamanho de produção é 16 peças. Valores menores que esse levam o *lead time* a valores muito altos (efeito saturação da curva TL-LT previsto por Karkamar et al. (1985)).

Os resultados dessas simulações se aproximam daqueles obtidos por Godinho Filho e Uzsoy (2011), e também estão de acordo com a literatura sobre o tema, como Hopp e Spearman (2001) e Karmarkar et al. (1985). Isso permite validar o modelo aqui construído para representar um ambiente *flow shop*. A próxima etapa consiste em inserir, no modelo construído, a variável lote de transferência para atingir o objetivo inicial de investigar a sua relação com o *lead time*.

Passo 4: Inserção da variável lote de transferência no modelo validado no Passo 3

O lote de transferência tem um efeito no *lead time* de uma determinada peça na medida em que esta peça tem que esperar as demais peças que compõem o lote de transferência ser processada. Assim, a variável lote de transferência é inserida no modelo aqui proposto no momento do cálculo do *lead time*.

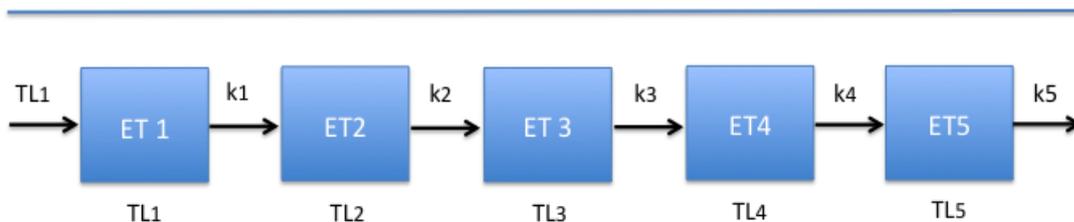
De acordo com Hopp e Spearman (2008), o tempo gasto por uma peça em uma determinada estação de trabalho inclui o tempo de fila, o tempo de processamento propriamente dito e o tempo para formar o lote que vai ser transferido para a próxima etapa, ou seja, o lote de transferência. A soma desses três componentes constitui o *lead time* de determinada peça que atravessa um ambiente produtivo, que no presente trabalho é uma linha de produção com cinco máquinas.

No modelo aqui proposto, as peças são processadas individualmente e o lote de produção é a quantidade de peças que uma determinada estação de trabalho processa entre um *setup* e outro. Conforme apresentado anteriormente nessa mesma seção, no Passo 2, o tempo de fila (TF_j) de um lote de produção TL_j na estação j é dado pela equação 3.10. O tempo de processamento de um lote é dado pela multiplicação entre o tempo de processamento efetivo

na estação j (Te_j) e o lote de produção (TL_j). Assim, o terceiro termo que compõe o *lead time*, que é o tempo gasto na espera da formação do lote de transferência é dado considerando o seguinte mecanismo: em uma linha de produção com cinco máquinas, as peças chegam na primeira estação de trabalho (ET1) em lotes de TL_j peças. Embora as peças sejam processadas individualmente nas estações de trabalho (j), o lote TL_j é denominado lote de produção, uma vez que é a quantidade de peças que são processadas nessa estação entre um *setup* e outro. Uma vez processada, cada peça do lote de produção TL_j deve esperar a formação do lote de transferência (k_j) para ser transportada para a próxima estação. Da segunda estação de trabalho em diante, as peças chegam às estações de k_j em k_j peças, são processadas individualmente, e saem das estações de trabalho, novamente, de k_j em k_j peças. A Figura 3.7 representa esse comportamento.

O tempo médio de formação do lote de transferência k_j é obtido considerando que a primeira peça deste lote deve esperar que as $k_j - 1$ peças restantes sejam processadas na estação j a um tempo de processamento efetivo (Te_j), enquanto que a última peça não precisa esperar. Assim, o tempo médio gasto para formar o lote de transferência é a média entre $(k_j - 1) \times Te_j$ e zero, o que é $(k_j - 1) \times Te_j / 2$.

FIGURA 3.7 - Lote de transferência e lote de produção em uma linha com cinco estações de trabalho (ET)



Legenda:

TL_j : Quantidade de peças processadas na estação de trabalho j entre os *set ups* (**Lote de produção**);

k_j : Quantidade de peças que deixam a estação j e são transportadas para a estação $j+1$ (**Lote de transferência**).

Então, considerando o tempo de fila, o tempo de processamento propriamente dito e o tempo para formar o lote de transferência, o *lead time* em cada estação de trabalho é calculado por meio da expressão 3.21:

$$LT_j = \left(TF_j + (Te_j \cdot TL_j) + \frac{(k_j - 1) \cdot Te_j}{2} \right) \quad (3.21)$$

Onde: k_j é o lote de transferência utilizado na estação de trabalho j , isto é, o número de peças que se acumulam em uma estação de trabalho antes de serem transferidas para a próxima estação (HOPP e SPEARMAN, 2008).

Assim, a partir da compreensão da forma como as peças são processadas e transferidas entre as estações de trabalho será apresentado na Seção 3.3.2 a seguir o modelo proposto para analisar a relação entre o lote de transferência e o *lead time*, em um ambiente *flow shop*.

3.3.2 Apresentação do modelo proposto

A diferença entre o modelo apresentado nesta seção e o modelo apresentado e validado na seção anterior consiste na forma de modelar o cálculo do *lead time*. Aqui, o cálculo do *lead time* considera a variável lote de transferência. Esta é justamente a contribuição deste modelo, e pela falta de modelo similar na literatura, a sua validação não se torna possível.

O mecanismo de funcionamento da linha de produção ao se considerar o lote de transferência foi explicado no Passo 4 da Seção 3.3.1. As equações matemáticas que relacionam as variáveis de chão-de fábrica são as mesmas utilizadas na seção anterior, no Passo 2. A única exceção se aplica ao cálculo do *lead time*, onde a equação 3.21 (apresentada no Passo 4) é utilizada no lugar da equação 3.17 (apresentada no Passo 2). A notação utilizada está representada no Quadro 3.3 a seguir.

QUADRO 3.3 - Notação utilizada no modelo proposto considerando o lote de transferência.

<i>Notação</i>	<i>Descrição</i>
Aj	disponibilidade da máquina j
ccj	coeficiente de variação do tempo entre chegadas na máquina j
cvcVet	vetor que atribui o mecanismo de melhoria ao coeficiente de variação do tempo entre chegadas a cada máquina da linha
cvfj	coeficiente de variação do tempo entre chegadas após a realização de melhorias na máquina j
cvpj	coeficiente de variação de partidas da máquina j
cvtj	coeficiente da variação do tempo efetivo médio global da máquina j
Dm	demanda média
dpadreparoj	desvio padrão do tempo de reparo da máquina j
dpsetup	desvio padrão do tempo de <i>set up</i>
DXr	vetor utilizado para atribuir o desvio padrão do tempo de reparo a cada uma das máquinas da linha
DXs	vetor utilizado para atribuir o desvio padrão do tempo de <i>set up</i> a cada uma das máquinas da linha
H	horas trabalhadas no ano
kj	vetor utilizado para atribuir o tamanho do lote de transferência a cada uma das máquinas da linha
LTj	<i>lead time</i> da máquina j
mdprVet	vetor que atribui o mecanismo de melhoria ao desvio padrão do reparo a cada uma das máquinas da linha
mfj	tempo entre falhas final da máquina j
mpVet	vetor que atribui o mecanismo de melhoria de produtividade a cada máquina da linha
mrj	tempo de reparo final da máquina j
mvtpVet	vetor que atribui o mecanismo de melhoria à variância do tempo natural de processamento a cada máquina da linha
MXr	vetor utilizado para atribuir o tempo de reparo a cada uma das máquinas da linha
MXs	vetor utilizado para atribuir o tempo de <i>set up</i> a cada uma das máquinas da linha
nmaquinas	número de máquinas na linha
Prj	taxa de processamento da máquina j
raVetj	taxa de chegadas de peças na máquina j
rep	número de replicações
SOMA	soma dos <i>lead times</i> das j máquinas da linha
taxpj	taxa de partida da máquina j
tdmj	taxa de defeitos final da máquina j
tdVet	vetor utilizado para atribuir a taxa de defeitos a cada uma das máquinas da linha
Tej	tempo de processamento efetivo global
Tetj	tempo efetivo de processamento da máquina j, considerando paradas preemptivas e não preemptivas
TFFVet	vetor utilizado para atribuir o tempo médio entre falhas a cada uma das máquinas da linha
TFj	tempo de fila da máquina j
THj	<i>throughput</i> na máquina j
TLj	vetor utilizado para atribuir o tamanho do lote de produção utilizado em cada máquina
TPVet	vetor utilizado para atribuir o tempo médio de processamento a cada uma das máquinas da linha
tsfj	tempo de <i>set up</i> final da máquina j
Uj	utilização da máquina j
UKj	termo utilização da Equação de Kingman para a máquina j
varpfj	variância no tempo de processamento após a melhoria na máquina j
varpVet	vetor utilizado para atribuir a variância do tempo natural de processamento a cada uma das máquinas da linha
varrfj	variância do tempo de reparo da máquina j
varsfj	variância no tempo de <i>setup</i> após a realização de melhoria na máquina j
varsVet	vetor utilizado para atribuir a variância do tempo de <i>set up</i> a cada uma das máquinas da linha
VKj	termo de variabilidade da Equação de Kingman para a máquina j
vtegj	variância do tempo efetivo médio global para a máquina j
vtepnj	variância do tempo de processamento com paradas preemptivas e não preemptivas para a máquina j
vtespj	variância do tempo efetivo considerando somente paradas preemptivas para a máquina j
WIPj	estoque em processo na máquina j

A Figura 3.8 representa o modelo, feito no Maple, com todas as equações e parâmetros já apresentados ao leitor na Seção 3.3.1.

FIGURA 3.8 - Ilustração do modelo desenvolvido neste trabalho com o uso do *software* Maple 13, considerando a variável k .

```

Loading LinearAlgebra
[>
Loading Statistics
[>
Loading Student-Calculus1
> RES := proc (rep, nmaquinas) local dpsetup, MXs, PF, DXs, DXr, MXr, k, Dm, H, TL, varsVet, varpVet, tdVet, TPVet, TFFVet,
mdprVet, mpVet, cvcVet, mvtpVet, i, j, mr, dpadpreparo, varrf, tsf, mf, tdm, A, Tet, Te, Pr, U, UK, varsf, varpf, vtesp, vtepn, vteg, cvt,
cvt, VK, TF, WIP, TH, cc, raVet, tazp, cvp, LT, SOMA; H := 1920; TL :=  $\begin{bmatrix} 400 & & & & \\ & 400 & & & \\ & & 30 & & \\ & & & 30 & \\ & & & & 400 & \\ & & & & & 400 \end{bmatrix}$ ; k := 30; varpVet :=  $\begin{bmatrix} 0.0225 & & & & \\ & 0.0225 & & & \\ & & 0.0225 & & \\ & & & 0.0225 & \\ & & & & 0.0225 \end{bmatrix}$ ; MXs
:=  $\begin{bmatrix} 0.75 & & & & \\ & 0.75 & & & \\ & & 0.75 & & \\ & & & 0.75 & \\ & & & & 0.75 \end{bmatrix}$ ; DXs :=  $\begin{bmatrix} 0.05 & & & & \\ & 0.05 & & & \\ & & 0.05 & & \\ & & & 0.05 & \\ & & & & 0.05 \end{bmatrix}$ ; tdVet :=  $\begin{bmatrix} 0.1 & & & & \\ & 0.1 & & & \\ & & 0.1 & & \\ & & & 0.1 & \\ & & & & 0.1 \end{bmatrix}$ ; TPVet :=  $\begin{bmatrix} 0.09 & & & & \\ & 0.09 & & & \\ & & 0.09 & & \\ & & & 0.09 & \\ & & & & 0.09 \end{bmatrix}$ ; TFFVet :=  $\begin{bmatrix} 120 & & & & \\ & 120 & & & \\ & & 120 & & \\ & & & 120 & \\ & & & & 120 \end{bmatrix}$ ; mdprVet :=  $\begin{bmatrix} 1 & & & & \\ & 1 & & & \\ & & 1 & & \\ & & & 1 & \\ & & & & 1 \end{bmatrix}$ ; mpVet :=  $\begin{bmatrix} 1 & & & & \\ & 1 & & & \\ & & 1 & & \\ & & & 1 & \\ & & & & 1 \end{bmatrix}$ ;
cvcVet :=  $\begin{bmatrix} 1 & & & & \\ & 1 & & & \\ & & 1 & & \\ & & & 1 & \\ & & & & 1 \end{bmatrix}$ ; MXr :=  $\begin{bmatrix} 1 & & & & \\ & 1 & & & \\ & & 1 & & \\ & & & 1 & \\ & & & & 1 \end{bmatrix}$ ; DXr :=  $\begin{bmatrix} 0.5 & & & & \\ & 0.5 & & & \\ & & 0.5 & & \\ & & & 0.5 & \\ & & & & 0.5 \end{bmatrix}$ ; mvtpVet :=  $\begin{bmatrix} 1 & & & & \\ & 1 & & & \\ & & 1 & & \\ & & & 1 & \\ & & & & 1 \end{bmatrix}$ ; for i from 1 while i ≤ rep do
for j from 1 to nmaquinas do if j=1 then Dm := 11520; raVetj :=  $\frac{Dm}{(H \cdot TL_j)}$ ; ccj := 1.3; dpsetupj := DXsj; varsfj := dpsetupj
· dpsetupj; dpadpreparoj := DXrj; mrj := MXrj; varrfj := dpadpreparoj · dpadpreparoj; tsfj := MXsj; mfj := TFFVetj; tdmj := tdVetj
· mpVetj; Aj :=  $\left(\frac{mf_j}{mf_j + mr_j}\right)$ ; Tetj :=  $\left(\frac{TPVet_j}{A_j}\right) + \left(\frac{tsf_j}{TL_j}\right)$ ; Tej :=  $\left(\frac{Tet_j}{1 - tdm_j}\right)$ ; Prj :=  $\left(\frac{1}{Te_j \cdot TL_j}\right)$ ; Uj :=  $\left(\frac{raVet_j}{Pr_j}\right)$ ; if Uj
> 1 then UKj := 1 else UKj := Uj / (1 - Uj); end if; varpfj := mvtpVetj · varpVetj; vtespj :=  $\left(\left(\frac{varpf_j}{A_j \cdot A_j}\right) + \left(\frac{(mr_j \cdot mr_j) + (varrf_j) \cdot (1 - A_j) \cdot (TPVet_j)}{(A_j \cdot mr_j)}\right)\right)$ ; vtepnj := (vtespj) +  $\left(\frac{varsf_j}{(TL_j)}\right) + \left(\left(\frac{(TL_j - 1)}{TL_j \cdot TL_j}\right) \cdot (tsf_j \cdot tsf_j)\right)$ ; vtegj
:=  $\left(\left(\frac{vtepn_j}{(1 - tdm_j)}\right) + \left(\frac{(tdm_j \cdot Tet_j \cdot Tet_j)}{(1 - tdm_j) \cdot (1 - tdm_j)}\right)\right)$ ; cvtj :=  $\left(\sqrt{\frac{vteg_j}{(Te_j \cdot Te_j)}}\right)$ ; cvfj := ccj · cvcVetj; VKj := (cvfj · cvfj)
+ (cvtj · cvtj); TFj :=  $\frac{(Te_j \cdot TL_j \cdot UK_j \cdot VK_j)}{2}$ ; LTj :=  $\left(TF_j + (Te_j \cdot TL_j) + \frac{(k_j - 1) \cdot Te_j}{2}\right)$ ; WIPj := LTj · raVetj; TLj; THj

```

```

:=  $\frac{WIP_j}{LT_j \cdot TL_j}$ ;  $cvp_j := \left( \sqrt{(U_j \cdot U_j \cdot cvt_j \cdot cvt_j + (1 - (U_j \cdot U_j)) \cdot cvf_j \cdot cvf_j)} \right)$ ;  $taxp_j := TH_j$ ;  $PF_j := ((TL_j \cdot raVet_j) - (TH_j \cdot TL_j))$ ;
else  $Dm := 11520$ ;  $raVet_j := \frac{((taxp_j - 1) \cdot TL_j - 1)}{TL_j}$ ;  $cc_j := cvp_{j-1}$ ;  $dpsetup_j := DX_s$ ;  $varsf_j := dpsetup_j \cdot dpsetup_j$ ;  $dpadreparo_j$ 
:=  $DX_r$ ;  $mr_j := MX_s$ ;  $varrf_j := dpadpreparo_j \cdot dpadpreparo_j$ ;  $tsf_j := MX_s$ ;  $mf_j := TFFVet_j$ ;  $tdm_j := tdVet_j$ ;  $mpVet_j$ ;  $A_j$ 
:=  $\left( \frac{mf_j}{mf_j + mr_j} \right)$ ;  $Tet_j := \left( \frac{TPVet_j}{A_j} \right) + \left( \frac{tsf_j}{TL_j} \right)$ ;  $Te_j := \left( \frac{Tet_j}{1 - tdm_j} \right)$ ;  $Pr_j := \left( \frac{1}{Te_j \cdot TL_j} \right)$ ;  $U_j := \left( \frac{raVet_j}{Pr_j} \right)$ ; if  $U_j > 1$ 
then  $UK_j := 1$  else  $UK_j := U_j / (1 - U_j)$ ; end if;  $varpf_j := mvtpVet_j \cdot varpVet_j$ ;  $vtesp_j := \left( \left( \frac{varpf_j}{A_j \cdot A_j} \right) \right.$ 
+  $\left. \left( \frac{((mr_j \cdot mr_j) + (varrf_j)) \cdot (1 - A_j) \cdot (TPVet_j)}{A_j \cdot mr_j} \right) \right)$ ;  $vtepn_j := (vtesp_j) + \left( \frac{varsf_j}{(TL_j)} \right) + \left( \left( \frac{(TL_j - 1)}{TL_j \cdot TL_j} \right) \cdot (tsf_j \cdot tsf_j) \right)$ ;  $vteg_j$ 
:=  $\left( \left( \frac{vtepn_j}{(1 - tdm_j)} \right) + \left( \frac{(tdm_j \cdot Tet_j \cdot Tet_j)}{(1 - tdm_j) \cdot (1 - tdm_j)} \right) \right)$ ;  $cvt_j := \left( \sqrt{\frac{vteg_j}{(Te_j \cdot Te_j)}} \right)$ ;  $cvf_j := cc_j \cdot cvcVet_j$ ;  $VK_j := (cvf_j \cdot cvf_j)$ 
+  $(cvt_j \cdot cvt_j)$ ;  $TF_j := \frac{(Te_j \cdot TL_j \cdot UK_j \cdot VK_j)}{2}$ ;  $LT_j := \left( TF_j + (Te_j \cdot TL_1) + \frac{(k_j - 1) \cdot Te_j}{2} \right)$ ;  $WIP_j := LT_j \cdot raVet_j \cdot TL_j$ ;  $TH_j$ 
:=  $\frac{WIP_j}{LT_j \cdot TL_j}$ ;  $cvp_j := \left( \sqrt{(U_j \cdot U_j \cdot cvt_j \cdot cvt_j + (1 - (U_j \cdot U_j)) \cdot cvf_j \cdot cvf_j)} \right)$ ;  $taxp_j := TH_j$ ;  $PF_j := ((TL_j \cdot raVet_j) - (TH_j \cdot TL_j))$ ;
end if; end do; end do; for  $i$  from 1 to  $rep$  do; for  $j$  from 1 to  $nmaquinas$  do  $SOMA := add(LT_j, j = 1 .. nmaquinas)$ ;  $print(i, "M.",$ 
 $j, "LT.", LT_j, "LT total", SOMA, U_j)$ ; end do; end do; return  $taxp_j, cvp_j$ ; end proc

```

Fonte: próprio autor.

A próxima seção apresenta os resultados obtidos com as simulações realizadas com o intuito de explorar a primeira questão de pesquisa da presente tese.

3.4 Resultados

Os experimentos aqui apresentados foram realizados visando explorar a primeira questão de pesquisa deste capítulo: como o tamanho do lote de transferência afeta o *lead time* em um ambiente *flow shop* balanceado?

A fim de correlacionar tamanho do lote de transferência e produção, o estudo do efeito do tamanho de lote de transferência no *lead time* será feito por meio da curva tamanho de lote – *lead time* para o sistema de produção simulado.

Para explorar essa curva e sua relação com a variável lote de transferência (k), foram considerados diversos valores para o tamanho do lote de produção e, então, para cada

um destes valores, foram testadas, de forma determinística e estocástica, diferentes políticas de lote de transferência, a saber: 1) lote de transferência igual ao lote de produção; 2) lote de transferência igual a 200; 3) lote de transferência igual a 30; 4) lote de transferência igual a 10 e 5) lote de transferência igual a 1. A escolha dessas políticas se deu pela necessidade de conhecer o efeito de tamanhos de lote de transferência grandes (igual a 600, 400 ou 200, por exemplo), pequenos (unitário, igual a 10 ou 30) e iguais ao lote de produção, que é justamente a política adotada pelas empresas, quando a redução do lote de transferência não foi ainda explorada. Ainda, o leitor deve se atentar ao fato de que a escolha dessas políticas também está relacionada com a ordem de grandeza dos parâmetros adotados no modelo e com os valores dos lotes de produção testados, a saber: 600, 400, 170, 150, 130, 100, 80, 70, 60, 40, 30 e 16.

É importante destacar neste ponto que o tamanho do lote de produção e o tamanho do lote de transferência são as duas variáveis independentes que sofreram variações ao longo das simulações. Já, o *lead time* é a variável dependente que foi utilizada para avaliar o comportamento do lote de transferência na linha de produção simulada.

A seguir serão apresentados os resultados obtidos com as simulações, considerando um cenário determinístico e também um cenário estocástico, em que a demanda e as variáveis independentes tempo de reparo e tempo entre falhas seguem uma distribuição de probabilidade.

3.4.1 Cenário determinístico

Inicialmente, foram feitas simulações considerando os parâmetros de entrada exibidos na Tabela 3.3 a seguir. Tais parâmetros foram inspirados em dados de empresas reais.

TABELA 3.3 - Valores de entrada utilizados para o cenário determinístico.

Parâmetros	Valor inicial
Coefficiente de variação do tempo entre chegadas na máquina j (ccj)	1,3
Demanda média (Dm)	11520 peças/ano
Desvio padrão do tempo de reparo de cada máquina da linha (DXr)	0,5
Desvio padrão do tempo de <i>set up</i> de cada máquina da linha (DXs)	0,5
Horas trabalhadas no ano (H)	1920 h
Tempo de reparo de cada máquina da linha (MXr)	1h
Tempo de <i>set up</i> a cada máquina da linha (MXs)	0,75 h
Número de máquinas (nmaquinas)	5
Taxa de defeitos de cada máquina da linha (tdVet)	0,1
Tempo médio entre falhas de cada máquina da linha (TFFVet)	120h
Tempo médio de processamento de cada máquina da linha (TPVet)	0,1 h
Variância do tempo natural de processamento de cada máquinas da linha (varpVet)	0,0025

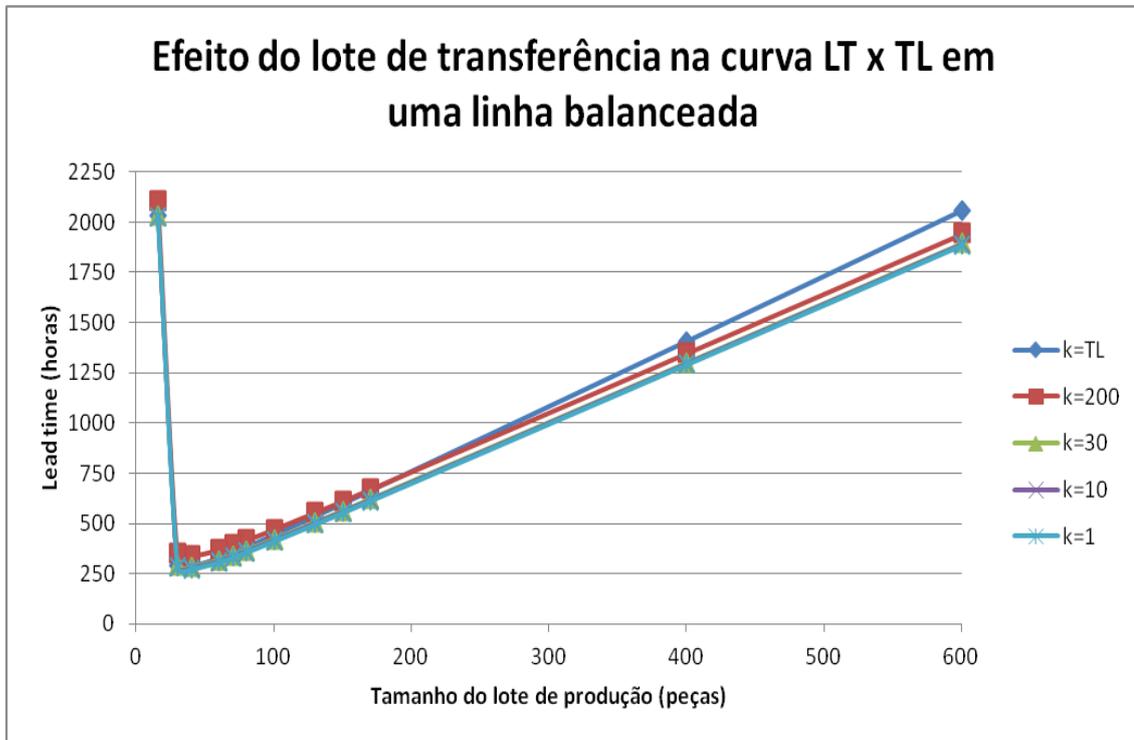
O sistema de produção simulado, neste primeiro momento, representa um *flow shop* com cinco máquinas idênticas. Por se tratarem de máquinas idênticas, a utilização média também foi a mesma em todas as máquinas da linha e variou entre 65% e 85%, de acordo com o tamanho do lote de produção adotado em cada cenário. Os valores obtidos para o *lead time* total da linha, em cada simulação, estão apresentados na Tabela 3.4 a seguir.

TABELA 3.4 – Valores obtidos para o *lead time* em cada simulação, em função dos tamanhos de lote de produção (TL) e de transferência (k).

Lote de produção (peças)	<i>Lead time (horas)</i>				
	k=TL	K=200	K= 30	k=10	k=1
600	2055,7	1942,3	1894,1	1888,4	1885,8
400	1405,0	1347,9	1299,4	1293,7	1291,1
170	660,7	669,4	619,7	613,9	611,3
150	596,8	611,5	561,6	555,7	553,0
130	533,5	554,2	503,9	497,9	495,3
100	440,1	470,2	419,0	413,0	410,3
80	380,1	416,8	364,8	358,6	355,9
70	351,5	391,8	339,1	332,9	330,1
60	324,7	368,8	315,2	308,9	306,1
40	285,0	338,2	281,7	275,1	272,1
30	291,0	350,5	291,0	284,1	280,9
16	2028,3	2103,8	2034,1	2025,9	2022,2

As curvas LT- TL obtidas com os valores da Tabela 3.4 estão apresentadas na Figura 3.9, pela qual é possível comparar o desempenho das diferentes políticas de lote de transferência adotadas em relação à curva *lead time* x lote de produção.

FIGURA 3.9 - Curva LT- TL para diferentes políticas de lote de transferência em um cenário determinístico.



A partir da Tabela 3.4 e da Figura 3.9 é possível perceber que o ponto de mínimo da curva LT-TL, ou seja, o menor tamanho do lote de produção que pode ser utilizado de forma a obter um baixo *lead time* está em torno de 40 peças. Considera-se a partir de agora que o lote de produção ótimo em relação ao *lead time* é, para o cenário simulado, 40 peças. Neste ponto, a linha de produção modelada atinge o menor *lead time*, aproximadamente 306 h.

Com o objetivo de investigar se os resultados encontrados se mantinham os mesmos para diferentes tamanhos de *flow shop*, foram simuladas as mesmas políticas do cenário com cinco máquinas, porém alterando o tamanho da linha. A consideração de que todas as máquinas são idênticas se manteve e o número de máquinas variou de 3 a 10. Devido ao maior comprimento da linha, na medida em que se aumenta o número de máquinas de 6 até 10, o valor final do *lead time* é maior, mas o comportamento da curva LT-TL se manteve o mesmo daquele obtido na simulação de uma linha com cinco máquinas idênticas. Para os cenários de 3 e 4 máquinas idênticas, também foi observado o mesmo comportamento da curva LT-TL, porém com um valor total do *lead time* menor que o experimento base (5 máquinas), uma vez que as peças tinham um percurso menor a ser percorrido.

A partir dessas simulações, é possível destacar alguns resultados:

- i) independentemente do tamanho do lote de produção, a política de lote de transferência unitário ($k=1$) foi, dentre as cinco políticas testadas para um cenário determinístico, a que proporcionou o menor *lead time* para todos os tamanhos de lotes testados. Ou seja, essa política levou a curva LT-TL para baixo, reduzindo o valor do *lead time*;
- ii) para tamanhos de lote de produção grandes, a política com pior desempenho, ou seja, a que proporciona maior *lead time* é a política de utilizar o lote de transferência igual ao lote de produção ($k = TL$);
- iii) apesar da política de lote de transferência unitário ($k=1$) proporcionar o menor *lead time* para todos os tamanhos de lote de produção testados, as maiores reduções no *lead time* ocorrem quando se trabalha perto do tamanho do lote de produção ótimo (ponto de mínimo da curva $LT \times TL$). Por exemplo, pela Tabela 3.4 pode-se perceber que quando o lote de produção é de 400 peças, portanto muito acima do lote de produção ótimo, e adota-se uma política $k=TL$, o *lead time* obtido é 1405 h. Caso a empresa faça um esforço para mudar a política do lote de transferência e opte por trabalhar com uma política $k=1$, o *lead time* obtido será de 1291,1 h, isto é, uma redução em torno de 8%. No outro extremo da curva, lote de produção de 16 peças (ou seja, muito inferior ao lote de produção ótimo em relação ao *lead time*), a conclusão é a mesma: passar de uma política de $k=200$ peças para uma política considerada boa como $k=1$, gera uma redução de 3,9% no *lead time*. Portanto, a mensagem aqui é clara: trabalhar com um lote de transferência pequeno ou até mesmo unitário sem utilizar um tamanho de lote de produção próximo ao tamanho ótimo (ponto de mínimo da curva LT-TL) gera reduções muito pequenas no *lead time*;
- iv) próximo ao ponto ótimo, a Figura 3.9 mostra que os resultados para todas as políticas testadas ($k=1$, $k=10$, $k=30$, $k=200$ e $k= TL$) parecem ser bem próximos.

Para investigar o item “iv” acima, isto é, o comportamento do *lead time* próximo no ponto ótimo, foram realizadas simulações utilizando um tamanho de lote de

produção em torno de 40 peças, variando de 20 a 50 peças. Os resultados obtidos estão na Tabela 3.5 a seguir.

TABELA 3.5 – Valores do *lead time* obtidos para tamanhos de lote de produção próximos ao valor mínimo da curva LT-TL.

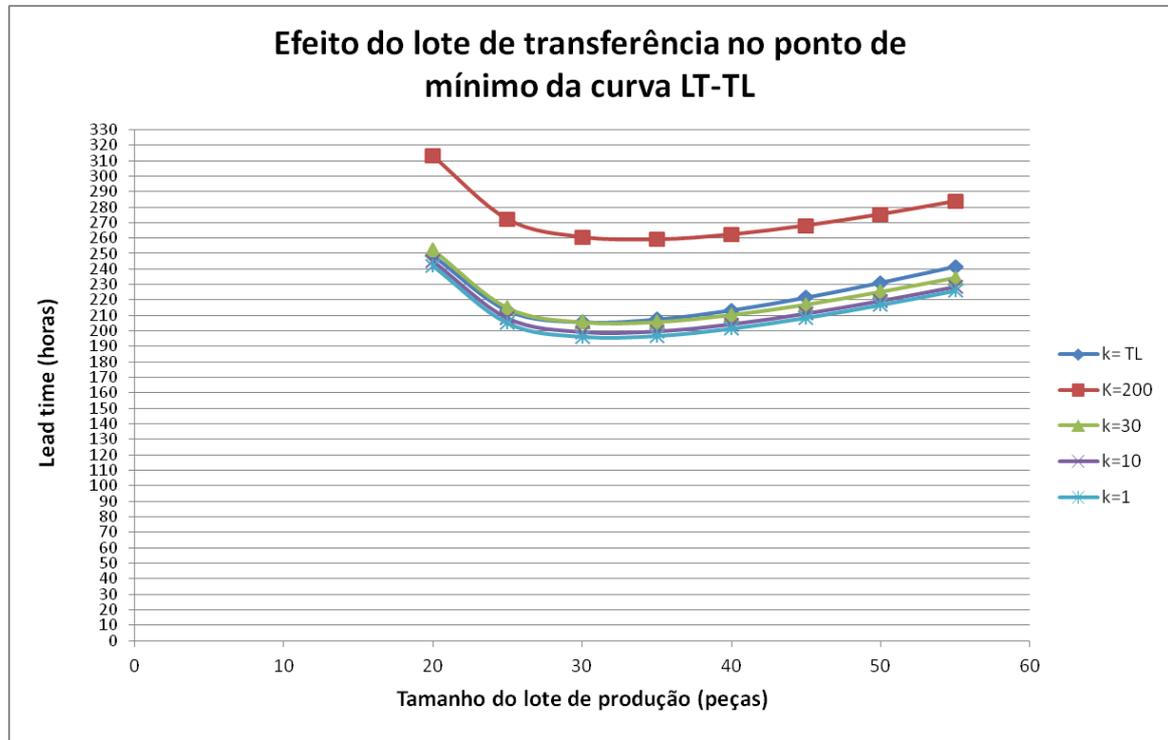
Tamanho do lote de produção (peças)	Lead times (horas)				
	k= TL	K=200	k=30	k=10	k=1
55	241,7	283,7	234,4	228,6	226,0
50	231,3	275,3	225,4	219,5	216,9
45	221,7	268,0	217,2	211,3	208,6
40	213,5	262,2	210,5	204,4	201,7
35	207,6	259,0	206,0	199,8	197,0
30	205,8	260,5	205,8	199,4	196,5
25	213,3	272,0	215,0	208,3	205,2
20	248,8	312,9	252,3	245,2	242,0

A partir da Tabela 3.5 foi construído o gráfico da Figura 3.10 que ilustra o comportamento do *lead time* em relação ao tamanho do lote de produção, para as mesmas políticas de lote de transferências testadas ($k=1$, $k=10$, $k=30$, $k=200$ e $k=TL$).

Percebe-se que para os tamanhos de lote de produção testados, as curvas para as políticas $k=1$, $k=10$, $k=30$ e $k=TL$ são bem próximas, o que indica que tais políticas permitem atingir praticamente o mesmo *lead time* de produção. Conforme mostrado na Tabela 3.5, a política de lote de transferência unitário ($k=1$) continua sendo a que proporciona o menor *lead time*, neste cenário determinístico. Porém, as diferenças entre essa política e as políticas $k=10$, $k=30$ e $k=TL$ giram em torno de 5%, o que pode ser pequeno, dependendo do esforço que a empresa precisa empreender para operar com lote de transferência unitário.

Já a curva que descreve a política $k=200$ está acima de todas as demais, ou seja, gera *lead times* maiores para todos os tamanhos de lote de produção testados. Ao se comparar os *lead times* obtidos entre a política $k=200$ e as demais, percebem-se diferenças maiores que 20%.

FIGURA 3.10 - Curva LT-TL para diferentes políticas de lote de transferência na faixa do tamanho do lote de produção ótimo.



A conclusão que se pode extrair das simulações realizadas até agora é que um sistema de produção deve operar com tamanhos de lotes de produção próximos ao seu lote de produção ótimo com relação ao *lead time* e, a partir desse ponto, definir o tamanho do lote de transferência que será utilizado. Tentar reduzir o lote de transferência sem conhecer o tamanho do lote de produção ótimo em relação ao *lead time*, pode ser um esforço improdutivo.

3.4.2 Cenário estocástico

Ainda com o objetivo de responder a primeira questão de pesquisa desse trabalho e testar as conclusões advindas dos testes realizados no cenário determinístico, foram utilizados os parâmetros iniciais da Tabela 3.3 e também foram inseridas incertezas no modelo proposto de forma gradativa. Ou seja, foi investigado de forma isolada o efeito das seguintes distribuições de probabilidade: i) distribuição de Poisson para a demanda; ii) distribuição LogNormal para o tempo de reparo e iii) distribuição de Weibull para o tempo entre falhas. Para cada uma dessas variáveis, agora com uma variabilidade associada, foram

feitas com simulações para as sessenta combinações tamanho do lote de produção (TL) – tamanho do lote de transferência (k), analisadas anteriormente de forma determinística. O número de simulações adotado, isto é, 100, possibilita uma amostra relativamente grande de dados, que respeita o teorema do limite central (MONTGOMERY; RUNGER; HUBELE, 2004), por ser maior que 30. O uso de amostras de tamanho 100 também representa a realidade de várias empresas que não têm um histórico de dados para as variáveis de chão-de-fábrica muito superior a cem medições.

A incerteza na demanda foi representada por uma distribuição de Poisson com média de 11520 peças por ano. O uso da distribuição de Poisson para representar o comportamento estocástico da demanda já foi amplamente realizado pela literatura, como por exemplo, nos trabalhos de Teunter e Haneveld (2008), Laporte, Louveaux e Hamme (2002), Kiesmüller e Van der Laan (2001), e Hopp e Spearman (2001). A média dos cem valores encontrados para o *lead time* e seu respectivo desvio padrão (DP) em cada combinação TL-k estão apresentados na Tabela 3.6.

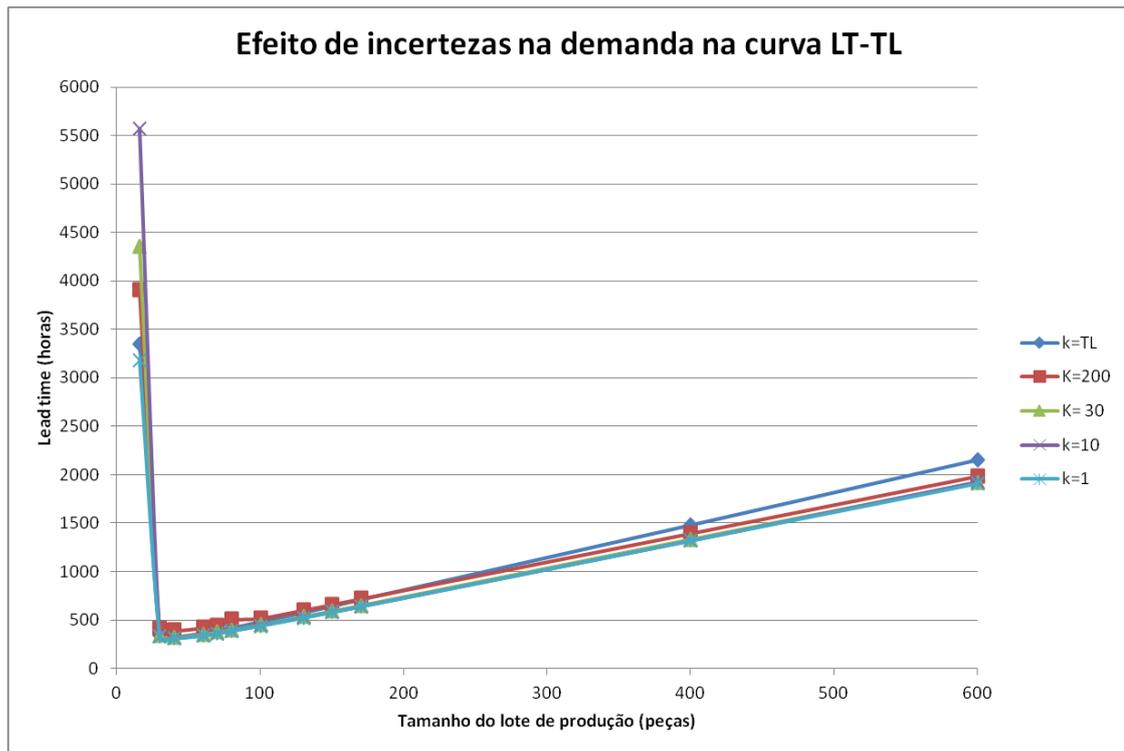
A comparação da Tabela 3.4 com a Tabela 3.6 mostra que a média dos valores para o *lead time* quase dobra quando o tamanho do lote de produção é de 16 peças, por exemplo. Ou seja, em uma situação de incerteza na demanda, trabalhar com o lote de produção muito abaixo do valor ideal (neste caso, 40 peças) gera um desempenho ainda pior quando comparado com um cenário determinístico. A Tabela 3.6 mostra que não só a média do *lead time* é ruim para um lote de produção de 16 peças, como também o desvio padrão é o maior quando comparado com os demais desvios referentes aos tamanhos de lotes testados.

TABELA 3.6 - Valores da média do *lead time* e desvio padrão de cem simulações realizadas para as 60 combinações TL-k, considerando que a demanda segue uma distribuição de Poisson.

TL	k=TL		K=200		K= 30		k=10		k=1	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
600	2152,26	43,58	1985,42	45,09	1918,38	42,99	1923,29	44,43	1908,07	43,92
400	1477,77	29,89	1394,40	30,62	1329,82	32,00	1316,94	34,84	1316,23	31,22
170	706,73	15,91	719,16	16,32	646,21	17,27	636,87	17,38	634,97	17,88
150	638,49	16,17	659,07	16,03	588,69	16,60	578,91	14,69	577,06	16,54
130	572,03	14,49	601,51	14,12	530,72	14,77	523,46	14,02	518,71	15,16
100	476,47	13,27	518,12	12,87	445,72	12,84	440,13	12,47	434,94	12,83
80	414,09	11,08	502,71	24,87	393,25	11,32	385,43	11,51	382,97	11,75
70	388,64	10,97	439,55	10,08	370,69	10,97	359,34	11,38	357,64	12,40
60	359,02	12,33	418,97	10,66	346,68	11,92	337,70	11,07	334,05	11,57
40	321,81	12,60	389,98	12,68	318,56	13,70	312,50	12,65	305,48	12,81
30	336,85	16,84	409,74	18,17	338,54	18,17	330,04	19,11	327,12	17,36
16	3349,15	2893,32	3901,42	5892,06	4356,24	10058,00	5568,77	11496,78	3172,97	4238,17

Em relação aos demais valores obtidos com as simulações considerando a incerteza na demanda, é possível perceber que o comportamento da curva LT-TL se manteve com o mesmo padrão obtido para um cenário determinístico. A Figura 3.11 ilustra esse resultado.

FIGURA 3.11 - Curva LT-TL para diferentes políticas de lote de transferência considerando que a demanda segue uma distribuição de Poisson.



O efeito da incerteza no tempo de reparo foi realizado considerando que esta variável segue uma distribuição LogNormal. Tal consideração está embasada em trabalhos da literatura, que fazem uso dessa distribuição para representar o comportamento estocástico do tempo de reparo, como por exemplo: Godinho Filho e Utiyama (2016), Neil e Marquez (2012), Hines *et al.* (2003) e Ananda (2003). Assim, considerando os demais parâmetros do modelo, o tempo de reparo foi modelado como uma distribuição LogNormal de média 1,0 e desvio padrão de 0,5. Para realizar essa modelagem no *software* Maple é preciso definir a média do tempo de reparo (mr_j) e o desvio padrão do tempo de reparo ($dpadreparo_j$) da seguinte forma:

$$mr_j := \text{Mean}(\text{Sample}(\text{LogNormal}(-0.11157, 0.472381), 1))$$

$$dpadreparo_j := \text{StandardDeviation}(\text{LogNormal}((-0.11157, 0.472381), 1))$$

Note que apesar de um dos parâmetros acima receber um valor negativo (igual a - 0,11157) não significa que foram assumidos valores negativos para a variável tempo de reparo. Trata-se apenas de um parâmetro, sem significado físico, para se obter a distribuição desejada, ou seja, uma distribuição LogNormal com média igual a 1,0 e desvio padrão igual a 0,5. Mais informações a respeito do cálculo desses parâmetros podem ser encontradas em Hines *et al.* (2003).

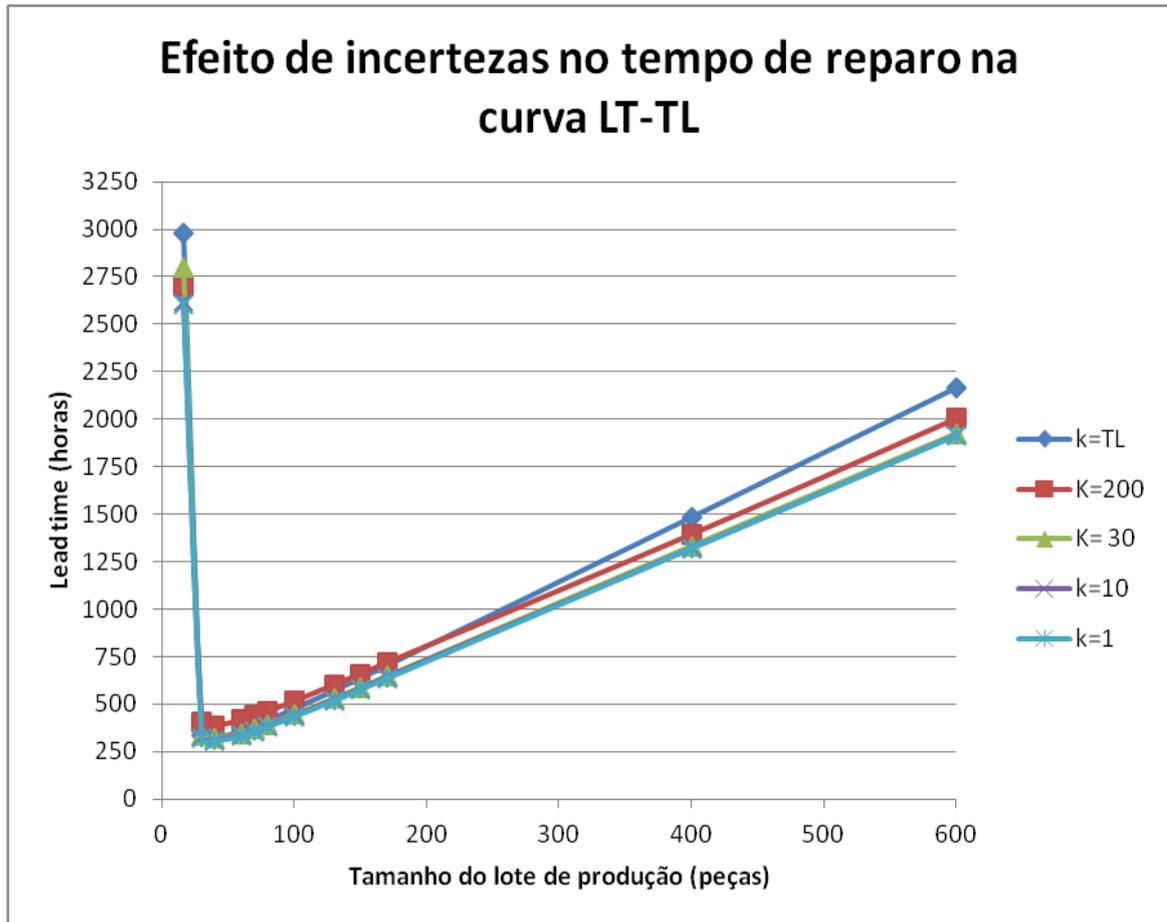
Assim, os valores encontrados para o *lead time* e seu respectivo desvio padrão em cada uma das sessenta combinações TL-k estão apresentados na Tabela 3.7 a seguir.

TABELA 3.7 - Valores da média do *lead time* e desvio padrão das cem simulações realizadas para combinações de TL-k, considerando que o tempo de reparo segue uma distribuição LogNormal.

TL	k=TL		K=200		K= 30		k=10		k=1	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
600	2167,89	39,25	2004,27	37,56	1924,59	36,20	1918,44	36,08	1914,85	38,54
400	1486,56	28,87	1395,81	21,30	1332,83	32,86	1323,11	29,05	1320,45	40,61
170	705,93	10,56	720,89	14,15	649,18	12,72	644,68	15,65	637,68	16,42
150	640,27	10,78	660,91	10,61	590,69	9,65	582,72	11,83	579,83	12,07
130	573,28	9,14	605,07	11,21	533,26	11,90	525,41	10,78	519,88	11,04
100	479,01	9,46	518,73	7,85	448,01	8,27	439,16	6,87	437,50	7,95
80	416,27	6,62	465,87	6,74	394,28	5,87	388,41	10,74	382,97	6,19
70	386,81	7,35	440,77	5,96	370,01	5,83	361,86	6,64	358,56	6,02
60	359,79	5,62	418,93	6,51	347,64	5,77	339,94	7,20	335,30	6,09
40	323,82	6,00	389,67	4,40	320,30	5,68	311,14	4,99	307,53	5,83
30	338,09	5,67	408,29	5,54	338,20	5,54	329,82	5,73	324,90	5,68
16	2981,76	2939,09	2700,79	415,97	2802,56	1281,90	2619,65	406,48	2608,24	345,38

É possível perceber que os valores médios dos *lead times* obtidos são semelhantes àqueles obtidos para um cenário determinístico, ou seja, a incerteza no tempo de reparo das máquinas, com os parâmetros usados para a distribuição LogNormal, não contribuiu significativamente para um aumento no *lead time*. Ao se comparar os desvios médios desse cenário (Tabela 3.7) com os desvios médios referentes à incerteza na demanda (Tabela 3.6), é possível notar que a incerteza no tempo de reparo permite maior estabilidade no *lead time*, isto é, desvios-padrão menores. Ainda se observa que o comportamento da curva LT-TL se manteve com o mesmo padrão obtido para um cenário determinístico. A Figura 3.12 ilustra esse resultado.

FIGURA 3.12 - Curva LT-TL para diferentes políticas de lote de transferência considerando que o tempo de reparo segue uma distribuição LogNormal.



O efeito da incerteza no tempo entre falhas foi realizado considerando que esta variável segue uma distribuição de Weibull. Tanto a distribuição de Weibull quanto a LogNormal são utilizadas na literatura para representar o tempo médio entre falhas. No entanto, no presente trabalho, a decisão de utilizar a distribuição de Weibull para representar essa variável foi embasada pelos seguintes trabalhos: Guner, Chinnam e Murat (2016), Safaei, Banjevic e Jardine (2010), Rezg, Xie e Mati (2004) e Azadivar e Shu (1999).

De acordo com Muchiri et al. (2013), parâmetros de forma inferiores a 1 representam taxas de falhas decrescentes, valores próximos a 1 representam taxas constantes de falhas e parâmetros de forma superiores a 1 para representar o tempo entre falhas correspondem a uma situação onde as taxas de falhas dos equipamentos são crescentes. Para representar essa última situação, foi adotado, para o parâmetro de forma da distribuição (β), o valor 1,5, conforme feito em Guner, Chinnam e Murat (2016). A média do tempo entre falhas foi considerada como 120 h. No *software* Maple, para se gerar tempos entre falhas que sigam

uma distribuição Weibull com média 120 e parâmetro de forma 1,5 é preciso definir a média do tempo entre falhas (mf_j) da seguinte forma: $mf_j := Mean (Sample (Weibull (120, 1.5), 1))$.

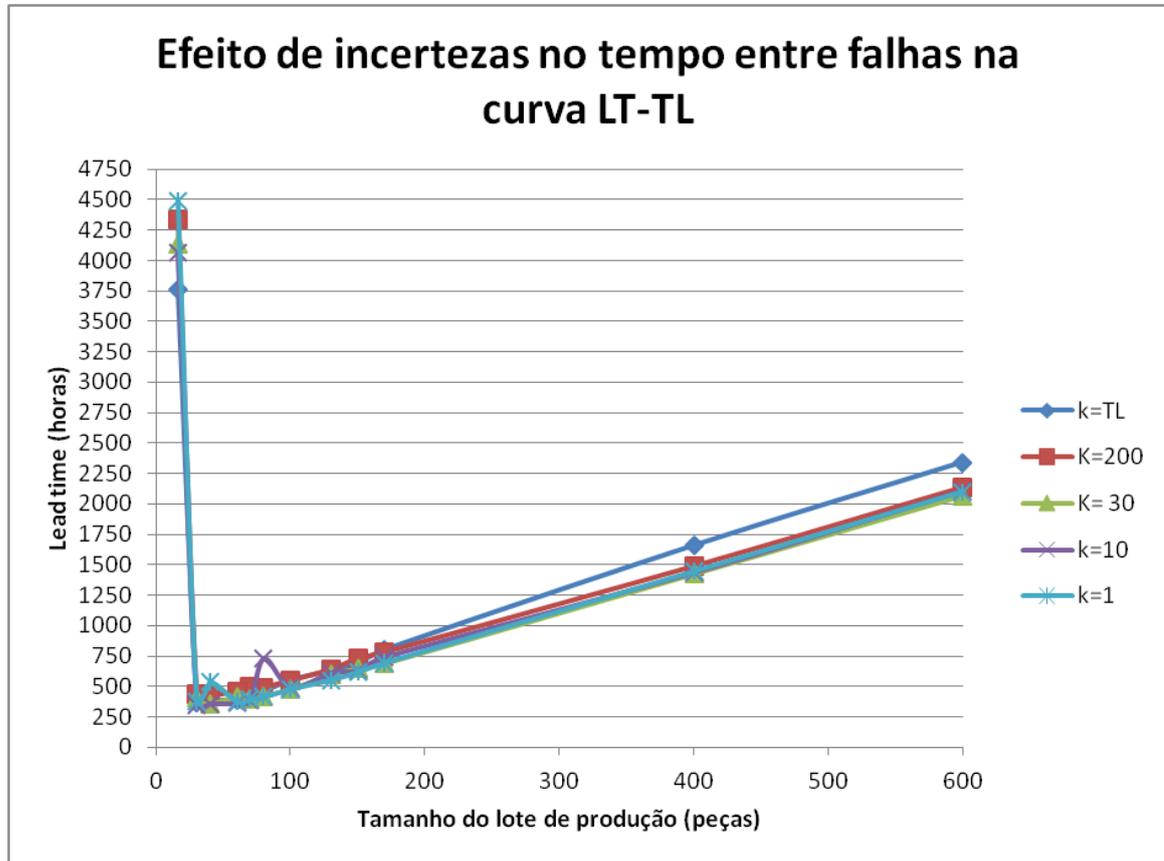
Assim, os valores encontrados para o *lead time* e seu respectivo desvio padrão em cada uma das sessenta combinações TL-k estão apresentados na Tabela 3.8 a seguir. É possível notar que os valores médios do *lead time* para um tamanho de lote de produção pequeno (16 peças) são relativamente maiores do que aqueles obtidos para um cenário determinístico (Tabela 3.4). Outro ponto a ser destacado desse resultado é que os desvios-padrão são maiores quando a linha de produção está sujeita a uma incerteza no tempo entre falhas. Isto é, a incerteza na demanda e a incerteza no tempo de reparo, em geral, não causaram uma variabilidade tão grande na linha de produção quanto à incerteza no tempo entre falhas.

TABELA 3.8 - Valores da média do *lead time* e desvio padrão das cem simulações realizadas para combinações de TL-k, considerando que o tempo entre falhas segue uma distribuição de Weibull.

TL	k=TL		K=200		K= 30		k=10		k=1	
	Média	DP								
600	2344,81	318,26	2139,24	171,12	2069,32	237,45	2109,19	319,23	2101,91	328,57
400	1658,61	501,40	1490,48	156,43	1426,58	116,82	1438,97	409,39	1447,78	253,28
170	800,87	413,97	783,48	153,21	691,62	78,82	744,11	291,37	697,15	183,13
150	686,15	72,82	731,41	298,77	649,03	145,12	634,93	95,58	621,41	66,77
130	629,04	105,64	642,61	75,38	598,42	300,30	613,69	344,58	556,41	40,42
100	549,23	225,76	551,44	56,67	481,62	67,75	495,37	109,43	480,78	78,52
80	457,22	218,24	495,46	78,98	423,84	52,15	732,47	2727,85	417,38	63,04
70	416,73	56,49	496,94	182,48	398,20	80,89	389,33	45,68	397,99	153,25
60	393,57	59,47	465,36	143,40	417,12	302,72	366,09	49,16	376,95	80,91
40	377,61	185,09	423,87	62,70	362,54	168,88	359,85	144,04	540,23	1867,92
30	366,84	49,14	441,56	238,02	409,51	238,02	354,61	43,37	384,48	253,84
16	3763,10	5810,39	4342,05	5216,15	4138,69	3801,06	4065,01	4159,83	4495,53	7871,33

Assim como as outras duas situações testadas anteriormente, a incerteza no tempo entre falhas na linha de produção simulada não alterou o padrão do comportamento da curva LT-TL, representada na Figura 3.13 a seguir.

FIGURA 3.13 - Curva LT-TL para diferentes políticas de lote de transferência considerando que o tempo entre falhas segue uma distribuição de Weibull.



Para os três cenários de incerteza testados, o valor médio obtido para o *lead time* com a política $k=1$ se mostrou inferior aos resultados obtidos com as demais políticas ($k=10$, $k=30$, $k=200$ e $k=TL$) para a maioria dos tamanhos dos lotes de produção testados. Essa diferença pode ser observada na Tabela 3.6, na Tabela 3.7 e na Tabela 3.8 e também nos gráficos da Figura 3.11, da Figura 3.12 e da Figura 3.13, onde é possível observar a curva da política $k=1$ sempre mais abaixo das demais curvas.

As curvas LT-TL foram geradas com os valores médios dos *lead times* obtidos sob a influência das incertezas simuladas. Então, se faz necessária a análise da dispersão dos dados obtidos nas simulações para verificar se de fato a política $k=1$ gera *lead times* inferiores às demais políticas. Para isso, foi utilizada a Estatística Descritiva gerada pelo *software* Statistica, para todos os experimentos realizados. A Tabela 3.9 apresenta, para os três cenários de incerteza, os valores mínimos e máximos dos *lead times*, o 10° e o 90° percentis de cada

configuração (TL x k). De acordo com Montgomery, Runger e Hubele (2004), o 10° percentil (P10) é um valor tal que 10% das observações têm valor igual ou inferior a ele assim como o 90° percentil (P90) determina os 90% das observações que têm valor igual ou inferior ao mesmo. Em termos práticos, a análise dos percentis permite identificar, considerando a dispersão dos dados, se as políticas testadas geraram *lead times* equivalentes ou não. Os destaques apresentados na Tabela 3.9 estão de acordo com o intervalo de intersecção observado entre a política k=1 e as demais políticas (k=10, k=30, k=200 e k=TL).

A partir da Tabela 3.9, é possível analisar que, para um tamanho de lote de produção igual a 600 peças, no cenário de incerteza na demanda, as políticas k=1 e k=10 são equivalentes no intervalo entre 1862,5 h e 1957,1 h (o que gera um intervalo de intersecção de 94,6 h). Comparando as políticas k=1 e k=10 para os demais tamanhos de lote de produção, observa-se que os intervalos de intersecção são superiores a 30 h em 22 das 36 configurações testadas para cada lote de transferência (ou seja, em 61,11% dos casos). De uma forma geral, a análise dos percentis P10 e P90 permite observar que, para os três cenários de incerteza (demanda, tempo de reparo e tempo entre falhas), as políticas k=1 e k=10 existe algum intervalo de intersecção para 100% dos tamanhos de lotes de produção testados. Ou seja, as políticas k=1 e k=10 são equivalentes. Esse mesmo raciocínio é utilizado para comparar as demais políticas testadas à política k=1.

Em relação aos valores obtidos para k=30, observa-se a existência de um intervalo de intersecção com a política k=1, em 97,22% dos tamanhos de lote de produção testados. E este intervalo é maior que 30 h em 61,11% das configurações analisadas. Assim, é possível concluir afirmar que essas políticas foram equivalentes na grande maioria das configurações testadas.

A política k=200 apresenta valores de P10 e P90 deslocados para a direita em relação aos valores P10 e P90 obtidos com a política k=1 para 63,89% dos tamanhos de lotes de produção testados. Isso indica que os *lead times* gerados por k=200 nessas configurações foram superiores aos *lead times* obtidos com k=1, ou seja, não há um intervalo de intersecção entre os *lead times* obtidos com essas políticas. Portanto, elas não são equivalentes. Conforme destaca a Tabela 3.9, foi observado um intervalo de intersecção e, portanto, uma equivalência entre as políticas k=1 e k=200 em 19,44% das configurações testadas. A maioria desses casos foram observados para um cenário de incertezas no tempo entre falhas, onde a alta variabilidade não permite concluir que a política k=1 gere *lead times* inferiores àqueles gerados por k=200.

TABELA 3.9 – Estatística descritiva para as simulações realizadas nos cenários estocásticos.

TL	k	Incerteza na Demanda				Incerteza no Tempo de Reparo				Incerteza no Tempo entre Falhas			
		Mín.	Máx.	P10	P90	Mín.	Máx.	P10	P90	Mín.	Máx.	P10	P90
600	1	1807,00	2030,30	1852,40	1957,10	1864,10	2125,80	1876,55	1962,30	1877,90	4500,60	1909,73	2321,36
	10	1819,20	2014,30	1862,50	1984,10	1872,90	2064,80	1881,15	1967,35	1892,80	3940,70	1917,24	2370,48
	30	1819,30	2042,10	1862,55	1966,60	1872,40	2055,70	1885,00	1973,20	1903,80	3745,40	1928,61	2260,62
	200	1900,30	2091,40	1931,95	2051,65	1942,00	2137,90	1961,85	2042,25	1965,50	2975,90	1997,53	2319,69
	TL	2070,20	2254,90	2100,60	2216,30	2106,50	2322,00	2129,10	2219,80	2124,50	4360,20	2154,21	2538,76
400	1	1246,50	1391,50	1278,35	1359,20	1278,40	1644,30	1290,80	1351,15	1304,50	2870,20	1316,90	1606,69
	10	1228,00	1384,80	1269,20	1360,75	1284,10	1442,20	1290,95	1360,95	1296,50	5359,60	1318,67	1509,58
	30	1258,80	1419,40	1291,00	1373,05	1289,40	1518,00	1305,35	1367,85	1307,80	2002,90	1329,69	1550,09
	200	1326,90	1480,00	1356,55	1427,95	1356,20	1459,10	1370,45	1428,60	1377,70	2691,30	1394,98	1618,98
	TL	1412,00	1561,50	1440,85	1510,50	1446,50	1611,10	1457,20	1525,40	1456,50	5793,20	1478,96	1725,19
170	1	585,50	683,60	615,45	658,95	618,20	708,90	622,80	652,40	384,10	2357,40	635,00	750,80
	10	595,20	675,70	612,85	659,30	623,00	699,40	629,50	664,10	630,90	2709,20	641,40	892,25
	30	597,90	691,50	626,40	669,50	623,10	702,90	637,55	665,70	637,40	1316,10	645,75	750,30
	200	670,00	764,50	699,45	740,80	702,90	790,50	708,35	737,70	707,90	2121,30	717,55	888,00
	TL	671,20	752,30	686,80	728,45	689,60	742,50	695,05	722,55	691,50	4764,60	705,55	824,70
150	1	544,40	613,70	556,50	600,70	561,90	631,10	568,00	597,70	566,00	1032,50	575,45	666,95
	10	548,80	621,20	560,60	596,25	565,40	623,60	571,40	599,05	572,20	1350,30	579,75	704,40
	30	556,70	625,50	568,50	612,60	574,30	622,30	579,70	603,10	580,00	1933,40	588,70	740,55
	200	616,50	699,40	641,40	680,85	641,30	700,30	650,30	674,50	651,20	3615,70	660,60	768,25
	TL	595,10	679,00	620,30	660,30	624,70	691,10	628,05	653,65	634,40	1167,60	640,05	766,35
130	1	487,60	562,70	499,20	538,90	505,10	575,60	509,80	533,25	509,50	773,00	520,70	595,50
	10	491,10	567,80	504,95	540,15	509,20	557,10	513,60	542,45	513,70	3714,10	524,55	649,90
	30	499,90	574,50	512,05	550,85	514,90	581,30	521,10	548,35	523,90	3511,60	532,25	627,75
	200	573,10	633,20	583,80	621,60	588,80	658,90	593,20	618,75	592,90	1245,20	601,95	700,50
	TL	543,30	604,70	554,30	592,85	559,60	603,00	562,40	586,25	562,50	1228,50	572,65	699,80
100	1	403,80	473,70	418,75	451,30	424,10	457,80	427,80	450,70	429,40	975,40	435,05	559,30
	10	412,20	472,70	422,50	455,75	427,10	466,50	431,80	448,20	433,40	1054,30	438,15	546,25
	30	422,00	475,20	431,00	464,75	434,20	469,10	438,15	460,65	436,90	1040,50	447,10	529,55
	200	492,00	554,60	501,85	535,60	505,10	547,00	511,00	530,25	512,70	814,40	517,50	580,95
	TL	449,50	514,00	459,65	494,50	464,40	516,70	469,80	491,15	471,70	2317,30	476,45	584,65
80	1	358,30	408,40	366,35	397,85	372,60	400,50	375,90	391,15	373,20	763,30	380,95	464,50
	10	363,80	419,90	369,60	399,65	374,60	452,00	378,55	401,90	378,70	27537,80	384,95	488,50
	30	368,50	425,40	379,30	405,75	383,00	417,50	388,30	401,45	387,40	671,50	393,55	449,20
	200	448,70	543,70	461,20	529,45	454,90	494,00	459,50	473,55	458,90	1022,60	463,60	517,80
	TL	386,70	440,30	399,70	428,75	405,40	434,10	408,35	426,70	406,90	2603,90	414,80	475,25
70	1	325,90	381,60	339,20	373,55	347,40	374,10	352,05	367,75	351,40	1878,00	357,70	424,30
	10	338,10	386,60	345,95	376,30	351,00	391,60	355,00	368,70	353,40	705,90	359,80	425,35
	30	345,90	403,10	356,95	385,30	361,10	389,80	363,75	377,60	318,30	954,50	368,00	418,80
	200	416,80	469,20	426,60	450,85	430,40	456,60	434,70	450,45	433,60	1999,80	440,55	530,25
	TL	363,50	411,20	373,80	403,85	375,80	423,30	379,90	393,60	378,70	827,80	384,75	465,70
60	1	306,00	360,50	318,10	349,05	326,00	369,20	329,70	341,75	328,80	840,50	333,65	446,70
	10	313,70	369,10	324,10	349,80	329,40	381,00	332,85	347,60	330,90	609,70	336,35	395,35
	30	314,60	377,70	333,85	361,85	338,10	367,50	341,65	355,75	340,50	3145,20	347,15	432,10
	200	395,90	449,50	406,10	433,42	408,70	448,20	411,95	427,30	412,50	1694,00	417,65	490,70
	TL	329,00	384,60	341,85	374,45	351,30	379,60	353,65	366,85	351,10	787,50	359,75	440,85
40	1	281,70	342,50	288,05	320,90	298,60	330,10	302,65	315,15	290,70	18920,20	308,10	363,15
	10	284,90	350,20	296,75	329,25	302,90	330,40	305,35	316,90	304,00	1464,00	309,55	416,75
	30	292,60	349,50	301,60	338,65	311,30	343,00	314,15	326,55	288,00	1948,90	318,70	377,75
	200	356,30	424,30	375,50	407,20	380,90	405,30	384,55	395,50	386,30	750,10	389,45	468,90
	TL	291,80	348,90	304,50	338,90	315,00	345,90	317,70	331,40	296,50	2058,20	323,65	410,20
30	1	288,80	385,80	305,45	347,75	316,60	351,40	319,00	331,45	319,00	2470,00	324,40	383,45
	10	282,10	380,30	308,90	356,00	320,60	349,00	323,60	336,80	318,30	624,10	328,90	381,70
	30	301,60	395,50	315,05	363,55	328,70	356,90	332,50	344,60	320,40	2096,50	337,15	431,85
	200	375,90	451,90	387,65	436,10	398,80	430,70	401,85	416,10	403,70	745,50	409,85	479,80
	TL	301,20	387,40	314,00	356,45	328,80	352,10	331,10	345,45	298,40	684,00	336,35	416,70
16	1	51,90	35572,10	1332,80	5801,40	2105,60	4530,00	2274,35	3103,00	974,00	73604,50	1744,50	6536,40
	10	55,60	95781,70	1295,15	10527,50	2113,20	5208,60	2298,25	3017,85	461,40	27341,20	1980,35	5667,05
	30	63,70	95789,90	1282,70	7326,60	2150,50	13984,50	2275,95	3105,30	973,80	25012,10	1972,15	7469,35
	200	133,20	35653,80	1416,80	6659,65	2125,70	4696,30	2335,75	3186,75	1222,60	46678,50	2125,30	6343,85
	TL	58,00	19915,90	1339,10	7379,35	2215,70	31632,30	2314,40	3098,05	884,70	51272,60	1648,30	4711,90

LEGENDA:

Intervalo de intersecção superior a 30 h

Intervalo de intersecção entre 10 h e 30 h

Intervalo de intersecção inferior a 10 h

Não há intervalo de intersecção

A comparação entre a política $k=TL$ e a política $k=1$ indica, que para 75% dos tamanhos de lotes de produção testados nos cenários de incerteza na demanda e de incerteza no tempo de reparo, os valores dos *lead times* obtidos com a política $k=TL$ são superiores aos obtidos por $k=1$. Exceções são observadas para os tamanhos de lote 30 e 16 peças, onde política $k=TL$ é equivalente à política $k=1$. Para todos os tamanhos de lote de produção testados no cenário de incerteza no tempo entre falhas, não se pode concluir que a política $k=TL$ seja diferente de $k=1$. Novamente, esse comportamento se deve a alta dispersão dos resultados obtidos nesse cenário.

Em relação ao efeito do tamanho do lote de transferência quando a linha de produção opera com valores próximos ao tamanho do lote de produção ótimo em relação ao *lead time* destacam-se dois pontos, a saber: i) o desvio padrão do *lead time* obtido quando a linha operava com os tamanhos de lote de produção iguais a 60, 40 ou 30 peças foi menor do que para todos os demais tamanhos de lote de produção testados. Esse comportamento foi observado para os cenários de incerteza na demanda (onde o desvio padrão variou de 4,4 h a 7,2h) e incerteza no tempo de reparo (desvio padrão foi de 10,66 h a 19,11 h). No entanto, isso não foi observado no cenário de incerteza no tempo entre falhas, que apresentou grandes desvios-padrão para todos os tamanhos de lote de produção testados; ii) para os parâmetros considerados no modelo, a análise dos pontos de máximo e mínimo apresentados na Tabela 3.9 mostram que as políticas $k=1$, $k=10$, $k=30$ e $k=TL$ apresentaram diferenças inferiores a 10% no *lead time*. Ou seja, em termos práticos, para os cenários de incerteza na demanda e incerteza no tempo de reparo, essas quatro políticas de lote de transferência proporcionam desempenhos similares em relação ao *lead time*.

Outro ponto a ser destacado na Tabela 3.9 é o comportamento dos resultados obtidos para o tamanho do lote de produção de 16 peças (menor que o tamanho do lote de produção ótimo em relação ao *lead time*). Para esse tamanho de lote de produção, os valores dos *lead times* obtidos são altos e com grande variabilidade (desvios-padrão altos), o que faz com que não seja possível observar diferenças entre qualquer política de tamanho de lote de transferência testada.

Os resultados apresentados até aqui serão discutidos na próxima seção.

3.5 Discussão dos resultados

Como apresentado no início deste capítulo, existe um consenso na literatura sobre o tamanho do lote de transferência: quanto maior ele for, mais as peças que foram processadas devem esperar para serem transportadas para a próxima estação. Em uma situação na qual o tamanho do lote de transferência é maior que o tamanho do lote de produção, o tempo de espera ou de fila dessas peças será grande, o que contribui para um aumento no *lead time*. Então, de acordo com esse raciocínio, bem difundido na literatura, grandes lotes de transferência geram grandes *lead times*. A questão seguinte a ser respondida é quão pequeno deve ser o lote de transferência para que se consiga uma redução no *lead time*?

A política de tamanho de lote de transferência unitário, bastante discutida pela literatura, principalmente pelo *Lean Manufacturing*, foi testada nas simulações realizadas, sendo que os resultados obtidos levam a seguinte conclusão: a análise determinística e estocástica realizadas não permitem afirmar que a política de lote de transferência unitária ($k=1$) garanta *lead times* menores que as demais políticas. Embora para um cenário determinístico e para os valores médios dos *lead times* obtidos no cenário estocástico, a política $k=1$ proporcionasse menores *lead times*, quando se analisa a dispersão dos resultados, a conclusão é diferente. Para todos os tamanhos de lotes de produção testados, a política $k=1$ se apresentou equivalente à política $k=10$. Ou seja, as políticas $k=1$ e $k=10$ proporcionam desempenhos parecidos em relação ao *lead time*.

Utilizar uma política $k=TL$, para grandes tamanhos de lote de produção trouxe um desempenho ruim em relação ao *lead time* no cenário determinístico. Comportamento que foi comprovado no cenário estocástico, com exceção apenas do cenário onde o tempo entre falhas estava sujeito a incertezas. Já para tamanhos de lote de produção pequenos (e próximos ao lote de produção ótimo em relação ao *lead time*), adotar a política $k=TL$ pode levar a um desempenho equivalente às políticas $k=1$ ou $k=10$.

Esses resultados obtidos com a análise da política $k=TL$ e das demais políticas testadas permitem concluir que se uma empresa opera com um lote de produção ótimo, o lote de transferência não precisa ser necessariamente menor que o lote de produção, como defende o QRM (SURI, 1998, 2010) ou a TOC (GOLDRATT; COX, 2014) e nem mesmo unitária, como defende o *Lean* (MONDEN, 1993). Estando dentro de uma faixa próxima ao tamanho

de lote ótimo, uma empresa pode atuar com o tamanho de lote de transferência igual ao tamanho do lote de produção, ou trabalhar com a política de lote de transferência que lhe for mais viável, em termos financeiros, de manuseio de materiais, controle de informações e demais variáveis. A única exceção é para um tamanho de lote de transferência maior que o lote de produção, o que já é uma política intuitivamente e reconhecidamente ruim para o *lead time* devido ao incremento no tempo de espera das peças do lote de produção.

Dentro desse intervalo ótimo, os *lead times* obtidos com as políticas $k=1$, $k=10$, $k=30$ e $k=TL$ se mostraram similares (com diferenças inferiores a 10 %), além de apresentarem desvios-padrão menores. Ou seja, trabalhar com pequenos lotes de produção e de transferência gerou, para os parâmetros considerados nas simulações, uma menor variabilidade na linha, o que contribui para o controle da produção.

Um importante ponto precisa ser destacado na análise dos gráficos das Figuras 3.11, 3.12 e 3.13 e também da Tabela 3.9. Quando uma linha de produção opera com grandes lotes de produção (muito maiores que o lote de produção ótimo) e passa a adotar uma política de lote de transferência $k=1$ ou $k=10$, haverá uma redução no *lead time* da linha. Ou seja, há uma melhoria no desempenho devido à redução do lote de transferência. No entanto, a análise dos resultados na seção anterior demonstra que essa redução pode não ser justificável.

Para explorar melhor essa situação, suponha que uma empresa opere com um tamanho de lote de produção e lote de transferência iguais a 600 peças e, que seu gerente de produção decida reduzir o tamanho do lote de transferência para $k=1$, mantendo o tamanho do lote de produção. O resultado obtido dessa mudança é uma redução no *lead time*. A Tabela 3.9 apresenta isso, ou seja, a análise dos percentis (P10 e P90) permite concluir que os *lead times* gerados pela política $k=1$ são inferiores àqueles gerados pela política $k=TL$. Este resultado justifica a escolha do gerente dessa empresa em operar com um lote de transferência unitário e manter o tamanho do lote de produção grande, uma vez que houve redução no *lead time*. Isso também está de acordo com o *Lean Manufacturing*, que defende que mesmo quando o tamanho do lote de produção é grande, utilizar um lote de transferência unitário permite reduzir o *lead time* (SHINGO, 1996).

No entanto, o que os demais resultados neste trabalho apontam, e que precisa ser conhecido pelos tomadores de decisão, é que essa redução obtida é muito pequena quando comparada com a redução que pode ser alcançada quando se utiliza um lote de produção ótimo (em relação ao *lead time*) aliado a um lote de transferência pequeno. Ou seja, quando se opera próximo ao ponto de mínimo da curva LT-TL, um melhor desempenho em relação ao *lead time* é obtido e o efeito da redução do lote de transferência na redução do *lead time* é

pequeno. Em um primeiro momento, esse resultado pode indicar certo contraste com a abordagem *Lean*, uma vez que para essa abordagem o melhor desempenho em relação ao *lead time* é obtido com lote de produção e de transferência unitários. No entanto, é preciso lembrar que isso só obtido quando os tempos de *setup* são iguais a zero (SEKINE, 1992). Nas simulações aqui realizadas os tempos de *setup* não são nulos, visando modelar um ambiente real, onde dificilmente é possível anular os tempos de preparação de máquinas. Mas, é importante atentar-se ao fato de que, se os tempos de *setup* forem nulos, o lote de produção ótimo (ponto de mínimo da curva de Karkamar et al. (1985)) seria provavelmente unitário. O que, em última análise, levaria a mesma conclusão que defende o *Lean Manufacturing*.

Além disso, os resultados também mostraram que quando sujeito a incertezas na demanda, no tempo de reparo ou no tempo entre falhas, o uso de lotes de produção grandes (muito maiores que o ótimo) e também muito pequenos (muito inferiores ao lote ótimo) geram maior variabilidade no *lead time* do que o uso de lotes de produção próximo ao valor ótimo. Então, nos cenários simulados pode-se perceber que adotar um lote de produção ótimo permite que o sistema de produção seja mais estável, além de permitir *lead times* menores.

Portanto, conhecer a curva LT-TL de determinada linha de produção e operar com o tamanho do lote de produção próximo do ótimo (ponto de mínimo dessa curva) contribui para bons desempenhos em relação ao *lead time*. Aliar essa redução à redução do tamanho do lote de transferência, gera uma redução no *lead time* um pouco maior, aproximadamente de 10% para os parâmetros aqui simulados. Este resultado está de acordo com a abordagem QRM, uma vez que Suri (2010) destaca que antes de atuar na redução do tamanho do lote de transferência (que deve ser menor que o lote de produção, mas não necessariamente unitário) deve-se, primeiramente, reduzir o tamanho do lote de produção. Porém, Suri (2010) apresenta uma análise apenas qualitativa para essa questão e, o passo dado neste trabalho foi o de analisar quantitativamente, por meio das equações propostas pelo *Factory Physics* (HOPP; SPEARMAN, 2008) como a escolha do tamanho do lote de produção e do lote de transferência afetam o *lead time*.

Por fim, a resposta à questão feita no primeiro parágrafo dessa seção pode ser a seguinte: para se obter um bom desempenho em relação ao *lead time*, o lote de transferência pode ser igual ou menor que o lote de produção, desde que este esteja próximo ao ponto de mínimo da curva LT-TL. Caso uma empresa não conheça ou não possa operar com o lote de produção ótimo em relação ao *lead time*, s. Isso representa um alerta importante para empresas, pois o grau de conhecimento sobre o tamanho do lote de produção ótimo (em

relação ao *lead time*) é baixo na prática. O que pode indicar que os benefícios oriundos da redução do tamanho do lote de transferência, na prática, podem estar sendo bastante prejudicados.

3.6 Conclusão

Este capítulo teve como objetivo explorar o efeito da redução do tamanho do lote de transferência no *lead time* de uma forma quantitativa, visando gerar recomendações que possam colaborar para a gerência da produção. Para esse fim, foi utilizada uma abordagem quantitativa que utilizou a modelagem e a simulação. Foram considerados no modelo proposto, as variáveis conhecidas por impactar no *lead time*, a saber: i) tempo médio de *setup*; ii) taxa média de defeitos; iii) tempo médio entre falhas; iv) tempo médio de reparo da máquina; v) variabilidade do tempo de processamento; vi) variabilidade do tempo entre as chegadas de ordens e vii) lote de transferência. A questão do efeito do lote de transferência no *lead time* foi explorada de forma determinística e também estocástica, considerando três diferentes cenários, a saber: i) incerteza na demanda (modelada com uma distribuição de Poisson); ii) incerteza no tempo de reparo (modelada com uma distribuição LogNormal) e iii) incerteza no tempo entre falhas (modelada com uma distribuição de Weibull).

Os resultados apresentados e discutidos anteriormente permitem que sejam destacados os seguintes pontos:

- Para se reduzir o *lead time* de um sistema *flow shop* deve-se primeiramente conhecer a curva LT-TL e operar com um lote de produção próximo ao ponto mínimo dessa curva (ponto ótimo). A partir disso, é possível obter menores *lead times* e um sistema produtivo mais estável (com menor variabilidade). Após atingido esse patamar, a política de lote de transferência pode colaborar para se obter um melhor desempenho.
- Uma vez operando com o lote de produção ótimo, é possível escolher qual a política de lote de transferência aplicar de acordo com as demais particularidades da empresa (recursos financeiros, manuseio de materiais, fluxo e controle de informações). A única restrição a ser atendida aqui é que o tamanho do lote de transferência não deve ser superior ao tamanho do lote de

produção. As demais políticas analisadas neste trabalho, com lotes de transferência igual ou inferior ao lote de produção, são equivalentes;

- A política $k=TL$ é uma decisão ruim quando se trabalha fora da faixa do lote de produção ótimo. Este resultado está parcialmente de acordo com o que defende a TOC, quando afirma que o lote de transferência pode não ser e, muitas vezes, não deve ser igual ao lote de processamento. No entanto, se o lote de produção for próximo ao ótimo (ponto de mínimo da curva $LT-TL$), os resultados aqui apresentados permitem concluir que essa política pode ser trazer um bom desempenho em relação ao *lead time*, uma vez que os esforços empreendidos para reduzir tamanho do lote de transferência além desse ponto podem não justificar a melhoria que será obtida no *lead time*;
- A política de lote de transferência unitário ($k=1$) proporcionou um menor *lead time* para todos os tamanhos de lotes de produção testados apenas em um cenário determinístico. Este resultado está de acordo com o que defende o *Lean Manufacturing* e também os resultados obtidos por Arbós et al. (2015). Para os cenários estocásticos, a política $k=1$ se mostrou equivalente à política $k=10$, para todas as incertezas analisadas.
- A menor variabilidade encontrada para os *lead times* obtidos se limita aos cenários em que a demanda ou o tempo de reparo foram considerados estocásticos e seguiam a uma distribuição de Poisson e LogNormal, respectivamente. Esse comportamento não foi observado quando o tempo dentre falhas de todas as máquinas seguia uma distribuição de Weibull com parâmetro de forma 1,5 (que modela uma taxa crescente de falhas nas máquinas). Nesse cenário, onde todas as máquinas da linha têm taxas crescentes de falhas, os *lead times* obtidos apresentaram grandes desvios-padrão. Tal comportamento ressalta a necessidade de programas de acompanhamento da manutenção das máquinas (manutenção preditiva e manutenção preventiva), pois aponta que a variabilidade causada por falhas frequentes (pequenos tempos entre falhas) geram altos *lead times* e alta variabilidade, o que por si só constitui um fator que dificulta o controle da produção.

Por fim, pode-se concluir que o presente trabalho cumpre com o objetivo inicial proposto. Porém, com algumas limitações, que poderão ser exploradas em pesquisas futuras. Primeiramente, é necessário destacar que os resultados obtidos e as conclusões acima destacadas são válidos para os cenários testados, não sendo possível a sua generalização para cenários cujos parâmetros sejam de outra ordem de grandeza.

Devido ao fato de ser um trabalho exploratório e inicial no tema, a variabilidade foi modelada de uma forma isolada, em poucas variáveis. Sabe-se que em um cenário real, um sistema produtivo está sujeito a variabilidade na demanda ao mesmo tempo em que está sujeito às variabilidades no tempo de reparo, no tempo entre falhas, no tempo de processamento, de *setup*, etc. Esta lista se estende devido à imensa complexidade que um sistema produtivo representa. Porém, o recorte feito neste trabalho pode ser explorado em trabalhos futuros que contemplem a variabilidade, de forma conjunta, em mais variáveis do modelo.

Outro ponto que tem potencial para ser explorado em trabalhos futuros são os parâmetros utilizados para modelar as distribuições de probabilidade. A própria escolha das distribuições de probabilidade constitui também um ponto a ser explorado futuramente.

Também foi analisado o efeito do tamanho do lote de transferência no *lead time* em um ambiente *flow shop*. Embora o tamanho da linha de produção tenha sido explorado (foram feitas simulações para ambientes *flow shop* de 3 a 10 máquinas), outros cenários como *job shop* ou um ambiente de manufatura celular pode vir a ser estudado.

Por fim, destaca-se o fato de que o ambiente aqui estudado consistiu em um *flow shop* balanceado, ou seja, onde todas as máquinas são idênticas. Este cenário pode não ser a realidade de muitas empresas, o que justifica a necessidade de se explorar as questões aqui analisadas quando o ambiente não for balanceado, ou seja, quando houver um gargalo preponderante. Esta análise será realizada no próximo capítulo desta tese.

Capítulo 4

O EFEITO DO LOTE DE TRANSFERÊNCIA NA REDUÇÃO DO *LEAD TIME* EM UM *FLOW SHOP* NÃO BALANCEADO

4.1 Introdução

O fato de que pequenos *lead times* podem ser fonte de competitividade é bem conhecido na literatura (DE TREVILLE et al. 2014). Apesar da idéia de se reduzir o *lead time* ser anterior à década de 1990, os inúmeros trabalhos que abordam a Competição Baseada no Tempo (termo proposto por Stalk e Hout, 1990) têm mostrado que a busca pela redução do *lead time* se tornou evidente para empresas de diversos setores industriais. De acordo com Thüerer et al. (2013), um *lead time* pequeno, previsível e confiável é um critério importante na seleção de fornecedores. E, ainda, conforme destacam Hopp e Spearman (2008), o *lead time* é uma medida de desempenho que dá suporte tanto aos baixos custos de manufatura quando aos altos níveis de venda.

No entanto, tornar o tempo de atravessamento das peças em um sistema de produção menor (i.e. reduzir o *lead time*) se torna uma tarefa mais árdua quando existem gargalos nesse ambiente. De acordo com Schultheiss e Kreutzfeldt (2009), os gargalos são a causa para as filas em frente às estações de trabalho. E essas filas, são a razão para o aumento do *lead time*, o que pode causar problemas com o atendimento de datas prometidas. Ainda de acordo com esses autores, os gargalos são geralmente o ponto inicial para iniciativas de melhoria. Argumento que tem um grande embasamento na Teoria das Restrições ou TOC (*Theory of Constraints*), em que a gestão do gargalo é central para um bom desempenho do chão-de-fábrica.

De acordo com Cox e Scheleier (2010), o segredo para uma gestão efetiva do chão-de-fábrica é a identificação dos gargalos-chave e o controle da produção, de forma que os gargalos nunca fiquem ociosos. A questão da gestão dos gargalos é vista sob outra forma

pela abordagem *Lean Manufacturing*. De acordo com Cook (1994), a *Lean Manufacturing* destaca a importância de uma planta balanceada, onde os recursos tenham a mesma capacidade de produção em relação às necessidades da planta. Nas palavras de Gundogar, Yilmaz e Erkayman (2014), os gargalos devem ser evitados para um desempenho eficiente do *Lean Manufacturing*.

De acordo com Iwase e Ohno (2011), um nível muito baixo de estoques é utilizado no *Lean Manufacturing*, porém isso é feito com uma produtividade e nível de qualidade muito alto. Essa alta produtividade atingida com a abordagem *Lean* é obtida por meio de seus princípios e técnicas. E um princípio básico, e há muito tempo difundido, é que grandes lotes de produção são contraproduativos em mais de uma forma, conforme destaca Trietsch (1989). De acordo com Kulkarni, Kshire e Chandratre (2014), a redução do tamanho do lote de produção aliada à redução do *setup*, proposta pelo *Lean*, é crítica para o fluxo contínuo na manufatura e melhorias da flexibilidade do sistema produtivo. Ainda segundo o autor, lotes de produção grandes causam *WIP* excessivo, *lead time* excessivo, reduzem a flexibilidade e comprometem a qualidade.

Apesar de, assim como a abordagem *Lean Manufacturing*, a TOC proporcionar diretrizes e técnicas para tornar os sistemas de produção mais efetivos, há uma divergência sobre a questão do tamanho do lote de produção especialmente no recurso gargalo. Goldratt (1990) sugere regras diferentes de produtividade para um recurso gargalo e para outro não gargalo. E uma delas é a utilização de grandes lotes de produção no recurso gargalo.

No entanto, como destacam Koo, Bulfin e Koh (2007), o tamanho do lote de produção afeta a capacidade da fábrica. Para que o gargalo produza mais produtos, o tamanho do lote de produção deve ser grande. No entanto, os autores afirmam que um tamanho de lote de produção grande pode aumentar o *lead time* de produção. Esse é justamente um dos pontos a serem explorados neste capítulo. Vários trabalhos se dedicaram a explorar a relação entre o tamanho de lote de produção e o *lead time*, sendo Karmarkar et al. (1985) um dos pioneiros. Também contribuíram para o esta temática: Lambrecht e Vandaele (1996), Hopp e Spearman (2001), Godinho Filho e Uzsoy (2009, 2010 e 2011).

A discussão sobre o tamanho do lote de produção, tanto em um recurso gargalo, quanto em um recurso não gargalo pode contemplar ainda a questão do tamanho do lote de transferência. No capítulo anterior, foi explorado o efeito do tamanho do lote de transferência no *lead time* em uma linha balanceada, cujas máquinas operavam com a mesma utilização. Os resultados apontaram uma importância secundária do tamanho do lote de transferência para a redução do *lead time*. A questão que imediatamente surge é se esses

efeitos observados no capítulo anterior se apresentam em uma linha desbalanceada, onde uma das máquinas tem uma utilização maior que as demais.

Dessa forma, a questão a ser investigada neste capítulo é a seguinte: qual o efeito no *lead time* do tamanho do lote de transferência em um ambiente *flow shop* desbalanceado? Até o momento não há trabalhos na literatura que investiguem essa questão. O presente capítulo utilizou o modelo de simulação apresentado no Capítulo 3, agora adaptado para representar uma linha desbalanceada, com a presença de um gargalo. Este capítulo também visa investigar, especificamente, a seguinte questão: operar com grandes lotes de produção apenas no recurso gargalo e pequenos lotes de transferência ao longo da linha, conforme defende a TOC, é uma política que contribui para o *lead time*? Para responder a essas questões, serão analisados cinco cenários, a saber: i) cenário 1: pequenos lotes de transferência em toda a linha de produção; ii) cenário 2: pequenos lotes de produção na máquina gargalo; iii) cenário 3: pequenos lotes de produção em duas máquinas da linha; iv) cenário 4: redução do tempo de *setup* na máquina gargalo e v) cenário 5: teste da configuração proposta pela TOC (grandes lotes de produção no gargalo e pequenos lotes de transferência em toda a linha).

4.2 A literatura sobre o tema

A ocorrência de gargalos nos sistemas de manufatura é um fenômeno discutido há muito tempo na literatura, de acordo com Schultheiss e Kreutzfeldt (2009). Esses autores ainda destacam que a definição do termo gargalo foi feita por Gutenberg (1951): um gargalo é um recurso de determinado negócio que só pode ser utilizado até um determinado limiar. Assim, para Gutenberg, citado por Schultheiss e Kreutzfeldt (2009, pág. 2), o recurso com o menor limite representa o gargalo do sistema de produção. De acordo com a TOC, um gargalo é um recurso crítico que determina a taxa de saída de peças do sistema produtivo (termo mais conhecido na literatura como *throughput*) e que, portanto, determina a habilidade de uma empresa em obter lucro (GOLDRATT; COX, 2014; DENISA, 2012; COX; SCHLEIER, 2010; BHARDWAJ, GUPTA; KANDA, 2010; CHAKRAVORTY; ATWATER, 2006). Betterton e Silver (2011) destacam que há diversas definições para o termo gargalo na literatura. Também são diversos os trabalhos que visam apresentar métodos para detectar o

gargalo de um sistema produtivo. O leitor interessado nessa questão pode encontrar mais informações por meio dos trabalhos de Muthiah e Huang (2007), Li (2009), Meerkov e Zhang (2010), Betterton e Silver (2011).

Goldratt e Cox (2014) propõem a TOC, que é uma abordagem orientada pelo gargalo, para a melhoria contínua de sistemas produtivos. As nove regras globais da TOC visam direcionar gerentes de produção a como lidar com os gargalos. Como o gargalo restringe o *throughput*, a TOC sugere que para melhorar essa medida de desempenho, eles sejam programados para operarem com 100% de utilização. O processo de cinco etapas desenvolvidas para ajudar os gestores a implementarem os princípios da TOC exige a subordinação de todas as decisões operacionais para garantir que o gargalo seja utilizado 100% (GOLDRATT, 1990). Segundo Chakravorty e Atwater (2006), este raciocínio tem certo apelo, porém, é preciso considerar que quando o sistema está com um nível de utilização muito alto (quando a taxa de chegadas de ordens de produção é igual ou maior que o tempo de processamento), o estoque em processo (WIP) e o *lead time* vão aumentar continuamente. Isso ocorre pois *lead time*, WIP e *throughput* estão relacionadas por meio da lei de Little (LITTLE, 1961). Por outro lado, Hopp e Spearman (2008) destacam que a tentativa de reduzir o WIP, visando a redução do *lead time* sem a redução da variabilidade do sistema produtivo, resulta em uma redução do *throughput*. Essa discussão ressalta a importância de contemplar a variabilidade ao se analisar medidas para melhorar o desempenho de sistemas produtivos. No presente trabalho, o *lead time* é expresso por meio das equações vindas da Teoria de Filas e apresentadas por Hopp e Spearman (2001), que contemplam a variabilidade de chegadas de peças e de processamento de um recurso.

O trabalho de Atwater e Chakravorty (2002) mostra que quando a utilização de um recurso gargalo se aproxima de 100% por um longo período de tempo, o desempenho do sistema se deteriora. Esse comportamento do sistema é previsto pela curva de operações logística que demonstra um aumento abrupto no *lead time* do sistema produtivo quando sua utilização se aproxima de 100% (HOPP; SPEARMAN, 2008; GODINHO FILHO; UZSOY, 2012)). Essa curva está apresentada na seção 2.4 desta tese (Figura 2.9). E conforme Chakravorty e Atwater (2006) destacam, o reconhecimento de que o sistema produtivo deve permitir certa sobra de capacidade não é novo. Esses autores citam que, de acordo com Monden (1984), 10% de capacidade extra é necessário nas linhas de produção para acomodar as variações das operações produtivas. E, de acordo com Krajweski et al. (1987), os gerentes japoneses permitem uma capacidade extra em suas operações que varia de 12% a 18%.

A discussão acerca do nível de utilização em um recurso produtivo (gargalo ou não gargalo) se relaciona diretamente com a questão do tamanho do lote de produção nesse recurso. Dimensionar o tamanho do lote de produção tem sido objeto de estudo há décadas e, de acordo com Hilmola (2004), a importância dessa questão, que despontou no início do século XX, aparentemente não diminuirá em um futuro próximo. Inicialmente, este problema era abordado sob a perspectiva dos custos, por meio da fórmula do lote econômico de produção (SIPPER; BULFIN, 1997; VOLLMAN; BERRY e WHYBARK, 1997). No entanto, de acordo com Burbidge (1978, 1996), considerar apenas os parâmetros de custo do lote econômico é irrelevante. A literatura sobre o tema é vasta e teve a contribuição de Karmarkar et al. (1985), que apresenta a relação entre o tamanho do lote de produção e o *lead time*. Hoje, sabe-se que existe um tamanho de lote de produção que minimiza o *lead time*. Diversos trabalhos exploraram essa relação apresentada por Karmarkar et al. (1985), dentre eles: Gardiner e Blackstone (1993), Lambrecht e Vandaele (1996) e Godinho Filho e Uzsoy (2010).

Particularmente, quando se trata de um ambiente produtivo com a presença de um gargalo, a discussão sobre o tamanho do lote de produção é discutida pelas grandes abordagens de gestão da manufatura, como *Lean Manufacturing* e TOC. De acordo com Lawrence (1994), houve um aumento de pesquisas sobre gestão do gargalo (termo conhecido na literatura internacional como *bottleneck management*) após a intensiva divulgação da TOC. Divulgação feita por meio dos trabalhos de Goldratt e Cox (2014); Goldratt e Fox (1986), Goldratt (1990, 1994, 2002, 2008); Goldratt et al. (2000, 2009), e Cox e Scheleier (2010). Há, ainda, vários trabalhos na literatura que visam discutir e comparar o desempenho das abordagens *Lean Manufacturing* e TOC, do ponto de vista da gestão dos recursos gargalos (*bottleneck management*). Mais informações sobre trabalhos que abordam especificamente essa comparação podem ser encontradas, por exemplo, nos seguintes trabalhos: Wu (1989), Matsuura, Kurosu e Lehtimäki (1995), Buckchin (1998), Pegels e Watrous (2005), Chakravorty e Atwater (2006), Schultheisse e Kreutzfeldt (2009), Kim, Cox e Mabin (2010) e Matsuura; Millstein e Martinich (2014).

A *Lean Manufacturing* defende, de uma maneira geral, a redução de desperdícios, visando um ambiente de produção balanceado (onde não há gargalos), com baixos tempos de *setup* e baixa variabilidade. Essas características permitem que uma linha de produção opere com pequenos lotes de produção e com pequenos lotes de transferência. E várias técnicas são apresentadas pela *Lean Manufacturing* para viabilizar esse cenário (MONDEN, 1993; SHINGO, 1996). Uma técnica que está diretamente ligada à redução do

tamanho do lote de processamento de um ambiente produtivo é o SMED (*Single Minute Exchange of Die*). Partindo do entendimento de que os tempos de *setup* não são fixos e que podem ser reduzidos, a *Lean Manufacturing* proporciona uma forma de reduzir consideravelmente os tempos de *setup*, por meio do SMED (SHINGO, 1986).

Dentro do contexto da TOC, as palavras de Goldratt (1990, pág. 53) sobre a questão dos tamanhos de lote em uma linha desbalanceada são as seguintes:

Devemos nos esforçar para maximizar o tamanho do lote de processamento nos gargalos enquanto utilizamos, ao mesmo tempo, pequenos lotes de transferência em todo lugar – incluindo o gargalo (pequenos lotes de transferência não tem qualquer impacto no *setup*).

Esse argumento de Goldratt (1990) está baseado no fato de que lotes de processamento grandes no gargalo economizam *setups* e que lotes pequenos de transferência em toda a linha permitem menores custos de se manter o estoque em processo. Ainda de acordo com Goldratt (1990), se a máquina não for o gargalo, o impacto nas despesas operacionais de se fazer mais *setups* é zero. É importante lembrar que o que direciona as sugestões da TOC é a meta de se aumentar o lucro por peças vendidas (“fazer mais dinheiro”). O tempo de atravessamento das peças (*lead time*) é considerado indiretamente, quando se opta por reduzir o tamanho do lote de transferência, mas a redução do *lead time* não é o foco proposto inicialmente por Goldratt e Cox (2014).

Ainda em relação à teoria do Dr. Goldratt, as operações são programadas (pelo DBR, o sistema de coordenação de ordens da TOC) de forma que o gargalo opere com grandes lotes de produção e, em seguida, esse material flua rapidamente para o fim do processo (lotes de transferência menores que o lote de produção). Para Vollman, Berry e Whybark (1997), é possível dizer que a idéia do DBR é mover os materiais tão rápido quanto possível de um recurso não gargalo para um recurso gargalo.

Assim, a partir do que foi apresentado até aqui, fica clara a importância de se investigar, de forma quantitativa, o efeito do tamanho do lote de produção e do lote de transferência em ambientes desbalanceados, considerando com medida de desempenho o *lead time*. Além das grandes abordagens destacadas nesta seção, há vários trabalhos na literatura que tangenciam o assunto. Para explorar esses trabalhos, foi realizada uma busca, entre os meses de julho e setembro de 2016, nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science* utilizando as seguintes palavras-chave: *batch/lot size*, *transfer batch/lot size*, *lead time* e *bottleneck*. Apenas artigos publicados em periódicos e no idioma inglês foram considerados.

Vários artigos encontrados consideram de alguma forma o tamanho do lote de produção e de transferência, e também a presença de um gargalo no sistema produtivo, são eles: Pinto e Rao (1992); Kadipasaoglu, Xiang e Khumawala (1999); Hoeck (2008); Kasemset e Kachitvichyanukul (2012); Glock e Jaber (2013). Outros trabalhos abordam essa questão do tamanho do lote de produção e de transferência, considerando o *lead time* como medida de desempenho, mas não contemplam o desbalanceamento do sistema de manufatura, como: Steele e Malhotra (1997) e Defersha e Chen (2011).

Uma vasta literatura aborda a questão da redução do lote de transferência (*lot splitting*) sob o ponto de vista da otimização. Especificamente, alguns artigos se propuseram a analisar problemas de otimização do tamanho do lote de produção, contemplando o *lead time* como medida de desempenho e considerando também a presença de recursos gargalo no sistema produtivo, tais como: Clark e Armentano (1995); Lambrecht, Ivens e Vandaele (1998); Ruben e Mahmoodi (1998); Armentano, Berreta e Franca (2001); Berreta, Franca e Armentano (2005); Rizk, Martel e D'Amours (2008); Helber e Sahling (2010); Wazed, Ahmed e Nukman (2010, 2010); Baldo et al. (2014) e Zhao e Jingshan (2014). Porém, apesar da contribuição desses trabalhos para a literatura, a questão da otimização não é considerada o foco desse capítulo.

De uma forma geral, cinco trabalhos se destacam por se aproximarem um pouco mais da questão explorada neste capítulo e são apresentados a seguir.

Millstein e Martinich (2014) desenvolvem um método chamado *Takt Time Grouping* (TTG) para implementar uma manufatura *kanban-flow*, quando o *one-piece-flow* ou o DBR não resultam em bons resultados. Os autores utilizam um modelo de simulação discreta, que combina a manufatura *one-piece flow*, o tamanho do lote de transferência e conceitos do DBR. Os autores concluem que o método proposto proporcionou menores *lead times* e WIP do que as técnicas DBR e CONWIP (*Constant Work in Process*).

Hilmola (2004) examinam o efeito do lote de transferência no desempenho financeiro em um processo produtivo desbalanceado. Os autores destacam que organizações de manufatura que utilizam a redução do lote de transferência parecem estar aptas a atender pedidos versáteis de uma maneira lucrativa.

Van Nieuwenhuyse e Vandaele (2004) apresentam uma discussão sobre o impacto da política de dimensionamento do tamanho do lote de transferência no *lead time*. Os autores utilizam um modelo de minimização dos custos totais, em um ambiente *flow shop* determinístico.

Ruben e Mahmoodi (1998) investigam o impacto da redução do tamanho do lote de transferência (*lot splitting*) em sistemas de produção não balanceados. Foram testadas diversas políticas de *scheduling* e os autores concluem que as políticas que tendem a aumentar a média do lote de produção (como políticas orientadas pela data de entrega) reduzem o efeito da redução no *lead time* obtida por meio do *lot splitting*.

Wagner e Ragatz (1994) investigam se a redução do *lead time* que ocorre por meio da redução do tamanho do lote de transferência resulta também em uma melhoria no desempenho das datas prometidas. Um modelo de simulação que representa um *job shop* com 5 máquinas é utilizado. Das conclusões do trabalho, destacam-se os benefícios da redução do lote de transferência, que demonstram ser essencialmente independentes do tempo de *setup*, considerando a utilização constante. A redução do lote de transferência permitiu a redução de até 39% no atraso médio das ordens.

Nota-se que alguns desses trabalhos apresentados fazem uso da simulação. Millstein e Martinich (2014), por exemplo, utilizam a simulação discreta para avaliar o efeito do tamanho do lote de transferência no *lead time*, porém, embora considerem a presença de gargalos, não consideram algumas variáveis do chão-de-fábrica, como: taxa de defeitos, tempo de reparo ou tempo médio entre falhas. Godinho Filho, Bacheга e Uzsoy (2010) e Godinho Filho e Utiyama (2014) já consideram estas variáveis. Nesses trabalhos, o inter-relacionamento entre seis variáveis do chão-de-fábrica é feito por meio das equações do *Factory Physics*, em um modelo de simulação dinâmica (tendo como base o modelo de Godinho Filho e Uzsoy (2009)). Porém, esses trabalhos não contemplam o lote de transferência.

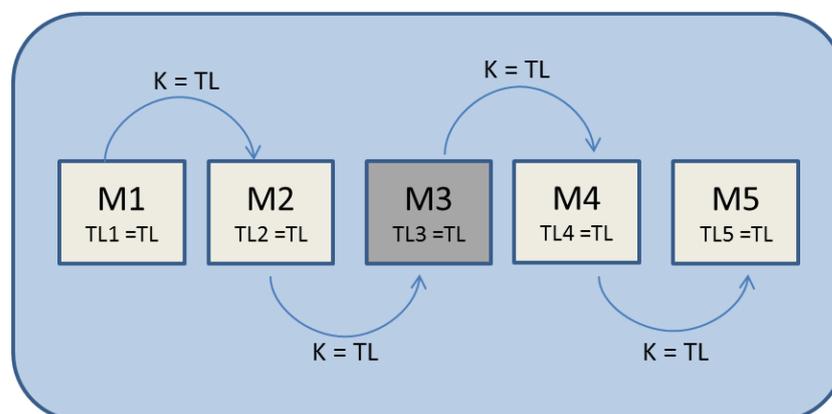
Assim, o presente capítulo visa dar continuidade aos trabalhos que utilizam o modelo Godinho Filho e Uzsoy (2009) como base e explorar o *gap* aqui encontrado. Dessa forma, as próximas seções deste capítulo se dedicam a responder à questão principal desse trabalho, ou seja: qual o efeito no *lead time* do tamanho do lote de transferência em um ambiente *flow shop* desbalanceado? E ainda, responder a seguinte questão específica: operar com grandes lotes de produção apenas no recurso gargalo e pequenos lotes de transferência ao longo da linha, conforme defende a TOC, é uma política que contribui para o *lead time*?

4.3 Metodologia da pesquisa realizada neste capítulo

Com o intuito de atender aos objetivos de pesquisa propostos para este capítulo, foram feitas simulações, no *software* Maple 13, utilizando o mesmo modelo apresentado na seção 3.3. Para que esse modelo representasse uma linha de produção desbalanceada, o nível de utilização das máquinas foi ajustado por meio da alteração do tempo de processamento dessa máquina, sendo a máquina gargalo, o recurso com o maior tempo de processamento. É importante lembrar que neste trabalho, a utilização é modelada por meio da equação 3.9.

Para avaliar o efeito das diferentes políticas adotadas nas simulações, foi considerado como cenário inicial, um *flow shop* com cinco máquinas, com diferentes níveis de utilização, onde todas as máquinas obedecem à seguinte política: o tamanho do lote de transferência (k) é sempre igual ao tamanho do lote de produção (TL). Isto é, todas as máquinas da linha produzem uma determinada quantidade de peças (TL) entre a realização de um *setup* e outro. Somente após o término do processamento das TL peças, esse mesmo conjunto de peças é transportado, ao mesmo tempo, para a próxima máquina. Esse cenário, aqui denominado de “cenário inicial” está representado na Figura 4.1 a seguir. Na prática, este cenário representa uma situação onde não foram aplicados programas de melhoria no intuito de reduzir o tempo de fila do sistema produtivo (e, portanto o *lead time*), por meio da redução do lote de transferência. Nessa situação, o que se observa é que as peças do lote de processamento tenham que esperar a finalização do mesmo para seguirem juntas para a próxima máquina. Desse raciocínio surge a política denominada de $k=TL$.

FIGURA 4.1 - Mecanismo de funcionamento no cenário inicial.
Destaque para o recurso gargalo (máquina 3).



Para se reduzir o *lead time* nesse cenário inicial descrito, uma opção seria a redução do tamanho do lote de produção em toda a linha. Conforme já conhecido pela literatura (KARMARKAR et al. 1985; HOPP; SPEARMAN, 2008; SURI, 2010; GODINHO FILHO, UZSOY, 2009, 2010, 2011, 2012) e discutido no Capítulo 3, para uma linha balanceada, a redução do tamanho do lote de produção (até o ponto ótimo da curva $TL \times LT$) proporcionou reduções significativas no *lead time*. Assim, o que as simulações apresentadas visam, primeiramente, é quantificar esse efeito para uma linha desbalanceada. No entanto, reduzir o tamanho do lote de produção e de transferência em toda a linha pode não ser uma alternativa viável para determinados ambientes, devido a restrições técnicas/operacionais, a altos tempos de *setup* ou a inviabilidade financeira requerida por grandes modificações, em alguns casos.

Para essas situações, é importante que os gerentes de produção conheçam alternativas que, não representam o cenário ótimo ou ideal, mas que permitam uma melhoria no *lead time*. Considerando esse contexto, os cenários testados visam analisar algumas alternativas que atendam a esse objetivo. Por essa razão, a questão do *one-piece-flow* (SHINGO, 1986; MONDEN, 1993) não foi considerada nas simulações, pois a mesma representa uma situação ideal, nem sempre atingível.

A seguir são apresentados os cenários utilizados neste capítulo:

❖ **Cenário 1: reduzindo o lote de transferência em toda a linha de produção**

Esse cenário visa representar uma linha de produção onde algum esforço é realizado para a redução do *lead time*, por meio da redução do lote de transferência. Então, as simulações neste cenário consideram situações onde uma linha de produção desbalanceada opera com um determinado tamanho de lote de produção (TL), porém, utiliza um tamanho de lote de transferência (k) menor do tamanho do lote de produção (TL). Conforme discutido no Capítulo 3, é esperado que um tamanho de lote de transferência menor que o tamanho do lote de produção proporcione uma redução no *lead time*. Assim, o intuito desse cenário é quantificar essa melhoria e entender o seu comportamento para tamanhos de lotes de produção grandes, médios e pequenos, considerando o desbalanceamento da linha.

❖ **Cenário 2: reduzindo o lote de produção na máquina gargalo**

Aqui além da melhoria realizada no cenário anterior, ainda se aplica a redução do tamanho do lote de produção (TL) no gargalo. Esse cenário representa uma

situação prática onde o lote de transferência de um *flow shop* já foi reduzido, mas a redução do tamanho do lote de produção de todas as máquinas não é possível. Assim, investiga-se aqui se a redução do tamanho do lote de produção apenas na máquina gargalo pode trazer um benefício considerável ao desempenho da linha. Nas simulações realizadas nesse cenário, o tamanho do lote de produção no gargalo está sempre atrelado ao tamanho do lote de transferência da linha. Assim, se a linha toda já opera com um lote de transferência de 100 peças, por exemplo, o lote de produção no gargalo será também de 100 peças.

❖ **Cenário 3: reduzindo o lote de produção em duas máquinas da linha**

Pretende investigar a situação onde existe a possibilidade de reduzir o tamanho do lote de produção em mais de uma máquina. Assim, as simulações visam analisar se há um ganho considerável no desempenho ao se adicionar esta melhoria (i.e. a redução do tamanho do lote de produção em mais uma máquina). Investiga-se também se há diferença entre realizar esta melhoria antes ou depois da máquina gargalo. Caso haja diferença, qual traz mais benefícios ao *lead time*? Se o esforço para realizar a melhoria for o mesmo, é coerente aplicá-lo à configuração que trará maiores benefícios ao *lead time*.

❖ **Cenário 4: redução do tempo de *setup* na máquina gargalo**

Seguindo o mesmo raciocínio no cenário anterior, aqui pretende utilizar as mesmas melhorias já realizadas no cenário 2, acrescida de uma redução no tempo de *setup* da máquina gargalo. De uma forma geral, a redução do tamanho do lote de produção associada à redução do tempo de *setup* em uma máquina permite ganhos de desempenho na linha (SHINGO, 1986; SEKINE, 1992; MONDEN, 1993; LIKER, 2005). Mas, o que se pretende analisar, especificamente, é se a redução do *setup* aliada à redução do tamanho do lote de produção apenas na máquina gargalo proporciona ganhos expressivos em relação ao *lead time*.

❖ **Cenário 5: testando a configuração proposta pela TOC**

O objetivo desse cenário é verificar o efeito no *lead time* da configuração proposta por Goldratt (1990, pág. 53), ou seja, operar com grandes lotes de produção no gargalo e com pequenos lotes de transferência em toda a linha.

Diferentemente dos cenários anteriores, aqui o tamanho do lote de produção no gargalo não está atrelado ao tamanho do lote de transferência da linha. As simulações consideram sempre um lote de transferência pequeno para a linha (30

peças) e diferentes tamanhos de lote de produção no gargalo. Ainda são analisados os efeitos da redução do tempo de *setup* (no gargalo) nessa configuração.

Os resultados obtidos com as simulações nesses cenários são apresentados a seguir.

4.4 Resultados e discussões

Os tempos médios de processamento (TPVet) atribuídos à cada máquina da linha de produção simulada estão apresentados na Tabela 4.1 a seguir. Nela, também estão apresentados os valores da utilização de cada máquina (U), medidos nas simulações. Como a utilização varia de acordo com o tamanho do lote de produção e com o tempo de processamento da máquina, a Tabela 4.1 apresenta um intervalo de variação verificado para cada máquina.

TABELA 4.1 - Valores adotados para os tempos médios de processamento de cada máquina (TPVet) e intervalo de utilização (U) medidos em cada recurso.

Máquina	TPVet (h)	U
1	0,091	62,0% - 77,8%
2	0,092	62,7% - 78,5%
3	0,121	81,5% - 98,0%
4	0,1	68,0% - 83,9%
5	0,09	61,3% - 77,2%

Observa-se que os valores obtidos para a utilização dos recursos variou entre 61,3% e 98%. A máquina 3 representa o recurso gargalo, máquina que teve a utilização variando de 81,5% a 98%. Atwater e Chakravorty (2002), que simularam um cenário com treze estações de trabalho adotaram um intervalo de 71% a 98,6% para a utilização daqueles recursos. De acordo com Godinho Filho e Uzsoy (2012), para a implementação de programas de melhoria contínua, o intervalo mais adequado para a utilização de um recurso varia entre 65% e 85%. Neste trabalho, os recursos não gargalo operam com uma utilização em torno dessa faixa, discutida em Godinho Filho e Uzsoy (2012). Já o gargalo, extrapola este intervalo, justamente para representar o desbalanceamento em um *flow shop*.

O gargalo foi atribuído à máquina 3 para permitir que o cenário 3 fosse avaliado, ou seja, para avaliar o efeito de modificações nas máquinas anterior ao gargalo (máquina 2) e posterior ao gargalo (máquina 4). Este recorte se justifica pelo fato de ser uma pesquisa inicial e exploratória sobre o tema, mas constitui uma limitação. Mais testes precisam ser realizados alterando a posição do gargalo no *flow shop*.

Para todos os cenários aqui analisados, os valores de tamanhos de lote de produção utilizados foram divididos em três categorias, a saber: i) grande: compreende os valores de 600, 500 e 400 peças; ii) médio: compreende os valores de 300, 200 e 100 peças e iii) pequeno: compreende os valores de 70, 50 e 30 peças. Esses valores também constituem os valores para os tamanhos dos lotes de transferência do cenário inicial. Para os demais cenários, os tamanhos dos lotes de transferência analisados foram: 200, 100, 50 e 30.

Tais valores foram definidos considerando os parâmetros utilizados nas simulações e visando criar essas três faixas de análise para o tamanho do lote de produção. Para os parâmetros de entrada do modelo, lotes de produção menores que 30 peças provocaram o efeito de saturação, previsto por Karmarkar et al. (1985), levando o *lead time* a valores muito altos, gerados por utilizações maiores que 100%. Por essa razão, não foram utilizados tamanhos de lote de produção menores que 30 peças.

Conforme apresentado no capítulo 3, tanto o lote de transferência quanto o lote de produção são as variáveis independentes do modelo simulado. O *lead time* constitui a variável dependente de maior interesse para as análises aqui realizadas.

A Tabela 4.2 a seguir apresenta os parâmetros, que juntamente com os tempos de processamento apresentados na Tabela 4.1, constitem todos os parâmetros iniciais utilizados nas simulações.

TABELA 4.2 - Valores de entrada utilizados nos cenários simulados.

Parâmetros	Valor inicial
Coefficiente de variação do tempo entre chegadas na máquina j (ccj)	1,3
Demanda média (Dm)	11520 peças/ano
Desvio padrão do tempo de reparo de cada máquina da linha (DXr)	0,5
Desvio padrão do tempo de <i>set up</i> de cada máquina da linha (DXs)	0,5
Horas trabalhadas no ano (H)	1920 h
Tempo de reparo de cada máquina da linha (MXr)	1 h
Tempo de <i>set up</i> de cada máquina da linha (MXs)	0,75 h
Taxa de defeitos de cada máquina da linha (tdVet)	10%
Tempo médio entre falhas de cada máquina da linha (TFFVet)	120 h
Variância do tempo natural de processamento de cada máquina da linha (varpVet)	0,0025

A seguir estão apresentados os resultados das simulações para os cinco cenários analisados.

4.4.1 Cenário inicial

Os valores obtidos para as simulações no cenário inicial estão apresentados na Tabela 4.3 a seguir.

TABELA 4.3 - *Lead time* total da linha obtido, no cenário inicial, em função dos tamanhos dos lotes de transferência e de produção.

k (peças)	TL (peças)	LT (horas)
600	600	2230,45
500	500	1879,62
400	400	1529,23
300	300	1179,75
200	200	832,7
100	100	497,55
70	70	410,83
50	50	377,41
30	30	727,12

É possível observar que, neste cenário, o tamanho do lote de produção ótimo em relação ao *lead time* é 50 peças. Observa-se também que o *lead time* passa de 2230,45 h para um tamanho de lote de produção e transferência iguais a 600 peças para 377,41 h, quando k e TL são iguais a 50 peças. A partir dessa configuração, foram realizadas modificações nas variáveis independentes do modelo (tamanho de lote de produção e de transferência). Os resultados estão apresentados a seguir.

4.4.2 Cenário 1: reduzindo o lote de transferência em toda a linha de produção

Este cenário representa um primeiro esforço para a redução do *lead time* de uma linha de produção desbalanceada. E, aqui, esse esforço é direcionado à redução do lote de transferência. Para isso, nas simulações realizadas, o tamanho do lote de transferência (k) não é necessariamente igual ao tamanho do lote de produção e recebe os valores de 200, 100, 50 ou 30 peças (como retratado no cenário inicial). A Figura 4.2 ilustra o mecanismo de funcionamento considerado. Em cada uma dessas situações, os valores dos tamanhos dos lotes de produção utilizados nas cinco máquinas foram idênticos e estão entre as três faixas de

tamanho de lote de produção (grande, médio e pequeno) consideradas neste trabalho. A combinação desses valores gera um conjunto de 36 simulações e, portanto, 36 medições de *lead time*.

Os resultados obtidos com essas simulações estão apresentados na Tabela 4.4 a seguir. Nela, também consta a diferença (percentual) em relação ao cenário inicial. Os valores assinalados com asterisco correspondem aos valores onde o tamanho de lote de produção se iguala ao valor do tamanho do lote de transferência, o que representa uma situação já retradada no cenário inicial. Por isso, para esses valores sempre se observa uma diferença nula. Os valores foram mantidos para viabilizar uma análise gráfica.

FIGURA 4.2 - Mecanismo de funcionamento no cenário 1.

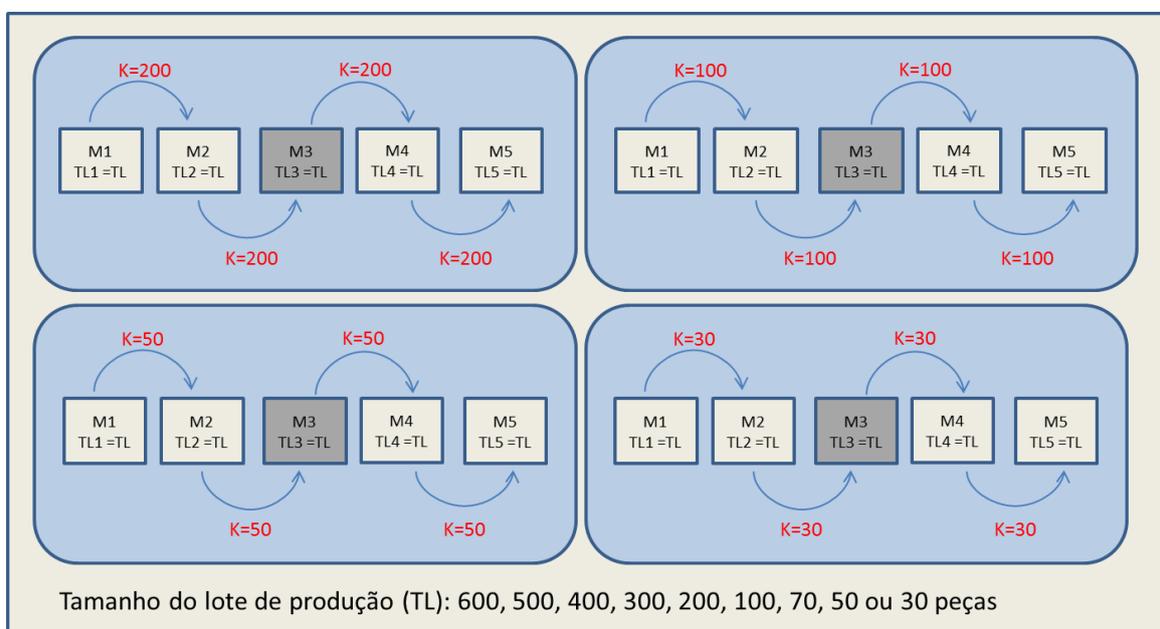
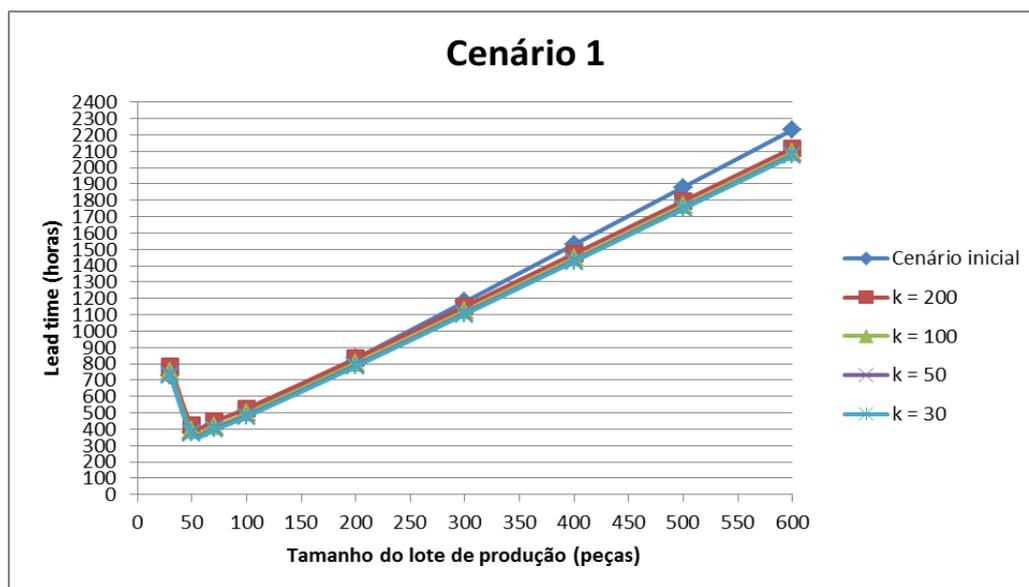


TABELA 4.4 - Valores dos *lead times* obtidos no cenário 1. Os valores percentuais se referem à diferença entre os resultados do cenário 1 e do cenário inicial.

TL (peças)	Lead time (horas)				Diferença (%)			
	k = 200	k = 100	k = 50	k = 30	k = 200	k = 100	k = 50	k = 30
600	2118,37	2090,35	2076,34	2070,73	-5,02%	-6,28%	-6,91%	-7,16%
500	1795,35	1767,26	1753,22	1747,6	-4,48%	-5,98%	-6,72%	-7,02%
400	1472,85	1444,65	1430,56	1424,92	-3,69%	-5,53%	-6,45%	-6,82%
300	1151,38	1123,01	1108,83	1103,16	-2,40%	-4,81%	-6,01%	-6,49%
200	832,7*	803,98	789,63	783,88	0,00%	-3,45%	-5,17%	-5,86%
100	527,31	497,55*	482,67	476,72	5,98%	0,00%	-2,99%	-4,19%
70	450,68	420,03	404,7	398,57	9,70%	2,24%	-1,49%	-2,98%
50	425,17	393,33	377,41*	371,05	12,65%	4,22%	0,00%	-1,69%
30	785,97	751,36	734,05	727,12*	8,09%	3,33%	0,95%	0,00%

As curvas *lead time versus* tamanho do lote de produção, para cada tamanho de lote de transferência simulado neste cenário, estão apresentadas na Figura 4.3 a seguir. Nela também consta a curva *lead time* x tamanho do lote de produção do cenário inicial.

FIGURA 4.3 - Curvas LT x TL para o cenário 1.



Observa-se que apenas reduzir o lote de transferência em toda a linha permite uma redução muito pequena no *lead time* (de no máximo 7,16%), tanto para tamanhos de lote de produção grandes quanto médios. De acordo com os resultados obtidos no capítulo 3, sabe-se que a alteração do tamanho do lote de transferência para valores maiores que o tamanho do lote de produção geram *lead times* maiores em relação ao cenário inicial, devido ao aumento do tempo de fila das peças. Conforme apresenta a Tabela 4.4, esse aumento no *lead time* atinge 12,65%.

Assim, as simulações realizadas nesse cenário mostram que para uma linha desbalanceada, a redução do tamanho do lote de transferência ao longo de toda a linha permite uma redução no *lead time*. Mas, essa melhoria é pequena. Para o menor tamanho de lote de transferência testado (30 peças), foram observadas reduções no *lead time* que variaram entre 6,82 % e 7,16%, para grandes lotes de produção e reduções entre 4,19% e 6,49%, quando a linha operava com tamanhos médios para os lotes de produção.

Portanto, a recomendação prática que esse cenário permite apontar é que o efeito isolado da redução do tamanho do lote de transferência em uma linha desbalanceada é uma redução no *lead time* inferior a 10%. Assim, é preciso considerar os custos e empenho

que serão necessários para a realização dessa melhoria, uma vez que o ganho que pode ser obtido no *lead time* é relativamente pequeno.

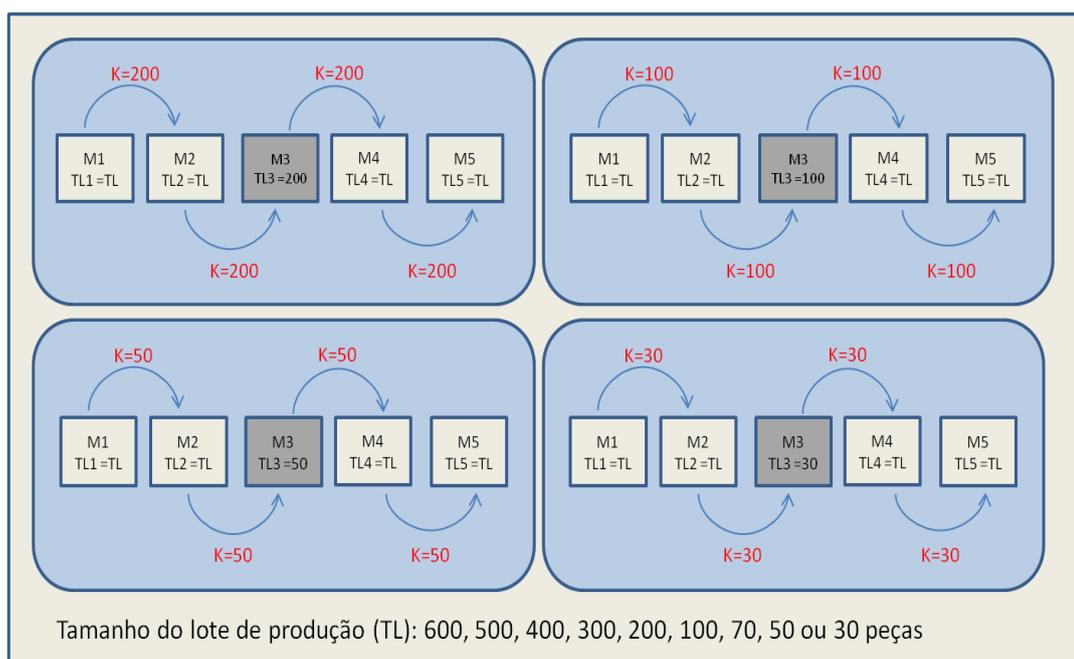
Dessa forma, os resultados obtidos destacam que, na situação retratada neste cenário, existe a necessidade de realização de mais melhorias na linha para que ganhos mais expressivos no desempenho da linha sejam atingidos. Se a redução nos tamanhos do lote de produção de toda a linha não for uma alternativa viável, podem-se realizar melhorias apenas na máquina gargalo. É justamente isso que os próximos cenários visam explorar.

4.4.3 Cenário 2: reduzindo o lote de produção na máquina gargalo

Essa configuração é motivada pelo argumento de que o gargalo deve ser o ponto inicial para iniciativas de melhoria (SCHULTHEISS; KREUTZFELDT, 2009) e que melhorias no gargalo podem ter um efeito maior no *lead time* (GODINHO FILHO; BACHEGA; UZSOY, 2010; GODINHO FILHO; UTIYAMA, 2014).

Por isso, nas simulações aqui realizadas, foram mantidas as alterações realizadas no cenário 1 e alterada a política do tamanho do lote de produção da máquina gargalo. Assim, a máquina gargalo utiliza como lote de produção o mesmo tamanho do lote de transferência. A Figura 4.4 ilustra o mecanismo de funcionamento utilizado no cenário 2.

FIGURA 4.4 - Mecanismo de funcionamento no cenário 2.



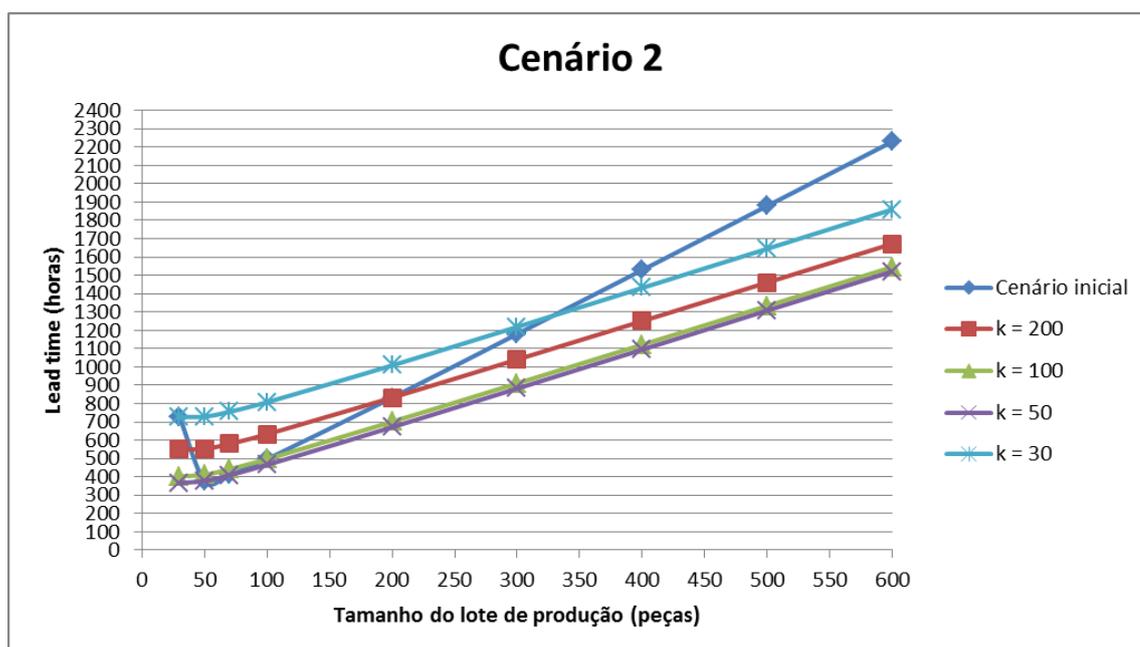
Novamente, foram feitas simulações para quatro tamanhos de k: 200, 100, 50 e 30 e para o conjunto e nove valores para o tamanho do lote de produção. Com exceção da máquina 3 (gargalo), os valores dos tamanhos dos lotes de produção utilizados nas demais máquinas foram idênticos. Os resultados obtidos com as 36 simulações realizadas e as diferenças (percentuais) em relação ao cenário inicial estão apresentados na Tabela 4.5 a seguir.

TABELA 4.5 – Valores dos *lead times* obtidos no cenário 2. Os valores percentuais se referem à diferença entre os resultados do cenário 2 e do cenário inicial.

TL (peças)	Lead time (horas)				Diferença (%)			
	k = 200	k = 100	k = 50	k = 30	k = 200	k = 100	k = 50	k = 30
600	1672,59	1545,84	1521,81	1859,91	-25,01%	-30,69%	-31,77%	-16,61%
500	1461,39	1333,7	1308,34	1645,59	-22,25%	-29,04%	-30,39%	-12,45%
400	1250,6	1121,86	1095,14	1431,76	-18,22%	-26,64%	-28,39%	-6,37%
300	1040,62	910,63	882,49	1218,93	-11,79%	-22,81%	-25,20%	3,32%
200	832,7*	700,94	671,24	1008,56	0,00%	-15,82%	-19,39%	21,12%
100	632,99	497,55*	465,73	807,83	27,22%	0,00%	-6,40%	62,36%
70	580,07	442,08	409,19	755,52	41,19%	7,61%	-0,40%	83,90%
50	552,38	411,42	377,41*	728,8	46,36%	9,01%	0,00%	93,11%
30	549,78	403,32	367,29	727,12*	-24,39%	-44,53%	-49,49%	0,00%

A Figura 4.5 a seguir apresenta as curvas *lead time versus* tamanho do lote de produção, para cada tamanho de lote de transferência simulado neste cenário.

FIGURA 4.5 - Curva LT x TL para o cenário 2.



É possível observar que quando se opera com grandes lotes de produção nas máquinas não gargalo, a configuração aqui testada permite reduções no *lead time* de até 31,77%, em relação ao cenário inicial. Esta redução corresponde a um tamanho do lote de produção de 600 peças e a um lote de transferência de 50 peças, que gerou um *lead time* de 1521,81 h. O valor obtido no cenário 1 para esses mesmos tamanhos de lote de produção e transferência foi de 2076,34 h. Ou seja, apenas reduzir o tamanho do lote de produção na máquina gargalo gerou uma melhoria de 26,71%.

Para valores médios de tamanho do lote de produção também se observa uma redução no *lead time*. Porém, essa redução só ocorre quando o nível de utilização da máquina gargalo não é muito alto, ou seja, para os valores de k iguais a 200, 100 e 50. A política de $k=30$ faz com que a utilização no gargalo seja 98%. Nessa situação, por mais que a máquina gargalo esteja sempre servida com peças (uma vez que as peças chegam de 30 em 30 unidades), o tempo alto de *setup* dessa máquina (considerado 0,75 h) faz com que seja inviável a operação com lotes de produção muito baixos (como o valor testado de 30 peças). Nesses casos, houve um aumento no *lead time* em relação ao cenário inicial. Para tamanhos dos lotes de produção (nas máquinas não gargalo) de 200 e 100 peças, a redução no *lead time* só foi observada para lotes de transferência e lotes de produção no gargalo de até 50 peças.

Em relação aos tamanhos de lote de produção pequenos testados para as máquinas não gargalo, há duas situações: para os tamanhos de lotes de produção de 70 e 50, nas máquinas não gargalo, praticamente não houve redução no *lead time* em se utilizar a política $k=50$. Para $k=30$, observa-se um aumento no *lead time* de até 93,11%, devido à grande utilização da máquina gargalo, que passa a operar com um lote de produção menor que o lote de produção ótimo (que é de 50 peças). Para o tamanho de lote de produção igual a 30 peças nas máquinas não gargalo, há uma redução no *lead time* para as políticas de k iguais a 200, 100 e 50. No entanto, essa redução é mais devido ao aumento do lote de produção no gargalo, que deixa de sofrer o efeito de saturação devido a lotes muito baixos, do que ao efeito do lote de transferência ao longo da linha.

De uma forma geral, a mensagem obtida com esse cenário é que reduzir o tamanho do lote de produção apenas no gargalo tem um efeito positivo para o *lead time*, mesmo quando o restante da linha opera com tamanhos de lote de produção grandes. Embora apenas a redução do lote de transferência (analisada no cenário 1) não traga grandes benefícios (até 7,16%) ao *lead time*, o efeito conjunto dessa melhoria com a redução do

tamanho do lote de produção no gargalo permite reduções consideráveis (de até 31,77%) no *lead time*.

4.4.4 Cenário 3: reduzindo o lote de produção em duas máquinas da linha

Conforme mostrado no cenário anterior, o efeito isolado da redução do tamanho do lote de produção no gargalo resultou em melhorias expressivas no *lead time* (de até 26,71 %). Isso indica que essa melhoria pode ser uma excelente alternativa, em uma situação onde há a necessidade de priorizar recursos, por exemplo. Portanto, a investigação que se faz a seguir é verificar o efeito no *lead time* de se estender a redução do tamanho do lote de produção a mais uma máquina da linha. Como o intuito é direcionar as melhorias ao gargalo, as máquinas consideradas para a aplicação dessa melhoria foram a máquina anterior ao gargalo e a máquina imediatamente após o gargalo.

Dessa forma, nas simulações realizadas neste cenário, foram mantidas as alterações realizadas no cenário 2 e alterada a política do tamanho do lote de produção em mais uma máquina, além do gargalo. Assim, duas situações foram testadas: i) situação 1: a máquina 2 e a máquina 3 (gargalo) tem o tamanho do lote de produção igual ao tamanho do lote de transferência e ii) situação 2: as máquinas que sofrem essa modificação são as máquinas 3 (gargalo) e a máquina 4. A Figura 4.6 e a Figura 4.7 ilustram o mecanismo de funcionamento utilizado no cenário 3.

FIGURA 4.6 - Mecanismo de funcionamento no cenário 3: alterações na máquina gargalo e na máquina anterior ao gargalo (situação 1).

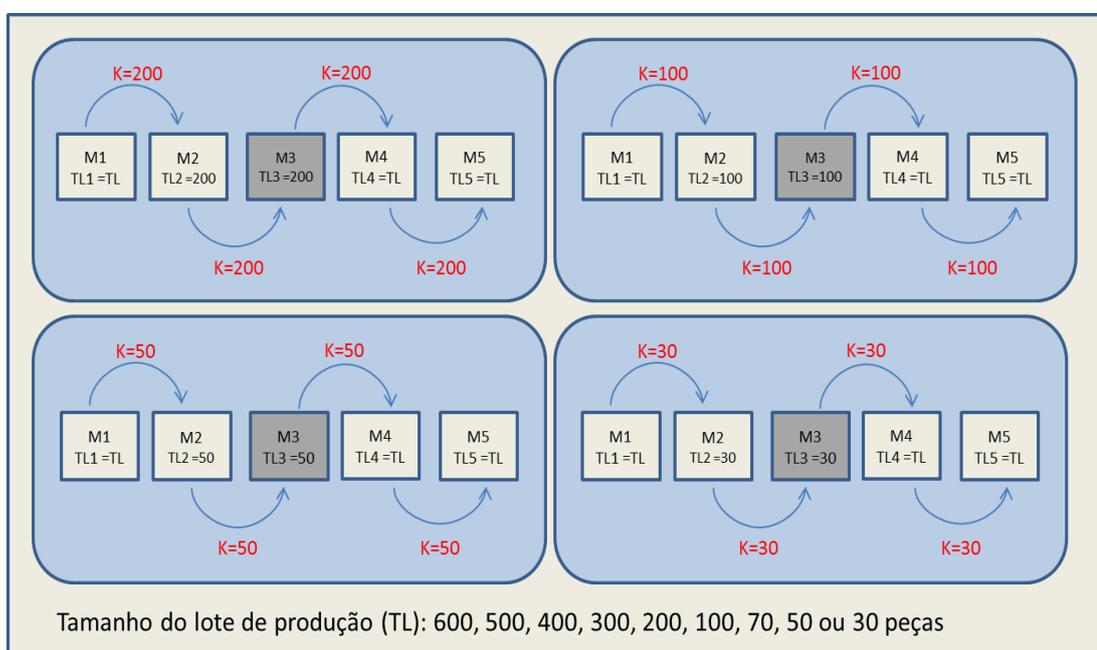
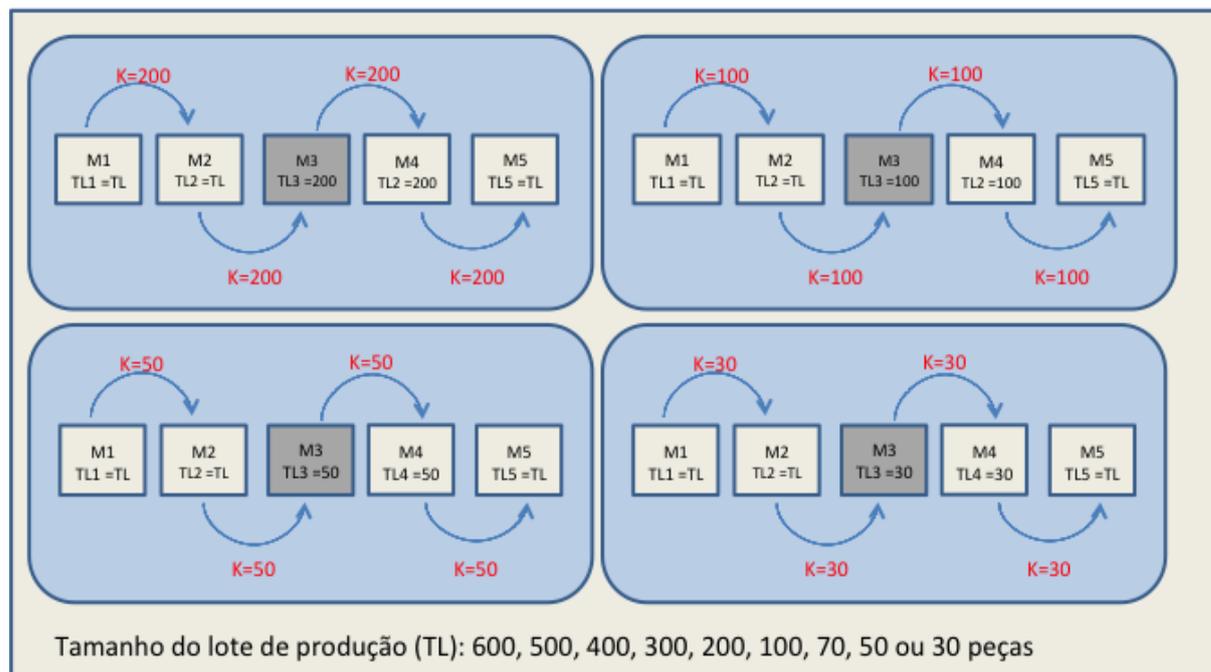


FIGURA 4.7 – Mecanismo de funcionamento no cenário 3: alterações na máquina gargalo e na máquina posterior ao gargalo (situação 2)



Os resultados obtidos com as 72 simulações (situações 1 e 2) realizadas para esse cenário e as diferenças (percentuais) em relação ao cenário inicial estão apresentados na Tabela 4.6 e na Tabela 4.7 a seguir.

TABELA 4.6 - Valores dos *lead times* obtidos na situação 1 do cenário 3.

TL (peças)	Lead time (horas)				Diferença (%)			
	k = 200	k = 100	k = 50	k = 30	k = 200	k = 100	k = 50	k = 30
600	1522,78	1363	1330,83	1695,46	-31,73%	-38,89%	-40,33%	-23,99%
500	1349,42	1188,2	1153,78	1516,38	-28,21%	-36,79%	-38,62%	-19,33%
400	1176,33	1013,6	976,9	1337,53	-23,08%	-33,72%	-36,12%	-12,54%
300	1003,81	839,41	800,38	1159,14	-14,91%	-28,85%	-32,16%	-1,75%
200	832,7*	666,27	624,76	981,89	0,00%	-19,99%	-24,97%	17,92%
100	667,42	497,55*	452,99	809,42	34,14%	0,00%	-8,96%	62,68%
70	623	450,97	405,03	761,98	51,64%	9,77%	-1,41%	85,47%
50	599,3	424,73	377,41*	735,38	58,79%	12,54%	0,00%	94,85%
30	596,17	416,46	366,67	727,12*	-18,01%	-42,72%	-49,57%	0,00%

TABELA 4.7 - Valores dos *lead times* obtidos na situação 2 do cenário 3.

TL (peças)	Lead time (horas)				Diferença (%)			
	k = 200	k = 100	k = 50	k = 30	k = 200	k = 100	k = 50	k = 30
600	1491,31	1323,61	1288,19	1637,48	-33,14%	-40,66%	-42,25%	-26,59%
500	1325,56	1156,34	1118,42	1465,18	-29,48%	-38,48%	-40,50%	-22,05%
400	1160,18	989,33	948,87	1293,32	-24,13%	-35,31%	-37,95%	-15,43%
300	995,53	822,84	779,77	1122,36	-15,62%	-30,25%	-33,90%	-4,86%
200	832,7*	657,63	611,81	953,59	0,00%	-21,02%	-26,53%	14,52%
100	676,96	497,55*	448,39	793,26	36,06%	0,00%	-9,88%	59,43%
70	636,03	453,85	403,26	751,85	54,82%	10,47%	-1,84%	83,01%
50	614,63	429,35	377,41*	730,74	62,85%	13,76%	0,00%	93,62%
30	610,34	419,6	365,54	727,12*	-16,06%	-42,29%	-49,73%	0,00%

As curvas *lead time versus* tamanho do lote de produção, para cada tamanho de lote de transferência simulado nas duas situações consideradas neste cenário são apresentadas na Figura 4.8 e na Figura 4.9 a seguir.

FIGURA 4.8 - Curva LT x TL para o cenário 3 – situação 1

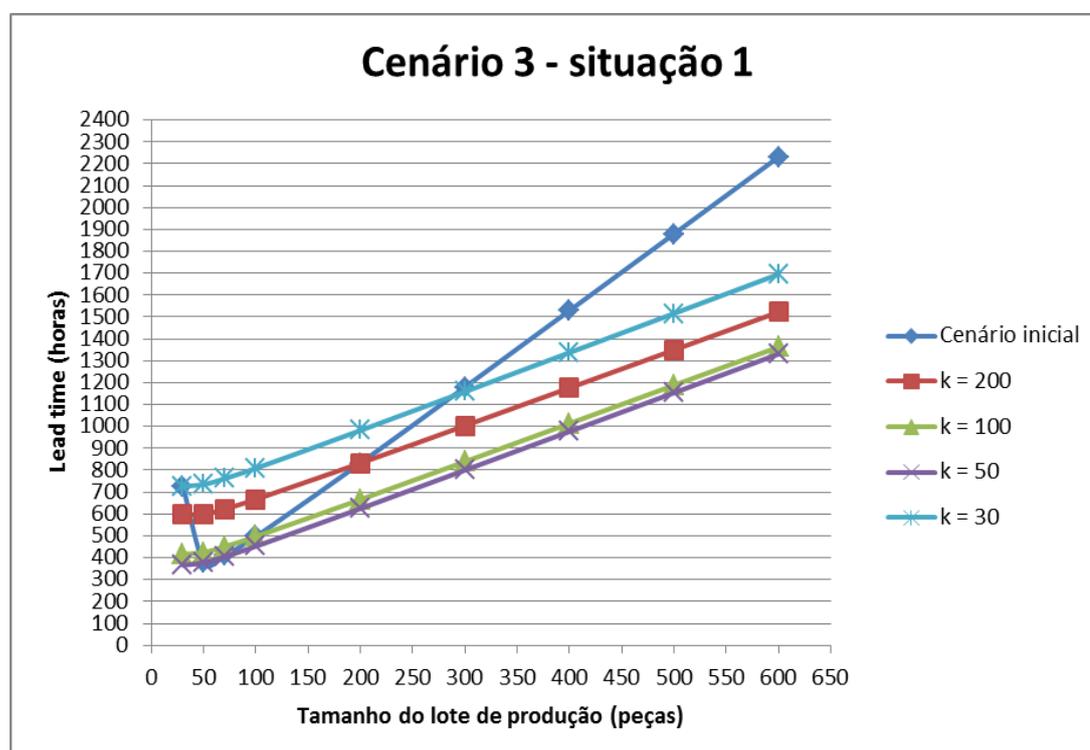
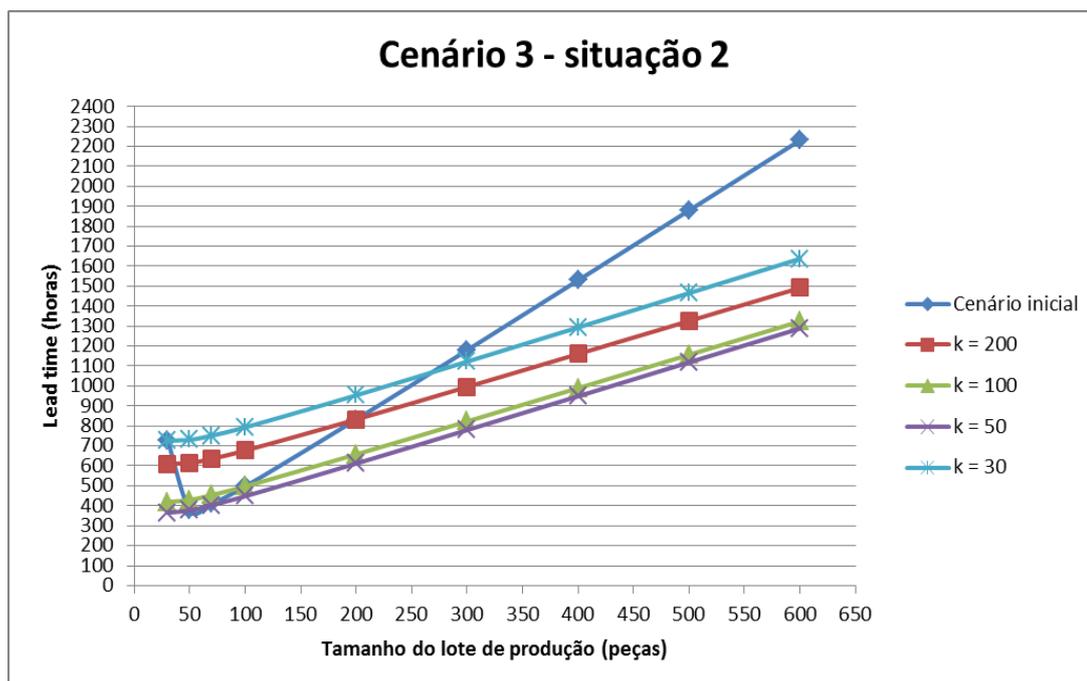


FIGURA 4.9 - Curva LT x TL para o cenário 3 – situação 2.



Aqui, é possível observar que quando se opera com grandes lotes de produção, a redução do lote de transferência aplicada a toda a linha, aliada à redução do tamanho do lote de produção no gargalo e em mais uma máquina permite reduções no *lead time* de até 42,25%. O comportamento das reduções no *lead time* segue o mesmo comportamento das melhorias observadas no cenário 2, onde apenas o gargalo opera com tamanhos de lotes de produção diferenciados. No entanto, as reduções obtidas tanto para a situação 1 quanto para a situação 2 aqui testadas são um pouco melhores daquelas obtidas para o cenário 2. Para exemplificar, a configuração TL=600 peças e k=50 peças, gerou um *lead time* de 1521,81 h no cenário 2. Ao reduzir o tamanho do lote de produção também na máquina 4 (situação 2 do cenário 3), o *lead time* obtido para TL=600 peças e k=50 peças é de 1288,19 h. Ou seja, uma melhoria de 15,35%, do cenário 2 para o cenário 3.

Quando se comparam os resultados obtidos com as simulações do cenário 1 com os resultados do cenário 2, percebe-se uma melhoria um pouco melhor para a situação 2, ou seja, quando a mudança na política do lote de produção foi alterada, além do gargalo, na máquina posterior ao gargalo. Isso pode ter sido causado pelo fato da máquina 4 operar com um nível de utilização maior que o da máquina 2. Na tentativa de isolar o efeito da posição da melhoria (antes ou depois da máquina gargalo) os tempos de processamento de todas as

máquinas não-gargalo foram alterados para 0,09 h. Assim, com exceção do gargalo, todas as máquinas passam a ter o mesmo nível de utilização. Para essa nova configuração, foram realizadas as mesmas simulações feitas nas situações 1 e 2, mantendo os demais parâmetros. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 4.8 e Tabela 4.9 a seguir.

TABELA 4.8 - Valores dos *lead times* obtidos na situação 1 do cenário 3, considerando o mesmo nível de utilização para as máquinas não gargalo.

TL (peças)	Lead time (horas)				Diferença (%)			
	k = 200	k = 100	k = 50	k = 30	k = 200	k = 100	k = 50	k = 30
600	1439,2	1280,31	1248,18	1616,14	-35,47%	-42,60%	-44,04%	-27,54%
500	1278,41	1118,19	1083,96	1449,95	-31,99%	-40,51%	-42,33%	-22,86%
400	1117,89	956,25	919,89	1283,97	-26,90%	-37,47%	-39,85%	-16,04%
300	957,88	794,69	756,14	1118,42	-18,81%	-32,64%	-35,91%	-5,20%
200	799,19	634,08	593,19	953,93	-4,02%	-23,85%	-28,76%	14,56%
100	645,85	477,41	433,62	793,83	29,81%	-4,05%	-12,85%	59,55%
70	604,51	433,93	388,81	749,65	47,14%	5,62%	-5,36%	82,47%
50	582,09	408,99	362,53	724,53	54,23%	8,37%	-3,94%	91,97%
30	576,25	398	349,11	713,9	-20,75%	-45,26%	-51,99%	-1,82%

TABELA 4.9 - Valores dos *lead times* obtidos na situação 2 do cenário 3, considerando o mesmo nível de utilização para as máquinas não gargalo.

TL (peças)	Lead time (horas)				Diferença (%)			
	k = 200	k = 100	k = 50	k = 30	k = 200	k = 100	k = 50	k = 30
600	1445,31	1288,17	1257,14	1607,54	-35,20%	-42,25%	-43,64%	-27,93%
500	1282,7	1123,99	1090,37	1438,14	-31,76%	-40,20%	-41,99%	-23,49%
400	1120,45	960,07	923,82	1269,19	-26,73%	-37,22%	-39,59%	-17,00%
300	958,92	796,66	757,71	1101,15	-18,72%	-32,47%	-35,77%	-6,66%
200	799,19	634,51	592,73	935,32	-4,02%	-23,80%	-28,82%	12,32%
100	646,44	477,41	432,25	778,03	29,92%	-4,05%	-13,12%	56,37%
70	606,32	434,53	387,93	737,58	47,58%	5,77%	-5,57%	79,53%
50	585,35	410,46	362,53	717,13	55,10%	8,76%	-3,94%	90,01%
30	580,95	400,56	350,55	713,9	-20,10%	-44,91%	-51,79%	-1,82%

A partir das Tabelas 4.8 e 4.9, observa-se certa equivalência nos resultados obtidos para as situações 1 (melhoria na máquina gargalo e na máquina anterior ao gargalo) e 2 (melhoria na máquina gargalo e na máquina posterior ao gargalo) quando as utilizações das máquinas não gargalo são idênticas. Para algumas configurações (TL x k), reduzir o tamanho do lote de produção da máquina 2 (antes do gargalo) gerou *lead times* menores do que os

obtidos quando a melhoria estava aplicada à máquina 4 (depois do gargalo). Para outras configurações, o que se observou foi o inverso.

Dessa forma, o que se pode concluir a partir desse cenário é que direcionar esforços para a redução do tamanho do lote de produção no gargalo e em mais uma máquina pode permitir reduções no *lead time* da ordem de 40 %. Esse resultado independe da posição da máquina (imediatamente antes ou imediatamente depois do gargalo), uma vez que os resultados obtidos para o *lead time* não mostraram diferença significativa entre essas duas situações. Vale ressaltar que essa melhoria no *lead time* é válida para quando a linha de produção opera com pequenos lotes de transferência.

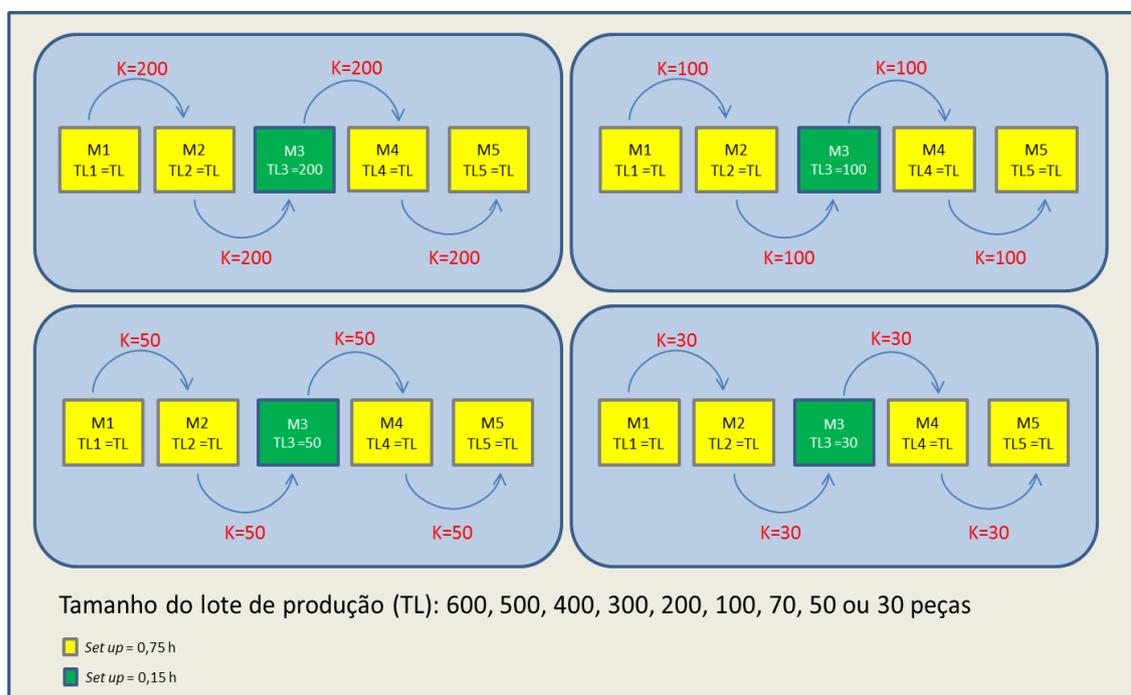
Em termos práticos, caso haja a possibilidade de se reduzir o tamanho do lote de produção em duas máquinas da linha, os resultados das simulações aqui realizadas mostram que esta pode ser uma excelente alocação de recursos. Considerando a impossibilidade de se operar com pequenos lotes de produção em toda a linha.

4.4.5 Cenário 4: reduzindo o tempo de *setup* na máquina gargalo

Este cenário, assim como o anterior, visa acrescentar uma melhoria ao cenário 2. Aqui, essa melhoria é a redução do tempo de *setup* na máquina gargalo. A literatura que embasa este cenário é vasta (SHINGO, 1986; SEKINE, 1992; MODEN, 1993; LIKER, 2005). Assim, o que se pretende aqui é analisar quantitativamente a melhoria advinda da redução do tempo de *setup* no gargalo e compará-la com as demais opções de melhorias apresentadas anteriormente, de forma a oferecer algumas alternativas e recomendações para os tomadores de decisão na prática.

Para isso, foram mantidas as alterações feitas para o cenário 2 e reduzido o tempo de *setup* da máquina 3 (gargalo) de 0,75 h para 0,15 h. A Figura 4.10 ilustra a configuração adotada no cenário 4.

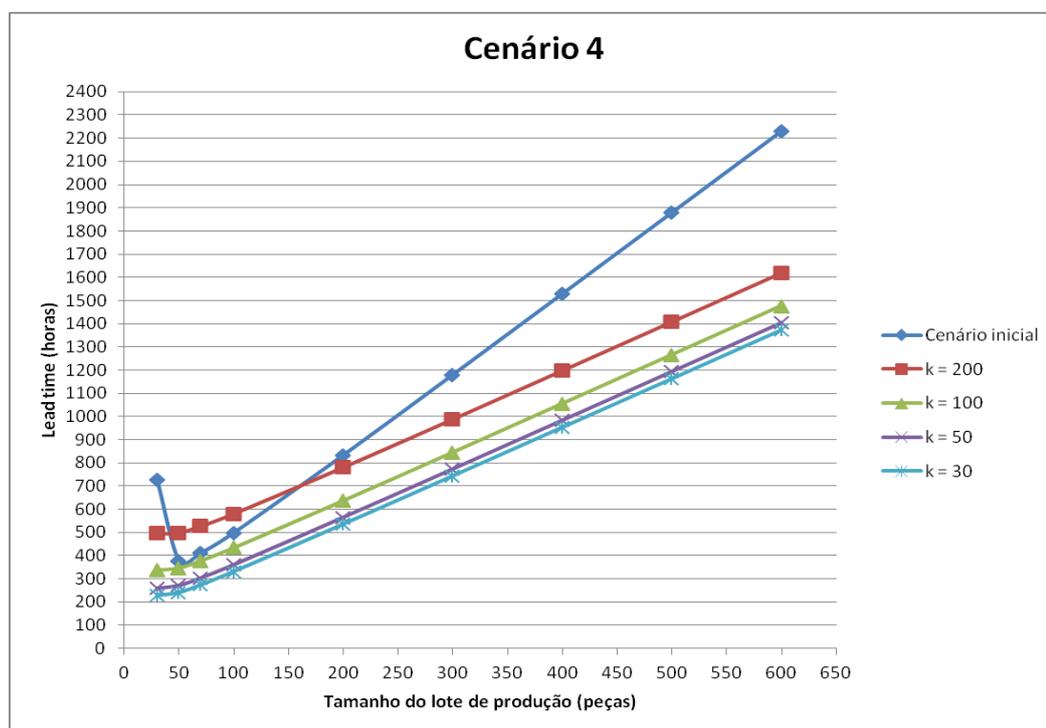
FIGURA 4.10 – Configuração adotada no cenário 4

TABELA 4.10 - Valores dos *lead times* obtidos no cenário 4.

TL (peças)	Lead time (horas)				Diferença (%)			
	k = 200	k = 100	k = 50	k = 30	k = 200	k = 100	k = 50	k = 30
600	1618,4	1476,28	1404,41	1374,66	-27,44%	-33,81%	-37,03%	-38,37%
500	1408,03	1265,8	1194,05	1164,6	-25,09%	-32,66%	-36,47%	-38,04%
400	1198,04	1055,58	983,9	954,72	-21,66%	-30,97%	-35,66%	-37,57%
300	988,8	845,89	774,18	745,22	-16,19%	-28,30%	-34,38%	-36,83%
200	781,46	637,56	565,53	536,69	-6,15%	-23,43%	-32,08%	-35,55%
100	581,78	434,85	361,48	332,35	16,93%	-12,60%	-27,35%	-33,20%
70	528,47	379,08	304,55	275,01	28,63%	-7,73%	-25,87%	-33,06%
50	500,18	347,82	271,83	241,74	32,53%	-7,84%	-27,97%	-35,95%
30	496,45	338,44	259,61	228,39	-31,72%	-53,45%	-64,30%	-68,59%

As curvas *lead time versus* tamanho do lote de produção, para cada tamanho de lote de transferência simulado neste cenário são apresentadas na Figura 4.11 a seguir.

FIGURA 4.11 - Curva LT x TL para o cenário 4.



A partir da Tabela 4.10 e da Figura 4.11, é possível perceber que, para tamanhos de lote de produção grandes e médios, as reduções no tamanho do lote de produção na máquina gargalo, aliada à redução do tamanho do lote de transferência e à redução do *setup* no gargalo, permitiram reduções no *lead time* de até 38,37%. Para os tamanhos de lotes de produção pequenos nas máquinas não gargalo, o efeito da redução do tempo de *setup* é claro, permitindo uma redução de até 68,59% no *lead time*. Essa redução é possível devido ao fato de que a redução no *lead time* altera o valor do lote de produção ótimo (ponto de mínimo da curva *lead time* x tamanho do lote de produção) e, para os parâmetros utilizados nas simulações, viabiliza a produção em lotes menores que 50 peças.

No entanto, para grandes tamanhos de lote de produção (considerando a impossibilidade de redução do lote de produção em toda a linha), observa-se que os *lead times* obtidos neste cenário foram um pouco maiores (cerca de 5%) do que os *lead times* obtidos no cenário 3, para os valores de $k=200$, $k=100$ e $k=50$. Este resultado está de acordo com os trabalhos de Godinho Filho e Uzsoy (2010, 2011) que destacam que programas de redução nos tempos de *setup* atingem melhores resultados com relação ao *lead time* quando tamanhos

de lote de produção pequenos são utilizados. O que também reforça o que é defendido pela literatura de SMED (SHINGO, 1986).

No entanto, quando a linha opera com $k=30$ e o gargalo opera com um lote de produção também igual a 30 peças, e as demais máquinas utilizam um lote de produção de 600 peças, o cenário 4 proporciona melhores resultados do que o cenário 3. Ou seja, nessa situação a redução do tempo de *setup* no gargalo leva a uma redução no *lead time* de 38,37%, enquanto que a redução do lote de produção em duas máquinas da linha proporciona uma redução de 23,99% no *lead time*. A melhoria de 38,37%, obtida no cenário 4, é equivalente à melhoria de 38,89% obtida no cenário 3 quando o lote de produção em duas máquinas da linha e o lote de transferência é de 100 peças. Em termos práticos, caso a redução do tempo de *setup* na máquina gargalo seja mais onerosa, a configuração proposta no cenário 4 pode proporcionar bons resultados para o desempenho da linha.

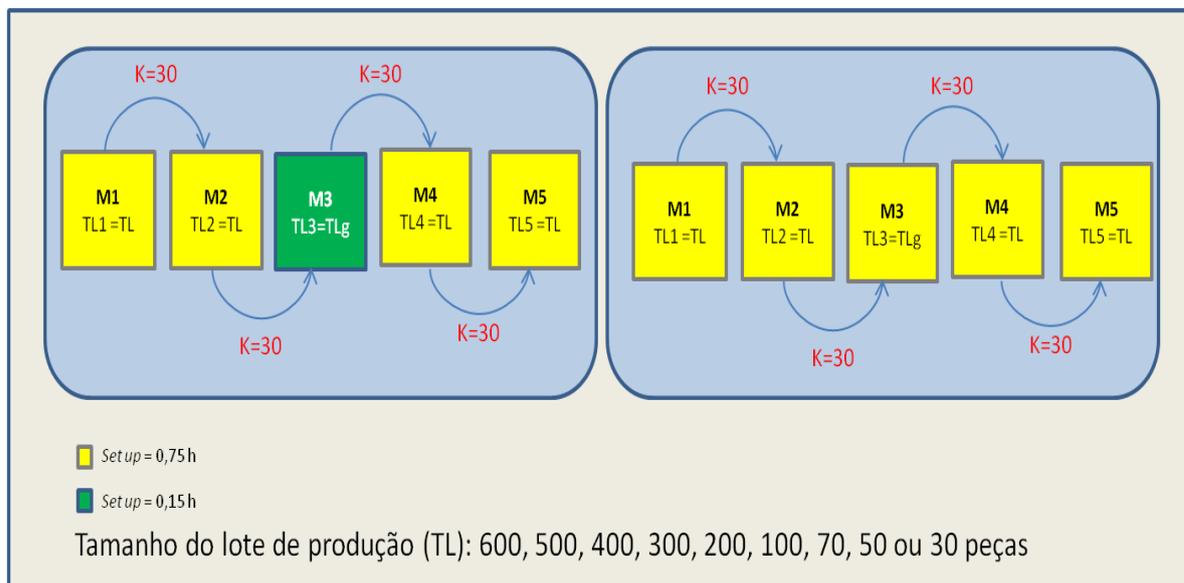
Portanto, os resultados tanto do cenário 3 quanto do cenário 4 demonstraram o potencial que essas melhorias tem para atingir bons desempenhos em relação ao *lead time*. A recomendação que se faz é analisar o esforço necessário para cada melhoria proposta e também a viabilidade dessas recomendações no contexto em que se pretende aplicá-las, uma vez que ambas podem contribuir significativamente para a redução do *lead time*.

4.4.6 Cenário 5: testando a configuração proposta pela TOC

O objetivo deste cenário é claro: avaliar o efeito no *lead time* das sugestões da TOC de trabalhar com pequenos lotes de transferência em toda a linha, com lotes de produção pequenos nas máquinas não gargalo e com lotes de produção grandes no gargalo.

Para isso, foram considerados os seguintes tamanhos de lote de produção na máquina gargalo (TLg): 600, 200 e 50 peças. O lote de transferência foi considerado igual a 30 peças em todas as simulações. Essas configurações foram testadas para dois valores de *setup* na máquina gargalo, a saber: 0,75 h (*setup* alto) e 0,15h (*setup* baixo). Os tempos de *setup* para as demais máquinas não foram alterados, ou seja, permanecem como 0,75h. Os demais parâmetros não foram alterados. A Figura 4.12 ilustra o mecanismo de funcionamento utilizado no cenário 5.

FIGURA 4.12 - Configurações utilizadas no cenário 5. O termo TLg utilizado neste cenário simboliza o tamanho do lote de produção aplicado ao gargalo.



Os resultados obtidos com as simulações aqui realizadas estão apresentados na Tabela 4.11 a seguir. As diferenças percentuais em relação ao cenário inicial são mostradas na Tabela 4.12.

TABELA 4.11 - Valores dos *lead times* (em horas) obtidos no cenário 5.

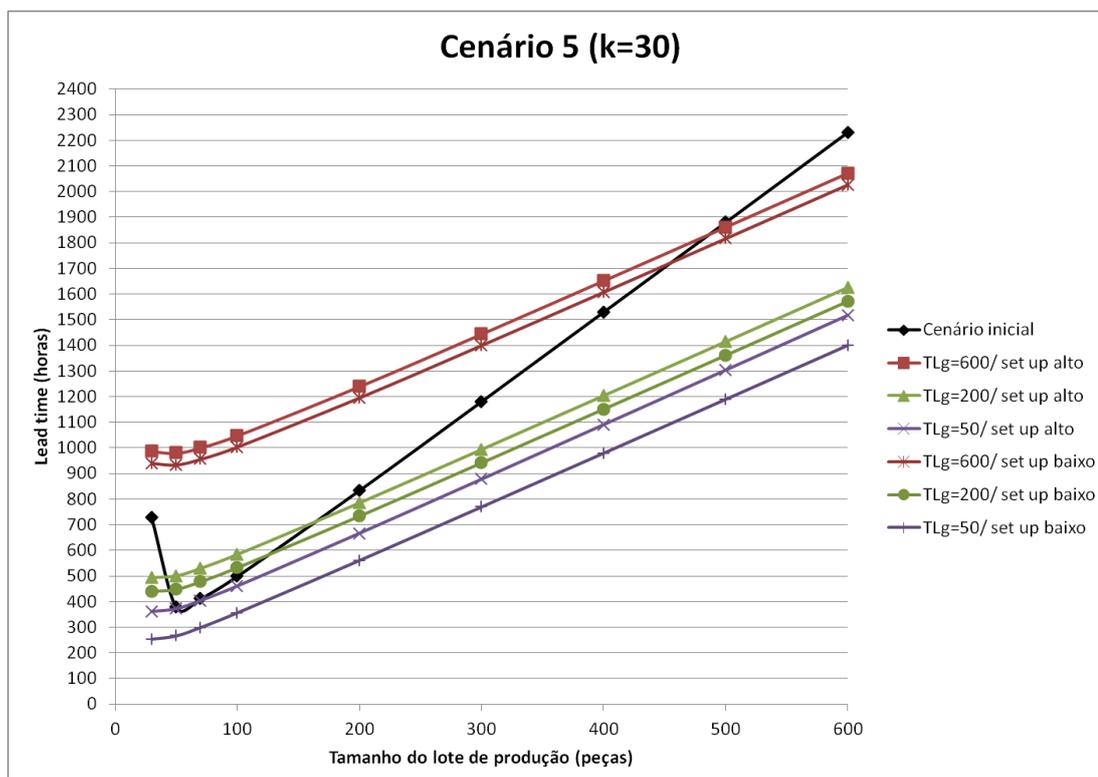
TL (peças)	Lead time (horas)					
	Set up alto no gargalo			Set up baixo no gargalo		
	TLg=600	TLg=200	TLg=50	TLg=600	TLg=200	TLg=50
600	2070,73	1624,72	1516,05	2025,67	1570,81	1398,79
500	1860,64	1413,42	1302,57	1815,83	1360,34	1188,42
400	1651,26	1202,49	1089,35	1606,66	1150,21	978,25
300	1443,26	992,28	876,68	1398,83	940,74	768,5
200	1238,68	783,89	665,37	1194,27	732,93	559,8
100	1047,23	582,76	459,7	1002,37	531,84	355,58
70	1000,24	528,62	403,01	954,88	477,3	298,5
50	979,12	499,31	371,05	933,14	447,4	265,59
30	986,36	492,93	360,48	939,3	439,89	252,93

TABELA 4.12 - Diferenças percentuais no *lead time* obtidas no cenário 5 em relação ao cenário inicial

TL (peças)	Set up alto no gargalo			Set up baixo no gargalo		
	TLg=600	TLg=200	TLg=50	TLg=600	TLg=200	TLg=50
600	-7,16%	-27,16%	-32,03%	-9,18%	-29,57%	-37,29%
500	-1,01%	-24,80%	-30,70%	-3,39%	-27,63%	-36,77%
400	7,98%	-21,37%	-28,76%	5,06%	-24,79%	-36,03%
300	22,34%	-15,89%	-25,69%	18,57%	-20,26%	-34,86%
200	48,75%	-5,86%	-20,09%	43,42%	-11,98%	-32,77%
100	110,48%	17,13%	-7,61%	101,46%	6,89%	-28,53%
70	143,47%	28,67%	-1,90%	132,43%	16,18%	-27,34%
50	159,43%	32,30%	-1,69%	147,25%	18,54%	-29,63%
30	35,65%	-32,21%	-50,42%	29,18%	-39,50%	-65,21%

A comparação das curvas tamanho de lote de produção x *lead time* para os três valores de lote de produção no gargalo e para os dois níveis de *setup* testados é apresentada na Figura 4.13 a seguir. Conforme explicado anteriormente, os valores foram testados para um lote de transferência de 30 peças.

FIGURA 4.13 - Curvas LT x TL para as simulações testadas no cenário 5.



A análise dos resultados obtidos neste cenário permite destacar os seguintes pontos:

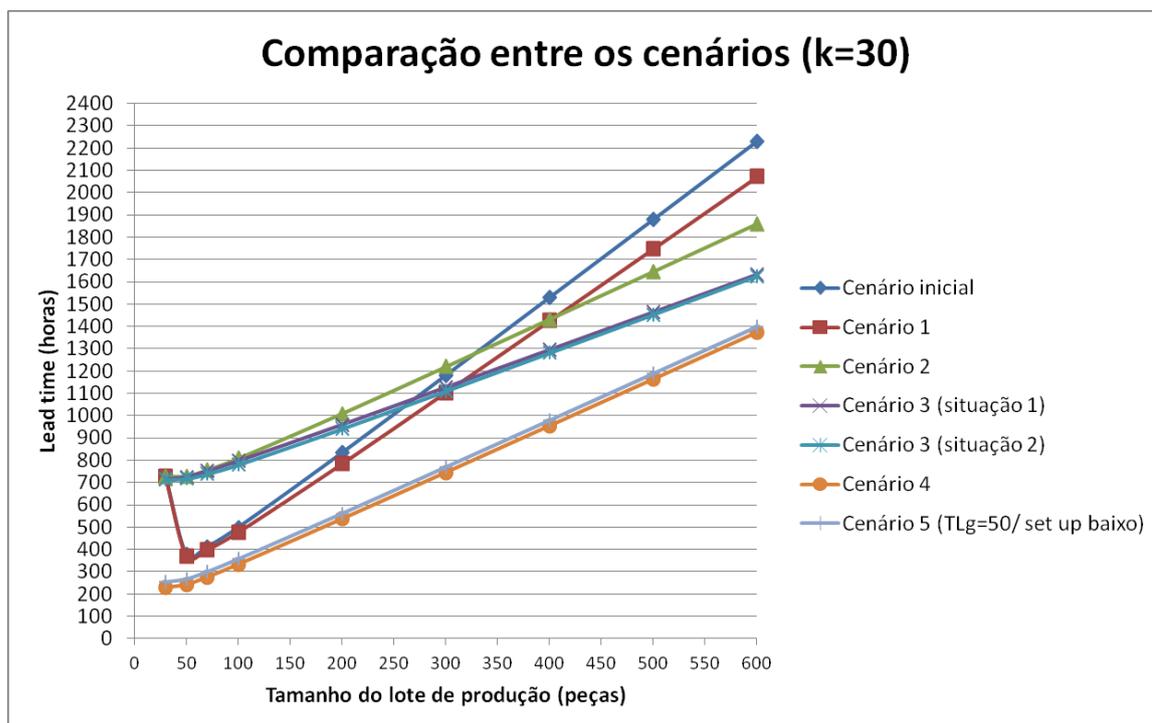
- Quando o tamanho do lote de produção no gargalo é grande (600 peças) e as demais peças da linha operam também com lotes de produção grandes, observa-se uma pequena melhoria no *lead time*, tanto para altos *setups* (essa melhoria chega até 7,98%) quanto para pequenos *setups* (melhoria de até 9,18%). Essas pequenas reduções no *lead time* são o efeito da redução do lote de transferência em toda a linha, o que já havia sido observado no cenário 1. No entanto, quando o tamanho do lote de produção no gargalo é de 600 peças e o restante da linha (as máquinas não gargalo) opera com tamanhos de lote de produção médios e pequenos, observa-se que o desempenho do *lead time* é ruim;
- Quando o tamanho do lote de produção no gargalo foi considerado de 200 peças e as demais peças da linha operavam com lotes de produção altos, observou-se uma redução no *lead time* mesmo quando o *setup* no gargalo era alto (essa redução chega a 27,16%). Com a redução do *setup*, essa redução observada tem um pequeno aumento e chega a 29,57%. Essas melhorias são devidas ao efeito combinado da redução do tamanho do lote de transferência, da redução do lote de produção na máquina gargalo e da redução do tempo de *setup* no gargalo;
- Quando o tamanho do lote de produção no gargalo é de 50 peças e o restante da linha opera com lotes de produção altos, observam-se reduções de até 32,03% no *lead time*, sem reduzir o tempo de *setup* na máquina gargalo e de 37,29% reduzindo o tempo de *setup* naquela máquina (a redução do *setup* nessa configuração proporcionou também uma redução da utilização da máquina gargalo de 91,33% para 83,34%). Esse comportamento também é observado para valores de lotes de produção médios na linha, porém com menores proporções. Já, quando a linha opera com pequenos lotes de produção (30, 50 ou 70 peças), é possível notar mais claramente o efeito da redução do tempo de *setup* na máquina gargalo. Nesta configuração, a redução do *lead time* proporcionada pela redução do tempo de *setup* no gargalo varia entre 7,73% e 10,19%;
- Para as situações onde a linha de produção operava com lotes de produção muito baixos (30 peças) observou-se que um tamanho do lote de produção de

600 peças no gargalo ocasiona um aumento no *lead time* da ordem de 30%, independente do valor do tempo de *setup* no gargalo. Nessa situação, o efeito do aumento do tamanho do lote de produção no gargalo se sobressai em relação ao efeito causado pela redução do tamanho do lote de transferência ou pela redução do tempo de *setup*, o que explica o aumento no *lead time* total da linha. Quando o tamanho do lote de produção no gargalo é reduzido (para 200 peças ou 50 peças), o efeito é a redução no *lead time*, de até 65,21%, para um tempo de *setup* baixo e de 50,42% para um tempo de *setup* alto.

A seguir, a Figura 4.14 apresenta, de forma conjunta, as curvas *lead time* x tamanho de lote de produção para todos os cenários analisados anteriormente. Especificamente, para o cenário 3 (situações 1 e 2), os resultados são aqueles obtidos para a linha desbalanceada inicial, onde as máquinas 3 e 4 tem níveis de utilização diferentes, pois esta é a configuração utilizada nos demais cenários. Para o cenário 5, a curva representa uma situação onde o tamanho do lote de produção no gargalo é pequeno e o *setup* dessa máquina é baixo (0,15 h). Situação essa onde se obteve melhores resultados para o *lead time*. As curvas são relativas a um lote de transferência de 30 peças, com exceção para o cenário inicial, onde o tamanho do lote de transferência varia na medida em que o tamanho do lote de produção varia.

Para uma linha que opera com grandes lotes de produção, todas as situações apresentadas no gráfico da Figura 4.14 proporcionam uma redução no *lead time*. Basicamente, essa melhoria é devido ao efeito da redução do lote de transferência (cenário 1), acrescido do efeito da redução do tamanho do lote de produção no gargalo (cenários 2, 3, 4 e 5) e da redução do tempo de *setup* no gargalo (cenários 4 e 5). De uma forma geral, nota-se que para os cenários 4 e 5, houve um deslocamento considerável da curva LT x TL para baixo. Ou seja, as melhorias realizadas apenas na máquina gargalo, aliadas a um pequeno lote de transferência na linha proporcionam reduções expressivas no *lead time*.

FIGURA 4.14 - Comparação dos resultados obtidos nos cinco cenários testados, considerando o lote de transferência na linha igual a 30 peças.



Dois pontos precisam ser destacados a partir dos resultados obtidos até aqui. O primeiro é o forte potencial de se realizar melhorias apenas na máquina gargalo. Segundo, quando essa melhoria é apenas a redução do tamanho do lote de produção aliada à redução do lote de transferência da linha, os resultados já são expressivos. Para um contexto no qual não é possível reduzir o tamanho do lote de produção em toda a linha, concentrar esforços apenas na redução do tamanho do lote de produção no gargalo aliado a uma redução do lote de transferência pode resultar em uma melhoria considerável no *lead time*.

Em um primeiro momento essa conclusão pode contrastar com o que defende a TOC e, mais especificamente no argumento de Goldratt (1990, pág. 53), testado no cenário 5. O argumento de Goldratt (1990) é embasado no fato de que maiores lotes de produção no gargalo permitem economizar *setup*. Os resultados aqui obtidos indicam que mesmo em uma situação onde o *setup* no gargalo é alto, operar com lotes de produção grandes no gargalo não é uma boa estratégia, do ponto de vista do *lead time*. Conforme destaca Millstein e Martinich (2010), a TOC não visa minimizar o *lead time*. Conforme bem divulgado pela literatura, a medida de desempenho que a TOC visa melhorar é o lucro. Assim, ao se alterar a medida de desempenho, altera-se também a perspectiva do mesmo problema.

De uma forma geral, os resultados aqui apresentados encontram embasamento na TOC e em toda a literatura que defende que a gestão do ambiente produtivo deva ser feita em função do recurso gargalo. As alternativas aqui testadas estão de acordo com o que Goldratt e Cox (2014) defendem no que tange ao “elevar o gargalo”, ou seja, empreender esforços para tornar o gargalo mais eficiente, de forma a melhorar o desempenho do ambiente produtivo como um todo. Todavia, aqui, melhorar o desempenho do ambiente produtivo significa melhorar o *lead time* da linha de produção. Nesse contexto, o resultado aqui apresentado de que trabalhar com grandes lotes de produção no recurso gargalo é uma política ruim está de acordo com o trabalho de Koo, Bulfin e Koh (2007). Esses autores destacam que modelos baseados na teoria de filas podem ser utilizados para determinar tamanhos de lote de produção que contribuam para a redução do *lead time*, o que é feito no presente trabalho. Destaca-se nesse ponto que uma das contribuições deste capítulo é investigar essa questão de forma quantitativa e utilizando para tal um modelo de simulação, que contempla sete variáveis do chão-de-fábrica. Todas as variáveis consideradas estão modeladas de acordo com as equações propostas por Hopp e Spearman (2001, 2008), que advém da Teoria de Filas. Ou seja, as simulações aqui realizadas, permitem uma análise mais robusta do que análises simplesmente qualitativas ou análises que não contemplem, por exemplo, variáveis como a variabilidade de processamento e de chegada de peças na linha, que tem reconhecidamente um efeito importante no *lead time* e, portanto, para o desempenho produtivo de uma linha de produção. É claro que, as simulações aqui realizadas apresentam suas limitações. Essas limitações são discutidas na próxima seção, que conclui o presente capítulo.

4.5 Conclusões

Este capítulo teve como objetivo principal investigar o efeito do tamanho do lote de transferência e do tamanho do lote de produção em um ambiente *flow shop* desbalanceado. Especificamente, também foi um objetivo deste capítulo analisar se operar com grandes lotes de produção apenas no recurso gargalo juntamente com pequenos lotes de transferência ao longo da linha de produção é uma política que contribui para o *lead time*.

Para esse fim, foi utilizada uma abordagem quantitativa que utilizou a modelagem e a simulação. Foram consideradas no modelo aqui utilizado as variáveis conhecidas por impactar o *lead time*, que são: i) tempo médio de *setup*; ii) taxa média de

defeitos; iii) tempo médio entre falhas; iv) tempo médio de reparo da máquina; v) variabilidade do tempo de processamento; vi) variabilidade do tempo entre as chegadas de ordens e vii) lote de transferência.

A questão de pesquisa a qual este capítulo se propôs a investigar foi explorada por meio da realização de simulações, considerando cinco diferentes cenários, a saber: i) cenário 1: pequenos lotes de transferência em toda a linha de produção; ii) cenário 2: pequenos lotes de produção na máquina gargalo; iii) cenário 3: pequenos lotes de produção em duas máquinas da linha; iv) cenário 4: redução do tempo de *setup* na máquina gargalo e v) cenário 5: teste da configuração proposta pela TOC. Os resultados obtidos nas simulações desses cenários foram comparados com o cenário inicial, onde o tamanho do lote de transferência era igual ao tamanho do lote de produção para toda a linha. Os resultados dessas comparações permitem destacar os seguintes pontos:

- A redução do lote de transferência em uma linha desbalanceada contribui para uma pequena redução no *lead time*. Por isso, é preciso primeiramente avaliar a relação custo/benefício de sua implantação de forma criteriosa, pois a mesma pode representar um esforço sem grandes resultados;
- A redução do tamanho do lote de produção apenas na máquina gargalo, aliada à redução do tamanho do lote de transferência em toda a linha proporciona reduções da ordem de 30% no *lead time*, mesmo quando todas as outras máquinas (não gargalo) operam com grandes tamanhos de lote de produção;
- Reduzir o tamanho do lote de produção na máquina gargalo e também na máquina anterior ou posterior a essa contribui para melhorias no *lead time* maiores do que apenas a redução obtida com a redução do lote de produção na máquina gargalo. Essa melhoria é incrementada com a redução do lote de transferência utilizado na linha. Tanto as melhorias (redução do tamanho do lote de transferência) realizadas na máquina anterior ao gargalo quanto àquelas realizadas na máquina posterior ao gargalo resultaram em reduções no *lead time* da ordem de 40%. Os resultados aqui obtidos para o *lead time* não mostraram diferença significativa entre essas duas situações;
- Operar a máquina gargalo com um tamanho lote de produção pequeno aliado à redução do tempo de *setup* neste recurso proporcionou melhorias de até 38,37%, quando o restante da linha operava com lotes de produção grandes e médios. A

redução do tempo de *setup* na máquina gargalo tem um efeito maior quando a linha opera com pequenos lotes de produção. Por exemplo, quando toda a linha utiliza um lote de produção e de transferência iguais a 30 peças, o *lead time* foi reduzido em 68,59%;

- Trabalhar com lotes de produção grandes no gargalo é uma política ruim do ponto de vista do *lead time*, mesmo quando pequenos lotes de transferência são utilizados ao longo da linha. Essa conclusão é válida para os dois tempos de *setup* testados no gargalo;
- Caso uma empresa não possa operar com tamanhos de lotes de produção pequenos em toda a linha e tiver que priorizar os recursos empregados na realização de melhorias a melhor alternativa, dentre as alternativas consideradas neste trabalho, seria adotar um tamanho do lote de produção pequeno no gargalo aliado a uma redução do tamanho do lote de transferência em toda a linha. A redução do tempo médio de *setup* apenas na máquina gargalo aliada a essa configuração proposta permite uma redução no *lead time* um pouco maior (entre 7,73% e 10,19%).

A partir do que foi apresentado e discutido anteriormente, pode-se concluir que os objetivos propostos inicialmente foram cumpridos de forma satisfatória. No entanto, algumas limitações precisam ser consideradas: i) foram realizadas simulações apenas para um *flow shop* com cinco máquinas, sendo que a máquina gargalo se encontrava na terceira posição da linha. Mais simulações precisam ser realizadas para avaliar se a posição do gargalo na linha e/ou o tamanho da linha de produção alteram os resultados aqui apresentados; ii) os testes realizados foram de apenas uma amostra por cada combinação considerada nos cinco cenários. A inclusão de distribuições de variabilidade nas variáveis do chão-de-fábrica aqui consideradas poderia permitir a realização de uma amostra maior, permitindo a investigação estatística dos resultados obtidos. Seguindo essa linha de raciocínio, as reduções no tempo de *setup* foram realizadas apenas no valor médio dessa variável. Estudos futuros podem ser realizados alterando também o desvio padrão dessa variável; iii) os resultados aqui obtidos são restritos aos parâmetros considerados na modelagem da linha e nas simulações. Não sendo possível, portanto, realizar generalizações para cenários com outras ordens de grandeza e/ou configurações. O que os resultados aqui apresentados permitem é gerar *insights* que visaram indicar alguns caminhos para que gerentes de produção possam obter reduções no *lead time* nos ambientes em que operam.

Por fim, destacam-se algumas recomendações que podem ser exploradas em

trabalhos futuros. A primeira se refere ao padrão de fluxo dos materiais e informações no ambiente produtivo. Neste trabalho, o fluxo na linha de produção foi considerado empurrado e nenhum sistema de coordenação de ordens foi utilizado. Como o tema tem uma forte interface com a TOC, futuros trabalhos poderiam contemplar a utilização do DBR, por exemplo, para a investigação do seu efeito no *lead time*. Também é importante destacar que as questões aqui estudadas, para um *flow shop* desbalanceado, podem ser exploradas em um ambiente *jobshop*.

Capítulo 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os objetivos gerais desta tese foram: i) desenvolver uma plataforma de simulação que permita testar o efeito do tamanho do lote de transferência no *lead time* e ii) analisar quantitativamente, por de uma série de experimentos, o efeito do tamanho do lote de transferência no *lead time* em ambientes *flow shop* balanceados e não balanceados, onde há a presença de um gargalo. Pode-se concluir, por meio das análises dos resultados apresentados nos capítulos 3 e 4, que esses objetivos foram plenamente atingidos assim como os quatro objetivos específicos propostos inicialmente neste trabalho.

Uma das contribuições dessa tese para a Gestão da Produção são as recomendações geradas para os gerentes de produção que visam à redução do *lead time*, considerando cenários que se aproximem da realidade do chão-de-fábrica. Outra contribuição deste trabalho é a plataforma de simulação aqui proposta, que constitui uma ferramenta com potencial para a análise de diversas questões relacionadas à redução do *lead time* e contempla as seguintes variáveis de chão-de-fábrica: i) tempo médio de *setup*; ii) taxa média de defeitos; iii) tempo médio entre falhas; iv) tempo médio de reparo da máquina; v) variabilidade do tempo de processamento; vi) variabilidade do tempo entre as chegadas de ordens e vii) lote de transferência. As demais conclusões estão especificadas ao final dos capítulos 3 e 4. De uma forma sintetizada, essas contribuições são as seguintes:

- Para se reduzir o *lead time* de um sistema *flow shop* deve-se primeiramente conhecer a curva LT-TL e operar com um lote de produção próximo ao ponto mínimo dessa curva (ponto ótimo). A partir disso, é possível obter menores *lead times* e um sistema produtivo mais estável (com menor variabilidade). Após atingido esse patamar, a política de lote de transferência pode colaborar para se obter um melhor desempenho.
- Uma vez operando com o lote de produção ótimo, é possível escolher qual a política de lote de transferência aplicar de acordo com as demais particularidades da empresa (recursos financeiros, manuseio de materiais,

fluxo e controle de informações). A única restrição a ser atendida aqui é que o tamanho do lote de transferência não deve ser superior ao tamanho do lote de produção;

- A política $k=TL$ é uma decisão ruim quando se trabalha fora da faixa do lote de produção ótimo. Este resultado está parcialmente de acordo com o que defende a TOC, quando afirma que o lote de transferência pode não ser e, muitas vezes, não deve ser igual ao lote de processamento. No entanto, se o lote de produção for próximo ao ótimo (ponto de mínimo da curva $LT-TL$), os resultados aqui apresentados permitem concluir que essa política pode ser trazer um bom desempenho em relação ao *lead time*, uma vez que os esforços empreendidos para reduzir tamanho do lote de transferência além desse ponto podem não justificar a melhoria que será obtida no *lead time*;
- A política de lote de transferência unitário ($k=1$), testada para uma linha balanceada, proporcionou um menor *lead time* para todos os tamanhos de lotes testados apenas em um cenário determinístico. Este resultado está de acordo com o que defende o *Lean Manufacturing* e também os resultados obtidos por Arbós et al. (2015). Para os cenários estocásticos, a política $k=1$ se mostrou equivalente à política $k=10$, para todas as incertezas aplicadas à demanda, tempo de reparo e tempo entre falhas;
- Para uma linha desbalanceada, a redução do tamanho do lote de produção apenas na máquina gargalo, aliada à redução do tamanho do lote de transferência em toda a linha proporciona reduções significativas no *lead time*, mesmo quando todas as outras máquinas (não gargalo) operam com grandes tamanhos de lote de produção. Nessa situação, a redução do tempo de *setup* na máquina gargalo pode levar a um pequeno incremento nessa melhoria, sendo necessária a avaliação custo x benefício desse esforço;
- Reduzir o tamanho do lote de produção na máquina gargalo e também na máquina anterior ou posterior a essa contribui para melhorias no *lead time* maiores do que apenas a redução obtida com a redução do lote de produção na máquina gargalo. Essa melhoria é incrementada com a redução do lote de transferência utilizado na linha;
- A redução do tempo de *setup* na máquina gargalo tem um efeito maior quando a linha opera com pequenos lotes de produção.

- Trabalhar com lotes de produção grandes no gargalo é uma política ruim do ponto de vista do *lead time*, mesmo quando pequenos lotes de transferência são utilizados ao longo da linha. O *setup* da máquina gargalo mostrou ter pouco efeito nessa situação;
- Caso uma empresa não possa operar com tamanhos de lotes de produção pequenos em toda a linha e tiver que priorizar os recursos empregados na realização de melhorias a melhor alternativa, dentre as alternativas consideradas neste trabalho, seria: adotar um tamanho do lote de produção pequeno no gargalo aliado a uma redução do tamanho do lote de transferência em toda a linha.

Devido ao fato de ser um trabalho exploratório e inicial no tema, a presente tese possuiu algumas limitações que foram explicitadas ao longo dos capítulos. No entanto, essas limitações podem ser exploradas em trabalhos futuros. Assim, as principais sugestões propostas para trabalhos futuros são: i) retratar a variabilidade de todas as variáveis de chão-de-fábrica de forma conjunta no modelo. Sabe-se que em um cenário real, um sistema produtivo está sujeito a variabilidade na demanda ao mesmo tempo em que está sujeito às variabilidades no tempo de reparo, no tempo entre falhas, no tempo de processamento, de *setup*, etc. Esta lista se estende devido à imensa complexidade que um sistema produtivo representa. Realizar simulações utilizando um modelo que contemple um cenário estocástico dessa forma pode gerar recomendações para a literatura de Gestão da Produção; ii) inserir no modelo sistemas de coordenação de ordens e avaliar seu efeito no *lead time*; iii) estender o modelo aqui proposto e as análises feitas para um ambiente *jobshop* ou *layout* celular e iv) inserir parâmetros financeiros no modelo em questão.

REFERÊNCIAS

AKEN, J. E. V.; ROMME, G. Reinventing the future: adding design science to the repertoire of organization and management studies, *Organization Management Journal*, v. 6, n.1, p. 5-12, 2009.

AMARATUNGA, D.; BALDRY, D.; SARSHAR, M.; NEWTON, R. Quantitative and qualitative research in the built environment: application of “mixed” research approach. *Work Study*, v. 51, n. 1, p. 17-31, 2002.

ANANDA, M. M. A. Confidence intervals for steady state availability of a system with exponential operating time and lognormal repair time. *Applied Mathematics and Computation*, v. 137, p. 499-509, 2003.

ARBÓS, L. C.; SANTOS, J. F.; LÓPEZ, P. R. A.; SANCHEZ, C. Monitoring processes through inventory and manufacturing lead time. *Industrial Management and Data Systems*, v. 115, n. 5, p. 951-970, 2015.

ARBÓS, L. C. Design of a rapid response and high efficiency service by lean production principles: methodology and evaluation of variability of performance. *International Journal of Production Economics*, v. 80, p.169-183, 2002.

ARMENTANO, V. A.; BERRETA, R. E.; FRANCA, P. M. Lot-izing in capacited multi-stage serial systems. *Production and Operations Management*, v. 10, n. 1, 2001.

ARNHEITER, E. D; MALEYEFF, J. The integration of lean management and Six Sigma. *The TQM Magazine*, v. 17, n. 1, p. 5-18, 2005.

ASKIN, R.; GOLDBERG J. *Design and analysis of Lean Production Systems*. John Wiley and Sons, 2002.

ATTADIA, L. C. L; MARTINS, R. A. Medição de desempenho como base para evolução da melhoria contínua. *Revista Produção*, v. 13, n. 2, 2003.

ATWATER, J. B.; CHAKRAVORTY, S. S. A study of the utilization of capacity constrained resources in drum-buffer-rope systems. *Production and Operations Management*, v. 11, n. 2, 2002.

AZADIVAR, F.; SHU, V. Maintenance policy selection for JIT production systems. *International Journal of Production Research*, v. 37, n. 16, p. 3725-3738, 1999.

BALDERSTONE, S. J.; MABIN, V. J. A review of Goldratt’s theory of constraints (TOC) – lessons from the international literature. In: 33^a Annual Conference of the Operations Research Society of New Zealand, 1998, Nova Zelândia. *Proceedings...* Nova Zelândia, 1998, p. 1-10.

BALDO, T. A.; SANTOS, M. O.; ALMADA-LOBO, B.; MORABITO, R. An optimization approach for the lot sizing and scheduling problem in the brewery industry. *Computers and Industrial Engineering*, v. 72, p. 58-71, 2014.

BERRETA, R.; FRANCA, P. M.; ARMENTANO, V. A. Metaheuristic approaches for the multilevel resource-constrained lot-sizing problem with setup and lead times. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, v. 22, n. 2, p. 261-286, 2005.

BERTO, R. M. V. S.; NAKANO, D. N. A produção científica nos anais do Encontro Nacional de Engenharia de Produção: um levantamento de métodos e tipos de pesquisa. *Produção*, v. 9, n. 2, p. 65-76, 2000.

BESSANT, J.; CAFFYN, S.; GILBERT, J.; HARDING R; WEBB, S. Rediscovering continuous improvement. *Technovation*, v. 14, n. 1, p. 17-29, 1994.

BETTERTON, C. E.; SILVER, S. J. Detecting bottlenecks in serial production lines – a focus on interdeparture time variance. *International Journal of Production Research*, v. 50, n. 15, p. 4158-4174, 2011.

BHARDWAJ, A.; GUPTA, A.; KANDA, A. Drum-Buffer-Rope: The technique to plan and control the production using theory of constraints. *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology*, v. 70, p. 103-106, 2010.

BHUIYAN, N.; BAGHEL, A. An overview of continuous improvement: from the past to the present. *Management Decision*, v. 43, n. 5, p. 761-771, 2005.

BLACK, J. T. *The design of the factory with a future*. McGraw-Hill, NY, 1991.

BLACKSTONE, J. H. A review of Literature on Drum-Buffer-Rope, BufferManagement and Distribution. In: COX, J. F.; SCHEILER, J. G. *Theory of Constraints Handbook*. United States of America: McGraw-Hill, 2010, p. 145-173.

BRYMAN, A. *Research methods and organization studies*. Londres: Unwin Hyman, 1989.

BUCKCHIN, J. A comparative study of performance measures for throughput of a mixed model assembly line in a JIT environment. *International Journal of Production Research*, v. 36, n. 10, p. 2669-2685, 1998.

CAFFYN, S. Development of a continuous improvement self-assessment tool. *International Journal of Operations and Production Management*, v. 19, n. 1, p. 1138-1153, 1999.

CARPINETTI, L. C. R.; GERÓLAMO, M. C.; DORTA, M. A conceptual framework for deployment of strategy-related continuous improvements. *The TQM Magazine*, v.12, n. 5, p. 340-349, 2000.

CHAKRAVORTY, S. S.; ATWATER, B. Bottleneck management: theory and practice. *Production Planning and Control: The Management of Operations*, v. 17, n. 5, p. 441-447, 2006.

CHANG, J. H.; CHIU, H. N. A comprehensive review of lot streaming. *International Journal of Production Research*, v. 43, n. 8, p. 1515-1536, 2005.

CHENG, M.; MUKHERJEE, N. J.; SARIN, S. C. A review of lot streaming. *International Journal of Production Research*, v. 51, n. 23-24, p. 7023-7046, 2013.

CLARK, A. R.; ARMENTANO, V. A. A Heuristic for a Resource-capacitated Multi-stage Lot-sizing Problem with Lead Times. *Journal of Operational Research Society*, v. 46, p. 1208-1222, 1995.

COOK, DAVID P. A simulation comparison of traditional, JIT, and TOC manufacturing systems in a flow shop with bottlenecks. *Production and Inventory Management Journal*, v. 35, n. 1, p. 73-78, 1994.

COX, J. F.; SCHLEIER, J. G. J. *Theory of Constraints Handbook*. Nova York: McGraw Hill, 2010, 1175 p.

CRESWELL, J. W. *Research design – qualitative and quantitative approaches*. Londres: Sage, 1994.

CRESWELL, J. W.; CLARK, V. L. P. *Designing and conducting mixed method research*. Londres: Sage, 2006.

DEFERSHA, F. M. A comprehensive mathematical model for hybrid flexible flow shop lot streaming problem. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, v. 2, p. 283-294, 2011.

DENISA, F. Bottleneck Management in Discrete Batch Production. *Journal of Competitiveness*, v. 4, n. 2, p. 161-171, 2012.

DE TREVILLE, S. et al. Valuing lead time. *Journal of Operations Management*, v.32, p. 337-346, 2014.

ERICKSEN, P. D.; STOFLET, N. J.; SURI, R. *Manufacturing Critical-Path Time – The QRM metric for lead time*. Corse Notebook – Department of Industrial and Systems Engineering 641 Class (Design and analysis of Manufacturing Systems). University of Wisconsin at Madison, 2007.

ERICKSEN, P. D.; SURI, R. Managing the Extended Enterprise. *Purchasing Today*, [S.I], v. 12, n. 2, p. 58-63, 2001.

FERNANDES, F. C. F.; GODINHO FILHO, M. *Planejamento e Controle da Produção: dos fundamentos ao essencial*. São Paulo: Atlas, 2010, 296 p.

FILIPPINI, R. Operations management research: some reflections on revolution, models and empirical studies in OM. *International Journal of Operations and Production Management*, v. 17, n. 7 p. 655-670, 1997.

FORRESTER, J. W. *Industrial dynamics*. Portland: Productivity Press, 1961. 464p. (System dynamics series).

GARDINER, S. C.; BLACKSTONE, J. H. The effects of lot sizing and dispatching on customer service in a MRP environment. *Journal of Operations Management*, v. 11, p. 143-159, 1993.

GARVIN, D. A. *Managing Quality*, Harvard Business School, Boston, MA, 1982.

GARVIN, D. A. Manufacturing strategic planning. *California Management Review*, Summer, p. 85-105, 1993.

GAY, L. R.; DIEHL, P. L. *Research Methods for Business and Management*, 1992.

GODINHO FILHO, M.; UTIYAMA, M. H. R. Comparing the effect of different strategies of continuous improvement programmes on repair time to reduce lead time. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, p.1-13, 2016.

GODINHO FILHO, M.; BARCO, C. F. A framework for choosing among different lean-based improvement programs. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 1, p. 1, 2015.

GODINHO FILHO, M; UTIYAMA, M. H. R. Comparing different strategies for the allocation of improvement programmes in a flow shop environment. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 77, p. 1365-1385, 2014.

GODINHO FILHO, M; UZSOY, R. Assessing the impact of alternative continuous improvement programmes in a flow shop using system dynamics. *International Journal of Production Research (Print)*, v. 52, p. 1-18, 2013.

GODINHO FILHO, M.; GUIMARAES, A. A.; OPRIME, P. C. Guiding improvement programs towards lead time reduction in a single-machine environment. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 66, p. 1987-1998, 2013.

GODINHO FILHO, M.; UZSOY, R. Assessing the impact of alternative continuous improvement programmes in a flow shop using system dynamics. *International Journal of Production Research (Print)*, v. 52, p. 1-18, 2013.

GODINHO FILHO, M; UZSOY, R. The impact of simultaneous continuous improvement in setup time and repair time on manufacturing cycle times under uncertain conditions. *International Journal of Production Research (Print)*, v. 1, p. 1-18, 2012.

GODINHO FILHO, M. Effect of lot-size reduction and continuous improvement programmes on work in process and utilisation: a study for single-machine and flow-shop environments. *International Journal of Logistics*, v. 15, p. 285-302, 2012.

GODINHO FILHO, M.; UZSOY, R. The effect of shop floor continuous improvement programs on the lot size–cycle time relationship in a multi-product single-machine environment. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 52, p. 669-681, 2011.

GODINHO FILHO, M.; UZSOY, R. Estudo do efeito de programas de Melhoria Contínua em variáveis do chão de fábrica na relação entre tamanho de lote de produção e lead time. *Gestão e Produção*, vol. 17, n. 1, p. 137-148, 2010.

GODINHO FILHO, M.; UZSOY, R. Efeitos da redução do tamanho de lote e de programas de Melhoria Contínua no Estoque em Processo (WIP) e na Utilização: estudo utilizando uma abordagem híbrida System Dynamics-Factory Physics. *Produção*, v. 19, n. 1, p. 214-224, 2009.

GODINHO FILHO, M.; UZSOY, R. Efeitos da redução do tamanho de lote e de programas de Melhoria Contínua no Estoque em Processo (WIP) e na Utilização: estudo utilizando uma abordagem híbrida System Dynamics-Factory Physics. *Produção*, v. 19, n. 1, p. 214-224, 2009.

GOLDRATT, E. M. Introduction to TOC: my perspective. In: Cox, J.F.; Schleier, J.G. *Theory of Constraints Handbook*. Nova Iorque: Mc Graw Hill, 2010, pag. 3-9.

GOLDRATT, E. M.; ESHKOLI, I.; BROWNLEER, J. *Isn't it obvious?* Great Barrington, MA: North River Press, 2009.

GOLDRATT, E. M. Standing on the shoulders of giants: Production concepts versus production applications, The Hitachi tool engineering example. Bnei Atarot, Israel: *Goldratt Consulting LTD*, 2008, p. 1-22.

GOLDRATT, E. M.; SCHRAGENHEIM, E.; PTAK, C. A. *Necessary but not sufficient*. Great Barrington, MA: North River Press, 2000.

GOLDRATT, E. M. *Critical chain*. Great Barrington, MA: North River Press, 2002, 246 p.

GOLDRATT, E. M. *It's not luck*. Great Barrington, MA: North River Press, 1994, 283 p.

GOLDRATT, E. M. *What Is This Thing Called the Theory of Constraints and How Should It Be Implemented?* North River Press, Croton-on-Hudson, NY, 1990, 162p.

GOLDRATT, E. M. Computerized Shop Floor Scheduling. *International Journal of Production Research*, v. 26, p. 443-455, 1988.

GOLDRATT, E. M.; FOX, R. E. *The race*. Croton-on-Hudson, Nova York: North River Press, 1986, 179p.

GOLDRATT, E. M.; COX, J. *The goal: a process of ongoing improvement*. Great Barrington, MA: North River Press, 30th Anniversary Edition, 2014, 362 p.

GOMEZ-GASQUET, P.; SEGURA-ANDRÉS, R.; ANDRÉS-ROMANO, C. A review of lot streaming in a flow shop environment with makespan criteria. *Journal of Industrial Engineering and Management*, v. 3, n. 6, p. 761-770, 2013.

GLOCK, C. H.; JABER, M. Y. Learning effects and the phenomenon of moving bottlenecks in a two-stage production system. *Applied Mathematical Modelling*, v. 37, p. 8617-8628, 2013.

GUNDOGAR, E.; YILMAZ, A.; ERKAYMAN, B. A solution approach to a synchronisation problem in a JIT production system. *Production, Planning and Control: The Management of Operations*, v. 25, n. 12, p. 990-998, 2014.

GUNER, H. G.; CHINNAM, R. B.; MURAT, A. Simulation platform for anticipative plant-level maintenance decision support system. *International Journal of Production Research*, v. 54, n. 6, p. 1785-1803, 2016.

GUPTA, M. Constraints management – recent advances and practices. *International Journal of Production Research*, v. 41, n. 4, p. 647-659, 2003.

GUPTA, M. C.; BOYD, L. H. Theory of constraints: a theory for operations management. *International Journal of Operations and Production Management*, v. 28, n. 10, p. 991-1012, 2008.

GUPTA, M.; SNYDER, D. Comparing TOC with MRP and JIT: A literature Review. *International Journal of Production Research*, v. 47, p. 3705-3739, 2009.

GUTENBERG, E. Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. Erster Band: *Die Produktion*, Berlin u.a.: Springer-Verlag, 1951.

HELBER, S.E.; SAHLING, F. A fix-optimize approach for the multi-level capacited lot sizing problem. *International Journal of Production Economics*, v. 123, p. 247-256, 2010.

HEVNER, A. R. A Three Cycle View of Design Science Research. *Scandinavian Journal of Information Systems*, v. 19, n. 2, 2007.

HILMOLA, O.P. Transfer batch sizes and the financial performance of manufacturing – theory of constraints perspective. *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, v. 6, n. 1, 2004.

HINES, W. W.; MONTGOMERY, D. C.; DOUGLAS, C.; GOLDSMAN, D. M.; BORROR, C. M. *Probability and Statistics in Engineering*, 4^a ed. Nova York: John Willy, 2003, 655 p.

HOECK, M. A workload control procedure for an FMC integrated in a job shop. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, v. 21, n. 6, p. 666-675, 2008.

HOOP, W. J.; SPEARMAN, M. L. *Factory Physics: Foundations of Manufacturing Management*. 3^a ed. Nova York: McGraw Hill Higher Education, 2008, 720 p.

HOPP, W. J.; SPEARMAN, M. L.; WOODRUFF, D. L. Practical Strategies for lead time reduction. *Manufacturing Perspective*, v. 3, n. 2, 1990.

HOPP, W. J.; SPEARMAN, M. L. *Factory Physics*, 2^a ed. Boston: Irwin McGraw-Hill, 2001.

HOZAC, K.; HILL, J. A. The material handling trade-off when lot splitting with RFID in a job shop. *International Journal of Production Research*, v. 48, n. 9, p. 2723-2743, 2010.

INDUSTRY WEEK. *Manufacturing Hall of Fame 2010: The Dream Team*. Disponível em: http://www.industryweek.com/articles/manufacturing_hall_of_fame_2010_the_dream_team_23230.aspx. Acesso em: 09 de maio de 2012.

IWASE, M.; OHNO, K. The performance evaluation of a multi-stage JIT Production System with Stochastic Demand and Production Capacities. *European Journal of Operational Research*, v. 214, n. 2, p. 216-222, 2011.

JABNOUN, N. Values underlying continuous improvement. *The TQM Magazine*, v. 13, n. 6, p. 381-387, 2001.

JACOBS, F. R.; BRAGG, D. J. Repetitive lots: flow time reduction through sequencing and dynamic batch sizing. *Decision Sciences*, v. 19, p. 281-294, 1988.

JOHNSON, D. A Framework for reducing Manufacturing Throughput Time. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 22, n. 4, 2003.

KADIPASAOGLU, S. N.; XIANG, W.; KHUMAWALA, B. M. Batch scheduling in a multistage, multiproduct manufacturing system – an application. *International Journal of Operations and Production Management*, v. 19, n. 4, p. 421-437, 1999.

KARMAKAR, U. S., et al. *Lot Sizing and Lead Time Performance in a Manufacturing Cell*. Interfaces, v.15, n. 2, p. 1-9, 1985.

KASEMSET, C.; KACHITVICHYANUKUL, V. A PSO-based procedure for a bi-level multi-objective TOC-based job-shop scheduling problem. *International Journal of Operational Research*, v. 14, n. 1, 2012.

KIESMÜLLER G. P.; VAN DER LAAN, E. A. An inventory model with dependent and returns. *International Journal of Production Economics*, v. 72, p. 73-87, 2001.

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

KOO, P. H.; BULFIN, R.; KOH, S. G. Determination of batch size at a bottleneck machine in manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, v. 45, n. 5, p. 1215-1231, 2007.

KRAJWESKI, L. J.; KING, B. E.; RITZMAN, L. P.; WONG, D. S. Kanban, MRP, and shaping the manufacturing environment. *Management Science*, v. 33, n. 1, p. 39-57, 1987.

KRITCHANCHAI, D.; MACCARTHY, B. L. Responsiveness and strategy in manufacturing. *Proceedings of the workshop Responsiveness in Manufacturing*, IEE, London, p. 98-123, 1998.

KROPP, D. H., SMUNT, T. L. Optimal and heuristic models for lot splitting in a flow shop. *Decision Sciences*, v. 21, p. 691–709, 1990.

KULKARNI, P. P.; KSHIRE, S. S.; CHANDRATRE, K. V. Productivity improvement through lean deployment and work study methods, *International Journal of Research in Engineering and Technology*, v. 3, n. 2, p. 429-434, 2014.

MATSUURA, H.; KUROSU, S.; LEHTIMÄKI, A. Concepts, practices and expectations of MRP, JIT and OPT in Finland and Japan. *International Journal of Production Economics*, v. 41, p. 267-272, 1995.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. *Fundamentos de Metodologia Científica*. 3ª ed. São Paulo: Atlas, 1995.

LAMBRECHT, M. R.; IVENS, P. L.; VANDAELE, N. J. ACLIPS: A Capacity and Lead Time Integrated Procedure for Sceduling. *Management Science*, v. 44, n. 11, 1998.

LAPORTE, G.; Louveaux, F. V.; Hamme, L.V. An integer L-Shaped Algorithm for the Capacitated Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands. *Operations Research*, v. 50, n. 3, p. 415-423, 2002.

LI, L. Bottleneck detection of complex manufacturing systems using a data-driven method. *International Journal of Production Research*, v. 47, n. 24, p. 6929-6940, 2009.

LIKER, J. K. *O Modelo Toyota: 14 princípios de gestão do maior fabricante do mundo*. Trad. Lene Belon Ribeiro. Porto Alegre: Bookman, 2005.

LITCHFIELD, J.; NARASIMHAN, R. Improving job shop performance through process queue management under transfer batching. *Production and Operations Management*, v. 9, n. 4, p. 336–348, 2000.

LITTLE, J. C. A Proof of the Queueing Formula $L = W$. *Operations Research*, n. 9, p. 383-387, 1961.

MAPLESOFT. *How Maple™ Compares to Mathematica*. Disponível em <http://www.maplesoft.com/products/maple/compare/HowMapleComparestoMathematica.pdf>. Acesso em: 07 de maio de 2014.

MATTESSICH, R. *Instrumental reasoning and systems methodology*, Reidel Pub. Co, 1978.

MARTEL, A. *La recherche instrumentale sectorielle en sciences de l'administration*. La production des connaissances scientifiques de l'administration/The generation of scientific administrative knowledge. Québec, Les Presses de l'Université Laval, 1986.

MARTINS, R. A. Abordagens quantitativa e qualitativa. In: MIGUEL, Paulo A.M (org). *Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações*. Rio de Janeiro: Elsevier, p. 45-61, 2010.

MILLSTEIN, M. A.; MARTINICH, J. S. Takt Time Grouping: implementing kanban-flow manufacturing in an unbalanced, high variation cycle-time process with moving constraints. *International Journal of Production Research*, v. 52, n. 23, p. 6863-6877, 2014.

MEERKOV, S. M.; ZHANG, L. Product quality inspection in Bernoulli lines: analysis, bottlenecks, and design. *International Journal of Production Research*, v. 48, n. 16, p.4745-4766, 2010.

MEREDITH, J. R.; RATURI, A. AMOAKO-GYAMPAH, K.; KAPLAN, B. Alternative research paradigms in operations. *Journal of Operations Management*, v. 8, p. 297-326, 1989.

MISTEREK, S. A.; ANDERSON, J. C.; DOOLEY, K. J. The strategic nature of process quality. *Proceedings of the National Decision Science Institute Conference*, p. 1517-1519, 1990.

MOHAMMADI, H.; GHAZANFARI, M.; NOZARI, H.; SHAFIEZAD, O. Combining the theory of constraints with system dynamics: A general model (case study of the subsidized milk industry). *International Journal of Management Science and Engineering Management*, v. 10, n. 2, p. 102-108, 2015.

MONDEN, Y. A simulation analysis of the Japanese just-in-time technique (with kanbans) for multiline, multistage production systems: a comment. *Decision Science*, v. 15, p. 445-447, 1984.

MONDEN, Y. *Toyota Production System: an Integrated Approach to Just-In-Time*, 2^a ed. Industrial Engineering and Management Press, Norcross, 1993.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C.; HUBELE, N. F. *Estatística aplicada à Engenharia*. Rio de Janeiro: LTC, 2004, 335 p.

MORABITO, R.; PUREZA, V. Modelagem e simulação. In: MIGUEL, Paulo A.M (org). *Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações*. Rio de Janeiro: Elsevier, p. 165-194, 2010.

MUCHIRI, P. N.; PINTELON, L.; MARTINI, H.; CHEMWENO, P. Modelling maintenance effects on manufacturing equipment performance: results from simulation analysis. *International Journal of Production Research*, DOI: [10.1080/00207543.2013.870673](https://doi.org/10.1080/00207543.2013.870673), 2013.

MUTHIAH, K. M. N.; HUANG, S. H. Overall throughput effectiveness (OTE) metric for factory-level performance monitoring and bottleneck detection. *International Journal of Production Research*, v. 45, n. 20, p. 4753-4769, 2007.

NAOR, M.; BERNARDES, E. S. COMAN, E. A. Theory of constraints: is it a theory and a good one? *International Journal of Production Research*, v. 51, n. 2, p. 542-554, 2013.

NEIL, M.; MARQUEZ, D. Availability modeling of repairable systems using Bayesian networks. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v. 25, p. 698-704, 2012.

NEUMAN, W. L. *Social research methods: qualitative and quantitative approaches*. 5^a ed. Boston: Allyn and Bacon, 2003. 584 p.

NEWMAN, W.R.; HANNA, M.; MAFFEI, M. J. Dealing with the Uncertainties of Manufacturing: Flexibility, Buffers and Integration. *International Journal of Operations and Production Management*, v. 13, n. 1, p. 19-34, 1993.

OLIVER, N.; DELBRIDGE, R.; LOWE, J. Lean production practices: International comparisons in the auto components industry [Special issue]. *British Journal of Management*, v. 7, p. 29-44, 1996.

OHNO, T. *O sistema Toyota de Produção: além da produção em larga escala*. Porto Alegre: Bookman, 1997.

PARASURAMAN, A.; ZEITHAML, V. A.; BERRY, L. L. A conceptual model for service quality and its implications for future research. *Journal of Marketing*, v. 19, p. 41-50, 1985.

PEGELS, C. C.; WATROUS, C. Application of the theory of constraints to a bottleneck operation in a manufacturing plant. *Journal of Manufacturing Technology Management*, v. 16, n. 3, p. 302-311, 2005.

PENTILLÄ, M.J. *Reducing variability in a semiconductor manufacturing environment*. 2005. 76f. Dissertação de mestrado (Mestrado em engenharia elétrica e Ciência da Computação). Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology, 2005.

PINTO, P. A.; RAO, B. M. Joint lot sizing and scheduling for multi-stage multi-product flow shop. *International Journal of Production Research*, v. 30, n. 5, p. 1137-1152, 1992.

REITER, S. A system for managing job shop production. *Journal of Business*, v. 34, p. 371-393, 1966.

REZG, N.; XIE, X.; MATI, Y. Joint optimization of preventive maintenance and inventory control in a production line using simulation. *International Journal of Production Research*, v. 42, n. 10, p. 2029-2046, 2004.

RIEZEBOS, J. Shop Floor Planning and Controle in Team-based Work Processes. *International Journal of Industrial Engineering and Management*, v. 4, n. 2, p. 51-56, 2013.

RIZK, N.; MARTEL, A.; D'AMOURS, S. Synchronized production-distribution planning in a single-plant multi-destination network. *Journal of the Operational Research Society*, v. 59, p. 90-104, 2008.

RONEN, B.; STARR, M. K. Synchronized manufacturing as in OPT: from practice to theory. *Computers and Industrial Engineering*, v. 18, n. 4, p. 585-600, 1990.

RUBEN, R. A. MAHMOODI, F. Lot Splitting in Unbalanced Production Systems. *Decision Sciences*, v. 29, n. 4, p. 921-949, 1998.

RUBEN, R. A.; MAHMOOD, F. Lead time prediction in unbalanced production systems. *International Journal of Production Research*, v. 38, n. 7, p. 1711-1729, 2000.

SAES, E. V. *Quick Response Manufacturing (QRM) uma alternativa para redução do lead time na área produtiva de uma empresa de materiais de escrita*. 2010. 209 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos, 2010.

SAFAEI, N.; BANJEVIC, D.; JARDINE, A. K. S. Impact of the use-based maintenance policy on the performance of cellular manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, v. 48, n. 8, p. 2233-2260, 2010.

SCHOEMIG, A. K. On the corrupting influence of variability in semiconductor manufacturing. *Winter Simulation Conference*, v. 1, p. 837-842, 1999.

SCHONBERGER, R. J., *Japanese Manufacturing Techniques: Nine Hidden Lessons in Simplicity*, New York: Free Press, 1982.

SCHULTHEISSE, J.; KREUTZFELDT, J. Performance improvement in production systems through practice-oriented bottleneck management. In: 4th European Conference on Technology Management, 6-8 September 2009, Glasgow, Scotland. *Proceedings...* Glasgow, Scotland, 2009.

SEKINE, K. *One-piece flow: Cell Design for transforming the Production Process*. Portland: Productivity Press, 1992, 286 p.

SHINGO, S. *Sistemas de produção com estoque zero: o sistema Shingo para Melhorias Contínuas*. Porto Alegre: Bookman, 1996, 380p.

SHINGO, S. *A Revolution in Manufacturing: The SMED System*. Cambridge: Productivity Press, 1986.

SIPPER, D.; BULFIN JR.; R. L. *Production: Planning, Control and Integration*, New York: Mc Graw Hill, 1997.

SPEAR, S.; BOWEN, H. K. Decoding the DNA of the Toyota Production System. *Harvard Business Review*, v. 77, n. 5, p. 96–106, 1999.

STALK, G. J.; HOUT, T. M. *Competing against Time: how Time-based Competition is Reshaping Global Markets*, The Free Press: New York, NY, 1990.

STANDRIDGE, C. R. How Factory Physics helps simulation. In: Winter Simulation Conference, 2004, Washington D.C, *Anais...*Washington, 2004, p. 1104-1108.

STEELE, D. C.; MALHOTRA, M. K. Factors affecting performance of period batch control systems in cellular manufacturing. *International Journal of Production Research*, v. 35, n. 2, p. 421-446, 1997.

STEIN, R. E. *The theory of constraints: applications in quality and manufacturing*. 2^a ed. Nova York: Marcel Dekker, Inc., 1997.

STERMAN, J.D. *Business Dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*. Boston: Irwin McGraw- Hill, 2000, 982 p.

SURI, R. *It's About Time: the competitive advantage of Quick Response Manufacturing*. New York: Productivity Press, 2010, 207 p.

SURI, R. *Quick Response Manufacturing: a companywide approach to reducing lead times*. Portland: Productivity Press, 1998, 545 p.

TEUNTER, R. H.; HANEVELD, W. K. K. Dynamic inventory rationing strategies for inventory systems with two demand classes, Poisson demand and backordering. *European Journal of Operational Research*, v. 190, p. 156-178, 2008.

THÜRER, M. et al. Lean Control for Make-to-Order Companies: Integrating Customer Enquiry Management and Order Release. *Production and Operations Management Society*, DOI 10.1111/poms.12058, p. 1-14, 2013.

TREVILLE, S. D., et al. From supply chain to demand chain: the role of lead time reduction in improving demand chain performance. *Journal of Operations Management*, v. 21, p. 613-627, 2004.

TRIETSCH, D. Polynomial transfer lot sizing techniques for batch processing on consecutive machines. *Technical Report NPS -54-89-011*, Naval Postgraduate School, Monterey, CA, 1989. 61 p.

TUNC, E. A.; GUPTA, J. N. D. Is time a competitive weapon among manufacturing firms? *International Journal of Operations and Production Management*, v. 13, n. 3, p. 4-12, 1993.

UTIYAMA, M. H. R. *Estudo de alocação de programas em um ambiente flow shop para redução do lead time*. 2012. 126f. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de São Carlos, 2012.

VAISHNAVI, V.; KUECHLER, W. Design Science Research in Information Systems, 2004. Disponível em: <http://www.desrist.org/design-research-in-information-systems/>. Acesso em : 15 de novembro de 2015.

VANDAELE, N.; BOECK, L. D. Advanced Resource Planning. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, v. 19, p. 211-218, 2003.

VAN NIEUWENHUYSE, I.; VANDAELE, N. Determining the optimal number of sublots in a single-product, deterministic flow shop with overlapping operations. *International Journal of Production Economics*, v. 92, p. 221-239, 2004.

VOLLMAN, T. E.; BERRY, W. L.; WHYBARK, D. C. *Manufacturing Planning and Control Systems*, 4th ed., McGraw-Hill, 1997.

WAGNER, B. J.; RAGATZ, G. L. The impact of lot splitting on due date performance. *Journal of Operations Management*, v. 12, p. 13-25, 1994.

WATSON, K. J.; BLACKSTONE, J. H.; GARDINER, S. C. The evolution of a management philosophy: The theory of constraints. *Journal of Operations Management*, v. 25, p. 387-40, 2007.

WAZED, M. A.; AHMED, S.; NUKMAN, Y. Application of Taguchi method to analyze the impacts of commonalities in multistage production under bottleneck and uncertainty. *International Journal of the Physical Sciences*, v. 5, n. 10, p. 1576-1591, 2010.

WAZED, M. A.; AHMED, S.; NUKMAN, Y. Impacts of quality and processing time uncertainties in multistage production system. *International Journal of the Physical Sciences*, v. 5, n. 6, p. 814-825, 2010.

WOMACK, J. P.; JONES, D. T. *A mentalidade Enxuta nas empresas*. Ed. Campus, 5^a ed., 1998.

WOMACK, J. P.; JONES, D. T.; ROOS, D. *The machine that changed the world: the story of lean production*, New York: Harper Collins, 1991.

WU, N. L. Understanding Production Systems through Human Simulation: Experiencing JIC (Just-in-case) JIT (Just-in-time) and OPT (Optimized-Production-Technology) Production Systems. *International Journal of Operations and Production Management*, v. 9, n. 1, p. 27-34, 1989.

ZHAO, C.; LI, J. Analysis and improvement of multi-product assembly systems: an application study at a furniture manufacturing plant. *International Journal of Production Research*, v. 52, n. 21, p. 6399-6413, 2014.