

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

CLARISSA FULLIN BARCO

**MÉTODO PARA PRIORIZAÇÃO DE PROGRAMAS DE MELHORIA
CONTÍNUA EM UM AMBIENTE DE MÁQUINA ÚNICA: PROPOSTA E
APLICAÇÃO**

**SÃO CARLOS
2013**

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

CLARISSA FULLIN BARCO

**MÉTODO PARA PRIORIZAÇÃO DE PROGRAMAS DE MELHORIA
CONTÍNUA EM UM AMBIENTE DE MÁQUINA ÚNICA: PROPOSTA E
APLICAÇÃO**

Dissertação 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 Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Moacir Godinho Filho

**SÃO CARLOS
2013**

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

B244mp Barco, Clarissa Fullin.
Método para priorização de programas de melhoria contínua em um ambiente de máquina única : proposta e aplicação / Clarissa Fullin Barco. -- São Carlos : UFSCar, 2013.
118 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2013.

1. Planejamento da produção. 2. Redução de *lead time*. 3. *Factory physics*. 4. Dinâmica de sistemas. I. Título.

CDD: 658.5 (20^a)




PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
Rod. Washington Luís, Km. 235 - CEP. 13565-905 - São Carlos - SP - Brasil
Fone/Fax: (016) 3351-8236 / 3351-8237 / 3351-8238 (ramal: 232)
Email : ppgep@dep.ufscar.br

FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno(a): Clarissa Fullin Barco

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DEFENDIDA E APROVADA EM 04/03/2013 PELA
COMISSÃO JULGADORA:



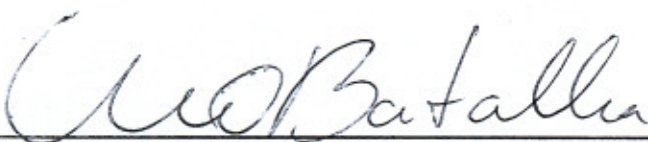
Prof. Dr. Moacir Godinho Filho
Orientador(a) PPGE/UFSCar



Prof. Dr. Gilberto Miller Devós Ganga
PPGE/UFSCar



Prof. Dr. Antônio Freitas Rentes
EESC/USP



Prof. Dr. Mário Otávio Batalha
Coordenador do PPGE

Aos meus pais Iris e Nelson,

Aos meus irmãos Euripedes, Túlio Henrique (*in memoriam*), Julyana e Ana Luiza.

Agradecimentos

Ao Professor Orientador Moacir Godinho Filho, pela paciência, pelos ensinamentos desde a graduação, por me inspirar na carreira de docente e pesquisadora e pelo constante otimismo, ao qual aprendi a me apegar.

Aos Professores Antônio Freitas Rentes e Gilberto Miller Devós Ganga pelas valiosas contribuições à melhoria desse trabalho.

À CAPES pelo apoio financeiro a esta pesquisa. A todos os funcionários do DEP pela ajuda e solicitude. Sou grata também aos Professores do DEP, em especial ao Edemilson, ao Roberto Tavares, à Andrea Lago, ao Flávio Fernandes, pelos ensinamentos e contribuições à minha formação no mestrado e ao querido Professor Sérgio, por seu apoio e amizade.

Às minhas companheiras de jornada no mestrado: Márcia, Lourdes, Carla e, em especial, à Marina, pela amizade que se tornou irmandade. Aos colegas Marcel, Richard e, especialmente, ao Thiago Palaçon pela imensa ajuda prestada no Estudo de Caso.

À minha professora de Yoga, Sylvia, pelos ensinamentos, por me proporcionar meios de buscar conhecimento pessoal, pela paciência com meu *Shirshásana* e também pelas risadas.

À Equipe de *Muay Thai* Ronildo Moura, em especial aos atletas Anderson Machado e ao Thiago Torres pelos exemplos de superação, garra e disciplina nos treinos e na vida.

Aos meus tios e primos pela colaboração com o meu crescimento pessoal.

Aos meus amigos de graduação, aos amigos do PET e demais amigos que passaram pela minha vida e me deixaram tantas contribuições.

Aos meus pais pela incansável dedicação, amor, paciência na minha formação como ser humano e por serem a minha referência diária de força e caráter.

Aos meus irmãos, pelas alegrias, por me proporcionarem infinitas oportunidades de aprendizado, pelo amor e apoio ao longo de toda a minha vida.

Ao Ronildo, pelo companheirismo, pela amizade, pelo amor e por proporcionar um novo sentido à minha vida.

A Deus, pela oportunidade da vida.

*Você pode encarar um erro como uma besteira a ser esquecida,
ou como um resultado que aponta uma nova direção.*

Steve Jobs

Resumo

A responsividade tem sido considerada pelas empresas um critério competitivo, na tentativa de atender ao mercado atual, que exige simultaneamente qualidade, agilidade, pontualidade e customização. Assim, a redução do *lead time* se torna um tema estratégico para a gerência da produção, sendo que, ações de melhorias para a redução do *lead time* têm sido abordadas destacadamente pelo *Lean Manufacturing* e pelo *Quick Response Manufacturing*. Estudos sobre melhorias em variáveis do chão de fábrica com o objetivo de reduzir o *lead time* foram abordados em inúmeros estudos, como por exemplo, no trabalho de Godinho Filho e Uzsoy (2008a). Devido às restrições de recursos existentes na prática, surge a necessidade de se investigar qual variável pode ser priorizada na elaboração de projetos de melhoria, devido ao seu potencial de redução do *lead time*. Para tanto, o presente trabalho visa atender a essa lacuna da literatura e do meio empresarial, ampliando o trabalho de Godinho Filho e Uzsoy (2008a) e propondo um método para a seleção de programas de melhoria que objetivem a redução do *lead time*. Para atingir esse objetivo, foi realizada uma análise da literatura, um estudo de caso em uma empresa do setor aeronáutico, assim como simulações utilizando um modelo criado a partir das abordagens *System Dynamics* e *Factory Physics*. Além de delinear a questão de pesquisa desse trabalho, o estudo de caso visa apresentar ao leitor uma aplicação do método aqui proposto. Assim, para o ambiente estudado, ou seja, uma máquina única gargalo de um processo de usinagem, o resultado da aplicação dos sete passos do método foi a potencial melhoria de 84,63% no *lead time*, que pode ser obtida com um projeto de melhoria de 1373% no tempo médio entre falhas, demandando um esforço de 5880 h. Como uma alternativa para a empresa, uma redução de 34,76% no *lead time* também seria possível por meio do investimento de 1960h de trabalho para uma melhoria de 72% no coeficiente de variação do tempo de reparo.

Palavras-chave: *Lead time*, variáveis de chão-de-fábrica, *Factory Physics*, *System Dynamics*.

Abstract

Companies have been considering the responsiveness as a competitive criterion, trying to meet current market that requires simultaneously quality, efficiency, punctuality and customization. So, the lead time reduction becomes a strategic issue for the manufacturing management, considering that improvement programs on lead time reduction have been widely approached by Lean Manufacturing and Quick Response Manufacturing. Studies on improvements on shop floor parameters in order to reduce the lead time were addressed in numerous studies, such as the work of Godinho Filho and Uzsoy (2008a). Due to resource constraints existing in practice, there is a need to investigate which variable can be prioritized in the development of improvement projects, due to their potential for reducing the lead time. Therefore, this study aims to address this gap in the literature and from the business, expanding Godinho Filho and Uzsoy (2008a) work and proposing a method for selecting improvement programs aimed at reducing the lead time. To achieve this goal, we conducted a literature review, a case study on a company of the aviation industry, as well as simulations using a model created from the System Dynamics approach and Factory Physics. In addition to outlining the research question of this work, the case study aims to present to the reader an application of the method proposed. Thus, for the environment studied, i.e. a bottleneck single machine of a machining process, the result of applying the seven steps of the method was the potential improvement of 84.63% on lead time, which can be obtained with a design 1373% improvement in mean time between failures, requiring an effort of 5880 h. As an alternative to the company, a 34.76% reduction in lead time would also be possible through the investment of 1960h working for an improvement of 72% in the coefficient of variation of the repair time.

Keywords: *Lead time, shop floor parameters, Factory Physics, System Dynamics.*

Lista de ilustrações

FIGURA 1.1: Ilustração da utilização do estudo de caso em dois momentos da pesquisa.....	21
FIGURA 2.1: Diagrama que ilustra os fatores que influenciam o modelo Godinho Filho e Uzsoy (2008a).....	29
FIGURA 2.2: Representação no <i>software</i> Vensim de parte do modelo Godinho Filho e Uzsoy (2008a).....	36
FIGURA 2.3: Recorte do modelo Godinho Filho e Uzsoy (2008a).....	37
FIGURA 2.4: Estrutura modelada para representar a melhoria no tempo médio até a falha.....	38
FIGURA 2.5: Modelo Godinho Filho e Uzsoy, representando os relacionamentos entre as variáveis de um sistema de máquina única.....	39
FIGURA 2.6: Ilustração da relação entre tamanho de lote de produção e <i>lead time</i> médio.....	41
FIGURA 2.7: Formato básico de uma curva de operação logística.....	44
FIGURA 3.2: O método proposto para a priorização de projetos de melhoria.....	54
FIGURA 4.1: As etapas principais do processo de fabricação de móveis para aeronaves executivas.....	57
FIGURA 4.2: Protocolo de entrevista inicial para escolha da empresa estudada.....	58
FIGURA 4.3: Estações de trabalho envolvidas na etapa de usinagem de peças constituintes dos móveis para aviação executiva.....	59
FIGURA 4.4: Ilustração do conceito de <i>lead time</i> focal abordado no trabalho.....	60
FIGURA 4.5: Representação da fila de placas anterior ao processamento na máquina gargalo.....	63
FIGURA 4.6: Valores da taxa média de defeitos após melhorias ao longo do período simulado.....	67
FIGURA 4.7: Valores do tempo de <i>set up</i> após melhorias ao longo do período simulado.....	68
FIGURA 4.8: Valores do tempo médio de reparo após melhorias ao longo do período simulado.....	69
FIGURA 4.9: Melhoria na variabilidade do tempo médio de reparo ao longo do tempo.....	69
FIGURA 4.10: Melhoria na variabilidade do tempo de <i>set up</i> ao longo do tempo simulado.....	70
FIGURA 4.11: Melhoria na variabilidade do tempo natural de processamento ao longo do tempo....	71
FIGURA 4.12: Melhoria na variabilidade do tempo entre chegadas ao longo do tempo simulado.....	71
FIGURA 4.13: Melhoria no tempo médio entre falhas ao longo do tempo simulado.....	72

FIGURA A1: <i>Loop</i> contendo <i>feedback</i> positivo. Três representações possíveis: sinal positivo, um desenho de bola de neve ou letra R.....	92
FIGURA A2: Exemplo de <i>feedback</i> positivo.....	93
FIGURA A3: <i>Loop</i> contendo <i>feedback</i> negativo. Três representações possíveis: sinal negativo, um desenho de balança ou letra E.....	93
FIGURA A4: Exemplo de <i>loop</i> de equilíbrio.....	94
FIGURA A5: Representação de estoques fluxos e conector no <i>software</i> Vensim.....	95
FIGURA A6: Etapas do processo de modelagem.....	96
FIGURA A7: Evolução ao longo do tempo dos trabalhos de SD aplicados a Gestão da Produção. No total, 48 trabalhos foram analisados.....	97
FIGURA A8: Distribuição dos trabalhos por área da Gestão da Produção.....	97
FIGURA B1: Curva LACTE.....	109
FIGURA B2: Curva LACTE (antes e depois de uma redução na variabilidade).....	110
FIGURA B3: Curva Lucro <i>versus</i> utilização.....	111

Lista de Tabelas e Quadros

TABELA 4.1: Valores médios das variáveis que impactam na redução do <i>lead time</i>	62
TABELA 4.2: Valores de alguns parâmetros da empresa estudada.....	62
TABELA 4.3: Valores fornecidos pela empresa sobre as magnitudes possíveis de serem atingidas e suas respectivas escalas de dificuldade.....	64
TABELA 4.4: Tempos de ajuste e tempos de meia-vida para obtenção de melhoria, dado em horas, para cada variável estudada.....	66
TABELA 4.5: Valores obtidos nas simulações a partir das melhorias realizadas.....	72
QUADRO 1.1: Classificação da pesquisa e síntese dos métodos escolhidos para o seu desenvolvimento.....	25
QUADRO 3.1: Dados necessários para a obtenção das variáveis que servem de <i>input</i> para a etapa de simulação.....	51
QUADRO 3.2: Utilização de curvas para descrever melhorias em variáveis do chão-de-fábrica.....	52
QUADRO A1: As principais características de sistemas complexos.....	89
QUADRO A2: Os princípios da teoria de <i>System Dynamics</i>	91
QUADRO B1: As variáveis de chão-de-fábrica que impactam na redução do <i>lead time</i>	108
QUADRO B2: Alternativas sugeridas para a redução do <i>flow time</i>	112
QUADRO B3: Caminhos para redução do <i>lead time</i> excessivo da estação de trabalho – redução do tempo de movimentação.....	113
QUADRO B4: Caminhos para redução do <i>lead time</i> excessivo da estação de trabalho – redução do tempo de espera pelo lote.....	113
QUADRO B5: Caminhos para redução do <i>lead time</i> excessivo da estação de trabalho – redução do tempo de espera pelo encontro na montagem.....	114
QUADRO B6: Caminhos para redução do <i>lead time</i> excessivo da estação de trabalho – redução do efeito das filas.....	115
QUADRO B7: Caminhos para redução do <i>lead time</i> excessivo da estação de trabalho – redução do retrabalho.....	116
QUADRO B8: Categorias das possíveis expansões para o modelo Godinho Filho e Uzsoy (2008a).....	117

Lista de Abreviaturas e Siglas

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

CV - Coeficiente de Variação

DOE - Projeto de Experimentos (do inglês, *Design Of Experiments*)

FP - *Factory Physics*

LT - *Lead Time*

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

QRM - *Quick Response Manufacturing*

SD -*System Dynamics*

SMED - em tradução aproximada, troca rápida de ferramentas (do inglês, *Single Minute Exchange of Die*)

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

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	13
1.1 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO	13
1.2 QUESTÕES DE PESQUISA E OBJETIVO DO TRABALHO	15
1.3 METODOLOGIA DE PESQUISA.....	17
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	25
CAPÍTULO 2: O MODELO DE GODINHO FILHO E UZSOY (2008A)	26
2.1 CONTEXTO	26
2.2 ORIGEM.....	27
2.3 LÓGICA DE FUNCIONAMENTO.....	29
2.4 RESULTADOS OBTIDOS COM O MODELO DE GODINHO FILHO E UZSOY (2008A)	40
CAPÍTULO 3: MÉTODO PARA SELEÇÃO DE PROGRAMAS DE MELHORIA COM FOCO NA REDUÇÃO DO <i>LEAD TIME</i>	49
3.1 O PROBLEMA DE PESQUISA	49
3.2 O MÉTODO PROPOSTO PARA A PRIORIZAÇÃO DE PROJETOS DE MELHORIA	50
CAPÍTULO 4: APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO	55
4.1 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA	55
4.1.1 O PROCESSO DE FABRICAÇÃO	55
4.1.2 O PROCESSO DE FABRICAÇÃO DOS MÓVEIS	56
4.2 PROTOCOLO DE ENTREVISTA	57
4.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO	58
4.3.1 SELEÇÃO DO AMBIENTE DE PRODUÇÃO A SER ESTUDADO (PASSO 1)	59
4.3.2 IDENTIFICAÇÃO DAS VARIÁVEIS QUE IMPACTAM NA REDUÇÃO DO LT(PASSO 2)	61
4.3.3 COLETA DE DADOS GERAIS DA MÁQUINA ESTUDADA (PASSO 3).....	61
4.3.4 ESTIMATIVA DA DIFICULDADE E MAGNITUDE POSSÍVEIS DAS MELHORIAS (PASSO4) ...	64
4.3.5 INSERIR OS DADOS COLETADOS NAS SIMULAÇÕES UTILIZANDO O MODELO GODINHO FILHO E UZSOY (2008 ^a) (PASSO 5)	66
4.3.6 ANÁLISE DOS <i>OUTPUTS</i> DA SIMULAÇÃO REALIZADA (PASSO 6)	67
4.3.7 IDENTIFICAÇÃO DA VARIÁVEL QUE PERMITE REDUÇÃO DO <i>LEAD TIME</i> COM MENOR ESFORÇO (PASSO 7).....	73
CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES	76
REFERÊNCIAS	78

ANEXO A –FUNDAMENTOS BÁSICOS SOBRE AS TEORIAS <i>SYSTEM DYNAMICS</i>, <i>FACTORY PHYSICS</i> E <i>QUICK RESPONSE MANUFACTURING</i>	86
ANEXO B –POSSÍVEIS EXTENSÕES PARA O MODELO GODINHO FILHO E UZSOY (2008A).....	107

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

Na busca por um destaque no mercado, uma empresa deve desenvolver, ao longo do tempo, vantagens competitivas que sejam sustentáveis no universo em que está inserida. Para isso, de acordo com Andrews (1996), um determinado padrão de decisões deve ser definido pela empresa para que esta revele objetivos, propostas e metas, e também desenvolva políticas e planos para alcançar os resultados almejados. De acordo com Gonzalez et al. (2005), o modelo resultante da estratégia de uma empresa define as características centrais da organização, traçando a posição que ela ocupará no mercado. Tais características e posição dependem de uma série de decisões de caráter administrativo, envolvendo essencialmente a estratégia de produção ou de operações.

Segundo Slack, Chambers e Johnston (2002), a estratégia de produção de uma empresa é determinada principalmente pela função produção que governa o conjunto de políticas, planos e comportamentos cotidianos estabelecidos pela estratégia de operações. Dessa forma, uma empresa pode explorar sua função produção de forma a obter vantagem competitiva em relação a seus concorrentes.

É dentro do contexto da função produção que Godinho Filho e Fernandes (2005) destacam que, na moderna literatura de Gestão da Produção, muitos são os paradigmas que se apresentam no intuito de ajudar as empresas a obterem vantagens competitivas. Segundo esses autores, um dos mais recentes Paradigmas Estratégicos de Gestão da Manufatura (PEGEM) que tem se destacado é a Competição Baseada no Tempo (do inglês, *Time-Based Competition- TBC*), também denominada Manufatura Responsiva por Kritchanhai e MacCarthy (1998). Primeiramente proposta por Stalk e Hout (1990), a TBC enfatiza a redução do tempo de desenvolvimento do produto e também do tempo de produção. Tais reduções, segundo Booth (1996), são fatores-chave para o aumento da competitividade de uma empresa.

De acordo com Suri (1998), o tempo tem sido considerado pelas empresas um critério competitivo, na tentativa de atender ao mercado atual: exigente em múltiplos aspectos tais como qualidade, agilidade, pontualidade e customização. Assim, a redução do *lead time* se

torna um tema de importância para a gerência da produção, o que também motiva sua exploração na presente pesquisa.

Apesar de o objetivo competitivo ser bastante claro, ou seja, as empresas visarem atender os clientes em menos tempo, de forma a colher os benefícios de um baixo *lead time* é importante se destacar a definição desse conceito. Do ponto de vista global (ou seja, considerando toda a empresa) 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. E o caminho crítico pode consistir em suprimento, fabricação, distribuição e entrega, por exemplo.

Assim, dentro do escopo das atividades do chão-de-fábrica e considerando que este trabalho visa estudar um ambiente de máquina única, se faz necessário definir o conceito de *lead time* focal. Para uma máquina gargalo, o *lead time* focal da fabricação será a soma entre o tempo de processamento e o tempo de espera antes desta máquina. Assim, se a máquina única estudada for a máquina gargalo, os esforços empenhados na redução do *lead time* focal irão se refletir na redução do *lead time* global.

Ações de melhorias para a redução do *lead time* têm sido abordadas destacadamente pelo *Lean Manufacturing* (WOMACK; JONES, 1998; LIKER, 2004) e pelo *Quick Response Manufacturing* (SURI, 1998, 2010). Nestes dois paradigmas de gestão, algumas das ferramentas usualmente associadas à redução do *lead time* são: fluxo contínuo (*one-piece flow*), *takt time*, sistema kanban, seis sigma, métodos *poka yoke*, SMED (*Single Minute Exchange of Die*), TPM (*Total Productive Maintenance*), redução do tamanho de lote, manufatura celular, dentre muitas outras. Essas ferramentas basicamente melhoram algumas variáveis do chão de fábrica (como tempo de *setup*, tempo de reparo, tempo entre falhas) e essas, por sua vez, contribuem diretamente para a redução do *lead time*.

Apesar de haver uma série de estudos na literatura a respeito dessas ferramentas e variáveis, existem poucos trabalhos, de acordo com Godinho Filho e Uzsoy (2008a), que auxiliem os gerentes de produção na prática a prever o efeito positivo no *lead time* da implantação de ações de melhorias em variáveis do chão de fábrica. Esse fato dificulta, de acordo com Suri (1998) e Ericksen et al. (2007), a tomada de decisão com relação à escolha

de ferramentas e ações a serem implantadas com o intuito fundamental de redução do *lead time*.

Alguns trabalhos buscam preencher essa lacuna. É o caso de Hopp et al. (2009), que propuseram uma árvore de diagnóstico que auxilia os gerentes de produção a melhor entender as ligações entre melhorias em certas variáveis do chão de fábrica e alguns indicadores de desempenho, tais como *lead time*, custo, qualidade, dentre outros. Godinho Filho e Uzsoy (2008a) propuseram um modelo que utiliza de forma híbrida as abordagens *System Dynamics* (FORRESTER, 1962) e *Factory Physics* (HOPP; SPEARMAN, 2008) para investigar o relacionamento entre variáveis de chão-de-fábrica e *lead time*. Em outras palavras, o modelo desses autores apresenta o efeito no *lead time* da implantação de ações de melhoria em seis variáveis do chão de fábrica, 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.

Além do estudo de melhorias em variáveis do chão de fábrica com o objetivo de reduzir o *lead time* (tema amplamente abordado em Godinho Filho e Uzsoy (2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011a, 2011b, 2012) e Godinho Filho (2008, 2012) se faz necessária ainda, a investigação de como priorizar ou escolher um programa de melhoria em detrimento aos demais possíveis. Isso se deve ao fato de que, na prática, existe uma restrição de recursos (como capital, tempo, pessoal, dentre outras) destinados à implementação de melhorias. Dessa forma, priorizar dentre várias opções de melhoria é uma tarefa vital no atual ambiente competitivo.

Assim, este trabalho pretende amenizar essa carência da literatura e do meio empresarial, na medida em que visa utilizar o modelo proposto por Godinho Filho e Uzsoy (2008a) em uma aplicação prática. A principal contribuição do presente trabalho constitui no desenvolvimento de um método para a priorização de programas de melhoria contínua em um ambiente de máquina única e na sua aplicação em uma empresa do setor aeronáutico.

1.2 QUESTÕES DE PESQUISA E OBJETIVO DO TRABALHO

Este trabalho objetiva propor um método que auxilie as empresas em tomadas de decisão relativas a projetos de melhoria que almejem a redução do *lead time*. Projetos de melhoria envolvem a alteração das variáveis do ambiente de manufatura em diferentes escala

de necessidade e ainda com diferentes potenciais de obtenção de resultados. No entanto, no presente trabalho entende-se melhoria como alterações, em determinadas variáveis do chão-de-fábrica, que provoquem um impacto positivo na redução do *lead time*. Devido à limitação de recursos existente em um ambiente produtivo, a gerência da produção se depara, frequentemente, com a necessidade de escolher qual projeto concentrará seus esforços para melhoria. Assim, antes da elaboração de um projeto de melhoria é essencial que os tomadores de decisão conheçam, para o sistema de produção estudado, qual a variável que tem o maior impacto na redução do *lead time*. A partir disso, programas de melhoria contínua podem ser elaborados com o intuito de se atingir maior responsividade.

Dessa forma, a principal questão de pesquisa a ser respondida por meio do presente trabalho é:

Que variáveis do chão-de-fábrica tem maior impacto na redução do *lead time* de uma máquina única considerada gargalo?

Para fins dessa pesquisa, as variáveis de chão-de-fábrica consideradas são: i) variabilidade no tempo de processamento, ii) variabilidade na chegada das ordens, iii) tempo médio de *set up*, iv) tempo médio de reparo, v) tempo médio entre falhas e vi) taxa média de defeitos. Tais variáveis são um resultado da análise da literatura e, em particular, uma análise mais detalhada da teoria *Factory Physics*, que fornece a relação matemática entre essas variáveis e o *lead time*. As relações matemáticas advindas dessa teoria tornam viável uma análise quantitativa da relação entre cada variável e a medida de desempenho foco, ou seja, o *lead time*. As equações que relacionam as seis variáveis com o *lead time* são uma forte contribuição do *Factory Physics* para o modelo Godinho Filho e Uzsoy (2008a) assim como para este trabalho.

Em relação ao ambiente produtivo, os programas de melhoria podem ser aplicados a um sistema *job shop*, *flow shop*, manufatura celular, dentre outros. No entanto, neste trabalho delimitou-se o ambiente produtivo a um ambiente de máquina única, onde esta representa o gargalo do sistema produtivo estudado. Embora ambientes produtivos reais possam ser caracterizados por uma maior complexidade (em termos de número de máquinas e de fluxo de materiais e informações), a análise de um sistema de máquina única, onde esta seja o gargalo, proporciona contribuições para a gerência da manufatura. Como o gargalo dita o ritmo do sistema produtivo como um todo, melhorias realizadas em tal ponto serão melhorias aplicadas a todo o ambiente produtivo.

A partir de tal questão de pesquisa, surge o objetivo central do presente trabalho:

Propor um procedimento que auxilie os meios corporativo e acadêmico na escolha da variável do chão-de-fábrica que proporciona maior redução do *lead time* em um ambiente de máquina única.

1.3 METODOLOGIA DE PESQUISA

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 pesquisar é uma atividade que exige um método a ser seguido. De acordo com Demo (1995), o método de pesquisa é indispensável por vários aspectos, como exemplo: para transmitir à atividade marcas de racionalidade, ordenação, otimizando o esforço e também para impedir generalizações precipitadas. De acordo com 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.

Os tópicos a seguir apresentam a explanação a cerca dos componentes do método de pesquisa utilizado no presente trabalho, assim como a justificativa das escolhas feitas.

Abordagem da pesquisa

A abordagem de pesquisa é a conduta que orienta o processo de pesquisa, é uma forma de aproximar ou focalizar o fenômeno que se pretende estudar (LAKATOS; MARCONI, 1995). Martins (2010) apresenta as possíveis abordagens de pesquisa: quantitativa e qualitativa. Ainda é possível a utilização de uma terceira abordagem que faz uso das duas abordagens citadas e denomina-se abordagem combinada.

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, p.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.

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. Van Maanen (1979) define a pesquisa qualitativa como um guarda-chuva que abriga uma série de técnicas de interpretação que procuram descrever, decodificar, traduzir, e qualquer outro termo relacionado com o entendimento e não com a frequência de ocorrência das variáveis. 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) e Sampieri (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.

O presente trabalho utiliza uma abordagem de pesquisa combinada, envolvendo a abordagem qualitativa e também a quantitativa. Tal abordagem se mostra adequada principalmente pelos pontos (i) e (iv) citados. A parte qualitativa da pesquisa envolve a revisão da literatura e o estudo de caso, que serve para o delineamento do problema de pesquisa e também para a aplicação e exemplificação do método proposto. Já a etapa de simulação constitui a parte quantitativa dessa pesquisa.

Método de pesquisa

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 utilizados os métodos: estudo de caso e 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.

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

- 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;
- Modelagem/simulação: o pesquisador manipula as variáveis e os seus níveis, por meio de um modelo de pesquisa, ou seja, uma abstração da realidade;
- 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.
- 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;

Nesse trabalho, a simulação será utilizada. De acordo com Meredith et al. (1989), esta é uma abordagem de geração de conhecimento racional. Tem como objetivo explicar o comportamento ou parte do comportamento dos processos reais ou então capturar os problemas de tomada de decisões enfrentados pelos gestores em operações reais. Para a utilização da simulação neste trabalho, utiliza-se o modelo Godinho Filho e Uzsoy (2008a) para manipular as variáveis consideradas. Tal escolha se justifica pelo fato de que tal modelo possui peculiaridades que permitem a análise da questão de pesquisa: relaciona de forma robusta (por meio de equações advindas da Teoria de Filas) as variáveis que caracterizam o ambiente estudado além de permitir a geração de diversos cenários dentro de um horizonte de tempo longo. A simulação será utilizada no capítulo 4 da dissertação.

No que tange a abordagem qualitativa, Martins (2010) destaca que dois métodos são mais apropriados para a área de Engenharia de Produção, são eles:

- Estudo de caso: o pesquisador tem baixo grau de envolvimento com os indivíduos e a organização pesquisada
- Pesquisa-ação: o pesquisador tem um envolvimento grande com os indivíduos e a organização.

No presente trabalho será utilizado um estudo de caso para a delimitação do problema de pesquisa e também para a coleta de dados de um ambiente de produção real. Esses dados

serão utilizados como *input* na etapa de simulação. É importante destacar que neste trabalho, o caso estudado aparece em dois momentos: 1) antes da criação do método, auxiliando na delimitação do problema de pesquisa e, portanto, contribuindo para a elaboração do método aqui proposto e 2) após a criação do método, com o intuito de exemplificar a aplicação do mesmo com dados oriundos de um ambiente real de manufatura. A Figura 1.1 a seguir apresenta esta característica peculiar do estudo de caso realizado neste trabalho.

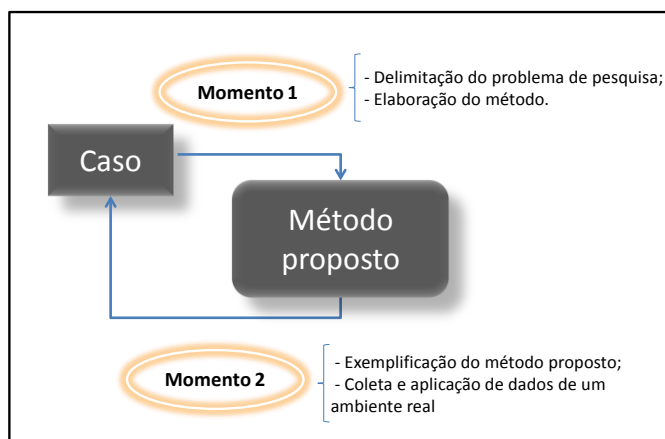


FIGURA 1.1: Ilustração da utilização do estudo de caso em dois momentos da pesquisa.

Estudo de Caso

Tal método constitui também uma base para a construção do procedimento proposto nessa pesquisa. De acordo com Miguel (2010), o estudo de caso é um trabalho de caráter empírico que investiga um dado fenômeno dentro de um contexto real contemporâneo por meio de análise aprofundada de um ou mais objetos de análise (casos). Para Yin (2005), em um estudo de caso considera-se que as fronteiras entre o fenômeno e o contexto onde se insere não são claramente definidas. Bryman (1989) observa que este procedimento de pesquisa geralmente envolve o exame de um pequeno número de casos, não tendo por objetivo a generalização estatística e sim, criar relações e entendimento sobre um fenômeno estudado. Tal procedimento foi utilizado neste trabalho para delinear o problema prático a ser pesquisado, também para a geração de conhecimento, assim como para ilustrar e aplicar o método proposto.

Ainda em relação ao estudo de caso, é preciso ressaltar que esse método de pesquisa possibilita, segundo Miguel (2010), o desenvolvimento de novas teorias, assim como viabiliza o aumento do entendimento sobre eventos reais e contemporâneos. Esses benefícios do estudo de caso serão explorados na presente pesquisa, na medida em que objetiva-se a construção de um método que auxilie empresas na prática a escolher projetos de melhoria que visem à

redução do *lead time*. No presente trabalho, a busca de informações em um ambiente de manufatura real se justifica na afirmação de Glaser e Strauss (1967), que ressalta que é a conexão íntima com a realidade empírica que permite o desenvolvimento de uma teoria testável, relevante e válida. Outra maneira de tornar a teoria emergente mais robusta, de acordo com Eisenhardt (1989), é conectá-la com a literatura existente. Estes argumentos juntos embasam as escolhas metodológicas escolhidas para a criação do método proposto neste trabalho.

Cabe ressaltar neste ponto que o desenvolvimento de teorias a partir de estudos de caso tem, evidentemente, pontos fortes e fracos. Eisenhardt (1989) explicita tais pontos:

- ✓ Pontos fortes: i) possibilidade de gerar novas teorias, uma vez que *insights* criativos surgem da contraposição de evidências contraditórias e paradoxais; ii) a teoria emergente é possível de ser testada com constructos que podem ser prontamente medidos e hipóteses que podem ser provadas falsas. Teorias geradas longe de uma evidência direta podem ter problemas de testabilidade; iii) a teoria advinda de um estudo de caso é possível de ser validada empiricamente. A probabilidade de validar a teoria é alta uma vez que o processo de construção da teoria está intimamente conectado com evidências, que é muito provável que a teoria resultante seja consistente com as observações empíricas;
- ✓ Pontos fracos: i) o uso intensivo de evidências empíricas pode resultar em uma teoria excessivamente complexa. Corre-se o risco de construir uma teoria muito rica em detalhes, mas com a falta da simplicidade característica da perspectiva geral; ii) pode-se gerar uma teoria estreita e idiossincrática, visto que a construção de teoria a partir do estudo de caso é um processo *bottom up*, onde as especificidades dos dados produzem as generalizações da teoria. O risco consiste em descrever um fenômeno muito idiossincrático ou que o pesquisador não consiga atingir o nível de generalização (ou varredura) da teoria, de forma que muitas teorias advindas do estudo de caso geram teorias modestas. De acordo com o autor, “grandes” teorias talvez requeiram múltiplos estudos, como o processo de construção da teoria e também o processo de testes empíricos.

A partir dessas características é possível considerar que o estudo de caso, em conjunto com a simulação e a revisão da literatura, atende aos anseios do presente trabalho. Dessa forma, acredita-se que as escolhas metodológicas aqui realizadas atendam aos propósitos de

gerar *insights* a cerca da redução do *lead time* assim como propor um método que auxilie na priorização de projetos de melhoria.

O rigor científico

Há na literatura uma preocupação a cerca do rigor empregado em pesquisas que utilizam o estudo de caso como método. O trabalho de Meredith (1998) aborda amplamente essa questão. Tal autor cita que, de acordo com Lee (1989), McCutcheon e Meredith (1993), Bonoma (1985), Richardt e Cook (1979) e Yin (1994) o método estudo de caso é guiado pelos mesmos princípios gerais e segue regras tão bem definidas de provas e evidências quanto os métodos racionalistas de pesquisa. Para Lee (1989), no estudo de caso, os quatro requisitos do rigor (que são: observações controladas, deduções controladas, replicabilidade e generalização) de uma pesquisa também podem ser obtidos.

Segundo esse autor, no estudo de caso as observações são controladas por meio de um controle natural, em vez de um controle estatístico ou laboratorial. O controle natural implica na seleção de um fenômeno para ser controlado durante o estágio de *design* do experimento. Tal fenômeno é “mantido constante” enquanto os demais são deixados livres para variarem. Na presente pesquisa as observações foram destinadas à máquina gargalo escolhida para o estudo.

Em relação ao controle das deduções em um estudo de caso, Lee (1989) destaca a aplicação da lógica formal às proposições verbais advindas do estudo de caso. Segundo o autor, a precisão desejável não é obtida necessariamente pela quantificação matemática de todas as variáveis do estudo. Como destacado por Lee (1989, p. 40): “a matemática é um subconjunto da lógica formal e não o contrário. A dedução lógica em geral não exige matemática”. No caso desse trabalho, as variáveis de chão-de-fábrica foram quantificadas para servirem de *input* para o modelo de simulação no *software* Vensim. No entanto, para a elaboração do método, além das quantificações foram utilizadas informações e avanços já realizados pela Literatura assim como a dedução lógica.

No que tange à replicabilidade, Lee (1989) destaca que no estudo de caso tal característica do rigor científico pode ser obtida por meio da aplicação da teoria resultante do estudo de caso em outra configuração com diferentes condições. Espera-se que o método proposto tenha essa característica, uma vez que a lógica de escolha de opções de melhoria, que forma a parte principal do método proposto, independente do cenário/empresa onde ele

será aplicado. O último requisito para um rigor científico, a generalização, é a característica mais difícil de ser atendida em um estudo de caso. Conforme Meredith (1998) destaca, a generalização teórica representa a situação onde a teoria propriamente dita indica que pode ser aplicada em uma situação particular. Ou seja, os parâmetros e variáveis da teoria em questão indicam o intervalo de generalização que pode ser atingido pela mesma. De acordo com Lee (1989), há dois tipos de generalização: 1) generalização estatística, onde os resultados da teoria aplicados para uma amostra podem ser replicados/ generalizados para a população que tal amostra se destina a representar; e 2) generalização analítica, na qual generalizações são feitas a partir do estudo de caso para criar uma teoria. Assim, um estudo de caso permite *insights* em outros fatores não representados na população considerada. Disso decorre que a generalização pode ser estendida para outras situações e populações. É justamente nesse segundo tipo de generalização que esta pesquisa se enquadra, visto que as informações coletadas com o estudo de caso juntamente com a etapa de simulação servem de base para a geração de *insights* sobre o tema estudado como um todo, independente dos valores e parâmetros existentes na empresa onde o procedimento será aplicado.

Justificativa metodológica para o método proposto no presente trabalho

De acordo com Barratt, Choi e Li (2011), os trabalhos sobre gestão de operações que utilizam estudo de caso como uma das metodologias de pesquisa produzem, como contribuições, *frameworks*, proposições e também *insights* descritivos. De acordo com esses autores, há uma relação entre esses três tipos de contribuições com o número de casos realizados na pesquisa: na revisão feita pelos autores, os trabalhos com mais de 10 estudos de caso tiveram como produto final proposições e *frameworks* (como em Wu e Choi (2005), Danese et al. (2006), Grutter et al. (2002)) ao passo que na maioria dos trabalhos com um único estudo de caso, as contribuições apresentaram-se na forma de *insights*, conforme realizado por Oliva e Watson (2011), Mohanty e Deshmukh (2001) e Stenger (1996). Porém, nessa categoria encontram-se trabalhos cuja contribuição se dá por meio de proposições, como em Hyer, Wemmerlöv e Monris Jr (2009), Narasimhan e Jayaram (1998).

No que tange a utilização de *frameworks*, observa-se que tal contribuição é encontrada na forma de um produto do estudo de caso como citado acima, mas também da *expertise* dos pesquisadores e da literatura sobre o tema. Assim, o *framework* aqui proposto advém de um problema prático e também serve para a validação do método proposto, como feito em Agrell e Wikner (1996), Khang e Myint (1999) e More (1988). É interessante destacar que, a análise

dos artigos feita por Barratt, Choi e Li (2011) revela que, em termos gerais, artigos que tiveram como resultado *frameworks* ou proposições foram metodologicamente mais rigorosos do que artigos que tiveram como *output, insights* descritivos.

A presente pesquisa visa propor um método, que também poderia ser considerado um *framework*, e aplicá-lo em um estudo de caso, no segundo momento de participação desse método de pesquisa, conforme apresentado na Figura 1.1. No entanto, devido à abordagem proposta neste trabalho ser constituída por passos a serem seguidos para a tomada de uma decisão, será adotado o termo método, para atender à língua portuguesa.

Técnica de pesquisa

As técnicas de pesquisa podem ser de diversos tipos: questionários, entrevistas, observação, *softwares*, por exemplo. Nesse estudo, será utilizado o *software Vensim* na etapa de simulação, que é um *software* livre de modelagem visual que permite desenvolver, simular e analisar modelos de *System Dynamics*. Além desse *software*, entrevistas, observações e anotações são utilizadas na etapa do estudo de caso.

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 e síntese dos métodos escolhidos para o seu desenvolvimento.

Abordagem de pesquisa	Quantitativa/ Qualitativo (Abordagem mista)
Método de pesquisa	Teórico- Conceitual (Revisão da Literatura), Estudo de Caso e Simulação
Etapas de pesquisa	Revisão da Literatura/ Estudo de caso/ Simulação
Técnica de pesquisa	Entrevistas/observações/ <i>Software Vensim</i>

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente dissertação está dividida em sete capítulos apresentados previamente 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, o modelo Godinho Filho e Uzsoy (2008a) que inspira e serve de ferramenta para a realização de simulações é apresentado. A origem do modelo é apresentada, assim como sua lógica de funcionamento e resultados obtidos com aplicações anteriores do mesmo. Por fim, apresentam-se possíveis extensões para o modelo, feitas a partir de uma análise da Literatura. No Capítulo 3 há a apresentação da metodologia proposta para auxiliar a gerência da produção a priorizar as variáveis do chão-de-fábrica que auxiliem na redução do *lead time*. Em seguida, o Capítulo 4 apresenta o estudo de caso realizado em uma empresa do setor de aviação executiva. O estudo de caso descritivo visa coletar dados de um ambiente produtivo real e aplicar a metodologia proposta para a tomada de decisões no contexto analisado no presente trabalho. Finalizando as análises desse trabalho, o Capítulo 5 visa apresentar as respostas às questões de pesquisa propostas nessa dissertação. Também são tecidas conclusões a cerca da pesquisa realizada e destacadas possíveis extensões desse trabalho. Por fim, nesse capítulo são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas na pesquisa.

Ainda, com o intuito de complementar o entendimento do leitor em relação ao tema aqui abordado são apresentados dois anexos. O ANEXO A fornece os fundamentos básicos sobre as teorias *System Dynamics*, *Factory Physics* e *Quick Response Manufacturing*. Já, o ANEXO B apresenta as possíveis extensões para o modelo de simulação utilizado nesse trabalho - o modelo Godinho Filho e Uzsoy (2008a).

CAPÍTULO 2: O MODELO DE GODINHO FILHO E UZSOY (2008a)

O objetivo desse capítulo é apresentar o modelo desenvolvido por Godinho Filho e Uzsoy (2008a) utilizado no presente trabalho. A Seção 2.1 apresenta o contexto no qual o modelo está inserido. Em seguida, a Seção 2.2 apresenta a origem do mesmo. Na Seção 2.3 é apresentado o mecanismo de funcionamento do modelo, suas variáveis e medida de desempenho. Por fim, a Seção 2.4 apresenta os resultados obtidos anteriormente com trabalhos que utilizaram o modelo.

2.1 CONTEXTO

Conforme apresentado no capítulo anterior, a questão que norteia este trabalho consiste na identificação, para um ambiente de máquina única, de qual variável melhor contribui para a redução do *lead time*. Sendo assim, a exploração de alguns aspectos é vital para o entendimento do tema abordado. Primeiramente, é necessário que o leitor compreenda quais variáveis de chão-de-fábrica estão sendo consideradas com o poder de redução no *lead time*, conforme foi explicado na Seção 1.2. A partir disso, é essencial a compreensão da relação entre cada uma dessas seis variáveis e a medida de desempenho estudada, o *lead time*.

A teoria denominada *Factory Physics* proporciona o entendimento dessas relações, representando quantitativamente esses relacionamentos, por meio de equações matemáticas. Assim, uma vez entendido o relacionamento isolado entre uma variável e o *lead time*, surge a necessidade do entendimento das relações que as variáveis têm entre si e também com o *lead time*. Como o grau de interação entre as variáveis é alto, uma vez que estas representam um ambiente produtivo, o entendimento de todas essas interações se torna complexo, de forma que o cérebro humano não consegue processar rapidamente. Então, o uso da simulação se mostra uma alternativa para o entendimento das interações existentes no ambiente produtivo estudado. É justamente neste ponto que o modelo de Godinho Filho e Uzsoy (2008a) apresenta sua contribuição, uma vez que representa, para um ambiente de máquina única, a interação entre as seis variáveis de chão de fábrica consideradas e o *lead time*. O modelo foi elaborado em um *software* de simulação dinâmica (Vensim), visto que esta abordagem de simulação permite a modelagem e simulação de sistemas complexos (em que há diversas interações entre os constituintes do sistema). Assim, as próximas seções deste capítulo visa

apresentar detalhadamente o modelo Godinho Filho e Uzsoy, que serve de ferramenta para um dos passos propostos no procedimento sugerido neste trabalho. Como é a partir da quantificação das relações existentes no ambiente produtivo estudado, que se pode entender e explorar o poder de redução do *lead time* das variáveis consideradas, o entendimento deste modelo de simulação se torna crucial.

2.2 ORIGEM

De acordo com Trévaille et al. (2004), a grande maioria da literatura sobre redução de *lead time* tem se apresentado somente teórica e exploratória. Godinho Filho e Uzsoy (2008a) citam duas exceções: i) o trabalho de Hopp e Spearman (2008), que reúne um conjunto de princípios matemáticos para o estudo e determinação do *lead time*, baseado na teoria de filas e denominado *Factory Physics*; e ii) o trabalho de Suri (1998) na redução de *lead time*, por meio de sua estratégia denominada *Quick Response Manufacturing*. Ambas as estratégias (*Factory Physics* e *Quick Response Manufacturing*) apresentam uma série de relações entre variáveis no chão da fábrica, objetivando aumentar o grau de conhecimento e intuição dos gerentes de produção a respeito da dinâmica do fluxo produtivo no chão de fábrica. Além disso, o QRM apresenta uma série de princípios e ferramentas para a obtenção de melhorias em variáveis do chão-de-fábrica.

Assim, de forma a expandir as contribuições de Suri (1998) e Hopp e Spearman (2008), Godinho Filho e Uzsoy (2008a) apresentam um modelo que utiliza a teoria *Factory Physics* em um modelo de simulação de *System Dynamics*. Dentre as diversas contribuições dos trabalhos de Hopp e Spearman (2008) e Suri (1998) destacam-se o esclarecimento em relação às interações entre as variáveis do chão-de-fábrica e as respectivas implicações para os resultados obtidos pela gerência da produção. Dessa forma, o modelo visa então aplicar essas relações entre as variáveis por meio de um modelo de simulação dinâmica, de forma a explorar a teoria de Hopp e Spearman (2008) e de Suri (1998).

A abordagem criada por Suri para colocar em prática a Manufatura Responsiva contribui para o modelo Godinho Filho e Uzsoy (2008a) ao fornecer a base que justifica a importância da medida de desempenho utilizada no modelo, o *lead time*. Os princípios e

práticas sugeridas pelo QRM têm importante contribuição para que os programas de melhoria, desenvolvidos a partir da realização de simulações no modelo, sejam atingidos com êxito. Além da relação do QRM com o modelo Godinho Filho e Uzsoy (2008a), pode-se observar também a relação entre as teorias *System Dynamics* e *Factory Physics* e o modelo em questão, por meio da Figura 2.1. Os fundamentos teóricos dessas teorias se encontram no ANEXO A.

Nessa figura encontram-se os três pilares fundamentais que servem de base para a etapa de modelagem, que tem como produto final o modelo Godinho Filho e Uzsoy (2008a). 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 (tais como ações são baseadas no QRM para a redução da variabilidade, tempos de *set up*, dentre outras) 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 da *System Dynamics* para construção do modelo em questão. Cabe destacar neste ponto que foi utilizada a abordagem *Hard* dessa teoria. Ou seja, a partir de diagramas estoque-fluxo e o uso de equações para a quantificação das interações entre os elementos do sistema pode-se analisar quantitativamente as simulações realizadas.

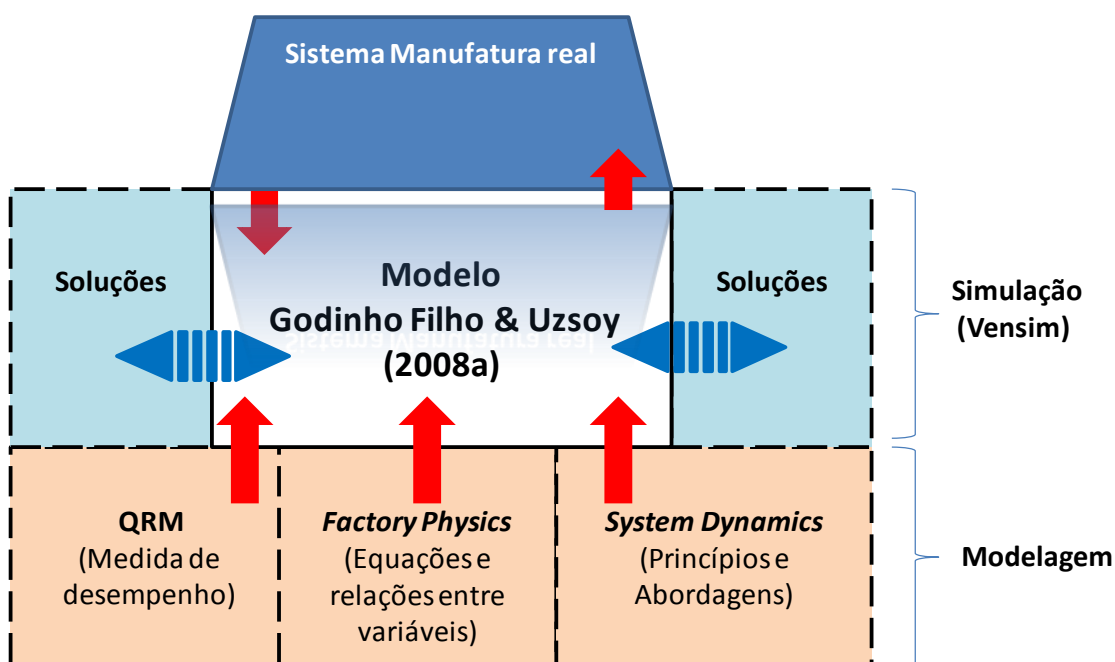


FIGURA 2.1: Diagrama que ilustra os fatores que influenciam e constituem o modelo Godinho Filho e Uzsoy (2008a).

Uma vez construído o modelo no *software* Vensim, utiliza-se o mesmo para a etapa de simulação, ou seja, a manipulação do modelo para a análise do problema estudado (ver Seção 1.2).

É importante notar que o modelo Godinho Filho e Uzsoy (2008a) representado pelo retângulo central da figura representa parte de uma realidade muito maior (o Sistema de Manufatura real). Nesta pesquisa analisa-se um ambiente de manufatura específico, constituído por uma única máquina e caracterizado por diversos parâmetros (como será mostrado na Seção 2.3) e inserido no contexto da Competição Baseada no Tempo (TBC), em que baixos *lead times* tem importância estratégica para as corporações. Nesse sentido, observa-se a finalidade de um modelo, isto é, representar parte do mundo real que se deseja analisar e ao final do processo de simulação e análises, contribuir com soluções possíveis de serem implementadas, de forma a se obter melhorias em sistemas de manufatura reais.

2.3 LÓGICA DE FUNCIONAMENTO

O modelo apresentado por Godinho Filho e Uzsoy (2008a) utiliza as abordagens *System Dynamics* e *Factory Physics* e representa um sistema de manufatura constituído por apenas uma máquina, isto é, um sistema modelado como um servidor único. Esta característica representa o sistema produtivo real estudado no presente trabalho: uma máquina gargalo. Nesse sistema representado no modelo, 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. Os autores utilizam como ambiente de simulação o *software* Vensim.

A seguir, as equações matemáticas envolvidas no modelo de Godinho Filho e Uzsoy (2008a) são apresentadas. No modelo, o ambiente de chão-de-fábrica com uma estação de trabalho de máquina única, 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 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 2.1:

$$r_a = \frac{D}{LH} \quad (2.1)$$

Em que, D é a demanda média anual; L é o tamanho de lote; H é o número de horas trabalhadas no ano.

A **taxa de produção da estação de trabalho**, r_e , advém de Hopp e Spearman (2008) e é expressa pela equação 2.2:

$$r_e = \frac{1}{L \times t_e} \quad (2.2)$$

Em que, L é o tamanho do lote, t_e é o tempo de processamento efetivo global e é constituído, de acordo com Godinho Filho e Uzsoy (2008a) 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 *set up*);
- 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 2.3:

$$C_0 = \frac{\sqrt{\sigma_0^2}}{t_0} \quad (2.3)$$

Em que, 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 2.4:

$$t_e^f = \frac{t_0}{A} \quad (2.4)$$

Em que 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 2.5 e 2.6, respectivamente:

$$\sigma_e^f = \left(\frac{\sigma_0}{A} \right)^2 + \frac{(m_r^2 + \sigma_r^2)(1-A)t_0}{Am_r} \quad (2.5)$$

$$(c_e^f) = \sqrt{c_0^2 + (1 + c_r^2)A(1-A)\frac{m_r}{t_0}} \quad (2.6)$$

Em que 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:

$$A = \frac{m_f}{m_f + m_r} \quad (2.7)$$

Em que, 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 2.8:

$$t_e^0 = t_e^f + \frac{t_s}{N_s} \quad (2.8)$$

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

A **variância de t_e^0** é dada pela equação 2.9:

$$(\sigma_e^0)^2 = (\sigma_e^f)^2 + \frac{\sigma_s^2}{N_s} + \frac{N_s - 1}{N_s^2} t_s^2 \quad (2.9)$$

Em que 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 2.10:

$$c_e^0 = \sqrt{\frac{(\sigma_e^0)^2}{(t_e^0)^2}} \quad (2.10)$$

Em que $(\sigma_e^0)^2$ 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 2.11:

$$t_e = \frac{\frac{t_0}{A} + \frac{t_s}{N_s}}{1 - p} \quad (2.11)$$

Em que:

- p é a taxa de itens defeituosos

A **variância para o tempo médio de processamento efetivo** é dada pela expressão 2.12:

$$\sigma_e^2 = \frac{(\sigma_e^0)^2}{1 - p} + \frac{p(t_e^0)^2}{(1 - p)^2} \quad (2.12)$$

Em que:

- $(\sigma_e^0)^2$ 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 por:

$$c_e = \sqrt{\left(\frac{\sigma_e}{t_e}\right)^2} \quad (2.13)$$

Em que σ_e ao quadrado é a variância para o tempo médio de processamento efetivo (dada pela equação 2.12) 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 2.11).

A utilização da estação de trabalho considerada no modelo é representada como em Hopp e Spearman (2008), por meio da equação 2.14:

$$u = \frac{r_a}{r_e} \quad (2.14)$$

Em que 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 por:

$$u = \frac{D}{LH} \times Lt_e = \frac{Dt_e}{H} \quad (2.15)$$

Em que 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 2.11) 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 (2009) é o *lead time* médio (TC):

$$TC = TC_f + t_e \quad (2.16)$$

Em que:

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 2.11)

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 2.17:

$$TC_f(G/G/1) = \left(\frac{c_a^2 + c_e^2}{2} \right) \left(\frac{u}{1-u} \right) t_e \quad (2.17)$$

Em que: 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 2.13), u é a utilização (equação 2.15) t_e é o tempo de processamento efetivo (apresentado pela equação 2.11).

Considerando o tempo de utilização de um lote de tamanho L como sendo Lt_e , o **lead time médio da estação de trabalho** em estudo pode ser calculado pela expressão 2.18:

$$TC = \left(\frac{c_a^2 + c_e^2}{2} \right) \left(\frac{u}{1-u} \right) Lt_e + Lt_e \quad (2.18)$$

O estoque em processo representa outra medida de desempenho importante no modelo e é dado pela Lei de Little (LITTLE, 1961). 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 2.19:

$$WIP = r_a \times TC \times L \quad (2.19)$$

Por fim, as equações acima descritas estão relacionadas e representadas graficamente na Figura 2.2 a seguir, que representa parte principal do modelo de Godinho Filho e Uzsoy (2008a).

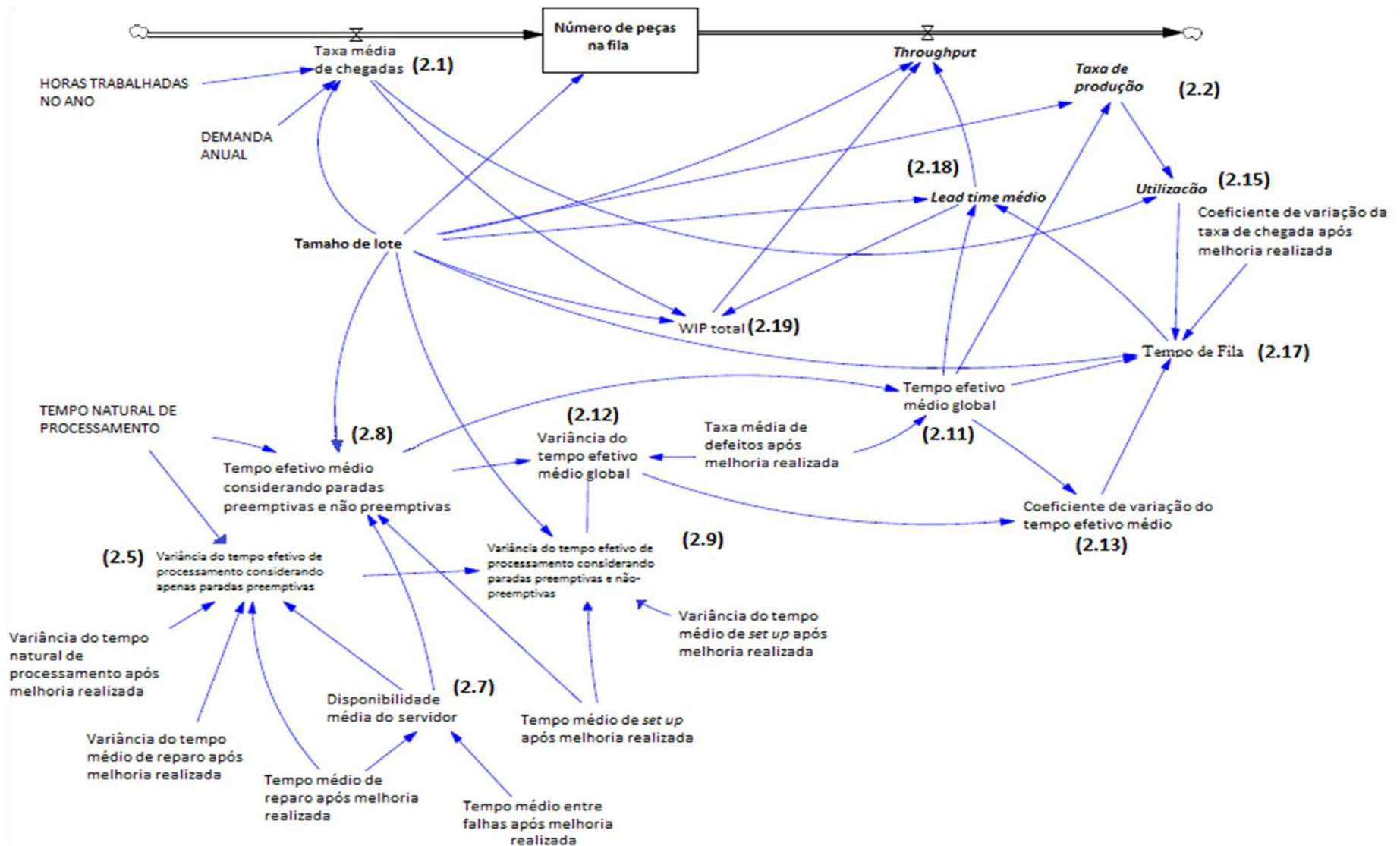


FIGURA 2.2: Representação gráfica, no *software* Vensim, de parte principal do modelo Godinho Filho e Uzsoy (2008a). Fonte: Godinho Filho e Uzsoy (2008a)

É importante destacar que a Figura 2.2 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 2.3 (onde estão destacados os parâmetros que impactam na taxa média de chegadas e os parâmetros que dependem da mesma).

De acordo com a equação 2.1 apresentada anteriormente, a taxa média de chegadas tem como *inputs* a demanda anual média, o tamanho do lote e a quantidade de horas trabalhadas no ano e, impacta na utilização e no WIP total, como pode ser visto pelas equações 2.15 e 2.19, respectivamente.

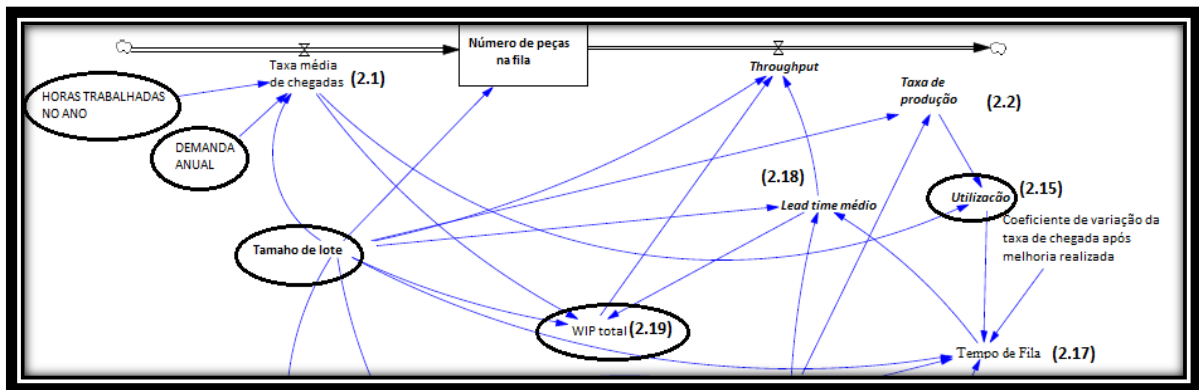


FIGURA 2.3: Recorte do modelo Godinho Filho e Uzsoy (2008a), no Vensim – detalhe dos parâmetros que impactam a taxa média de chegada e das variáveis que são impactadas por ela.

Assim, o mesmo raciocínio pode ser aplicado aos demais parâmetros e variáveis envolvidas na modelagem de um sistema de máquina única. A Figura 2.2 apresenta os demais relacionamentos modelados utilizando-se a abordagem *hard* da teoria *System Dynamics*. Nessa abordagem utilizam-se 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. A explicação e exemplificação dessa abordagem assim como dos diagramas estoque-fluxo podem ser encontrados no ANEXO A.

Além dos relacionamentos apresentados pela Figura 2.2, o modelo Godinho Filho e Uzsoy (2008a) 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 A em um dado tempo t é dado conforme a expressão 2.20:

$$A(t) = (A_0 - G)e^{-t/\tau} \quad (2.20)$$

Em que A_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. Neste trabalho, esse parâmetro indica o grau de dificuldade para melhorar o parâmetro em questão. A Figura 2.4 mostra como foi modelada a estrutura de melhoria para o tempo médio até a falha. Como se observa, a estrutura mostrada na Figura 2.4 é ligada à variável tempo médio até a falha após melhoria, que também aparece na Figura 2.2. Outras sete estruturas similares à mostrada na Figura 2.4 são utilizadas no modelo para modelar as melhorias contínuas nos outros parâmetros estudados neste trabalho (variabilidade da taxa de chegada das ordens no sistema, variabilidade natural do processo, variabilidade do tempo de reparo das máquinas, variabilidade do tempo de *set up*, taxa média de defeitos do processo, tempo de *set up* e tempo médio de reparo da máquina).

Tais estruturas que modelam a melhoria contínua estão relacionadas às seguintes variáveis mostradas na Figura 2.2: variabilidade da taxa de chegada após melhoria realizada; variabilidade natural do processo após melhoria realizada; variabilidade do tempo de reparo das máquinas após melhoria realizada; variabilidade do tempo de *set up* após melhoria realizada; taxa média de defeitos do processo após melhoria realizada; tempo de *set up* após melhoria realizada; e tempo médio de reparo da máquina após melhoria realizada. Portanto, o modelo desenvolvido é formado pela junção da Figura 2.2 com oito estruturas semelhantes à Figura 2.4 mostrada a seguir. A Figura 2.5 representa o modelo completo, com a junção de todos os elementos explicados nesta seção.

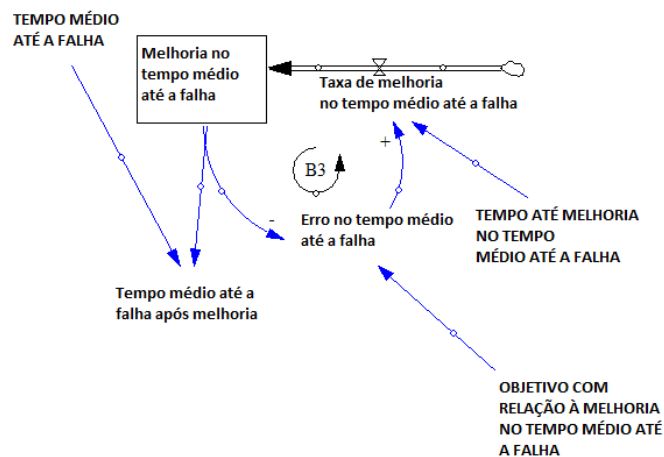


FIGURA 2.4: Estrutura modelada em SD para representar a melhoria no tempo médio até a falha.

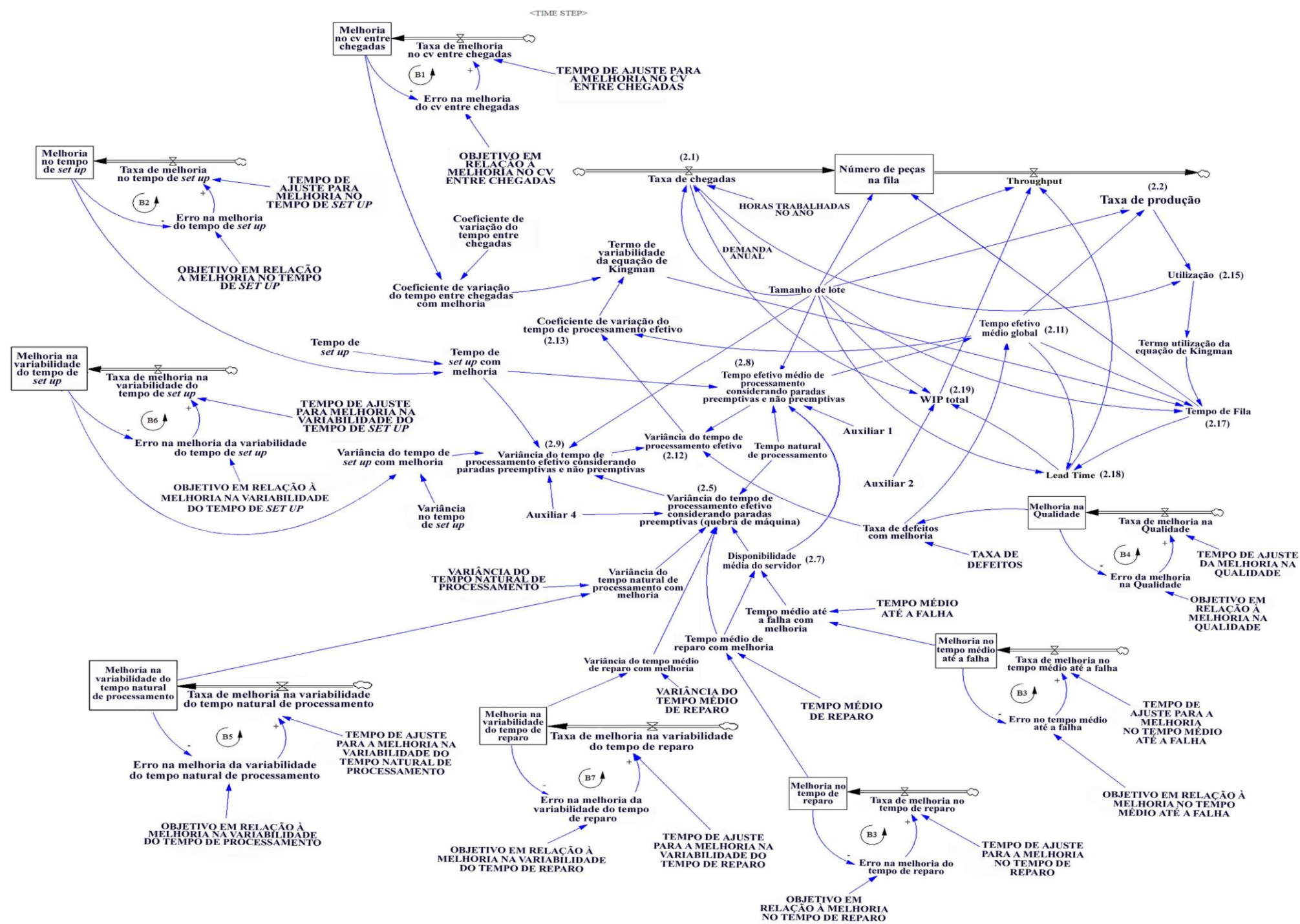


FIGURA 2.5: Modelo Godinho Filho e Uzsoy, representando os relacionamentos entre as variáveis de um sistema de máquina única.

2.4 RESULTADOS OBTIDOS COM O MODELO DE GODINHO FILHO E UZSOY (2008A)

A proposta de utilizar de forma híbrida as abordagens *System Dynamics* (SD) e *Factory Physics* (FP) apareceu primeiramente nos trabalhos de Godinho Filho (2008) e Godinho Filho e Uzsoy (2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011a, 2011b). Nesses trabalhos, tal modelo foi utilizado para se estudar o efeito de programas de melhoria contínua em seis variáveis do chão de fábrica (variabilidade da chegada das ordens, variabilidade do processo, taxa média de defeitos, tempo médio de reparo, tempo médio entre falhas e tempo médio de *set up*) em importantes indicadores de desempenho do chão de fábrica, tais como *lead time*, WIP, dentre outros. Esses estudos são feitos para um ambiente de máquina única que processa múltiplos produtos. Uma conclusão importante encontrada nesses trabalhos é a de que, para os dados utilizados nos estudos, o programa que mais efeito positivo teve no *lead time* foi o programa para redução na variabilidade do processo, seguido pelo programa de melhoria no *set up*, tempo de reparo, tempo entre falhas, taxa de defeitos e por fim, variabilidade da chegada das ordens.

Em Godinho Filho (2008) é estudado como o tamanho de lote de produção impacta nesse efeito. Esse autor conclui que o efeito positivo da implantação dos programas de melhoria no tempo de *set up*, variabilidade do processo e taxa de defeitos no *lead time* é potencializada pela redução dos tamanhos de lote. Esses resultados fornecem suporte à grande parte das modernas técnicas de gestão, como por exemplo, as filosofias *Lean Manufacturing* (WOMACK, 2000) e *Quick Response Manufacturing* (Suri, 1998), as quais defendem a redução dos tamanhos de lote como sendo pré-requisito para se conseguir melhorias no chão de fábrica. Por outro lado, o efeito da implantação de programas de melhoria no tempo de reparo, tempo entre falhas e variabilidade na chegada das ordens no *lead time* não é potencializada pela redução dos tamanhos de lote. Esses resultados mostram que, mesmo empresas que tem dificuldade em trabalhar com tamanhos de lote reduzidos, devido, por exemplo, a restrições do processo produtivo, podem se beneficiar com programas de melhoria contínua no tempo de *set up*, na variabilidade do processo e na taxa de defeitos.

Em Godinho Filho e Uzsoy (2008a, 2010, 2011a) são estudados os efeitos dos seis programas citados 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 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 2.6 ilustra basicamente a relação entre tamanho de lote e *lead time*. Lambrecht e Vandaele (1996) descrevem esta relação: tamanhos de lote grandes causarão longos *lead times* (efeito do tamanho de lote); conforme os tamanhos de lote são reduzidos, o *lead time* também decrescerá, mas, uma vez que um tamanho de lote mínimo é alcançado, uma redução do tamanho do lote 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”) da Figura 2.6 da direita para a esquerda. Assim, à medida que se observa o decaimento do tamanho do lote 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 2.6) há uma inversão do comportamento do *lead time*, que passa a crescer caso o tamanho do lote seja reduzido.

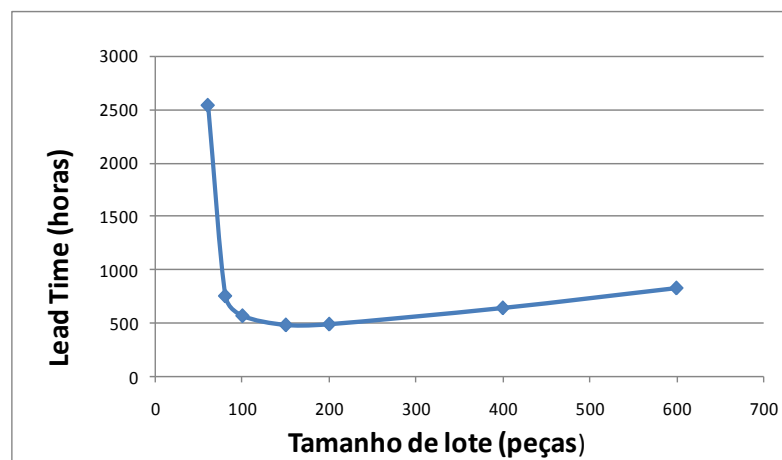


FIGURA 2.6: Ilustração da relação entre tamanho de lote de produção e *lead time* médio.

As principais conclusões extraídas dos trabalhos de Godinho Filho e Uzsoy (2008a, 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 x *lead time* para baixo e para esquerda, fazendo com que o tamanho de lote 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 x *lead time*. Esse resultado mostra que esforços para redução da variabilidade na chegada das ordens de produção não apresenta 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 e *lead time* mostra que simplesmente reduzir o tamanho de lote (sem se conhecer exatamente o formato da curva tamanho de lote x *lead time*) não garante a redução do *lead time*. Os resultados apresentados nestes artigos mostram que grandes reduções nos tamanhos de lote, mesmo acompanhados por melhorias (por exemplo na variabilidade do processo, na qualidade e no tempo até a falha) pode ter efeito pior no *lead time* do que uma redução mais gradual no tamanho de lote. Em termos gerais, a mensagem é que se deve conhecer a relação tamanho de lote x *lead time* antes de se decidir a respeito de reduções no tamanho de lote;

- Se uma empresa trabalha com um tamanho de lote próximo ao tamanho de lote ótimo com relação a *lead time* (valor mínimo da curva tamanho de lote 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 x *lead time*, mais necessários se fazem programas de melhorias nos tempos de reparo e tempo até a falha;

- O programa de redução nos tempos de *set up* atinge melhor resultado com relação ao *lead time* quando tamanhos de lote pequenos são utilizados. Na verdade, a melhoria no tempo de *set up* permite que o sistema produtivo trabalhe com tamanhos de lote bem menores do que aqueles que seriam utilizados caso nenhuma melhoria no tempo de *set up* tivesse sido implementada. Este resultado fornece suporte à literatura que defende a importância da utilização de métodos de redução de *set up*, como, por exemplo, o método SMED (*Single Minute Exchange of Die*) de Shingo (1986).

Além dessas contribuições, Godinho Filho e Uzsoy (2008a, 2010, 2011a) 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 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 *set up* 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 e Uzsoy (2008b) 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 (2011b) ampliam esse trabalho para um ambiente *flow shop* com 5 estações de trabalho. 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 (2008) denominam equação de Kingman. O formato básico de uma curva de operação é mostrado na Figura 2.7. Como salientado anteriormente, pode-se notar claramente que conforme a utilização aumenta, o *lead time* cresce rapidamente. Na Figura 2.7 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 (20 peças).

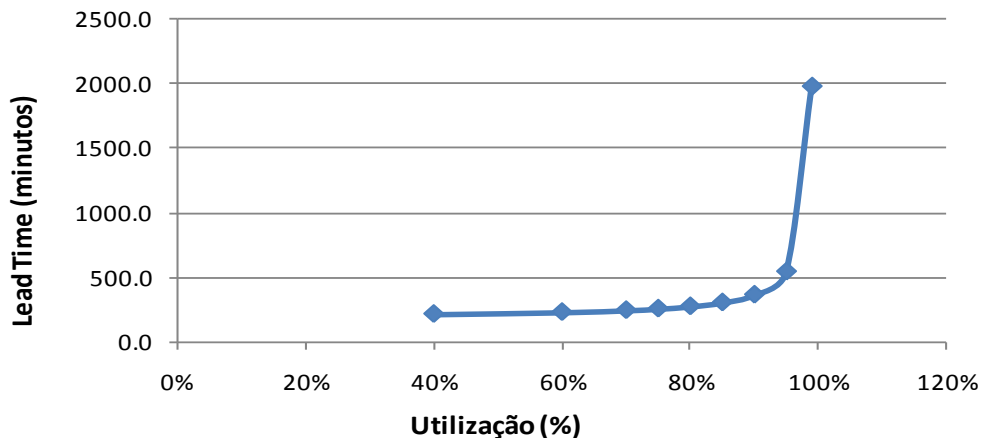


FIGURA 2.7: Formato básico de uma curva de operação logística.

A partir dos experimentos realizados, Godinho Filho e Uzsoy (2008b; 2011b) concluíram que:

- 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 *set up*. 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 *set up* 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 *set up*, 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 *set up*, 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 (2009) estudam o efeito dos programas de melhoria contínua nos níveis de estoque em processo (WIP) e na utilização para um ambiente de máquina única. Nesse trabalho os autores concluem que:

- 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 do programa para melhoria na variabilidade do processo diminui. Nesse contexto, o programa de melhoria no tempo de *set up* passa a ser o programa que mais contribui para a redução do WIP. Também é interessante notar que programas de melhoria de qualidade têm sua importância aumentada conforme são menores

os tamanhos de lote de produção utilizados. De maneira oposta, programas de manutenção de máquinas que reduzam o tempo de reparo e aumentem o tempo médio entre falhas têm seu impacto no WIP reduzido conforme tamanhos de lote menores são utilizados. Programas de melhoria na variabilidade da chegada das ordens têm pouco impacto na redução do WIP;

- 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. Quando se utiliza grandes tamanhos de lote, programas para melhorias de 20% e 15% em todos os seis parâmetros estudados conjuntamente obtiveram melhores resultados com relação à redução de WIP do que qualquer programa para 50% de melhoria em somente um parâmetro. Quando se utiliza pequenos tamanhos de lote, um programa para melhoria de 20% em todos os seis parâmetros estudados conjuntamente obteve quase que o mesmo resultado com relação à redução de WIP que um programa para 50% de melhoria nos tempos de *set up*. Esses resultados confirmam ainda mais os resultados mostrados por Godinho Filho e Uzsoy (2008a; 2011) para a variável *lead time*;

- Com relação ao efeito dos programas de melhoria contínua na utilização, este estudo mostrou que quando grandes tamanhos de lote são utilizados, todos os programas de CI avaliados apresentaram pouco ou nenhum efeito no nível médio de Utilização do sistema. Esta conclusão é também válida para a implantação de pequenas melhorias em vários parâmetros ao mesmo tempo. Conforme tamanhos de lote menores são utilizados, programas de melhoria no *set up* apresentam o melhor resultado com relação à redução dos níveis médios de Utilização do sistema;

- Os resultados com relação à Utilização também mostram, como esperado, que conforme os tamanhos de lote são reduzidos, a utilização média aumenta. Nestes casos, investimentos em programas de redução de *set up* se mostraram como sendo a melhor alternativa para se tentar manter os níveis de utilização baixos enquanto as reduções de tamanho de lote são efetuadas. Estes resultados, portanto, também fornecem suporte para toda a literatura que defende a importância e a necessidade de programas de redução de *set up*.

Godinho Filho (2012) apresenta a mesma questão que Godinho Filho e Uzsoy (2008a) para um ambiente *flow shop* com 5 estações de trabalho. O autor conclui que:

- Para a grande maioria dos cenários testados no artigo (tanto relativos à máquina única quanto *flow shop*), os programas de melhoria no tempo de *set up* e variabilidades (processamento e chegada) tiveram os maiores efeitos com relação à redução do WIP;

- Também para o ambiente *flow shop*, concluiu-se que investimento combinado em várias melhorias simultâneas fornecem menor WIP do que grandes melhorias em uma única variável;

- Em um ambiente *flow shop*, a melhoria na variabilidade de chegada e pequenas melhorias em todas as variáveis em conjunto auxilia na estabilização da quantidade de WIP mesmo quando grandes lotes são utilizados;

- Somente a redução combinada do tempo de *set up* e dos tamanhos de lote ou, alternativamente, pequenas melhorias em todas as variáveis em conjunto com a redução do tamanho de lote conseguem reduções significativas na utilização das estações do trabalho no *flow shop*.

Godinho Filho e Uzsoy (2011b) focam mais no efeito dos programas de redução do *set up* e do 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.

Guimaraes et al. (2012) 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 *set up* 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.

Por fim, com base nos resultados obtidos a partir do modelo de Godinho Filho e Uzsoy (2008a) apresenta-se, no ANEXO B, um estudo sobre possíveis expansões deste modelo. A partir de uma análise da Literatura, algumas observações e *insights* são apresentados, visando contribuir para futuros trabalhos sobre o tema.

A seguir, o Capítulo 3 apresenta o desenvolvimento do método proposto neste trabalho e o detalhamento dos sete passos que o constituem.

CAPÍTULO 3: MÉTODO PARA SELEÇÃO DE PROGRAMAS DE MELHORIA COM FOCO NA REDUÇÃO DO *LEAD TIME*

O desenvolvimento do método para a priorização de programas de melhoria que visem à redução do *lead time* surge de uma carência da literatura, assim como do problema encontrado por grande parte das empresas, também verificado no estudo de caso realizado (apresentado no Capítulo 4). Assim, no presente capítulo são apresentados o problema de pesquisa e o método proposto.

3.1 O PROBLEMA DE PESQUISA

A redução do *lead time* global de uma empresa pode ser atingida de várias formas, uma vez que tal medida considera desde a entrada de pedidos até à entrega da primeira peça da ordem ao cliente final, havendo então diversas áreas a serem atacadas em um programa de melhoria. No que tange o *lead time* focal, essa variedade de possibilidades de melhoria também não é diferente. Ao se focar o estudo em uma máquina única, ainda sim existem várias possibilidades de melhoria. Isso se deve à complexidade de um sistema de manufatura, que se traduz em um grande número de variáveis que podem sofrer melhorias, de forma a impactar positivamente na agilidade do processo produtivo. Dessa forma, ao se analisar a redução do *lead time* focal de uma máquina única, várias são as variáveis de chão-de-fábrica que podem sofrer melhoria. A análise de uma máquina única se justifica pelo fato de que, quando esta máquina representa o gargalo do sistema, os ganhos obtidos na redução do *lead time* focal dessa máquina se refletem no *lead time* global do sistema produtivo estudado.

Devido à restrição de recursos geralmente existente em um ambiente real, a Gerência da Produção frequentemente se depara com a questão da escolha de qual aspecto deve ser priorizado ao se recrutar esforços para a redução do *lead time*. Aspectos como manutenção, reparo, defeitos e variabilidade, por exemplo, podem ser expressos em termos de variáveis de chão-de-fábrica. De acordo com uma análise da literatura pode-se citar seis variáveis de chão-de-fábrica que tem impacto na redução do *lead time*. Godinho Filho & Uzsoy (2008a) destacam as seguintes variáveis: tempo médio de *set up*, tempo médio de processamento,

tempo médio entre falhas, tempo médio de reparo, variabilidade de chegada, variabilidade de processamento e taxa média de defeitos.

Dessa forma, o problema de pesquisa deste trabalho consiste em analisar, para uma máquina única gargalo, qual variável de chão-de-fábrica deve ser priorizada em programas de melhoria que visem reduzir o *lead time*. É para atingir tal objetivo que se apresenta na próxima seção, o método proposto.

3.2 O MÉTODO PROPOSTO PARA A PRIORIZAÇÃO DE PROJETOS DE MELHORIA

O método proposto consiste na aplicação de sete passos para a seleção de programas de melhoria que visem à redução do *lead time* em um ambiente de máquina única com a presença de variabilidade. Os passos a serem seguidos são:

PASSO 1: Selecionar o ambiente de produção a ser estudado. Para fins da presente pesquisa, limitou-se o ambiente de manufatura a uma máquina única. Por tal ambiente entende-se uma máquina que processe todo o lote de produção exclusivamente, isto é, o lote de produção não é dividido com máquinas semelhantes;

PASSO 2: Identificar as variáveis de chão-de-fábrica que tem influência, e portanto, a capacidade de contribuir para a redução do *lead time*. Nesta etapa recorre-se a teoria do *Quick Response Manufacturing* e *Factory Physics* e ao trabalho de Godinho Filho e Uzsoy (2008a), que identifica seis variáveis que impactam na redução do *lead time*, para um cenário de máquina única. Assim, esta etapa se destina à coleta dos dados listados no Quadro 3.1. De uma forma geral, um coeficiente de variação é dado pela razão entre a média e o desvio padrão da variável (raiz quadrada da variância), conforme explicitado no Capítulo 2.

QUADRO 3.1: Dados necessários para a obtenção das variáveis que servem de *input* para a etapa de simulação.

Dados necessários para a aplicação do método
Taxa média de defeitos
Tempo médio de duração dos <i>set ups</i>
Variância do tempo de <i>set up</i>
Tempo médio de reparo
Variância do tempo de reparo
Tempo médio entre falhas
Tempo natural de processamento
Variância do tempo natural de processamento
Tempo médio entre chegadas de peças
Variância do tempo entre chegadas
Coefficiente de variação do tempo de reparo
Coefficiente de variação do tempo de <i>set up</i>
Coefficiente de variação do tempo natural de processamento
Coefficiente de variação de chegadas

PASSO 3: Coletar dados gerais sobre a máquina e a empresa estudada. Nesse passo, a dificuldade da coleta está relacionada à facilidade de acesso e a existência de informações, relatórios ou outras formas de armazenamento dos dados necessários. Também são necessárias as informações da demanda média anual da máquina estudada, das horas trabalhadas no ano e do tamanho do lote utilizado.

PASSO 4: Estimar o limite máximo (magnitude) possível de melhoria nas variáveis de fábrica consideradas e a dificuldade (esforço) para a realização de uma melhoria.

Tal magnitude pode ser obtida por meio de entrevistas com gerentes responsáveis pela produção e por projetos de melhoria contínua. O importante nesta etapa é extrair da experiência dos funcionários envolvidos diretamente no ambiente produtivo o quanto é possível melhorar em cada uma das variáveis, considerando conhecimentos já difundidos na literatura, assim como conhecimento da tecnologia envolvida no processo, que em última análise, pode ditar os limites que as variáveis consideradas podem atingir.

Para estimar o esforço na melhoria de uma variável, supõe-se que à medida em que esforços (sejam financeiros, horas trabalhadas, dentre outros possíveis) são empregados para a

obtenção de uma melhoria, a variável passa a assumir valores diferentes ao longo do tempo observado, desenhando assim o formato dinâmico da melhoria. Para este trabalho, considera-se que a melhoria de uma variável ao longo do tempo tenha um comportamento equivalente a um decaimento exponencial. Tal consideração tem embasamento na Literatura, visto que demais trabalhos também apresentam a utilização dessa função para descrever o comportamento de melhorias realizadas em variáveis como o custo de *set up*, custo de qualidade, conforme mostrado no Quadro 3.2. Tal fato representa uma justificativa para a escolha da função exponencial como forma de representar o decaimento das seis variáveis de chão-de-fábrica em relação ao tempo.

QUADRO 3.2: Utilização de curvas para descrever melhorias em variáveis do chão-de-fábrica.

Autor	Função	Variável
Porteus (1986)	Logarítmica	Custo de <i>set up</i>
Hong, Xu e Hayya (1993)	Exponencial	Custo de <i>set up</i>
Hong e Hayya (1984)	Logarítmica	Custo de <i>set up</i> e custo de qualidade
Jaber e Bonney (2003)	Exponencial	Conhecimento em <i>set up</i>

Dessa forma, para estimar a dificuldade de melhoria de uma variável, é necessário retomar o conceito do decaimento exponencial, dado pela equação 2.20.

$$A(t) = (A_0 - G)e^{-t/\tau} \quad (2.20)$$

Para se parametrizar o decaimento exponencial de cada variável é necessário conhecer os valores:

- i) A_0 : valor inicial do parâmetro;
- ii) G : nível mínimo para qual o parâmetro pode ser reduzido;
- iii) τ : tempo de ajuste, que é o tempo necessário para a melhoria ocorrer, ou seja, o grau de dificuldade para que o gap inicial seja corrigido.

O tempo de ajuste (τ) pode ser expresso em função do tempo de meia-vida da variável. O tempo de meia-vida constitui uma importante propriedade do decaimento exponencial, e pode ser definido como o tempo necessário para atingir 50% da melhoria pretendida, ou seja, o tempo para que a diferença entre o valor inicial e o valor desejado, reduza pela metade. De

acordo com Sterman (2000), há uma relação entre o tempo de meia-vida e o tempo de ajuste, sendo que o tempo de meia-vida é 70% do tempo de ajuste.

Sendo assim, o Passo 4 exige que sejam respondidas as seguintes questões:

- i) Quais são os valores mínimos factíveis para as seis variáveis consideradas?
- ii) Qual o tempo de meia-vida de cada variável?

Devido a uma maior dificuldade de estimativa da última questão, pode-se obter, por meio de entrevistas com funcionários da empresa, uma análise comparativa entre os esforços necessários para a realização das melhorias.

PASSO 5: Inserir os dados coletados no modelo Godinho Filho e Uzsoy (2008a) e realizar simulações que avaliem as possíveis melhorias e seus respectivos impactos no *lead time*;

PASSO 6: Analisar os *outputs* das simulações realizadas com o modelo Godinho Filho e Uzsoy (2008a), que consistem em valores e gráficos que relacionam as variáveis estudadas e o *lead time* atingido com as alterações simuladas;

PASSO 7: Identificar qual variável permite a redução do *lead time* com o menor esforço empregado.

Para sintetizar os passos previamente apresentados, apresenta-se a Figura 3.2.

Método para priorização de programas de melhoria com foco na redução do *lead time*

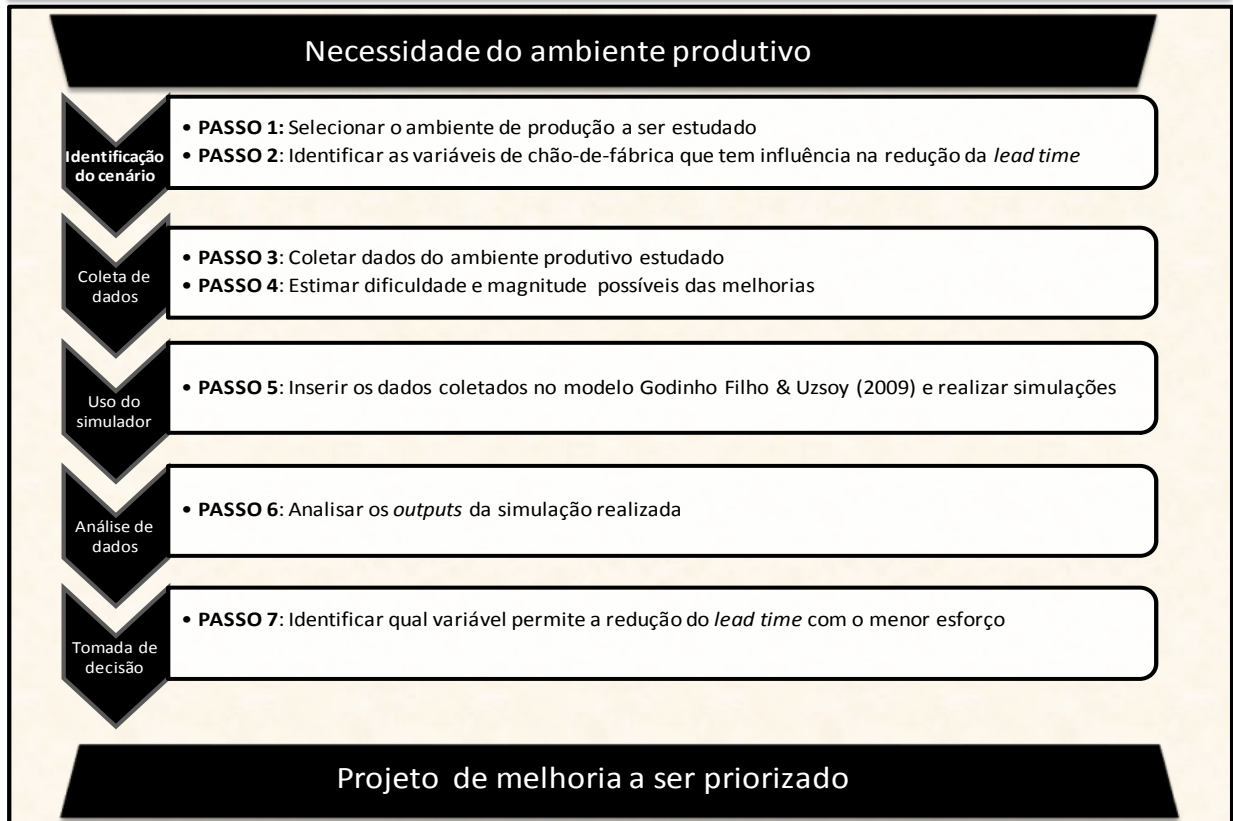


FIGURA 3.2: O método proposto para a priorização de projetos de melhoria.

Por fim, os sete passos sugeridos visam partir da observação da necessidade de melhoria de um ambiente de máquina única e obter a decisão do projeto de melhoria a ser priorizado. Os caminhos que devem ser percorridos para essa tomada de decisão serão exemplificados no próximo capítulo, que faz uma aplicação prática do método a partir de um Estudo de Caso.

CAPÍTULO 4: APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO

A estrutura do estudo de caso pode ser dividida em três partes, em que se apresenta a empresa estudada, o protocolo de entrevista e a aplicação dos sete passos do método proposto.

4.1 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA

A empresa estudada possui mais de 40 anos de existência e atua nos setores de Aviação Comercial, Aviação Executiva e Defesa. Com atuação no Brasil e em mais cinco países, as unidades estão localizadas no estado de São Paulo. No total, as unidades brasileiras contam com mais de 17 mil funcionários.

As etapas envolvidas no seu complexo processo são: projeto, desenvolvimento, fabricação, venda e suporte pós-venda de aeronaves para os segmentos de aviação comercial, aviação executiva, além do oferecimento de soluções integradas para defesa e segurança. Desde sua fundação, foram produzidos pela empresa mais de 5 mil aviões, que operam em 92 países, nos cinco continentes, tornando-a líder no mercado de jatos comerciais com até 120 assentos.

O segmento de mercado considerado na presente pesquisa é o de Aviação Executiva, que produz três tipos de aeronaves, com um total de 7 modelos, que correspondem a 13% de toda a receita da empresa. O processo produtivo de uma aeronave possui diversos e complexos passos. Desde a escolha das matérias-primas, que devem ter baixo peso e alta resistência mecânica (tais como liga de titânio, aço inoxidável e materiais compósitos) todo o processo deve atender aos requisitos do projeto de engenharia, que pode ser customizado em alguns aspectos, de acordo com os pedidos dos clientes.

4.1.1 O PROCESSO DE FABRICAÇÃO

De uma maneira geral, o processo inicia-se com a conformação do revestimento da fuselagem (a “carcaça” em formato aerodinâmico do avião), seguido do dimensionamento e ajuste dos painéis (portas e janelas são cortadas por meio de uma máquina CNC). Após essa etapa, as peças são submetidas a um processo de tratamento superficial anti-corrosão. Um

selante também é aplicado para garantir a pressurização da cabine e evitar vazamentos. Em seguida é realizada a junção das peças da fuselagem, por meio de rebites e cintas.

As etapas seguintes consistem na instalação de dutos, cabos, sistemas hidráulicos, válvulas e outros equipamentos. Em seguida, a fuselagem é pintada em uma cabine fechada, com temperatura e pressão controladas, de acordo com os requisitos do cliente. Assim, inicia-se o processo de montagem final, em que asas, motores, estabilizadores e trens de pouso são integrados à fuselagem. Isso feito, os sistemas aviônico, hidráulico, de combustível e de comandos de vôo assim como os móveis da aeronave (copa, assentos, *toilete*), dentre outros componentes, são instalados. Ensaios em solo são realizados por meio de testes e inspeções nos controles e sistemas da aeronave. Por fim, são realizados vôos de produção para a verificação dos requisitos de projeto e de fabricação, assim como para garantir os requisitos das autoridades de certificação para a emissão do certificado de aeronavegabilidade.

4.1.2 O PROCESSO DE FABRICAÇÃO DOS MÓVEIS

O foco da presente pesquisa se enquadra na etapa de fabricação dos móveis (copa, assentos, *toilete*, dentre outras peças) de aeronaves executivas. O processo de produção dos móveis é constituído pelas etapas de usinagem, montagem, revestimento, verniz, pintura, polimento e montagem final, conforme apresentado na Figura 3.1. Entre as etapas do processo são realizadas inspeção em 100% das peças. Os materiais utilizados para a fabricação dos móveis variam entre madeira, compósitos, alumínio, teflon, dentre outros.

Os móveis fabricados atendem aos três modelos de aviões executivos, sendo que o acabamento, materiais utilizados e os modelos dos móveis podem variar bastante de acordo com as especificações técnicas das aeronaves e também de acordo com o pedido do cliente.

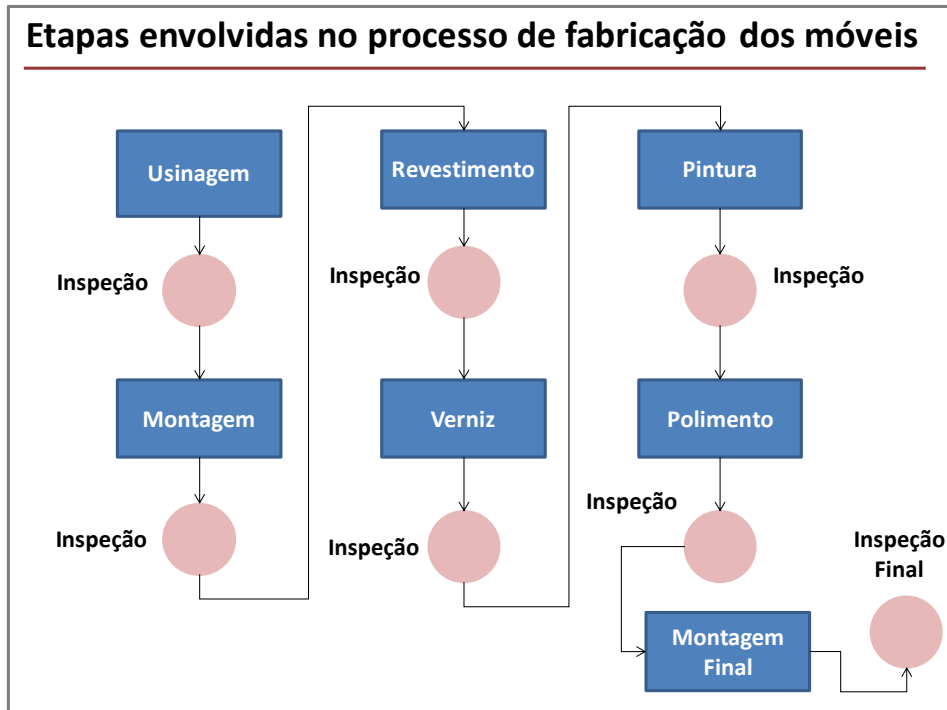


FIGURA 4.1: As etapas principais do processo de fabricação de móveis para aeronaves executivas.

4.2 PROTOCOLO DE ENTREVISTA

A empresa estudada foi escolhida devido ao fato de que a característica e complexidade de seu processo produtivo representar um ambiente favorável à aplicação do método proposto. Como um estudo inicial, foi escolhido um estudo de caso único devido às restrições de tempo inerentes a um trabalho de mestrado. No entanto, como o objetivo inicial é apresentar um exemplo de aplicação do método, o estudo de caso na empresa estudada se torna válido, devido à três razões: i) a empresa apresenta uma máquina única que é o gargalo do processo produtivo estudado; ii) o processo produtivo apresenta a necessidade de redução do *lead time*; iii) a variedade de peças usinadas na máquina gargalo e a variabilidade entre chegadas de peças fazem com que o ambiente estudado possua variabilidade, que é um ponto de interesse desta pesquisa e destacado por Hopp e Spearman (2008).

A Figura 4.2 apresenta o protocolo de entrevista inicial aplicado à empresa estudada. As questões nele apresentadas auxiliaram na elaboração do método proposto assim como no início do processo de coleta de dados na empresa.

Protocolo de entrevista
<p>Informações sobre o ambiente produtivo da empresa</p> <p>1) Existe na empresa um procedimento formal para a escolha de programas de melhoria contínua?</p> <p>2) Como é feita a priorização/seleção de programas de melhoria na empresa?</p> <p>3) Há variabilidade nos produtos produzidos na empresa ?</p> <p>4) A empresa possui em seu processo produtivo uma máquina onde não há a divisão do lote de produção com máquinas semelhantes ?</p> <p>5) Há dados sobre valores médios das seguintes variáveis ?</p> <ul style="list-style-type: none"> * tempo médio de <i>set up</i> * tempo médio de processamento * tempo médio entre falhas * tempo médio de reparo * variabilidade de chegada * variabilidade de processamento * taxa média de defeitos <p>6) Há dados sobre projetos de melhoria realizados em tais variáveis (histórico)?</p> <p>7) Há dados relativos ao esforço empregado para a realização da melhoria (por exemplo: número de funcionários alocados em projetos Kaizen, custos, etc)?</p> <p>8) Qual a demanda anual média da máquina em questão?</p> <p>9) É possível a visita do pesquisador à empresa?</p> <p>10) Caso sua empresa represente o ambiente de produção adequado a essa pesquisa podemos contar com a sua colaboração para a coleta de dados?</p>

FIGURA 4.2: Protocolo de entrevista inicial para escolha da empresa estudada.

A partir da primeira entrevista com o gerente da empresa, feita com o protocolo apresentado na Figura 4.2 (baseado no trabalho de Oliva e Watson (2011)), constatou-se que a empresa apresentava oportunidades de melhoria no processo de fabricação de móveis para as aeronaves. Intrínseco a esse processo, a etapa de usinagem de placas, que dá origem aos móveis das aeronaves, foi escolhida para o estudo. A análise desse processo produtivo por meio de visitas, observações e entrevistas, possibilitou a escolha do centro de usinagem por apresentar necessidade de redução do *lead time*. Foram feitas duas visitas técnicas à empresa e várias entrevistas não-estruturadas com funcionários do setor estudado e com o gerente de manufatura do setor de fabricação de móveis para as aeronaves, para fins de coleta de dados e entendimento da dinâmica do ambiente produtivo estudado.

4.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO

Nesta seção apresenta-se a análise dos dados e a aplicação do método para priorização de variáveis com o objetivo de reduzir o *lead time*. Esta seção está dividida em sete partes, onde cada subseção apresenta um passo do método proposto

4.3.1 SELEÇÃO DO AMBIENTE DE PRODUÇÃO A SER ESTUDADO (PASSO 1)

O ambiente produtivo selecionado para o estudo é uma máquina responsável por parte do processo de usinagem dos móveis para as aeronaves, aqui denominada de *Router 2*. Tal seleção se deve ao fato de que a *Router 2*, gargalo do processo de usinagem, processa vários tipos de peças e a redução do *lead time* de tal processo é uma das preocupações da empresa.

O processo de usinagem inicia-se com o processamento de placas de diversos materiais (teflon, madeira, alumínio, compósitos) e tamanhos (PP, P, M, G, GG e XG). Na Figura 4.1 estão representadas as estações de trabalho envolvidas no processo de usinagem de placas, denominadas pelo termo em inglês *nests*. Tal processo consiste em quatro etapas: 1) o corte na máquina 1; 2) a preparação em uma estação manual; 3) a usinagem na máquina 2 (*Router 2*) e 4) a inspeção e acabamento em uma estação de trabalho manual.

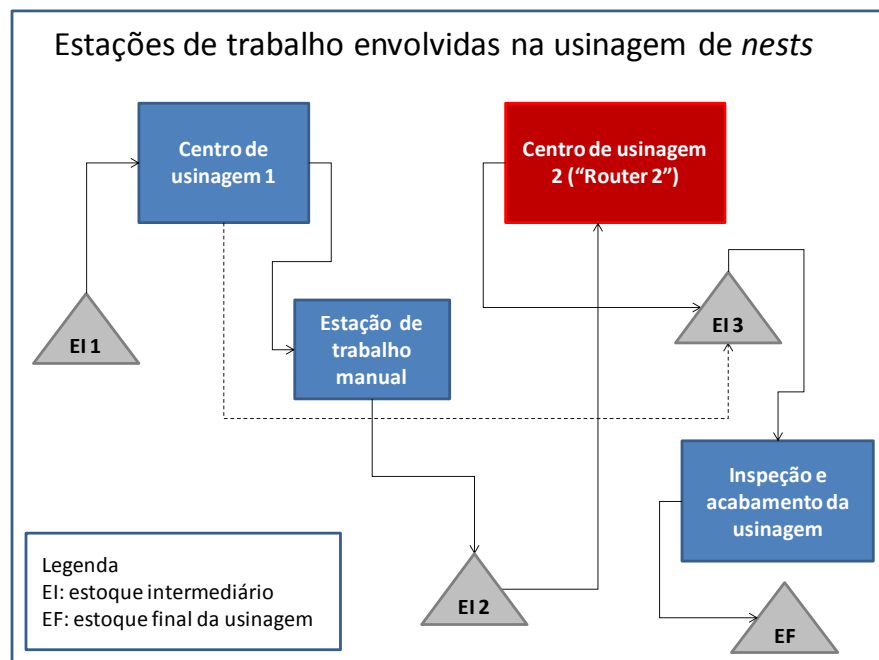


FIGURA 4.3. Estações de trabalho envolvidas na etapa de usinagem de peças constituintes dos móveis para aviação executiva. Destaque para o centro de usinagem 2, ambiente de produção selecionado para o estudo.

Estoques intermediários são utilizados entre as estações de trabalho. Ao final da etapa de acabamento e inspeção encontra-se um estoque final do processo de usinagem. A partir

deste estoque, as peças irão para os processos seguintes: montagem, revestimento, verniz, pintura, polimento e montagem final, conforme já apresentado na Figura 4.3.

A *Router2* representa o ambiente de produção “máquina única” uma vez que não divide a produção com uma máquina semelhante. A mesma processa uma variedade considerável de produtos, o que gera variabilidade no ambiente produtivo estudado. Como explicado anteriormente, a empresa nota a necessidade de melhoria no tempo de atravessamento do processo como um todo. No entanto, é importante destacar nesse ponto que o *lead time* a ser reduzido no ambiente estudado é o *lead time* focal da máquina gargalo estudada, a *Router 2*. Neste caso, o *lead time* pode ser definido como a soma entre o tempo de processamento neste centro de usinagem e o tempo gasto na fila anterior ao gargalo, conforme apresenta a Figura 4.4.

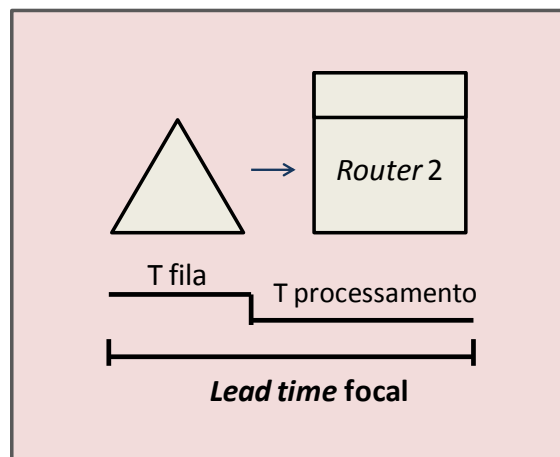


FIGURA 4.4: Ilustração do conceito de *lead time* focal (soma do tempo de fila e do tempo de processamento) abordado no trabalho.

A redução do *lead time* global, conforme definido por Ericksen et al. (2007) é o objetivo maior do paradigma TBC e, certamente, acarreta em ganhos maiores para a empresa analisada. Entretanto, como um estudo inicial de tal ambiente, a análise da redução do *lead time* focal de uma máquina gargalo constitui uma contribuição para o tema. Pesquisas futuras que explorem mais amplamente outros sistemas produtivos são vistas como oportunidades para um melhor entendimento de tal problema.

4.3.2 IDENTIFICAÇÃO DAS VARIÁVEIS QUE IMPACTAM NA REDUÇÃO DO LT (PASSO 2)

A máquina estudada apresenta variabilidade na entrada das peças a serem processadas, uma vez que há certa variedade de materiais e também do tamanho das placas. Essa característica gera a necessidade de realização de *set ups* entre o processamento de um lote e outro. Assim, a variabilidade presente no processo e o tempo de *set up* requerido são duas variáveis que podem sofrer melhorias de forma a contribuírem para a redução do *lead time* do processo produtivo estudado.

Conforme um processo produtivo típico há outras variáveis que também podem ser melhoradas para que o *lead time* seja reduzido. Dentre elas estão o tempo de processamento propriamente dito, o tempo entre as falhas que ocorrem na máquina, o tempo gasto para tais reparos, assim como a taxa de eventuais defeitos do processo de manufatura.

Dessa forma, o ambiente de estudo encontrado na empresa caracteriza-se como um ambiente de máquina única, em que há a possibilidade de coleta de dados de seis variáveis que impactam na redução do *lead time*, a saber: tempo médio de *set up*, tempo médio de processamento, tempo médio entre falhas, tempo médio de reparo, variabilidade de chegada, variabilidade de processamento e taxa média de defeitos.

4.3.3 COLETA DE DADOS GERAIS DA MÁQUINA ESTUDADA (PASSO 3)

Foram realizadas duas visitas técnicas em uma das plantas da empresa, em que entrevistas não estruturadas foram realizadas com os funcionários envolvidos no processo de usinagem. Os dados foram coletados por meio de anotações, observações e medições durante as visitas e entrevistas. Algumas informações foram fornecidas pela empresa após as visitas técnicas serem realizadas. Em situações de dúvidas, os dados e informações foram enviados ao contato da empresa para os esclarecimentos necessários e melhor compreensão do ambiente estudado.

Durante esta etapa, foram solicitados à empresa valores médios das variáveis descritas na Seção 4.3.2. Os dados obtidos estão apresentados na Tabela 4.1. Outros dados que também

contribuem para a redução do *lead time*, mas permaneceram constantes nas simulações, por serem parâmetros da empresa, também foram coletados nesta etapa. Tais parâmetros, se alterados, também podem contribuir para a redução do *lead time*. No entanto, constituem o cenário real da empresa no momento do estudo e serão considerados constantes nas simulações, tais como informações sobre demanda média anual e horas trabalhadas por dia, conforme listado na Tabela 4.2.

TABELA 4.1: Valores médios das variáveis que impactam na redução do *lead time*.

Variáveis do chão-de-fábrica	Dados da empresa estudada
Taxa média de defeitos	6%
Tempo médio de duração dos <i>set ups</i> (min)	10
Variância do tempo de <i>set up</i>	12,5
Tempo médio de reparo (min)	3.532,20
Variância do tempo de reparo	14.451.705,80
Tempo médio entre falhas (min)	53.271,31 (1 quebra a cada 2,47 meses)
Tempo natural de processamento (min)	25,9
Variância do tempo natural de processamento	1.094,54
Coefficiente de variação do tempo de reparo	1,08
Coefficiente de variação do tempo de <i>set up</i>	0,47
Coefficiente de variação do tempo natural de processamento	1,28
Coefficiente de variação de chegadas	1,64

TABELA 4.2: Valores de alguns parâmetros da empresa estudada.

Parâmetros da empresa	
Horas trabalhadas por dia	16,33
Horas trabalhadas no ano	3920
Demanda média anual (<i>nestjs</i> /ano)	6480
Tamanho de lote (peças)	1

Particularmente, para a obtenção do coeficiente de variação entre chegadas das placas na máquina estudada, foi necessária a aplicação de etiquetas nas placas para o acesso às informações de data e horário de saída da estação de trabalho manual assim como da data e horário de chegada ao centro de usinagem *Router 2*. Assim, por meio da coleta dessas informações foi possível verificar a existência da fila que se forma antes de uma placa ser processada na máquina gargalo. A Figura 4.5 ilustra a situação recorrente na empresa. De acordo com os dados coletados e a partir da análise da dinâmica da fila de placas, observa-se que a cada 64 minutos, uma placa chega ao centro de usinagem *Router 2*.

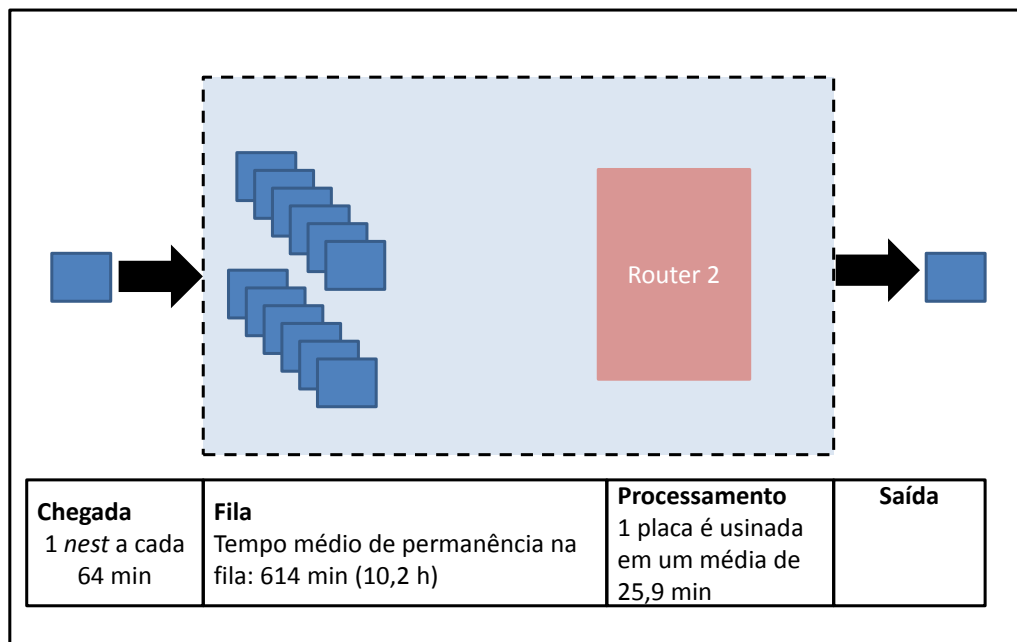


FIGURA 4.5: Representação da fila de placas anterior ao processamento na máquina gargalo.

No entanto, cada placa permanece, em média, cerca de 614 minutos (ou 10,2 horas) esperando para ser usinada. Após este tempo de espera, a placa é usinada em uma média de 25,9 minutos e depois é liberada para a próxima estação de trabalho.

Assim, por meio das informações coletadas durante alguns dias de trabalho da empresa estudada, foi possível calcular a variável coeficiente de variabilidade entre as chegadas das placas, que foi de 1,64. De acordo com Hopp e Spearman (2008), um coeficiente de variabilidade acima de 1,33 caracteriza um ambiente de Alta Variabilidade.

Analisando os demais coeficientes de variabilidade calculados e apresentados na Tabela 4.2 observa-se a seguinte classificação, de acordo com Hopp e Spearman (2008):

i) coeficiente de variação do tempo de reparo (1,08) e coeficiente de variação do tempo natural de processamento (1,28): Variabilidade Média – coeficiente de variabilidade entre 0,75 e 1,33;

ii) coeficiente de variação do tempo de *set up* (0,47): Baixa Variabilidade – coeficiente menor que 0,75.

A taxa de defeitos foi calculada por meio da relação entre o tempo destinado ao retrabalhos das peças que saíram da *Router 2* com problemas de Qualidade e o tempo total de trabalho da funcionária que realiza o acabamento e a inspeção das peças que saem da *Router 2* (conforme esboçado na Figura 4.1). Tal medida foi tomada, pois a empresa não possuía informações específicas sobre a taxa de defeitos desse centro de usinagem.

4.3.4 ESTIMATIVA DA DIFICULDADE E MAGNITUDE POSSÍVEIS DAS MELHORIAS (PASSO4)

Para estimar a dificuldade e magnitude de melhoria das variáveis analisadas, foi solicitado à empresa os valores mínimos possíveis de serem atingidos para cada variável, assim como a escala de dificuldade atribuída para cada melhoria considerada. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 4.3.

TABELA 4.3: Valores fornecidos pela empresa sobre as magnitudes possíveis de serem atingidas e suas respectivas escalas de dificuldade.

Variável	Valor atual (A ₀)	Valor mínimo atingível (G)	Escala de dificuldade (h)
Taxa média de defeitos	6%	0,03%	11520
Tempo médio de duração dos <i>set ups</i> (min)	10	4	17280
Tempo médio de reparo (min)	3532,20	3510,00	2880
Tempo médio entre falhas (min)	53271,31	797040,00	5760
Coefficiente de variação do tempo de reparo	1,08	0,30	1920
Coefficiente de variação do tempo de set up	0,47	0,40	1440
Coefficiente de variação do t. natural de process.	1,68	1,38	4320
Coefficiente de variação de chegadas	1,64	1,31	2880

A escala de dificuldade foi dada em horas necessárias de trabalho dos funcionários envolvidos nos eventuais projetos de melhoria, considerando um turno de 8h diárias para cada funcionário. As informações fornecidas pela empresa que permitiram chegar aos valores apresentados na Tabela 4.3 estão apresentadas no Quadro 4.1. Após uma análise feita pelo gerente de manufatura da empresa, os valores possíveis de se obter foram justificados e o esforço medido em número de pessoas necessárias para a execução de cada projeto, nos respectivos tempos estimados. Alguns valores do Quadro 4.1 foram convertidos nas unidades utilizadas no modelo para serem apresentados na Tabela 4.3.

QUADRO 4.1: Informações fornecidas pela empresa para estimativa de magnitude e esforço.

VARIÁVEL	MELHORIA	EXECUÇÃO	OBSERVAÇÕES
<i>Taxa média de defeitos</i>	<i>De 6% para 0,03%</i>	<i>Kaizen Estruturante (6 meses - 8 pessoas)</i>	<i>Para problemas de qualidade, considera-se que 300dppm é aceitável para processos especiais. Logo teríamos que melhorar o processo de 60000dppm para 300dppm.</i>
<i>Tempo médio de duração dos set ups</i>	<i>De 10 min para 4 min</i>	<i>Projeto de 1,5 anos de 4 pessoas da empresa</i>	<i>Projeto de melhoria já iniciado pela empresa</i>
<i>Tempo médio de reparo</i>	<i>De 58,9 h para 58,5 h</i>	<i>Projeto Kaizen (2 meses - 6 pessoas)</i>	<i>Chegar ao 1º quartil da distribuição, ou seja, 0,975h</i>
<i>Tempo médio entre falhas</i>	<i>De 1 falha a cada 49,33 dias para 1 falha a cada 738 dias</i>	<i>Projeto Kaizen (3 meses - 8 pessoas)</i>	<i>Chegar ao 3º quartil da distribuição, ou seja, 738 dias</i>
<i>Coefficiente de variação do tempo de reparo</i>	<i>Redução de 72% no coeficiente de variação</i>	<i>Kaizen de célula (2 meses - 4 pessoas)</i>	<i>Redução de outliers em 50%.</i>
<i>Coefficiente de variação do tempo de set up</i>	<i>Redução de 15% no coeficiente de variação</i>	<i>Kaizen de célula (2 meses - 3 pessoas)</i>	<i>Redução de outliers em 50%.</i>
<i>Coefficiente de variação do tempo natural de processamento</i>	<i>Redução de 17,8% no coeficiente de variação</i>	<i>Projeto Kaizen (3 meses - 6 pessoas)</i>	<i>Redução de outliers em 50%.</i>
<i>Coefficiente de variação de chegadas</i>	<i>Melhoria de 20% no coeficiente de variação</i>	<i>Kaizen de célula (2 meses - 6 pessoas)</i>	<i>Melhoria atingível desenvolvendo programa de scheduling</i>

A escala de dificuldade associada à melhoria de cada variável, apresentada na Tabela 4.3, representa o tempo que seria gasto para que a diferença entre o valor atual (A_0) e o valor mínimo atingível (G) seja corrigida. No entanto, de acordo com Sterman (2000), teoricamente o *gap* inicial de um decaimento exponencial nunca é completamente corrigido, pois, em um tempo finito, haverá sempre uma pequena fração do *gap* remanescente. De acordo com esse autor, isso ocorre devido à característica de que no decaimento exponencial, a taxa de correção deste intervalo ($A_0 - G$) não é constante. Se a taxa de correção (dada por $(A_0 - G)/\tau$) deste intervalo permanecesse constante, o *gap* inteiro seria corrigida no tempo de ajuste τ .

Segundo Sterman (2000), em termos práticos, considera-se que o intervalo inicial seja corrigido depois de um intervalo de tempo equivalente a três ou quatro tempos de ajuste. Ainda de acordo com Sterman (2000), pode-se considerar que após 4 tempos de ajuste (4τ), 98% da melhoria desejada é atingida. Dessa forma, interpreta-se neste trabalho que a escala de dificuldade de cada variável, dada na Tabela 4.3, é o tempo para se atingir completamente a melhoria desejada. Sendo assim, com base na aproximação de Sterman (2000), essa escala de dificuldade pode ser considerada como sendo 4τ . Dessa forma, para a obtenção do tempo de ajuste (τ), basta que a escala de dificuldade dada para cada variável seja dividida por 4. Os

valores obtidos para os tempos de ajuste associados às melhorias em cada variável estão apresentados na Tabela 4.4.

Considerando a Regra dos 70 entre o tempo de ajuste e o tempo de meia-vida (STERMAN, 2000), a Tabela 4.4 também apresenta os tempos de meia-vida de cada variável com o intuito de ilustrar esta propriedade da curva parametrizada e contribuir para a análise do leitor.

TABELA 4.4: Tempos de ajuste e tempos de meia-vida para obtenção de melhoria, dado em horas, para cada variável estudada.

Variável	% Melhoria	Tempo de ajuste (h)	Tempo de meia-vida (h)
Taxa média de defeitos	99,50%	2880	2016
Tempo médio de duração dos <i>set ups</i>	60,00%	4320	3024
Tempo médio de reparo	0,70%	720	504
Tempo médio entre falhas	1396,00%	1440	1008
Coefficiente de variação do tempo de reparo	72,00%	480	336
Coefficiente de variação do tempo de set up	15,00%	360	252
Coefficiente de variação do tempo natural de processamento	17,80%	1080	756
Coefficiente de variação de chegadas	20,00%	720	504

Assim, assumindo-se as considerações feitas, foram obtidas as informações necessárias ao estudo da redução do *lead time* na *Router 2*. A próxima seção irá apresentar a utilização desses dados no modelo de Godinho Filho e Uzsoy (2008a).

4.3.5 INSERIR OS DADOS COLETADOS NAS SIMULAÇÕES UTILIZANDO O MODELO GODINHO FILHO E UZSOY (2008^a) (PASSO 5)

Esta etapa do método consiste em inserir os dados obtidos nos passos anteriores no modelo de Godinho Filho e Uzsoy (2008a) para a análise do comportamento do *lead time* ao longo do período simulado. Aqui, além dos dados das Tabelas 4.1 à Tabela 4.4, considerou-se um *time step* de 15 dias (245h) e um período de simulação de 6 anos (23520 h).

As simulações foram realizadas da seguinte forma: primeiramente, os dados foram inseridos sem considerar a melhoria nas variáveis, obtendo-se assim, o *lead time* focal da máquina no momento da coleta dos dados. Posteriormente, foram feitas simulações considerando a melhoria em uma variável individualmente. Assim, as oito estruturas que modelam o processo de melhoria contínua no modelo Godinho Filho e Uzsoy (2008a) foram atualizadas com os valores coletados. Para simular as melhorias, é necessária a atualização dos valores dos objetivos com relação às melhorias em cada variável. Nessas estruturas de melhoria, apresentadas na Seção 2.3, se encontram esses parâmetros que se destinam a limitar

a magnitude que determinada variável pode atingir. Assim, em cada simulação realizada nesta etapa, o objetivo com relação à melhoria na variável estudada foi alterado de acordo com a porcentagem de melhoria desejada para cada variável, apresentados na Tabela 4.5. Para todas as simulações foram avaliados os comportamentos das variáveis em relação ao tempo simulado e também o impacto que a melhoria gerou no *lead time*.

4.3.6 ANÁLISE DOS *OUTPUTS* DA SIMULAÇÃO REALIZADA (PASSO 6)

As simulações no *software* Vensim permitiram encontrar um *lead time* focal inicial de 3,97 horas para a *Router 2*. A partir das simulações das melhorias, foram encontrados os seguintes resultados para cada variável:

Taxa média de defeitos

Com os dados coletados na pesquisa, a simulação no Vensim resultou que uma redução na taxa de defeitos de 6% para 0,12% proporciona um *lead time* de 3,71h. Essa melhoria pode ser obtida após 11.515 horas, valor aproximadamente igual à 4τ , que equivale ao tempo fornecido pela empresa para a máxima melhoria possível (conforme apresentado na Tabela 4.3). A Figura 4.6 apresenta o gráfico da taxa de defeitos ao longo do período simulado.

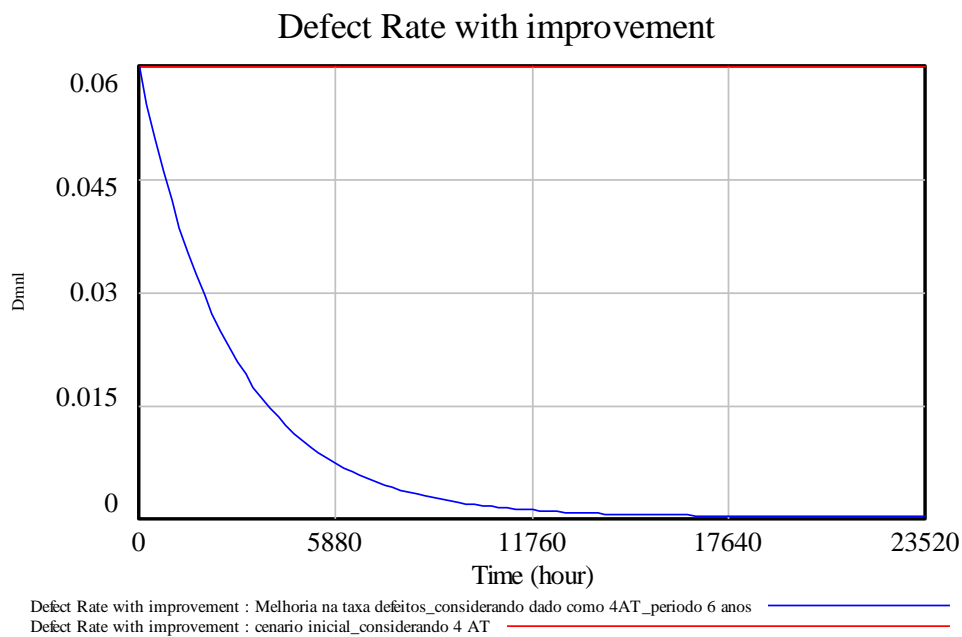


FIGURA 4.6: Valores da taxa média de defeitos após melhorias ao longo do período simulado.

Tempo médio de duração dos set ups

Para o tempo médio de *set up*, as simulações apresentam que uma redução de 10 min para 4,10 min nesta variável, possibilita atingir um LT de 3,94h. O tempo para se obter tal melhoria foi de 17150h. A Figura 4.7 a seguir apresenta o comportamento da melhoria do tempo médio de *set up* ao longo do período simulado.

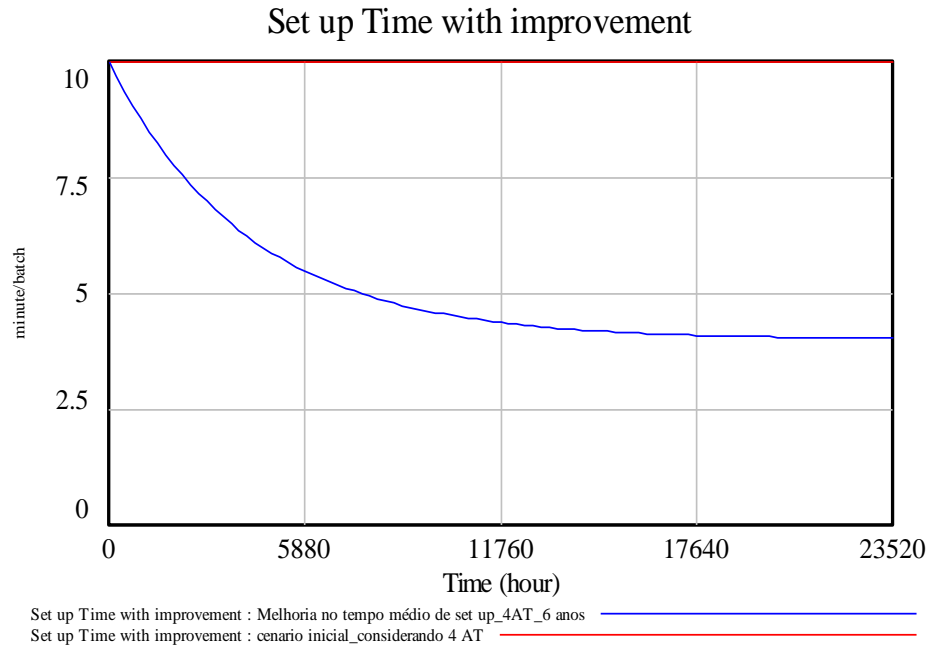


FIGURA 4.7: Valores do tempo de *set up* após melhorias ao longo do período simulado.

Tempo médio de reparo

Para se reduzir o tempo médio de reparo na máquina estudada de 3532,20 min para 3510,00min seriam necessárias 1225 horas. Esta melhoria permite atingir um LT de 3,95h. A Figura 4.8 ilustra a melhoria no tempo médio de reparo:

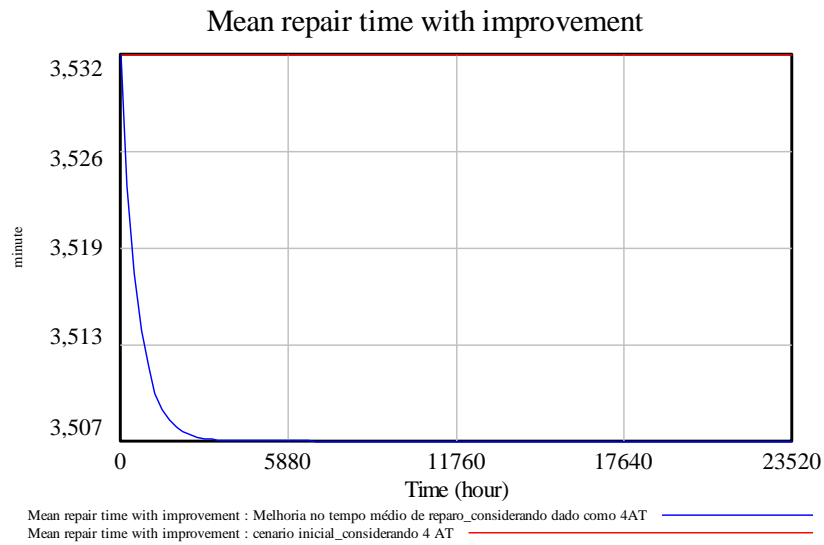


FIGURA 4.8: Valores do tempo médio de reparo após melhorias ao longo do período simulado.

Coefficiente de variação do tempo de reparo

Em relação ao cv do tempo de reparo, 1960 horas seriam necessárias para a redução desta variável em 72%. O impacto dessa melhoria se traduz em um LT de 2,59h. A Figura 4.9 ilustra essa melhoria.

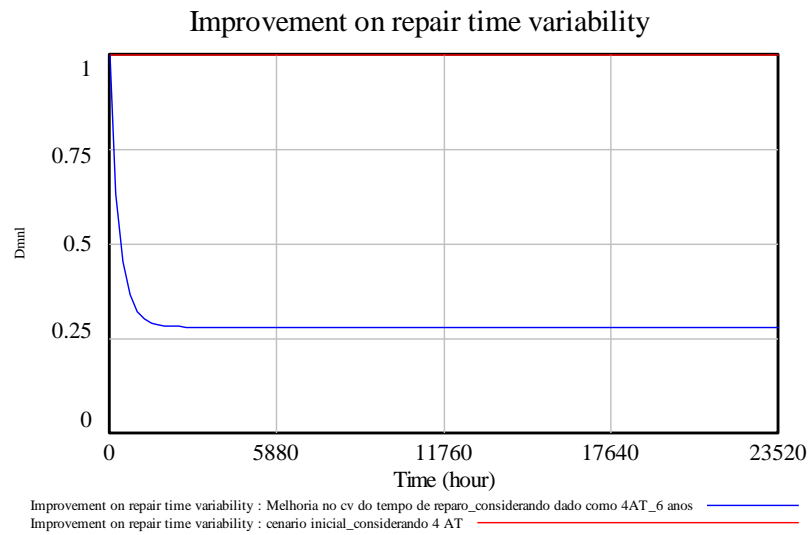


FIGURA 4.9: Melhoria na variabilidade do tempo médio de reparo ao longo do tempo.

Coefficiente de variação do tempo de *set up*

Para o cv do tempo de *set up*, a simulação no Vensim resultou que uma redução de 85% nesta variável não proporciona redução significativa no *lead time*, mantendo-o em 3,97h. A melhoria nessa variável pode ser obtida após 980 horas. A Figura 4.10 ilustra esse decaimento.

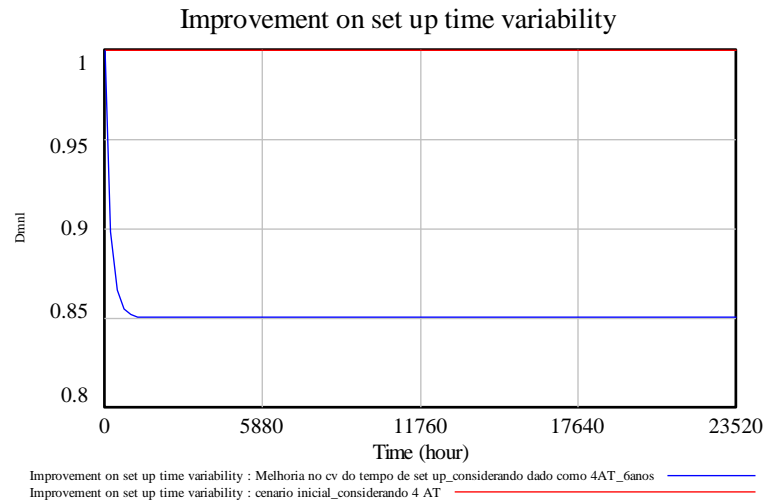


FIGURA 4.10: Melhoria na variabilidade do tempo de *set up* ao longo do tempo simulado.

Coefficiente de variação do tempo natural de processamento

Para essa variável, as simulações apresentam que uma redução de 82% no cv do tempo natural de processamento, possibilita atingir um LT de 3,91h. O tempo para a obtenção de tal melhoria foi 3675h. A Figura 4.11 a seguir apresenta o comportamento da melhoria na variabilidade do tempo natural de processamento ao longo do período simulado.

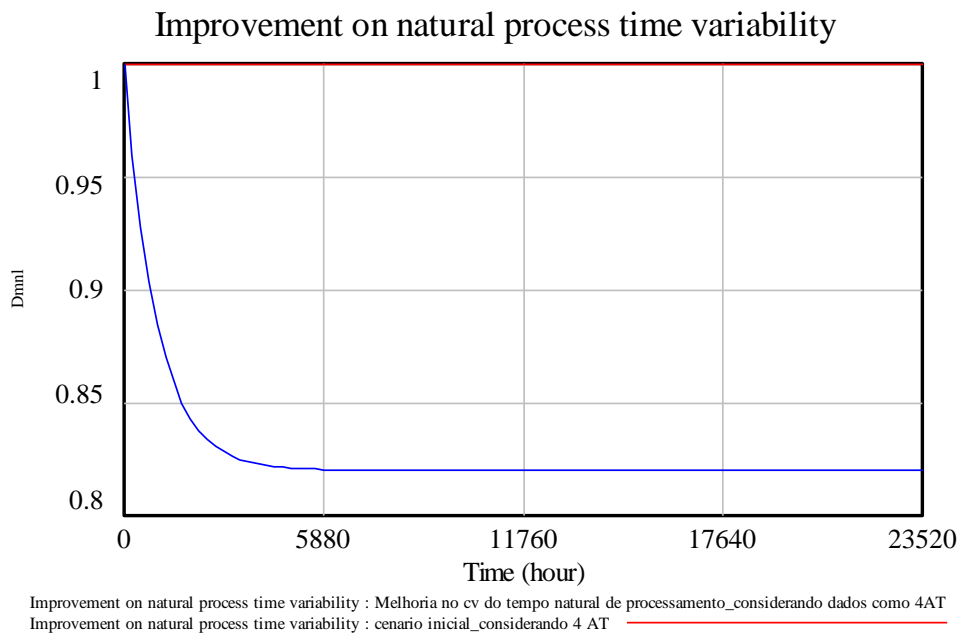


FIGURA 4.11: Melhoria na variabilidade do tempo natural de processamento ao longo do tempo.

Coefficiente de variação do tempo entre chegadas

Para se reduzir o cv do tempo entre chegadas de peças de 1,64 para 1,31 seriam necessárias 2450 horas. Esta melhoria não permite atingir uma redução significativa no LT. A Figura 4.12 ilustra o comportamento da redução da variabilidade ao longo do tempo.

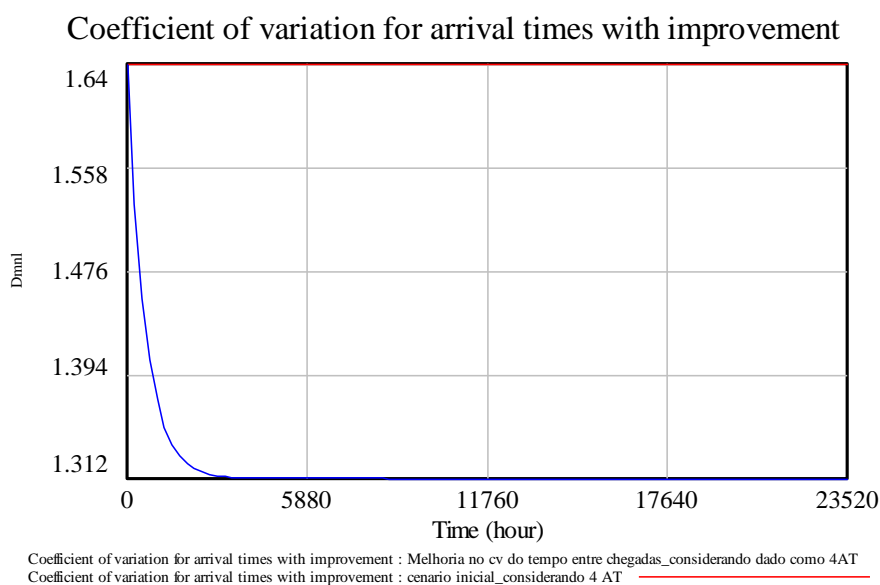


FIGURA 4.12: Melhoria na variabilidade do tempo entre chegadas ao longo do tempo simulado.

Tempo médio entre falhas

Em relação ao tempo médio entre falhas, a melhoria dessa variável de 1 falha a cada 53.271,31 min para tempo para 1 falha a cada 784.506,6 min, proporcionaria um LT de 0,61h. Essa redução seria obtida com um esforço de 5880 horas. A Figura 4.13 apresenta o comportamento dessa melhoria.

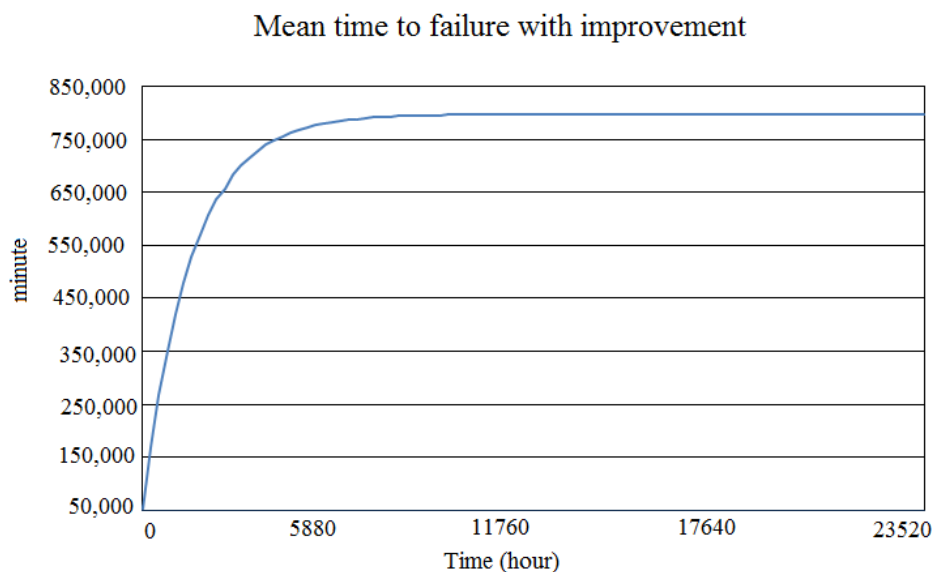


FIGURA 4.13: Melhoria no tempo médio entre falhas ao longo do tempo simulado.

Assim, a partir dos resultados obtidos pode-se analisar de forma comparativa o tempo dispendido para a realização de cada melhoria, o valor obtido para a variável ao final da simulação e sua respectiva contribuição para a redução do LT. A Tabela 4.5 sintetiza essas informações:

TABELA 4.5: Valores obtidos nas simulações a partir das melhorias realizadas.

Variável	Valor obtido	Melhoria	Tempo dispendido	LT após melhoria	Redução no LT
Taxa média de defeitos	0,12%	98,0%	11515h	3,71 h	6,55%
Tempo médio de duração dos set ups	4,1 min	59,0%	17150h	3,94 h	0,76%
Tempo médio de reparo	3510 min	0,63%	1225h	3,95 h	0,50%
Tempo médio entre falhas	784506,6 min	1373%	5880h	0,61 h	84,63%
Coefficiente de variação do tempo de reparo	0,30	72,0%	1960h	2,59 h	34,76%
Coefficiente de variação do tempo de set up	0,40	15,0%	980h	3,97 h	0,00%
Coefficiente de variação do t. natural de process.	1,38	18,0%	3675h	3,91 h	1,51%
Coefficiente de variação de chegadas	1,31	20,1%	2450h	3,96 h	0,25%

Por fim, ao término deste passo, a gerência da produção possui embasamento para a análise dos *trade-offs* inerentes à escolha de uma melhoria em detrimento a outra. No próximo e último passo do método serão apresentadas as discussões cabíveis a esse processo de decisão.

4.3.7 IDENTIFICAÇÃO DA VARIÁVEL QUE PERMITE REDUÇÃO DO LEAD TIME COM MENOR ESFORÇO (PASSO 7)

Como pode ser observado pelos resultados apresentados no Passo 6, a melhoria que mais contribuiu para a redução do *lead time* da máquina estudada foi a melhoria na variável tempo médio entre falhas. Observa-se claramente que a maior redução permite atingir um *lead time* de 0,61h, que representa uma melhoria maior que 80%. Dessa forma, considerando o esforço de 5880h, é possível optar pela escolha de um programa de melhoria que envolva a redução do tempo médio entre falhas. Para se atingir a melhoria prevista se faz necessária a estruturação de políticas, medidas e decisões que atinjam o valor factível para essa variável. No caso estudado, a empresa considera possível a melhoria do tempo médio entre falhas do valor atual (que equivale a uma falha a cada 2,47 meses) para um valor de uma falha a cada 24,6 meses. Se implementada, essa melhoria certamente acarretará em retornos financeiros significativos para a empresa.

Caso a empresa opte por realizar um investimento menor para a redução do LT, os resultados demonstram que uma alternativa para a empresa seria a melhoria do coeficiente de variação do tempo e reparo. Com um terço do esforço necessário para a redução do tempo médio entre falhas é possível obter uma redução de 34,76% no LT. As demais melhorias não impactaram significativamente na redução do *lead time*. Então, cabe a empresa analisar o *trade-off* existente entre a melhoria no tempo médio entre falhas ou a melhoria no coeficiente de variação do tempo de reparo, de acordo com as possibilidades e interesses da empresa no momento da decisão.

Vale salientar que os resultados obtidos para as simulações, apresentados na Tabela 4.5, estão de acordo com trabalhos anteriores encontrados na Literatura. No que tange à alta contribuição da redução no tempo médio entre falhas encontrada neste trabalho, o resultados obtidos por Guimarães et al. (2012) também constatam esse fato. De acordo com esses

autores, para um ambiente de máquina única a maior contribuição para o *lead time* é dada pela redução do tempo médio entre falhas em ambientes produtivos de baixo desempenho. Já a alta contribuição do coeficiente de variação do tempo de reparo obtida com os dados do Estudo de Caso gerou uma mudança de patamar nessa variável, que passou de um ambiente de média variabilidade (cv igual a 1,08) para um ambiente de baixa variabilidade (cv igual a 0,3). Assim, a redução na variabilidade dada pela melhoria nessa variável se traduz em um ambiente de produção mais efetivo de uma forma geral, de acordo com Hopp e Sperman (2008).

A baixa contribuição (redução de 6,55%) da melhoria na taxa de defeitos encontrada neste trabalho também é destaque nos resultados obtidos por Godinho Filho e Uzsoy (2008a, 2008b, 2009, 2011a, 2011b). De acordo com estes autores, para um ambiente de máquina única, a taxa de defeitos é um programa com baixa contribuição para a redução do LT, juntamente com o coeficiente de variação do tempo entre chegadas. Neste trabalho, a baixa contribuição no *lead time* (0,25%) dada pela melhoria no cv do tempo entre chegadas também está de acordo com Godinho Filho e Uzsoy (2008a, 2008b, 2009, 2011a, 2011b).

Apesar de os resultados obtidos por Guimarães et al. (2012) destacarem que o tempo de *set up* e o tempo de reparo têm grande contribuição para redução do *lead time*, a melhoria que a empresa conseguiria fazer no tempo de reparo é baixa (0,63%) o que poderia justificar a pequena contribuição obtida para a redução no LT. Em relação ao tempo de *set up*, embora fosse esperada uma redução maior no LT, deve-se considerar que a empresa já trabalha com um tempo de *set up* relativamente baixo (10 min). Devido a esse fato, mesmo uma redução de 59% nesta variável não resultaria em contribuição significativa para o *lead time*.

É interessante destacar que justamente este programa de melhoria (redução no tempo médio de *set up*) já foi iniciado pela empresa estudada, antes do conhecimento dos resultados do presente estudo. De acordo com as simulações realizadas, observa-se que o esforço empregado para a realização desta melhoria (17150h) não acarretará em melhoria significativa para o *lead time* da empresa, e conseqüentemente, não acarretará em retornos financeiros consideráveis. A partir de um relatório gerado com base na presente pesquisa, a empresa poderá rever a forma como aplicará seus investimentos.

No que tange à variabilidade do tempo de *set up*, observa-se que a empresa já possui Baixa Variabilidade (cv < 0,75), o que contribuiu para o fato de que uma redução de 15%

nesta variável não contribua para a redução do *lead time*. Em relação à variabilidade do tempo natural de processamento, uma melhoria de 18% nesta variável não foi suficiente para uma redução mais representativa no LT, uma vez que mesmo após a simulação da melhoria, a empresa continuaria a operar com um alto coeficiente de variação ($cv > 1,33$).

Por fim, no próximo capítulo o objetivo do presente trabalho será retomado e conclusões serão tecidas a respeito do mesmo.

CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES

A presente pesquisa teve como objetivo propor um método que auxilie o meio corporativo na escolha da variável do chão-de-fábrica que proporcione maior redução do *lead time* em um ambiente de máquina única.

Para responder à questão de pesquisa deste trabalho foi desenvolvido um método contendo sete passos a serem seguidos para a escolha da variável a ser priorizada em projetos de melhoria. Para fornecer um exemplo da aplicação do método, foram utilizados dados de um Estudo de Caso realizado em uma empresa da indústria aeronáutica. As variáveis de chão-de-fábrica consideradas e analisadas foram: i) variabilidade no tempo de processamento, ii) variabilidade na chegada das ordens, iii) tempo médio de *set up*, iv) tempo médio de reparo, v) tempo médio entre falhas e vi) taxa média de defeitos.

O desenvolvimento e aplicação do método proposto permitem as seguintes conclusões:

- i. A complexa estrutura de um chão-de-fábrica exige o entendimento de sua dinâmica de funcionamento e das relações que os atores atuantes desse cenário (as variáveis e parâmetros de chão-de-fábrica) mantêm entre si. Depois de um estudo da literatura sobre o tema, que não foi exaustivo, mas amplo, nota-se que a Teoria *System Dynamic* e a teoria *Factory Physics* constituem um instrumento valioso para o entendimento de tais aspectos;
- ii. De uma forma geral, a eficácia do método está ligada à qualidade das informações coletadas na empresa. Para que os intervalos de confiança e valores gerados como output do modelo sejam confiáveis, a empresa deve alocar esforços para o levantamento dos dados médios, desvios e realizar um estudo com funcionários-chave para a obtenção das estimativas de magnitude atingível da variável e grau de dificuldade associado às melhorias;
- iii. A coleta de dados sobre os valores possíveis de serem obtidos com eventuais melhorias, juntamente com o esforço para obter tais melhorias constituiu, para o estudo de caso realizado, a maior dificuldade, uma vez que tais dados tiveram que ser analisados e simulados pelo gerente que participou da pesquisa, por meio de sua experiência na área e vivência na fábrica.

- iv. Para o ambiente estudado, ou seja, uma máquina única gargalo de um processo de usinagem, o resultado da aplicação dos sete passos do método foram a potencial melhoria de 84,63% no *lead time*, que podem ser obtidos com um projeto de melhoria de 1373% no tempo médio entre falhas, demandando um esforço de 5880h. Como alternativa, uma redução de 34,76% no *lead time* também se faz possível por meio do investimento de 1960h de trabalho para uma melhoria de 72% no coeficiente de variação do tempo de reparo;
- v. As características e dados coletados da empresa permitiram que os resultados tivessem um desvio grande no que tange a redução do LT. No entanto, para outros cenários, podem-se obter melhorias com um desvio padrão menor entre elas, o que geraria um ônus a mais no processo decisório. Para tais situações, sugere-se que melhorias combinadas entre variáveis que demandem menos esforço sejam simuladas para se investigar a existência de possíveis sinergias.

Acredita-se que o modelo aqui proposto possa ser aplicado a outras empresas, sem necessidade de alteração da estrutura do simulador, caso o interesse seja o estudo de uma máquina única ou um ambiente celular. Isso é possível devido ao fato de que um ambiente de manufatura celular com padrão de fluxo *flowshop*, onde não há presença de estoque em processo é equivalente a um ambiente de máquina única.

Certamente, os ambientes produtivos reais podem ser caracterizados por uma maior complexidade, em termos de número de máquinas e de fluxo de materiais e informações, quando comparados com o ambiente de máquina única. No entanto, acredita-se que a análise de um sistema de máquina única, onde esta seja o gargalo, proporciona contribuições para a gerência da manufatura. Como o gargalo dita o ritmo do sistema produtivo como um todo, melhorias realizadas em tal ponto serão melhorias aplicadas a todo o ambiente produtivo. No entanto, essa limitação da pesquisa pode servir de perspectiva para futuras pesquisas no tema.

A exploração de outros ambientes produtivos, tais como: um sistema *job shop* e *flow shop* podem ser explorados futuramente. Outra oportunidade para ser explorada em futuras pesquisas é a questão da parametrização da curva que caracteriza a melhoria de determinada variável. Neste trabalho, foi considerado que o comportamento das melhorias de todas as variáveis se assemelha ao decaimento exponencial. No entanto, faltam pesquisas que assegurem que esta aproximação de fato reflete a realidade.

REFERÊNCIAS

- ACKOFF, R. L.; SASIENI, M. W. **Pesquisa Operacional**. Rio de Janeiro: LTC, 1971.
- AGRELL, P.L.; WIKNER, J. An MCDM framework for dynamics systems. **International Journal Economics**, v.45, p.279-292, 1996.
- 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.
- ANDREWS, K.R. The concept of Strategy. In: Mintzberg, H. e Quin, J.B. **The Strategy Process – Concepts, contexts, case**. 3ªed. New Jersey: Prentice Hall, 1996.
- AURAND, S. S.; MILLER, P.J. The Operating Curve: a Method to Measure and Benchmark Manufacturing Line Productivity. In: **Proceedings of the Advanced Semiconductor Manufacturing Conference and Workshop**, Set,10-12, p.391-397, 1997.
- BASTOS, A.A.P. **A dinâmica de sistemas e a compreensão da estrutura de negócios**. 2003. 132f. Dissertação (Mestrado em Administração) – Departamento de Administração, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- BARRATT, M.; CHOI, T.Y; LI, M. Quantitative case studies in operational management: Trends, research outcomes, and future research implications. **Journal of Operations Management**, v.29, p.329-342, 2011.
- 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.
- BLACKBURN, J. The quick response movement in the apparel industry– a case study in time compressing supply chains. In: BLACKBURN, J. (editor): **Time-based competition – The next Battleground in Manufacturing**. Business One Irwin, Homewood, IL, 1991.
- BONOMA, T.V. Case research in marketing opportunities, problems, and a process. **Journal of Marketing Research**, v.22, p. 199-208, 1985.
- BOOTH, R.: Agile Manufacturing. **Engineering Management Journal**, vol. 6, n.2, p.105-112, Abril 1996.
- BRYMAN, A. **Research methods and organization studies**. Londres: Unwin Hyman, 1989.
- 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.

DANESE, P. ROMANO, P.; VINELLI, A. Sequences of improvement in supply networks: case studies from the pharmaceutical industry. **International Journal of Operations & Production Management**, v.26, n.11, p. 1199-1222, 2006.

DE TONI, A.; MENEGHETTI, A.: Traditional and innovative paths towards time-based competition. **Int. J. Production Economics**, v.66, n.3, p. 255-268, 2000.

DEMO, P. Reconstruir conhecimento. In: _____ **Metodologia científica em ciências sociais**. 3ª ed, São Paulo: Atlas, 1995. P161-185.

EISENHARDT, K. M. Building theories from case study research. **Academy of Management Review**, v. 14, n.4, p. 532-550, 1989.

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

FERNANDES, A.C. **Dinâmica de Sistemas e Business Dynamics**: Tratando a Complexidade no Ambiente de Negócios. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO (ENEGEP), 21, out. 2001, Salvador. **Anais...** Salvador: ENEGEP, 2001.

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).

FORRESTER, J. **System Dynamics and K-12 Teachers**. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, MA, USA, 1996. Disponível em: <http://ocw.mit.edu/courses/sloan-school-of-management/15-988-system-dynamics-self-study-fall-1998-spring-1999/readings/teachers.pdf>. Acesso em: maio de 2012.

FORRESTER, J. **Readings**. MIT Open Courseware. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, MA, USA, 2001. Disponível em: <http://ocw.mit.edu/courses/sloan-school-of-management/15-988-system-dynamics-self-study-fall-1998-spring-1999/readings/>. Acesso em: maio de 2012.

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

GEORGIADIS, P.; VLACHOS, D.; IAKOVOU, E. A system dynamics modeling framework for the strategic supply chain management of food chains. **Journal of Food Engineering**, v.70, n.3, p. 351-364, 2005.

GLASER, B.; STRAUSS, A. **The Discovery of grounded theory: Strategies of qualitative research**. London: Wiedenfeld and Nicholson, 1967.

GODINHO FILHO, M.; FERNANDES, F.C.F. Paradigmas estratégicos de gestão da manufatura (PEGEMs): elementos chave e modelo conceitual. **Gestão & Produção**, São Carlos, v.12, n.3, p. 333-346, 2005.

GODINHO FILHO, M. O impacto da variável tamanho de lote no efeito da implantação de programas de melhoria contínua no lead time: estudo utilizando-se uma abordagem híbrida System Dynamics - Factory Physics. In: XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP), 2008, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 2008.

GODINHO FILHO, M; UZSOY, R. Combining System Dynamics And Factory Physics Approach To Study The Effect Of Continuous Improvement On Lot Size – Cycle Time Relationships. In: PRODUCTION AND OPERATION MANAGEMENT SOCIETY (POMS), 19, 2008a, La Jolla. **Proceedings...** California, 2008a, 7p.

GODINHO FILHO, M; UZSOY, R. Combining System Dynamics and Factory Physics to study the effect of continuous improvement. in Operating Curves. In: INDUSTRIAL ENGINEERING RESEARCH CONFERENCE (IIE ANNUAL CONFERENCE), 2008, Vancouver. **Proceedings...**[S.I:S.I], 2008b, 10p.

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*. São Paulo. **Produção**, v.19, n.1, jan/abr., p.214-224, 2009.

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 & Produção**, vol. 17, n.1, p. 137-148, 2010

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, 2011a.

GODINHO FILHO, M.; UZSOY, R. The impact of simultaneous continuous improvement in set up and repair time on manufacturing cycle times under uncertain conditions. Artigo aceito para publicação. **International Journal of Production Research**, 2011b.

GODINHO FILHO, M.; UZSOY, R. The effect of continuous improvement programs in operating curves for single machine and flow shop environments. Artigo submetido ao **International Journal of Production Research**, 2012.

GODINHO FILHO, M. Effect of lot-size reduction and Continuous Improvement programs on Work In Process and Utilization: A study for single-machine and flow-shop environments. Artigo submetido para publicação no **International Journal of Logistics**, 2012.

GOLDRATT, E.; COX, J. **The goal**. North River Press, Great Barrington, MA, 1984.

GONZALEZ, R. V. D.; NOGUEIRA, E.; MARTINS, M. F.; JUGEND, D. A contribuição da função produção para a estratégia de negócio: Estudo de caso em uma indústria de cosmético. **Anais do XII SIMPEP**, Bauru, 2005.

GRUTTER, A.W.; FIELD, J.M.; FAULL, N.H.B. Work team performance over time: three case studies of South African Manufacturers. **Journal of Operations Management**, v.20, n.5, p.641-657, 2002.

GUIMARÃES, A.A. **Utilização de um método híbrido System-Dynamics – Factory Physics para a investigação do efeito de ações de melhoria contínua na redução do Lead Time**. 2010. 205 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos, 2010.

GUIMARÃES, A.A.; GODINHO FILHO, M.; OPRIME, P. C. Guiding improvement programs towards lead-time reduction in a single-machine environment. Artigo submetido ao **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2012.

HAYES, R.; PISANO, G.; UPTON, D.; WHEELWRIGHT, S.: Estratégias de Produção: origens e novas orientações. In: HAYES, R.; PISANO, G.; UPTON, D.; WHEELWRIGHT, S.: **Produção, Estratégia e Tecnologia – Em busca da vantagem competitiva**. New Jersey: Wiley, 2005.

HONG, J.; XU, S.H.; HAYYA, J.C. Process quality improvement and setup reduction in dynamic lot-sizing. **International Journal of Production Research**, v.31, n.11, p. 2693-2708, 1993.

HONG, J.; HAYYA, J.C. Joint investment in quality improvement and setup reduction. **Computers Operational Research**, v.22, n.6, p.567-574, 1995.

HOPP, W.J.; IRAVANI, S.M.R.; SHOU, B. A Diagnostic Tree for Improving Production Line Performance. **Production and Operations Management**. Vol. 16 (1), p. 77-92, 2007.

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

HYER, N. L.; WEMMERLÖV, U.; MORRIS JR, J.A. Performance analysis of a focused hospital unit: the case of an integrated trauma center. **Journal of Operations Management**, v.27, p.203-219, 2009.

IGNIZIO, J.P. Metrics for the Evaluation of Factory Performance. Technical paper, **Research Management Institute**, 1997.

IGNIZIO, J.P. **Optimizing Factory Performance: Cost-Effective Ways to Achieve Significant and Sustainable Improvement**. New York: Mc Graw Hill, 2009. 371p.

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 maio 2012.

- JABER, M.Y.; BONNEY, M. Lot sizing with learning and forgetting in set-ups and in product quality. **International Journal of Production Economics**, v.83, p.95-111, 2003.
- KARMARKAR, U. S., et al. **Lot Sizing and Lead Time Performance in a Manufacturing Cell**. *Interfaces*, v.15(2), p.1-9, 1985.
- KHANG, D.B.; MYINT, Y. M. Time, cost and quality trade-off in project management: a case study. **International Journal of Project Management**, v.17, n.4, p. 249-256, 1999.
- KRITCHANCHAI, D.; MACCARTHY, B.L. Responsiveness and strategy in manufacturing. Proceedings of the workshop Responsiveness in Manufacturing, **IEE**, London, p. 98-123, 1998.
- LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 3ª ed. São Paulo:Atlas, 1995.
- LAMBRECHT, M. R.; N. J. VANDAELE. A General Approximation for the Single Product Lot Sizing Model with Queueing Delays. **European Journal of Operational Research**. v. 95, p.73-88, 1996.
- LEE, A.S. **A scientific methodology for MIS case studies**. *MIS Q.* v.13, n.1, p. 33-50, 1989.
- LIKER, J.K. **O modelo Toyota: 14 princípios de gestão do maior fabricantes do mundo**. Porto Alegre: Bookman, 2005.
- LITTLE, J.C.: A Proof of the Queueing Formula $L = W$. **Operations Research**, N° 9, p. 383-387, 1961.
- MCCUTCHEON, D.M.; MEREDITH, J.R. Conducting case study research in operations management. **Journal of Operations Management**, v.11, n.3, p. 239–256, 1993.
- MARTIN, L.A. **The First Step**. MIT System Dynamics in Education Project. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, MA, USA, 1997. Disponível em: <http://ocw.mit.edu/courses/sloan-school-of-management/15-988-system-dynamics-self-study-fall-1998-spring-1999/readings/step.pdf>. Acesso em abril de 2012.
- 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, 2010, p. 45-61.
- MEREDITH, J.R.; RATURIA, A. AMOAKO-GYAMPAH, K.; KAPLAN, B. Alternative research paradigms in operations . **Journal of Operations Management**, v.8, p.297-326, 1989.
- MEREDITH, J.R., 1998. Building operations management theory through case and field research. **Journal of Operations Management**, v.16, n.4 p. 439-452.
- MERRILLS, R. How Northern Telecom competes on time. **Harvard Business Review**. p. 108-114, 1989.

MIGUEL, P. A. C. Adoção do estudo de caso na engenharia de produção. In: MIGUEL, P. A.M. (org). **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e operações**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010, p. 129-143.

MOHANTY, R.P.; DESHMUKH, S.G. Reengineering of materials management system: a case study. **International Journal of Production Economics**, v.70, p.267-278, 2001.

MORE, R. A. Supplier/ User Interfacing in the Development and Adoption of New Hardware/ Software Systems: A Framework for Research. **IEEE Transactions on Engineering Management**, v. 35, n.3, agosto de 1988.

NARASIMHAN, R.; JAYARAM, J.; Reengineering service operations: a longitudinal case study. **Journal of Operations Management**, v.17, n.1, p. 7-22, 1998.

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

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

OLIVA, R.; WATSON, N. Cross-functional alignment in supply chain planning: A case study of sales and operations planning. **Journal of Operations Management**, v.29, p.434-448, 2011.

PENTILLÄ, M.J. **Reducing variability in a semiconductor manufacturing environment**. 2005. 76p. Dissertação de mestrado (Mestrado em engenharia elétrica e Ciência da Computação). Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology, 2005.

PIDD, M. **Modelagem empresarial: Ferramentas para tomada de decisão**. Trad. Gustavo Severo de Borba. Porto Alegre: Artes Médicas, 1998.

PIRTILLÄ, T.; SANDSTRÖM, R. A step-wise method for product range management and production control decisions: A case study at a board industry company. **International Journal of Production Economics**, v.45, p. 223-230, 1996.

PORTEUS, E.L. Optimal lot sizing, process quality improvement and setup cost reduction. **Operations Research**, v. 24, n.1, 1986.

RADIZICKI, M.J. **Introduction to System Dynamics: a Systems Approach to Understanding Complex Policy Issues (Version 1.0)**. EUA: Sustainable Solutions, Inc., 1997. Disponível em: <<http://www.systemdynamics.org/DL-IntroSysDyn/>> Acesso em 14 de maio de 2012.

RICHARDT, C.S.; COOK, T.D. Beyond qualitative vs. quantitative methods. In: Richardt, C.S., Cook, T.D. _Eds., **Qualitative and Quantitative Methods in Evaluation Research**. SagePublications, Newbury Park, CA, p. 7–32, 1979.

ROSSONI; L. **Modelagem e simulação *soft* em estratégia**. Revista Produção Online. v. 6, n. 2, 2006. Disponível em: <http://producaoonline.org.br/rpo/article/view/291>. Acesso em: maio de 2012.

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.

SAMPIERI, R. H.; COLLADO, C. F.; LUCIO, P.B. **Metodologia de pesquisa** 3ª ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

SCHOEMIG, A. K. On the corrupting influence of variability in semiconductor manufacturing. **Winter Simulation Conference**, v.1, p. 837-842, 1999.

SCHONBERGER, R.J. **World Class Manufacturing**. 1 ed., New York: The Free Press, USA, 1986.

SENGE, P.M. **A Quinta Disciplina: arte e prática da organização que aprende**. Trad. Gabriel Zide Neto e OP Traduções, 26ª ed. Rio de Janeiro: Best Seller, 2010. 530p.

SHINGO, S. **A Revolution in Manufacturing: The SMED System**. Cambridge: Productivity Press, 1986.

SLACK, N.; CHAMBLERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da produção**. 2ª ed. São Paulo: Atlas, 2002.

SLACK, N.; LEWIS, M. **Operations Strategy**. Londres : Prentice Hall -Financial Times, 2002.

STALK, G.: Time – The next source of competitive advantage. **Harvard Business Review**, p. 41-51, July- August, 1988.

STALK, G; HOUT, T. **Competing against time**. The Free Press, New York, 1990.

STANDRIDGE, C.R. How Factory Physics helps simulation. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2004, Washington D.C, **Anais...** Washington, 2004, p. 1104- 1108.

STENGER, A.J. Reducing inventories in a multi-echelon manufacturing firm – A case study. **International Journal Production Economics**, v.45, p. 239-249, 1996.

STERMAN, J.D. **Business Dynamics: systems thinking and modeling for a complex world**. Boston: Irwin McGraw- Hill, 2000, 982p.

STONICH, P.J. Time: the next strategic frontier, **Planning Review**, v.18, n. 6, p.4-7/46-48, Nov/dez, 1990.

SURI, R. **Quick Response Manufacturing**: A companywide approach to reducing lead times. Portland: Productivity Press, 1998. 545p.

SURI, R. **It's About Time**: The competitive advantage of Quick Response Manufacturing. New York: Productivity Press, 2010.

TANG, V.; VIJAY, S. System Dynamics-Origins, Development, and Future Prospects of a Method. In: RESEARCH SEMINAR IN ENGINEERING SYSTEMS, 83, 2001, MIT. **Anais...**2001, 11p. Disponível em <<http://web.mit.edu/esd.83/www/notebook/NewNotebook.htm>> Acesso em 12 de setembro de 2011.

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.

VAN MAANEM, J. Reclaiming qualitative methods for organizational research. **Administrative Science Quarterly**, v.24, p. 520-526, dez. 1979.

VENNIX, J.A.M. **Group model building**: facilitating team learning using system dynamics. Chichester: John Wiley & Sons, 1996. 297p.

WOMACK, J.P., et al. **The machine that changed the world**. Ney York: Harper Perennial, 2000.

WOMACK, J.P.; JONES, D.T.: **A mentalidade Enxuta nas empresas**. Ed. Campus, 5^oed, 1998.

WU, M. YAN, H. System Dynamics Modeling and Simulation in Software Engineering Education. In: INTERNATIONAL CONFERENCE FOR YOUNG COMPUTER SCIENTISTS, 9, Nov.2008, Huma. **Anais...**[S.I: S.I], Nov. 2008, p. 2407-2411.

WU, Z.; CHOI, T.Y. Supplier-supplier relationships in the buyer-supplier triad: building theories from eight case studies. **Journal of Operations Management**, v. 24, n.1, p. 27-52, 2005.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. Tradução de Daniel Grassi. 3^a Ed. Porto Alegre: Bookman, 2005, 212 p.

ANEXO A – Fundamentos básicos sobre as teorias *System Dynamics*, *Factory Physics* e *Quick Response Manufacturing*

1. *System Dynamics*

1.1 Introdução à *System Dynamics*

De acordo com Sterman (2000), a aceleração econômica, as mudanças tecnológicas, sociais e ambientais dos últimos tempos desafiam gestores e formuladores de políticas a aprenderem a taxas crescentes, enquanto ao mesmo tempo, a complexidade dos sistemas existentes é cada vez maior. Muitos dos problemas enfrentados no presente surgem como efeitos colaterais não previstos de ações passadas. Muitas vezes, as políticas implantadas para resolver problemas importantes falham, tornam o problema pior, ou criam novos problemas.

Dessa forma, em um mundo de crescente complexidade dinâmica, a tomada de decisão eficaz e a aprendizagem exigem um pensamento sistêmico, com a função de expandir as fronteiras de modelos mentais e desenvolver ferramentas para compreender como as estruturas dos sistemas complexos criam seus comportamentos. A Dinâmica de Sistemas ou *System Dynamics*, em inglês, se destaca como um método para o entendimento desses sistemas complexos e dinâmicos.

A *System Dynamics* se enquadra no campo da modelagem computacional e pode ser utilizada no contexto dos sistemas produtivos. Analogamente, segundo Sterman (2000), assim como um piloto utiliza um simulador de vôo em sua formação, modelos computacionais de simulação, como modelos de SD, podem ajudar a Gerência da Produção no entendimento do funcionamento de sistemas de produção e, em última análise, a desenvolver políticas mais efetivas.

Essa seção apresenta: as origens da SD; definições e conceitos importantes; as abordagens existentes; as etapas de um processo de modelagem e a aplicação da teoria de SD na Gerência da Produção.

1.2 Origem da teoria

A Dinâmica de Sistemas (*System Dynamics*) foi desenvolvida por Jay W. Forrester, pesquisador e professor do Instituto de Tecnologia de Massachussets (o MIT, *Massachussets Institute of Technology*), na década de 50. De acordo com Forrester (1996), a *System Dynamics* utiliza modelos de simulação computacional para revelar como políticas e estruturas conhecidas podem gerar comportamentos inesperados e problemáticos.

De acordo com Radizick (1997), durante a Segunda Guerra Mundial, J.W. Forrester foi contratado para prestar serviço nas forças armadas americanas, como técnico do MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), organizando controles de armas e radares. Segundo Tang e Vijay (2001), foi durante esse período que Forrester estudou e aplicou intensivamente teorias matemáticas de controle e conceitos de *feedback* e equilíbrio em situações práticas e em projetos reais de engenharia.

Radizick (1997) relata que ao final da Segunda Guerra Mundial, Jay Forrester voltou seus esforços para a criação de um simulador de vôo de aeronaves para a Marinha Norte-Americana. O projetado simulador foi lançado em torno da idéia, não testada na época, de um computador digital. Em 1947, o Laboratório Digital de Informática do MIT foi fundado e colocado sob a direção de Jay Forrester. A primeira tarefa do laboratório foi a criação do WHIRLWIND I do MIT, um computador digital de propósito geral. Após o Projeto WHIRLWIND, Forrester concordou em liderar uma divisão da *Lincoln Laboratory* do MIT para criar computadores para o sistema de defesa aérea norte-americano SAGE (*Semi-Automatic Ground Environment*). Os computadores criados pela equipe de Forrester durante o projeto SAGE foram instalados na década de 1950, permanecendo em serviço por cerca de 25 anos.

Ainda de acordo com Radizick (1997), um resultado importante dos projetos WHIRLWIND e SAGE foi o interesse de Jay Forrester pelas dificuldades encontradas na gerência. As experiências de Forrester como um gerente o fizeram concluir que os maiores impedimentos para o progresso de um projeto são de caráter gerencial e não técnico (de engenharia, por exemplo). Isso se deve ao fato de que os sistemas sociais são muito mais difíceis de entender e controlar do que sistemas físicos. Assim, os estudos de Forrester levaram ao desenvolvimento de uma teoria para estudar e simular sistemas sociais como

sistemas de informação por meio de *feedbacks* ou retroalimentação. A teoria foi primeiramente aplicada a problemas corporativos e chamada de *Industrial Dynamics*.

Foi no fim dos anos 1950 que Forrester e sua equipe de alunos de graduação concentraram seus esforços no emergente campo da simulação computacional da SD. Nessa mesma época, foi criado o primeiro *software* de simulação para a teoria, chamado de SIMPLE (*Simple of Industrial Management Problems with lots of Equation*). Um ano após o surgimento do SIMPLE, foi desenvolvida a primeira versão do DYNAMO (*DYNAMIC Models*) uma evolução do SIMPLE, que se tornou padrão durante os 30 anos seguintes. (RADZICKI;1997).

Em 1961, Forrester publica o livro *Industrial Dynamics*, que pode ser considerado um grande marco conceitual da teoria *System Dynamics*. A partir dos trabalhos de Forrester (1961), diversos pesquisadores, como Sterman e Senge, dentre vários outros, vêm desenvolvendo e aplicando SD para estudar sistemas dinâmicos e complexos.

Apesar de sua origem ter um propósito corporativo, outros campos do conhecimento foram explorados por Forrester. Como por exemplo, um modelo que representa a dinâmica urbana, lançado no livro *Urban Dynamic*. Tal modelo tem o intuito de ilustrar porque muitas políticas urbanas consagradas são ineficazes ou tornam os problemas urbanos piores. Nos últimos vinte anos, os esforços do professor Forrester foram centrados em duas áreas principais: 1) a criação de um modelo de SD para a economia dos Estados Unidos e 2) a extensão do treinamento de *System Dynamics* para a educação infantil.

Pelo que foi exposto até o momento sobre a história da *System Dynamics*, pode-se notar que tal método pode ser utilizado para o estudo de várias áreas do conhecimento que envolvam sistemas complexos. Nesse ponto é importante destacar que o grau de complexidade de um sistema, segundo Sterman (2000), está relacionado com a interação entre os agentes do sistema e não com a quantidade desses agentes. 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 (efeitos colaterais). A apresentação dos demais conceitos que evoluem a teoria da SD será feita na próxima seção.

1.3 Definições importantes

Sterman (2000) define *System Dynamics* como uma modelagem rigorosa que nos permite construir simulações de sistemas complexos e utilizá-las para elaborar políticas e organizações mais eficientes. Essas ferramentas permitem-nos criar simuladores de micromundos em que o espaço e o tempo podem ser comprimidos e desacelerados para que se possam verificar os efeitos colaterais em longo prazo de decisões, assim como desenvolver a compreensão de sistemas complexos. Para Martin (1997), *System Dynamics* é uma metodologia utilizada para entender como os sistemas mudam ao longo do tempo.

De acordo com Forrester (1996), a maioria do aprendizado e conhecimento vem de sistemas muito simples. As verdades aprendidas com esses sistemas são geralmente opostas ao comportamento de sistemas mais complexos. Assim, a utilização de tais conhecimentos na tomada de decisões em sistemas complexos pode originar problemas inesperados. De acordo com esse autor, existem seis características inerentes aos sistemas complexos e que os diferenciam de sistemas simples. O Quadro A1 apresenta essas características.

QUADRO A1: As principais características de sistemas complexos. Fonte: Adaptado de Forrester (1996).

Características de sistemas complexos
1) As causas e efeitos não estão próximos no tempo e um sintoma pode surgir em uma parte totalmente diferente do sistema
2) Sempre existem trade-offs entre metas de curto prazo e de longo prazo
3) Ações ineficientes: em sistemas complexos, a decisão óbvia geralmente é ineficiente. Experiências vindas de sistemas simples contribuem para tomadas de decisões inefetivas, que geram a falha do sistema
4) Direção errada para ações eficientes: em sistemas complexos, mesmo quando uma política de alto potencial foi escolhida, a direção desejável para mudar essa política é pouco clara, ou pior, pode geralmente ser mal interpretada e levar a política para direção errada.
5) Culpar terceiros: em sistemas complexos, as causas são mais obscuras; não é evidente que nós mesmos causemos nossos próprios problemas; há então uma forte tendência a culpar os demais.
6) Colapso de metas: em sistemas menos óbvios, as metas podem gradualmente erudir.

É importante destacar que o aprendizado de sistemas complexos requer, segundo Sterman (2000), mais do que ferramentas técnicas para criar modelos matemáticos. *System Dynamics* é uma teoria fundamentalmente interdisciplinar, baseada na teoria de dinâmica não-

linear e controle de *feedback* desenvolvido por meio da matemática, física e engenharia. O conceito de *feedback* será melhor explorado na Seção 1.4 desse ANEXO A.

Dessa forma, a premissa central presente em SD, de acordo com Fernandes (2001), é que o comportamento de um sistema é determinado por sua estrutura interna e que, por meio de uma linguagem própria para modelar um sistema é possível testar os diferentes tipos de comportamentos do mesmo ao longo do tempo, possibilitando a identificação e validação de potenciais melhorias.

Nesse ponto, é importante destacar a definição de sistema. Para Wu e Yan (2008), em SD, um sistema é definido como uma coleção de elementos que interagem continuamente uns com os outros com elementos de fora, ao longo do tempo, para modificar o sistema como um todo. Para esses autores, dois elementos são importantes em um sistema: a estrutura e o comportamento. Por estrutura entende-se a coleção de componentes do sistema e seus relacionamentos. O comportamento, por sua vez, é definido como a maneira pela qual os elementos ou variáveis que compõem o sistema variam ao longo do tempo.

Tal apresentação da teoria de SD envolve três conceitos-chave: o conceito de modelo, de modelagem e de simulação. De acordo com Pidd (1998), um modelo é uma representação externa e explícita da realidade vista pela pessoa que deseja usar aquele modelo para entender, mudar, gerenciar e controlar parte daquela realidade. A modelagem consiste no processo de criação de modelos (ROSSONI; 2006), enquanto que a simulação, de acordo com Ackoff e Sasiene (1971, p.12), “é a obtenção de uma solução para o problema, a partir de um modelo, por meio da experimentação”. Assim, para Rossoni (2006), a simulação representa a manipulação de um modelo, de maneira que este represente uma visão da realidade.

No que tange a Simulação Dinâmica, há quatro áreas do saber envolvidas na sua origem, que são: a teoria da realimentação da informação em sistemas; o conhecimento do processo de tomada de decisões; a abordagem experimental por meio de modelos; e a evolução dos computadores, que tornou possível a simulação dos modelos (FORRESTER; 1961).

Assim, a teoria SD utiliza modelos computacionais de simulação para revelar como são as estruturas e políticas que produzem os comportamentos do sistema. Vários são os programas computacionais utilizados como ambiente de simulação e modelagem para a teoria. São eles: Stella, Powersim, Vensim, Ithink, como exemplo.

Para esclarecer um pouco do que vem a ser a Dinâmica de Sistemas, são apresentados os princípios dessa teoria, definidos por Forrester (2001). São vinte e seis princípios que definem e caracterizam a teoria de Dinâmica de Sistemas e estão apresentados no Quadro A2.

QUADRO A2: Os princípios da teoria de *System Dynamics*. Fonte: Adaptado de Forrester (2001).

Princípios da Dinâmica de Sistemas	
Princípio #1: O <i>loop</i> de <i>feedback</i> é o elemento estrutural básico dos sistemas.	Princípio #14: <i>Loops</i> negativos de segunda ordem apresentam oscilação senoidal.
Princípio #2: Estoque e fluxo são fundamentais para a estrutura do <i>loop</i> .	Princípio #15: Metas, observações, discrepâncias e ações criam uma subestrutura do sistema.
Princípio #3: As unidades de medida não determinam se uma variável é um estoque ou fluxo.	Princípio #16: Variáveis de estoque e variáveis de fluxo devem alternar-se.
Princípio #4: Estoques (níveis) são acumulações.	Princípio #17: <i>Loops</i> de ordem superior (com mais de um nível), <i>loops</i> de <i>feedback</i> positivo geralmente apresentam comportamento exponencial.
Princípio #5: Estoques (níveis) são alterados somente pelos fluxos (ou taxas).	Princípio #18: Coeficientes de conversão são identificáveis nos sistemas reais; devem ter um significado simples e real.
Princípio #6: Níveis e estoques existem em subsistemas conservativos	Princípio #19: A constante de tempo de um <i>loop</i> de 1ª ordem relaciona um estoque a uma taxa
Princípio #7: Os fluxos (as taxas) dependem somente dos estoques e constantes.	Princípio #20: As taxas não são mensuráveis instantaneamente; uma taxa é uma mudança ao longo do tempo.
Princípio #8: Decisões ocorrem sempre dentro de um <i>loop</i> de <i>feedback</i> .	Princípio #21: Todo sistema tem uma fronteira, um limite fechado.
Princípio #9: Toda equação deve ter igualdade dimensional (estar na mesma unidade).	Princípio #22: <i>Links</i> de informações conectam estoques aos fluxos; conectores ligam estoques.
Princípio #10: Os <i>loops</i> de primeira ordem apresentam comportamento exponencial (crescimento ou decaimento).	Princípio #23: Decisões (taxas) são baseadas unicamente em informações disponíveis.
Princípio #11: Estoques/ níveis descrevem completamente a condição do sistema.	Princípio #24: Variáveis auxiliares (conversores) ficam apenas nos <i>links</i> de informações;
Princípio #12: As variáveis tem a mesma unidade dentro de subsistemas conservativos.	Princípio #25: Modelos de simulação matemática pertencem à classe dos modelos abstratos.
Princípio #13: O período de medição está em todos os níveis de equações.	Princípio #26: A validade do modelo é um assunto relativo. Um modelo é bem sucedido se ele abre caminhos para melhorar a acurácia com a qual podemos representar a realidade.

1.4 Abordagens existentes na *System Dynamics*

De acordo com Forrester (1961), uma estrutura de SD apresenta quatro níveis hierárquicos, que são: 1) Limite fechado; 2) Um *loop* de *feedback* como componente básico do sistema; 3) Estoques e fluxos; 4) Objetivos, condições e discrepâncias entre as condições observadas e a ação desejada.

Considerando essas estruturas básicas, há duas abordagens distintas para se trabalhar com SD: a abordagem *soft* (qualitativa) e abordagem *hard* (quantitativa).

Abordagem *Soft*

De acordo com Fernandes (2001), na modelagem *soft* são utilizados diagramas que produzam uma descrição dos principais elementos que causam o comportamento de um sistema. Tais diagramas são denominados diagramas de influências, diagramas de *feedback* ou ainda diagramas de *loop* (BASTOS; 2003). Os *loops* causais podem externalizar modelos mentais e hipóteses, além de facilitar as inferências de modelos de comportamento.

De acordo com Senge (2010), o entendimento do pensamento sistêmico reside na compreensão do conceito de *feedback*, o qual mostra como ações podem se reforçar ou equilibrar umas às outras. Os diagramas de influências são compostos por dois elementos centrais: os *feedbacks* e os *delays*. Para Georgiadis et al. (2005), os *feedbacks* podem ser de dois tipos: positivos (de reforço) ou negativos (de equilíbrio). São as interações entre esses dois tipos de *feedbacks* que determinam as características dinâmicas de um sistema (VENNIX, 1996).

Pode-se encontrar uma longa explicação sobre *feedback* em Sterman (2000). Segundo esse autor, o *feedback* positivo ocorre se uma ação produz uma variação no mesmo sentido, originando assim um *loop* de reforço. Assim, após um distúrbio inicial, a mudança é amplificada. A Figura A1 representa um *loop* contendo um *feedback* positivo.

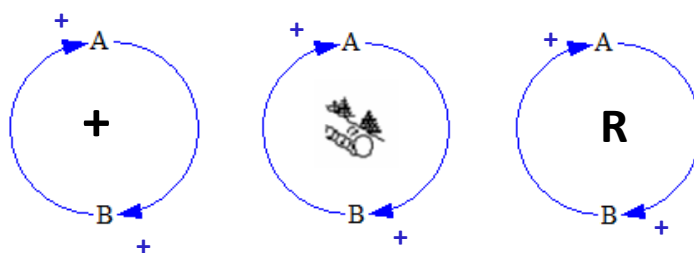


FIGURA A1: *Loop* contendo *feedback* positivo. Três representações possíveis: sinal positivo, um desenho de bola de neve ou letra R. Fonte: Adaptado de Sterman (2000).

Um exemplo de *loop* de reforço é dado por Martin (1997) e representado pela Figura A2. Um aumento na nossa resistência física aumenta o número de quilômetros diários que podemos correr. E esse aumento de distância que conseguimos percorrer, provoca um aumento na taxa que conseguimos resistir. Assim, um aumento na taxa que obtemos resistência compõe um aumento inicial da nossa resistência corporal propriamente dita.

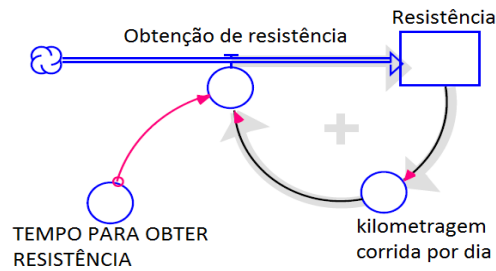


FIGURA A2: Exemplo de *feedback* positivo. Fonte: Adaptado de Martin (1997).

Em contra partida, um *feedback* negativo ocorre quando uma ação produz uma variação contrária, originando um *loop* de equilíbrio (FERNANDES, 2001). Em um processo de *feedback* negativo após um distúrbio inicial, o sistema pode retornar à situação inicial. A Figura A3 ilustra as formas de representação de um *loop* de equilíbrio.

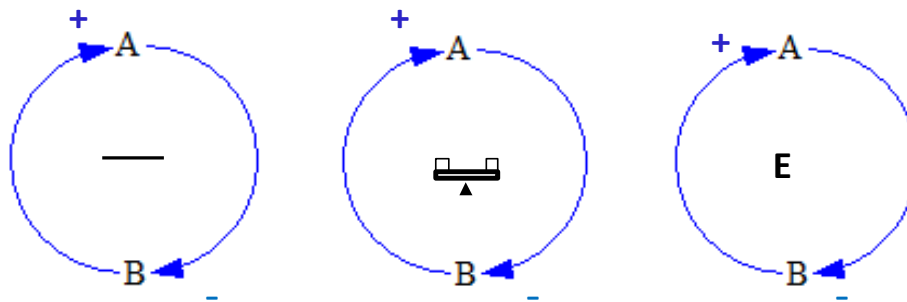


FIGURA A3: *Loop* contendo *feedback* negativo. Três representações possíveis: sinal negativo, um desenho de balança ou letra E. Fonte: Adaptado de Sterman (2000).

Um exemplo de *loop* de equilíbrio, fornecido por Senge (2010), ocorre quando ligamos o chuveiro e a água está mais fria ou mais quente do que a temperatura que desejamos. Nessa situação, nosso corpo sente a diferença de temperatura e assim acionamos o controle para alterar a temperatura do chuveiro; a temperatura se modifica e o sistema volta a uma situação de equilíbrio. A Figura A4 ilustra esse exemplo.

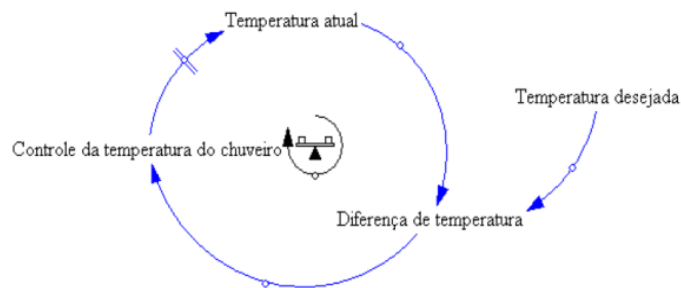


FIGURA A4: Exemplo de *loop* de equilíbrio. Fonte: Adaptado de Senge (2010).

Nota-se na Figura A4 que há uma descontinuidade (duas barras paralelas) entre o controle da temperatura do chuveiro e a temperatura atual. Tal sinal representa outro elemento central da modelagem *soft*: o *delay*. *Delays*, segundo Fernandes (2001), são atrasos ou defasagens que fazem com que uma ação possa produzir efeitos diferentes no tempo e espaço. No exemplo ilustrado na Figura A4, no momento em que se aciona o controle de temperatura do chuveiro até essa temperatura realmente se modificar há uma defasagem, denominada *delay*.

Abordagem Hard

De acordo com Fernandes (2001), a modelagem *hard* (ou quantitativa) utiliza as características estruturais definidas na modelagem *soft* (diagramas de *loops*) para desenvolver modelos de simulação de sistemas que evidenciem de forma gráfica, uma descrição completa dos elementos relevantes para análise. No entanto, na modelagem *hard*, a estrutura e as inter-relações entre as variáveis são representadas matematicamente por meio de diagramas de estoque-fluxo (GEORGIADIS et al.; 2005). Assim, segundo Fernandes (2001), nessa abordagem é possível explorar a evolução de um sistema ao longo do tempo e dentro de um período de interesse.

Os diagramas de estoque-fluxo funcionam de acordo com o princípio de acumulação. De acordo com Radzicki (1997), tal princípio revela que o comportamento dinâmico no mundo ocorre quando fluxos se acumulam nos estoques, ou seja, o comportamento dinâmico surge quando algo flui por algum meio, e se acumula ou se esgota de alguma maneira.

É fundamental para a compreensão da dinâmica do sistema, o entendimento da diferença entre estoques e fluxos. Estoques são acumulações e fluxos representam ações, responsáveis pelas mudanças no estado do estoque (BASTOS; 2003).

O diagrama estoque-fluxo foi proposto por Forrester (1961) e contém quatro elementos principais, a saber: i) estoques: representam acumulações de um recurso; ii) fluxos: são atividades que produzem crescimento ou redução dos estoques, iii) auxiliares (conversores e constantes): processam informações a respeito dos estoques e fluxos ou representam fontes de informação externas ao sistema iv) conectores: são *links* de informação que descrevem a relação entre estoques, fluxos e conversores; definem a maneira como os elementos do sistema se dispõem conjuntamente. A Figura A5 apresenta as representações gráficas dos componentes do diagrama estoque-fluxo no *software* Vensim.

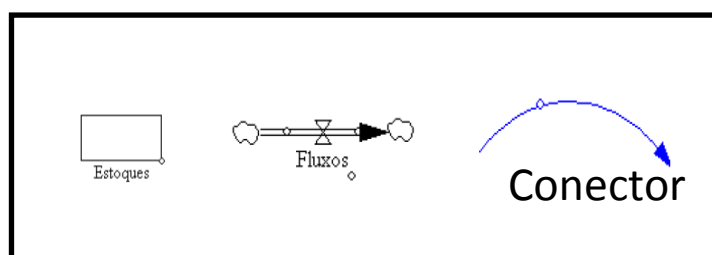


FIGURA A5: Representação de estoques fluxos e conector no *software* Vensim.

1.6 Etapas do processo de modelagem

Sterman (2000) destaca que a modelagem é uma atividade inerentemente criativa e não há uma “receita pronta” para uma modelagem de sucesso. No entanto, tal autor descreve algumas etapas essenciais que devem ser seguidas no processo de modelagem, que são:

- a) Articulação do problema: decide-se o tema que será abordado, as variáveis e conceitos-chave que serão considerados, o horizonte de tempo e a definição do problema dinâmico (modo de referência);
- b) Formulação de uma hipótese dinâmica: formular uma explicação sobre a dinâmica que caracteriza o problema em termos de *feedbacks*, fluxos e estoques. São geradas uma hipótese inicial e uma explanação endógena que explique o comportamento das estruturas do sistema;
- c) Formulação de um modelo de simulação: são especificadas as estruturas e regras de decisão do modelo, são feitas estimativas dos parâmetros, dos relacionamentos comportamentais e das condições iniciais;

- d) Teste: comparação entre o comportamento simulado do modelo com o apresentado no mundo real. Nessa fase, são avaliadas a robustez do modelo sob extremas condições e a sensibilidade do mesmo.
- e) Projeto de política e avaliação: nessa fase podem-se incluir novas estratégias, estruturas e regras de decisão para melhorar o sistema em estudo. São avaliados estruturas e parâmetros dos modelos em diversos cenários.

As etapas acima descritas se relacionam conforme mostrado na Figura A6.

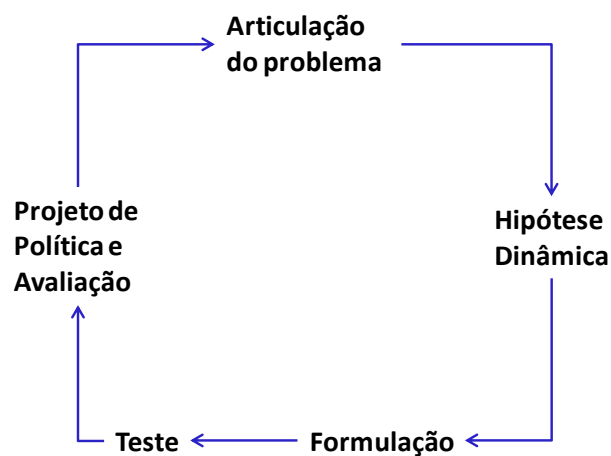


FIGURA A6: Etapas do processo de modelagem. Fonte: Adaptado de Sterman (2000).

1.7 A aplicação da SD na Gerência de Produção

System Dynamics é uma ferramenta que pode ser utilizada em qualquer situação que possa ser modelada como um sistema, que combine pessoas e/ou máquinas (FORRESTER, 1961). Sendo assim, os modelos de SD têm sido aplicados em uma vasta gama de áreas para entendimento e resolução de problemas, tais como manufatura, economia, agricultura, biologia, dentre outras.

Devido à complexidade dos sistemas de produção, a aplicação de SD para análise desses cenários pode ser explorada com boas perspectivas. Guimarães (2010) apresenta uma revisão da literatura mostrando justamente a evolução da aplicação de SD na Gestão da Produção. Tal revisão compreende o período de 1990-2007. No trabalho de Guimarães (2010), a revisão é realizada em três etapas, cada uma abrangendo um período correspondente

a seis anos: primeira de 1990-1995, a segunda de 1996-2001 e, a terceira etapa analisa os trabalhos realizados entre os anos de 2002-2007.

A revisão realizada por Guimarães (2010) mostra que há um aumento expressivo do número de trabalhos que utilizam SD na Gerência da Produção. O gráfico da Figura A7 ilustra essa evolução.

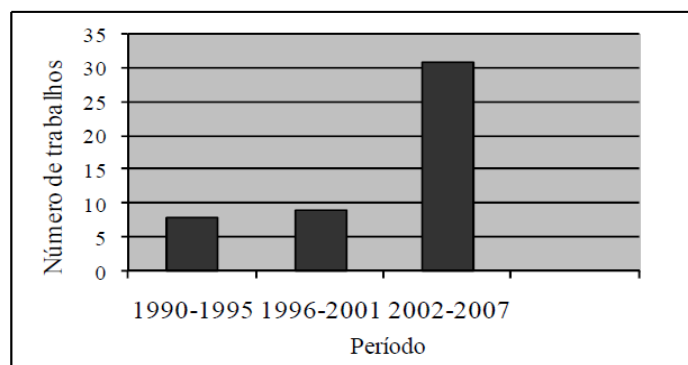


FIGURA A7: Evolução ao longo do tempo dos trabalhos de SD aplicados a Gestão da Produção. No total, 48 trabalhos foram analisados. Fonte: Guimarães (2010).

Guimarães (2010) também apresenta a produção científica que utiliza SD por subárea da Gerência da Produção, a saber: Sistemas de produção/PCP; Gestão em desenvolvimento do produto; Processo; Logística/Gestão da cadeia de suprimentos e Gestão da qualidade. A Figura A8 ilustra a distribuição dos trabalhos por área.

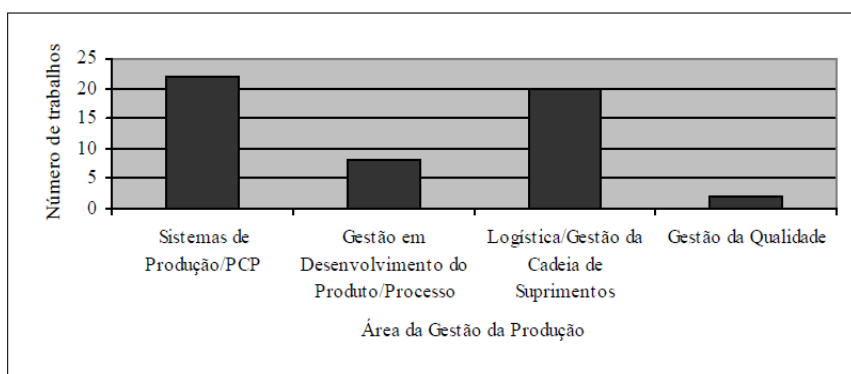


FIGURA A8: Distribuição dos trabalhos por área da Gestão da Produção. Fonte: Guimarães (2010).

A revisão realizada por Guimarães (2010) destaca que apesar do número crescente de trabalhos que utilizam SD na Gestão da Produção, a mesma ainda é uma técnica pouco

utilizada e, portanto, há espaço para estudos que envolvam a aplicação de SD nas quatro áreas consideradas. Uma análise mais ampla do assunto pode ser encontrada em Guimarães (2010).

2. *Factory Physics*

Factory Physics é uma abordagem criada por Hopp e Spearman (2008) visando analisar a manufatura de um ponto de vista científico. De acordo com os autores, a Gestão da Manufatura é uma ciência aplicada e seu objetivo é a *performance* financeira, no entanto ela deve apoiar-se na ciência uma vez que 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; iii) facilidade na síntese de sistemas complexos. Tal relação entre ciência aplicada e ciência pura pode ser vista em outras áreas do conhecimento, como exemplo a Medicina, uma ciência aplicada, servindo-se do apoio da Biologia e da Química.

Segundo os pré-cursos da *Factory Physics*, a manufatura é considerada um sistema complexo que envolve pessoas, equipamentos e recursos financeiros. E, a ciência, por meio de sua característica quantitativa e indutiva pode fornecer à Gestão da Manufatura equações e modelos científicos que proporcionam *insights* valiosos.

Segundo Hopp e Spearman (2008), a Gestão da Manufatura é falha em duas questões centrais: no entendimento do padrão 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(1984) 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 (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 (2008), um estoque 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 estoque 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 e SPEARMAN; 2008).

Hopp e Spearman (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 (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 um dessas dimensões define a estratégia de

negócio da empresa. Uma empresa pode focar preço, oferecendo preços mais baixos ou tempo, ao disponibilizar 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 do 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 (2008a), sendo que o modelo desenvolvido por esses autores utiliza equações matemáticas apresentadas por Hopp e Spearman (2008).

2.1 Definições e parâmetros

De acordo com Hopp e Spearman (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 montados em produtos mais elaborados. **Subconjuntos** são unidades montadas que serão transformadas em produtos mais complexos. **Conjuntos** são produtos completamente montados ou itens finais. Itens finais, 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 item 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 bens 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 matérias físicas que percorrem um roteiro de fabricação, junto com uma informação lógica (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 como é representada por t e a variância por σ^2 , o coeficiente de variação, denotado por c , pode ser escrito conforme a equação 1A:

$$c = \frac{\sigma}{t} \quad (\text{Eq.1A})$$

Usualmente pode ser conveniente a utilização do quadrado do coeficiente de variação, conforme apresenta a equação 2A:

$$c^2 = \frac{\sigma^2}{t^2} \quad (\text{Eq.2A})$$

De acordo com Hopp e Spearman (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 (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 3A a seguir:

$$r_e = \frac{n}{t_e} \quad (\text{Eq. 3A})$$

Em que:

n é número de máquinas idênticas 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 que em que a mesma está parada devido a falhas de máquinas, *set ups*, manutenção, entre outros. A utilização pode ser expressa por meio da equação 4A:

$$u = \frac{r_a}{r_e} \quad (\text{Eq. 4A})$$

Em que:

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 5A a seguir:

$$A = \frac{m_f}{m_f + m_r} \quad (\text{Eq. 5A})$$

Em que: 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 6A, que relaciona três medidas de desempenho citadas acima:

$$WIP = TH \times TC \quad (\text{Eq.6A})$$

Em que 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 (2008) constitui um pilar do modelo Godinho Filho e Uzsoy (2008a) e uma relevante contribuição para a Gestão da Manufatura. A seção 3.2 apresenta as equações, advindas da teoria *Factory Physics*, que são utilizadas no modelo utilizado no presente trabalho.

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 técnica 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. 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. Em contraste com a Manufatura Enxuta, o QRM é uma abordagem que visa 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 devem ser aplicados às quatro principais áreas da empresa: produção, cadeia de suprimentos, escritório 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 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 mais adequado para a redução do *lead time*; iv) Manutenção Preventiva Total (TPM) e redução de *set up*; 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 eficiência. 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 *lay-out* 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 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).

ANEXO B –Possíveis extensões para o modelo Godinho filho e Uzsoy (2008a)

Essa seção visa apresentar extensões que podem ser aplicadas ao modelo Godinho Filho e Uzsoy (2008). Tais extensões se referem à variáveis de chão de fábrica que não foram contempladas no modelo em questão, assim como políticas ou medidas de desempenho que poderiam, em uma primeira análise, ser aplicadas ao modelo.

Conforme visto na Seção 2.3, o modelo de Godinho Filho e Uzsoy (2008a) contempla importantes variáveis de chão-de-fábrica que cumprem com o objetivo de contribuir para a análise do ambiente de produção estudado, por meio da implantação de programas de melhorias que envolvem melhorias nas seis variáveis consideradas. As variáveis utilizadas são expressas por meio de equações matemáticas oriundas da Teoria de Filas.

O Quadro B1 apresenta as variáveis originárias de Hopp e Spearman (2008) que têm algum efeito no *lead time*. Observa-se que das variáveis apresentadas por Hopp e Spearman (2008), apenas a variável lote de transferência (representado por k) não foi contemplada no modelo Godinho Filho e Uzsoy (2008a), constituindo-se então em uma oportunidade futura de expansão para o mesmo.

A consideração de k no modelo de Godinho Filho e Uzsoy (2008a) se daria, em um ambiente com mais de uma estação de trabalho, onde o *lead time* pode ser expresso de acordo com a equação 1B, proposta por Hopp e Sperman (2008):

$$CT = \left(\frac{c_a^2 + c_e^2}{2} \right) \left(\frac{u}{1-u} \right) t + t + \left(\frac{k-1}{2u} \right) t \quad (\text{Eq. 1B})$$

Em que t representa o tempo de processamento; C_a representa a variabilidade do tempo entre as chegadas das ordens; C_e representa a variabilidade do tempo de processamento; u representa a utilização; k é o lote de transferência.

Considerando as contribuições de Hopp e Spearman (2008) para o modelo Godinho Filho e Uzsoy (2008a), também foram investigados trabalhos importantes que trazem variáveis que tem efeito no *lead time*, a saber: Ignizio (2009), Suri (2010), e Hopp et al. (2007).

QUADRO B1: As variáveis de chão-de-fábrica que impactam na redução do *lead time*.

Variáveis	Considerado no modelo Godinho Filho & Uzsoy (2009) ?
Tempo médio de set up (t_s)	sim
Taxa média de defeitos (p)	sim
Tempo médio entre falhas (m_f)	sim
Tempo médio de reparo da máquina (m_r)	sim
Variabilidade do tempo de processamento (C_e)	sim
Variabilidade do tempo entre as chegadas das ordens (C_a)	sim
Lote de transferência (k)	não

Visando contribuir para a melhoria do desempenho da fábrica, na qual a redução do *lead time* está inserida, Ignizio (2009) define três medidas de desempenho, a saber: 1) Curva de operações (*Factory Operating Curve*); 2) Eficiência do tempo de ciclo ajustado pela utilização (*Load-adjusted Cycle-Time Efficiency Curve- LACTE*); 3) Curva Lucro *versus* utilização (*Profit versus Factors Loading Curve*). A curva de operações ou curva de operação logística, também conhecida na literatura pelo termo *Factory Operating Curve* foi apresentada primeiramente por Aurand e Miller (1997) e foi abordada no Capítulo 2, Figura 2.7, do presente trabalho e considerada nos trabalhos de Godinho Filho e Uzsoy (2008a). Já, as curvas LACTE e Lucro *versus* utilização foram apresentadas primeiramente por Ignizio (1997). As três curvas representam métricas de desempenho holísticas na medida em que visam avaliar o desempenho de toda a fábrica e não apenas algumas partes isoladas.

De acordo com Ignizio (2009), a medida de desempenho eficiência do *lead time* (dada pela razão entre o tempo de processamento e o *lead time* e denominada por CTE) pode ser falha quando se considera o tempo de processamento como o tempo gasto apenas com atividades que agregam valor (desconsiderando atividades que não agregam valor, mas que consomem tempo tais como transporte, inspeção, testes, dentre outras). Além disso, tal medida não está ajustada à utilização da fábrica, característica que impossibilita a utilização de tal medida como um comparativo entre fábricas que operem a diferentes taxas de

utilização. De acordo com a curva de operações (Figura 2.7, no Capítulo 2), pode-se observar que a eficiência do *lead time* cai à medida que a utilização da fábrica aumenta. Sendo assim, para que uma análise tenha credibilidade, a comparação do desempenho de duas fábricas deve ser ajustada à utilização das mesmas.

Com o objetivo de suprir essa lacuna, Ignizio (2009) apresenta a medida de desempenho denominada LACTE (*Load-adjusted cycle-time efficiency* - em tradução livre seria a eficiência do *lead time* ajustada à utilização). Para a análise do desempenho de uma fábrica utiliza-se a curva LACTE *versus* utilização, representada na Figura 2B. Para calcular os valores LACTE é necessário considerar no tempo de processamento, os tempos gastos com processos que não agregam valor. Assim, os valores da LACTE podem ser obtidos por meio da seguinte relação:

$$LACTE = \left(\frac{\text{Tempo de processamento da fábrica}}{\text{Lead time da fábrica}} \right) \times \left(\frac{\text{Throughput da fábrica}}{\text{Capacidade teórica da fábrica}} \right) \quad (\text{Eq.2B})$$

O primeiro termo da equação representa a eficiência do *lead time* (CTE) e o segundo termo representa a taxa de utilização da fábrica. De acordo com a Figura B1 pode-se notar que o valor da eficiência da fábrica varia de acordo com a utilização da mesma, o que enfatiza o argumento de Ignizio (2009), que para uma verdadeira análise comparativa entre duas fábricas ou para a verificação de uma melhoria realizada, deve-se traçar as curvas LACTE *versus* utilização para as situações analisadas.



FIGURA B1: Curva LACTE. Fonte: adaptado de Ignizio (2009).

Como exemplo, Ignizio (2009) apresenta uma fábrica com 12 estações de trabalho e coeficiente de variabilidade 8. Tal configuração inicial tem um pico de eficiência (maior valor LACTE) de 19%, correspondente a uma utilização de 49%. Após a implantação de um programa de melhoria na fábrica, obtém-se um cenário com um coeficiente de variabilidade 1. Tal melhoria leva a curva LACTE para a direita do eixo da utilização, sendo que o pico da eficiência nesse caso é de 59%, referente a uma utilização de 74%. Na Figura B2 pode-se observar que após a redução da variabilidade (curva indicada como “Após melhoria”), a eficiência (valor LACTE) da fábrica é maior para todos os valores de utilização, quando comparado com o cenário inicial. A comparação das curvas LACTE de cada cenário é essencial para a avaliação da melhoria, uma vez que a análise de pontos isolados pode gerar uma conclusão equivocada da situação. Uma análise mais detalhada dessa medida de desempenho pode ser encontrada em Ignizio (2009).

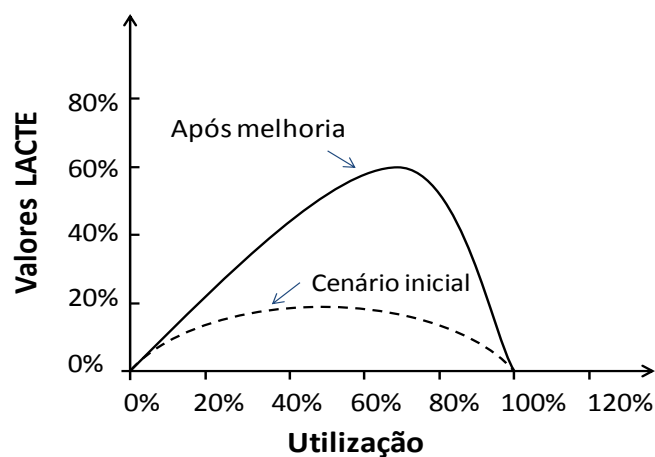


FIGURA B2: Curva LACTE (antes e depois de uma redução na variabilidade). Fonte: adaptado de Ignizio (2009).

A terceira medida de desempenho, a curva Lucro *versus* Utilização permite estimar o nível de utilização da fábrica que retorna o melhor resultado em termos de lucro. Considere a equação 3B para a obtenção do lucro:

$$\text{Lucro} = (\text{unidades vendidas} \times \text{preço de venda}) - (\text{unidades produzidas} \times \text{custo unitário})$$

(Eq. 3B)

De acordo com Ignizio (2009), geralmente assume-se para a obtenção do lucro valores constantes para o preço de venda e custos de produção. No entanto, raramente esses valores

são constantes, uma vez que, em geral, tanto o preço de venda quanto o custo de produção de determinado produto decrescem com o tempo. Devido a essa característica, Ignizio (2009) apresenta a importância de se conhecer o comportamento do lucro em função do tempo.

Após o conhecimento da curva lucro em função do tempo é possível computar as saídas da fábrica (número de produtos finais que sai da fábrica) por cada período de tempo e multiplicá-las pelo lucro associado a cada período. Assim, obtém-se a terceira medida de desempenho sugerida por Ignizio (2009), o gráfico lucro *versus* utilização. Na Figura B3 podemos observar a curva lucro x utilização para dois produtos (A e B), fabricados por fábricas distintas, respectivamente fábricas A e B. O produto A difere do produto B por apresentar um decaimento mais lento do lucro em função do tempo. Da mesma figura se observa que, para atingir os melhores resultados em termos de lucro, as fábricas A e B deveriam operar com utilizações 88% (representado por “Pico A” na Figura B3) e 67% (representado por “Pico B” na Figura B3), respectivamente. Nota-se aqui que o objetivo é a maximização do lucro e não da utilização. Em alguns casos, para atingir o máximo lucro, uma fábrica deverá trabalhar com níveis de utilização bem inferiores do que seu nível de utilização máximo.

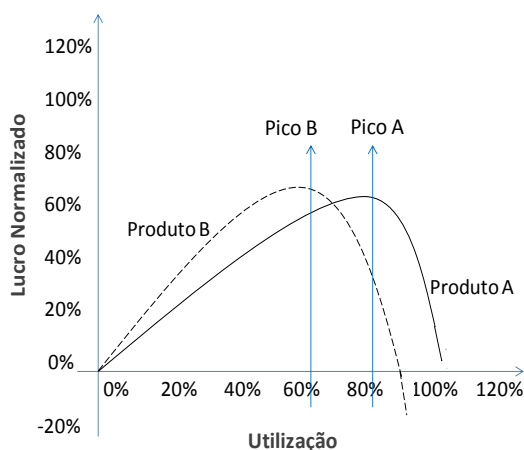


FIGURA B3: Curva Lucro *versus* utilização. Fonte: adaptado de Ignizio (2009).

Assim, a curva apresentada por Ignizio (2009) se mostra um diferencial, pois para obtê-la é preciso traçar a função lucro como uma função do tempo, ou seja, considerando suas reais variações ao longo de um determinado período.

Suri (2010) apresenta algumas estratégias para obter a redução desses três fatores, que podem ser visualizadas no Quadro B2. Tais alternativas podem ser utilizadas na

implementação dos programas de melhoria contínua analisados no modelo Godinho Filho e Uzsoy (2008a), mas também na gestão da manufatura, de uma maneira em geral, uma vez que são estratégias que visam reduzir a variabilidade assim como obter uma utilização que seja coerente com a redução do tempo de atravessamento.

QUADRO B2: Alternativas sugeridas para a redução do *flow time*. Fonte: adaptado de Suri (2010).

Estratégias para a redução do <i>Flow Time</i>		
Reduzir Variabilidade na chegada	Reduzir Variabilidade no tempo de processamento	Reduzir a Utilização (<i>Magnifying Effect of Utilization</i>)
<ul style="list-style-type: none"> * Não incentivar os departamentos de marketing e vendas a gerar grandes ordens (pedidos); * Incentivar o pessoal de vendas a utilizar modernas tecnologias (e-mail, fax, internet móvel) para enviar pedidos diariamente e não * Incentivar a liberação diária das tarefas processadas ou liberá-las a medida em que forem concluídas; * Educar o pessoal do manuseio de materiais sobre a importância de manter as peças em movimento, movimentando-as assim que estiverem prontas e não esperar a 	<ul style="list-style-type: none"> * Padronizar procedimentos de mudanças de forma que os tempos de <i>set up</i> sejam previsíveis; * Padronizar os procedimentos de trabalho para que os tempos de operação sejam previsíveis; * Planejar o tamanho de lote de forma que a soma dos tempo de <i>set up</i> e de processamento permaneçam aproximadamente o mesmo ao longo de todo o processamento da tarefa; * Reduzir a ocorrência de retrabalho e de faltas não programadas de funcionários * Reduzir as paradas não planejadas dos equipamentos investindo em manutenção preventiva; 	<ul style="list-style-type: none"> * Investigar oportunidades de redução de <i>set up</i>; * Investir em maneiras de reduzir o tempo de operação das tarefas, sem grandes investimentos financeiros (como otimizar a programação das máquinas NC, por exemplo); * Buscar formas de reduzir retrabalho e refugos, de forma a aumentar a capacidade disponível dos equipamentos; * Entender que o tempo livre dos funcionários não são realmente "livre". Tempos ociosos podem ser utilizados para a realização de tarefas que visam melhorar a <i>performance</i> da fábrica no futuro;

A reflexão sobre as estratégias para a redução do *lead time* apresentadas no quadro acima permitem a identificação de oportunidades para a expansão do modelo. O desafio se torna analisar essas estratégias e identificar formas de incorporá-las no modelo proposto por Godinho Filho e Uzsoy (2008a).

Hopp et al. (2007), por sua vez, apresentam uma Árvore de Diagnósticos que objetiva listar ações para a redução do *lead time*. A árvore está centrada em duas grandes ações que podem ser tomadas para se obter a redução do *lead time*, que são: i) utilizar tarefas paralelas e ii) reduzir o *lead time* excessivo da estação de trabalho em questão. A primeira grande ação constitui em uma alternativa para quando existir a possibilidade de realizar o processamento simultaneamente em mais de uma estação. Já a segunda, pode ser obtida por meio da realização de cinco ações, que na realidade, referem-se a alterações em cinco variáveis de chão-de-fábrica, a saber: 1) Reduzir o tempo de movimentação; 2) Reduzir o tempo excessivo de espera pelo lote; 3) Reduzir o tempo de espera pelo encontro na montagem; 4) Reduzir os efeitos da fila e 5) Reduzir o tempo de processamento. Os quadros a seguir resumem as ações

necessárias para a redução do *lead time* para cada uma das cinco variáveis envolvidas na segunda grande ação citada por Hopp et al. (2007).

QUADRO B3: Caminhos para redução do *lead time* excessivo da estação de trabalho – redução do tempo de movimentação.

<p>Reduzir o <i>lead time</i> excessivo da estação</p> <ul style="list-style-type: none">1. Reduzir o tempo de movimentação<ul style="list-style-type: none">1.1 Redesenhar o <i>layout</i> de produção1.2 Aumentar capacidade de manuseio de materiais

QUADRO B4: Caminhos para redução do *lead time* excessivo da estação de trabalho – redução do tempo de espera pelo lote.

<p>Reduzir o <i>lead time</i> excessivo da estação</p> <ul style="list-style-type: none">2. Reduzir o tempo excessivo de espera pelo lote (<i>wait-for-batch</i>)<ul style="list-style-type: none">2.1 Reduzir o atraso devido ao processamento dos lotes<ul style="list-style-type: none">2.1.1 Reduzir o atraso de série dos lotes (<i>serial batching delay</i>): devido ao alto tempo de <i>set up</i>, os jobs tem que esperar a sua vez de processar o seu tipo de job, por isso esperam em lotes2.1.2 Reduzir o atraso paralelo dos lotes (<i>parallel batching delay</i>): uma operação/máquina faz múltiplos jobs ao mesmo tempo, então alguns jobs devem esperar formar o lote2.2 Reduzir o atraso devido a movimentação dos lotes<ul style="list-style-type: none">2.2.1 Mover os lotes mais frequentemente em lotes menores2.2.2 Desenvolver mecanismos de coordenação

QUADRO B5: Caminhos para redução do *lead time* excessivo da estação de trabalho – redução do tempo de espera pelo encontro na montagem.

Reduzir <i>lead time</i> excessivo da estação
3. Reduzir o tempo excessivo de espera pelo encontro na montagem (<i>wait-to-match</i>)
3.1 Melhorar a sincronização (coordenação das chegadas de componentes)
3.1.1 Enviar sinais puxados da montagem para sincronizar chegadas
3.2 Reduzir a variabilidade do processo de fabricação
3.2.1 Reduzir <i>downtime</i> dos equipamentos
3.2.1.1 Reduzir as falhas dos equipamentos
Melhorar o <i>design</i> do equipamento
Melhorar o <i>design</i> do produto
Manutenção Preventiva
3.2.1.2 Reduzir tempos de reparo
Melhorar o <i>design</i> do equipamento
Melhorar treinamento
Aumentar quadro de funcionários
Aumentar paralelismo (atividades feitas em paralelo)
Melhorar a documentação do processo para evitar a reinvenção da roda
Fazer com que as peças e ferramentas estejam prontamente disponíveis
3.2.1.3 Tornar reparos atividades externas
3.2.2 Reduzir as perdas com <i>set up</i>
Tornar as tarefas de <i>set up</i> externas
Melhorar equipamentos
Melhorar treinamento dos operadores
Melhorar a motivação dos operadores
Padronizar procedimentos de <i>set up</i>
Melhorar <i>scheduling</i>
3.2.3 Reduzir retrabalho
Melhorar equipamentos
Melhorar manutenção
Melhorar a performance dos operadores
Melhorar materiais
Melhorar o controle de qualidade
Reduzir as filas entre os pontos de inspeção de qualidade
Design da manufatura a prova de erros
3.2.4 Melhorar a disponibilidade dos operadores
3.2.5 Melhorar a coordenação
3.2.6 Padronizar procedimentos
3.2.7 Treinar operadores
3.2.8 Automação
3.3 Reduzir a proliferação excessiva de componentes
Design para manufatura e montagem (DFMA)
Combinar conjunto de componentes
Postergar as operações de montagem

QUADRO B6: Caminhos para redução do *lead time* excessivo da estação de trabalho – redução do efeito das filas.

Reduzir o <i>lead time</i> excessivo da estação
4. Reduzir os efeitos da fila
4.1 Reduzir a variabilidade na chegada
4.2 Reduzir a variabilidade do processo de fabricação
4.2.1 Reduzir <i>downtime</i> dos equipamentos
4.2.1.1 Reduzir as falhas dos equipamentos
Melhorar o <i>design</i> do equipamento
Melhorar o <i>design</i> do produto
Manutenção Preventiva
4.2.1.2 Reduzir tempos de reparo
Melhorar o <i>design</i> do equipamento
Melhorar treinamento
Aumentar quadro de funcionários
Aumentar paralelismo (atividades feitas em paralelo)
Melhorar a documentação do processo para evitar a reinvenção da roda
Fazer com que as peças e ferramentas estejam prontamente disponíveis
Tornar reparos atividades externas
4.2.1.3 Reduzir as perdas com <i>set up</i>
Tornar as tarefas de set up externas
Melhorar equipamentos
Melhorar treinamento dos operadores
Melhorar a motivação dos operadores
Padronizar os procedimentos de <i>set up</i>
Melhorar <i>scheduling</i>
4.2.1.4 Reduzir retrabalho
Melhorar equipamentos
Melhorar manutenção
Melhorar a performance dos operadores
Melhorar materiais
Melhorar os controle de qualidade
Reduzir as filas entre os pontos de inspeção de qualidade
Design da manufatura a prova de erros
4.2.1.5 Melhorar a disponibilidade dos operadores
4.2.1.6 Melhorar a coordenação
4.2.1.7 Padronizar pocedimentos
4.2.1.8 Treinar operadores
4.2.1.9 Automação

QUADRO B7: Caminhos para redução do *lead time* excessivo da estação de trabalho – redução do retrabalho.

Reduzir o <i>lead time</i> excessivo da estação
5. Reduzir o tempo de processamento
5.1 Reduzir retrabalho
Melhorar equipamentos
Melhorar manutenção
Melhorar a performance dos operadores
Melhorar materiais
Melhorar os controle de qualidade
Reduzir as filas entre os pontos de inspeção de qualidade
<i>Design</i> da manufatura a prova de erros
5.2 Instalar mais máquinas
5.3 Atualizar equipamentos
5.4 Adicionar mais operadores
5.5 Treinar operadores
5.6 Transferir capacidade

Uma análise dos trabalhos encontrados em Ignizio (2009), Suri (2010), Hopp et al. (2007) e também Hopp e Spearman (2008) permite observar que o modelo Godinho Filho e Uzsoy (2008a) considera tais trabalhos amplamente. No entanto, algumas possíveis extensões advindas das fontes dessa análise podem ser observadas e divididas em três categorias, a saber:

a) Inclusão de variáveis:

No que tange essa categoria, foi observado que a variável lote de transferência, denotado por Hopp e Spearman (2008) por K pode ser incorporada ao modelo Godinho Filho e Uzsoy (2008a) quando o mesmo analisar um ambiente de produção com mais de uma estação de trabalho;

b) Utilização de curvas para análise do desempenho:

Aqui se observa que a utilização das duas curvas sugeridas por Ignizio (2009) contribuiriam para análises a cerca da redução do *lead time*: a curva *LACTE x Utilização* e a curva *Lucro x Utilização*. No entanto, para a utilização da segunda curva, devem ser acrescentados dados relacionados aos custos; informações ainda não contempladas em Godinho Filho e Uzsoy (2008a).

c) Reflexão sobre políticas qualitativas expostas na literatura:

Os trabalhos de Suri (2010) e Hopp et al. (2007) apresentam algumas ações, políticas que podem ser aplicadas na gestão da manufatura, com o intuito de se reduzir o *lead time*. Exemplos das contribuições de Suri (2010) podem ser encontrados no Quadro B3 e as contribuições de Hopp et al. (2007) são visualizadas na sequência dos Quadros B4 a B7.

São exemplos dessas ações: redesenhar *layout* de produção; padronizar procedimentos; incentivar a liberação das tarefas processadas ou liberá-las à medida que forem concluídas; não incentivar a utilização de grandes pedidos. Essas ações contribuem para o tema redução de *lead time*, de forma que podem ser incorporadas em ambientes reais para se obter as melhorias nas variáveis. Por se tratar de um modelo de simulação quantitativo, há a necessidade de se traduzir ações em termos de variáveis, que são passíveis de mensuração.

Assim, uma análise criteriosa das contribuições dos autores acima citados nos permite dizer que as variáveis diretamente relacionadas a essas ações de melhoria estão contempladas no modelo Godinho Filho e Uzsoy (2008a), por meio da utilização das equações advindas da teoria *Factory Physics* de Hopp e Spearman (2008). A seguir, o Quadro B8 sintetiza as possíveis expansões encontradas para o modelo Godinho Filho e Uzsoy (2008a).

QUADRO B8: Categorias das possíveis expansões para o modelo Godinho Filho e Uzsoy (2008a).

Categorias para expansão do modelo	Descrição	Referência
Inclusão de variáveis	Lote de transferência entre estações de trabalho	Hopp e Spearman (2008)
Utilização de curvas para analisar desempenho	Curva LACTE x Utilização: curva que analisa a eficiência do <i>lead time</i> , ajustado pela Curva Lucro x Utilização: permite conhecer o valor da utilização que retorna um melhor resultado em termos de lucro	Ignizio (2009)
Reflexão sobre políticas qualitativas expostas na literatura	Exemplo: Redesenhar <i>layout de produção</i> e Padronizar procedimentos Exemplo: Incentivar a liberação das tarefas processadas ou liberá-las a medida que forem concluídas e Não incentivar a utilização de grandes pedidos	Hopp et al. (2007) Suri (2010)

Finalmente, a análise realizada permite concluir que a teoria *Factory Physics* foi amplamente utilizada no modelo em questão, de forma que apenas uma variável foi encontrada com possibilidade de ser incorporada ao modelo em futuros trabalhos. É importante notar que a Árvore de Diagnósticos, de Hopp et al. (2007) apresenta uma extensa lista de ações para se reduzir o *lead time*. Essas ações estão diretamente relacionadas às cinco variáveis de chão-de-fábrica utilizadas em Godinho Filho e Uzsoy (2008a). O trabalho de Ignizio (2009) apresenta um ponto de vista ainda não explorado pelo modelo, ou seja, o lucro relacionado com a utilização do sistema produtivo. Por fim, a análise nos permite dizer que

ainda há muito a ser explorado pela literatura a cerca do tema e que tais aspectos anteriormente apontados podem proporcionar valiosos *insights*.