

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

ALYNE DE ANDRADE GUIMARÃES

**UTILIZAÇÃO DE UMA ABORDAGEM HÍBRIDA *SYSTEM DYNAMICS*
- *FACTORY PHYSICS* PARA A INVESTIGAÇÃO DO EFEITO DE
AÇÕES DE MELHORIA CONTÍNUA NA REDUÇÃO DO *LEAD TIME***

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
2010**

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

G963ua

Guimarães, Alyne de Andrade.

Utilização de uma abordagem híbrida *System Dynamics-Factory Physics* para a investigação do efeito de ações de melhoria contínua na redução do *lead time* / Alyne de Andrade Guimarães. -- São Carlos : UFSCar, 2010.
205 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2010.

1. Engenharia de produção. 2. Melhoria contínua. 3. Sistemas dinâmicos. I. Título.

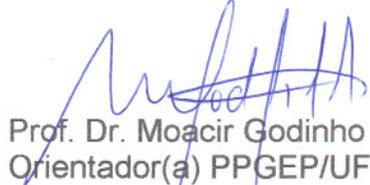
CDD: 658.5 (20^a)



FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno(a): Alyne de Andrade Guimarães

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DEFENDIDA E APROVADA EM 18/06/2010 PELA
COMISSÃO JULGADORA:



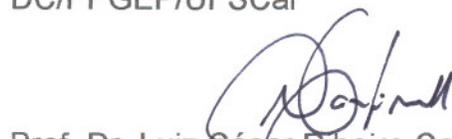
Prof. Dr. Moacir Godinho Filho
Orientador(a) PPGE/UFSCar



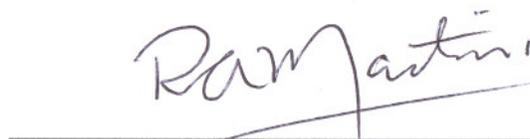
Prof. Dr. Pedro Carlos Oprime
PPGE/UFSCar



Prof. Dr. Paulo Rogério Politano
DC/PPGE/UFSCar



Prof. Dr. Luiz César Ribeiro Carpinetti
EESC/USP



Prof. Dr. Roberto Antonio Martins
Coordenador do PPGE

Dedico este trabalho à minha mãe, Terezinha e
À minha avó, Valdelice (in memorian),
Meus exemplos de vida, que sempre apoiaram meus sonhos,
E me ensinaram a encarar a vida com determinação
Obrigada por tudo!

"Seja você a mudança que quer ver no mundo"

(Mahatma Gandhi)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida, pelas dádivas concedidas e pela força para seguir em frente.

Agradeço ao meu orientador Moacir Godinho Filho, por me orientar desde o primeiro momento em que lhe escrevi interessada no mestrado e em toda a trajetória dessa dissertação, pelos conhecimentos transmitidos, pelos conselhos e pelo comprometimento demonstrado. Por estar sempre presente e disposto a ajudar.

Agradeço ao professor Pedro Oprime, por toda a ajuda prestada e boa vontade em transmitir seus conhecimentos.

Agradeço aos professores da banca, Luiz César Ribeiro Carpinetti, Paulo Rogério Politano e Pedro Carlos Oprime, pelas contribuições dadas e pela disponibilidade em participar das bancas de qualificação e defesa.

Agradeço aos professores e funcionários do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção da UFSCar, em especial a Raquel e Robson, por toda presteza em ajudar e tirar nossas inúmeras dúvidas.

Agradeço a Capes, pelo apoio financeiro concedido.

Agradeço à minha família. Em especial a minha mãe Terezinha Andrade, meu porto seguro, por sempre acreditar nos meus sonhos e não poupar esforços para que eles se realizassem, por nunca me deixar desanimar e sempre me dar todo o amor e força que eu preciso e a minha avó Valdelice, que não está mais entre nós para ver esse sonho se concretizar, mas que está no céu me acompanhando e olhando por mim, por toda a sua história de vida, por me fazer crer que nada é impossível, por ter construído nossa família e por me ensinar a ser forte e persistente. A meu pai, Alberto Guimarães, pelo amor e carinho.

Ao meu namorado Daniel Moraes, pelo amor, carinho e compreensão. Por toda paciência em me ouvir, aconselhar, pelo apoio, por sempre dizer que sou capaz e por me trazer paz e a calma que sempre necessito.

A Sílvia Caldas, por já fazer parte da nossa família, pela presença, atenção, carinho e bom humor. Aos meus tios e tias, primos e primas, pelo amor, carinho e por me fazerem sentir tão querida.

Agradeço aos meus amigos. Aos antigos e aos novos. Aos da Bahia, os de Minas Gerais, aos que fiz em São Carlos e em Campinas. Pelos bons momentos vividos: de

diversão, de seriedade, de alegrias e dificuldades. Pelos conselhos dados, sonhos divididos, por se tornarem parte importante da minha vida.

Aos amigos queridos que fiz no mestrado: Elizângela Veloso Saes, Fábio Moraes Borges, Marina Soares, Sabrina Di Salvo Mastrantonio, Elaine Cristina, Maico Roris e sua esposa Vanessa. Em especial: a Elizângela, pela amizade construída, desde o dia da seleção do mestrado, por todas as conversas, dificuldades e alegrias divididas, horas de estudo, conversas e conselhos, por ter se tornado minha irmã de mestrado; a Fábio, pelo seu jeito amigo e generoso, sua espontaneidade e sua determinação. A Sabrina, pela sua alegria, sempre disposta a ajudar e falar palavras de apoio e incentivo. A Marina, pelas opiniões e objetividade.

Agradeço as novas colegas de república, Daniela Oliveira e Natália Melo, por estarem presentes nessa nova fase da minha vida, por acompanharem a correria desse finalzinho de caminhada no mestrado e pela ajuda que possibilitou a entrega dessa dissertação.

Agradeço a todos os meus professores, os de escola e os da época da universidade. Por me mostrarem a importância da constante busca pelo conhecimento e aperfeiçoamento.

Agradeço a todos, por cada palavra ou sorriso dado, por me ajudarem a construir minha história. Obrigada por tudo!

RESUMO

Nos dias de hoje, onde o ambiente competitivo domina o panorama mundial, as empresas precisam estar sempre atentas a oportunidades de melhoria contínua em suas funções. Nesse cenário a redução do *lead time* surge como um dos grandes objetivos a serem alcançados. É exatamente dentro deste contexto que este trabalho se insere, tendo como principal objetivo avaliar o efeito da implantação de ações de melhoria contínua em variáveis do chão de fábrica (variabilidade no tempo de processamento, tempo médio de *setup*, taxa de defeitos, dentre outras) na redução do *lead time* para dois ambientes produtivos: ambiente com máquina única e ambiente *flow shop*. Para isso pretende-se utilizar um modelo quantitativo que utiliza as abordagens *Factory Physics – System Dynamics* de forma híbrida, modelo este originalmente criado por Godinho Filho e Uzsoy (2008a, 2008b, 2009). No presente trabalho esse modelo, que é de máquina única será ampliado por meio da inclusão de mais estações de trabalho para criação do ambiente *flow shop*. Além do objetivo principal, a presente pesquisa tem os seguintes objetivos específicos: (1) Verificar se os resultados encontrados por Godinho Filho e Uzsoy (2008a, 2008b, 2009) são os mesmos para cenários com diferentes características do sistema produtivo. (2) Determinar se o efeito positivo no *lead time* de uma ação de melhoria nas variáveis do chão de fábrica estudadas é sensível a características do sistema produtivo e se sim, como é o relacionamento entre a ação de melhoria e o sistema em questão. (3) Comparar os resultados com relação aos dois objetivos anteriores para os casos de máquina única e *flow shop*. Os resultados encontrados no presente trabalho mostram que as conclusões extraídas por Godinho Filho e Uzsoy (2008a, 2008b, 2009) são robustas para diferentes características do sistema produtivo nos ambientes de máquina única e *flow shop* simulados. Nos cenários simulados para esses dois ambientes, as ações de melhoria na variabilidade do tempo de processamento e no tempo de *setup* são as que se mostraram melhores para redução do *lead time*. Além disso, o efeito positivo no *lead time* de uma ação de melhoria mostra-se sensível a quase as mesmas características do sistema para os ambientes de máquina única e *flow shop*. Para esses dois ambientes, as ações de melhoria no tempo entre falhas e no tempo de reparo são as que se apresentam mais sensíveis a diferentes características do sistema produtivo, e também como melhores alternativas em sistemas com certas características negativas (por exemplo, altos tempos de *setup*, entre outras). Os resultados gerados pelo modelo quantitativo foram analisados por meio de técnicas de planejamento de experimentos para obtenção das conclusões.

Palavras-chave: *Lead Time*. Melhoria Contínua. *System Dynamics*. *Factory Physics*

ABSTRACT

Nowadays, with the competitive environment dominating the world scene, companies need to be alert to continuous improvement opportunities. In this scene lead time reduction arises as one of the greatest goal to be accomplished. Within this context, the main goal of this research is to study the effect of continuous improvement in shop floor variables (such as variability, setup time, defect rate, among others) on lead time reduction for two productive environments: one with single machine and another flow shop environment. This is done using a quantitative model, which uses a hybrid System Dynamics – factory Physics approach. This model was created by Godinho Filho and Uzsoy (2008a, 2008b, 2009). In this research this single machine model is extended by means of adding more workstations in order to create flow shop environment. Besides to the main goal, this research has the following specific goals: (1) Check if the results found by Godinho Filho e Uzsoy (2008a, 2008b, 2009) are the same for scenes with different characteristics of productive system. (2) Determine if the positive effect in lead time of a continuous improvement action in the shop floor variables is sensitive to characteristics of productive system. If so, how is the relationship between the improvement action and the productive system. (3) Compare the results related with the two previous objectives for the single machine and flow shop cases. The results found in this research proved that conclusions made by Godinho Filho e Uzsoy (2008a, 2008b, 2009) are robust for different characteristics of productive system in the single machine and flow shop environments studied in this research. In simulated scenes for these environments, the continuous improvements actions in processing time variability and setup time are the most effective in lead time reduction. Furthermore, the positive effect made by the improvement action in lead time is proved sensitive to almost the same characteristics of productive system for single machine and flow shop environments. For these environments, improvement actions in time to failures and repair time are the most sensitive to different characteristics and the most appropriate in productive systems with negative characteristics (e.g. high setup times, high processing time variability, among others). Results generated by quantitative model in this research were analyzed using design of experiments to obtain conclusions.

Keywords: Lead Time. Continuous improvement. System Dynamics. Factory Physics.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1: Experimento fatorial sem interação.....	26
FIGURA 1.2: Experimento fatorial com interação.	26
FIGURA 2.1: Relacionamento entre os métodos e ações de melhoria contínua e as variáveis do chão de fábrica.....	47
FIGURA 3.1: Pensamento que a maioria das pessoas tem sobre o ato de encher um copo de água.....	54
FIGURA 3.2: Diagrama de influências sobre o ato de encher um copo de água.....	54
FIGURA 3.3: <i>Loop</i> positivo ou de reforço.....	55
FIGURA 3.4: Exemplo de um <i>loop</i> de reforço.	55
FIGURA 3.5: <i>Loop</i> negativo ou de equilíbrio.....	56
FIGURA 3.6: Exemplo de um <i>loop</i> de equilíbrio	56
FIGURA 3.7: Terminologia usada para distinguir entre fluxos e estoques em diferentes disciplinas.....	58
FIGURA 3.8: Estoques.....	58
FIGURA 3.9: Estoques separando fluxos.	59
FIGURA 3.10: Representação de um fluxo	59
FIGURA 3.11: Conector.	60
FIGURA 3.12: Processo de modelagem.	62
FIGURA 3.13: Evolução ao longo do tempo dos trabalhos de SD aplicados a Gestão da Produção.....	69
FIGURA 3.14: Número total de trabalhos por área da Gestão de Produção.....	70
FIGURA 3.15: Evolução ao longo do tempo das 4 áreas de Gestão da Produção.....	70
FIGURA 4.1: Fluxo produtivo em uma linha de produção.....	85
FIGURA 4.2: Relação entre o <i>lead time</i> e a utilização.	91
FIGURA 5.1: Parte principal do modelo desenvolvido por Godinho Filho e Uzsoy (2009).	101
FIGURA 5.2. Estrutura de melhoria para o tempo médio de <i>setup</i>	103
FIGURA 5.3: Ilustração esquemática do modelo desenvolvido neste trabalho.....	106
FIGURA 5.5: Resultados obtidos para o modelo desenvolvido por Godinho Filho e Uzsoy (2009)	111
FIGURA 5.6. Gráfico para throughput da segunda estação de trabalho.....	113
FIGURA 5.7: Gráfico para taxa de partidas da segunda estação de trabalho	113
FIGURA 5.8: Gráfico para taxa de chegadas da terceira estação de trabalho	114
FIGURA 5.9: Gráfico para coeficiente de variação de partidas da segunda estação	114
FIGURA 5.10: Gráfico para coeficiente de variação de chegadas da terceira estação	115
FIGURA 5.11: <i>Lead time</i> de uma linha produtiva com 5 estações	115
FIGURA 6.1: Resultados obtidos por Godinho Filho e Uzsoy (2009)	118
FIGURA 6.2: Efeito de ações de melhoria contínua no <i>lead time</i> para tempos de <i>setup</i> de 240 e 180 minutos.	120
FIGURA 6.3: Efeito de ações de melhoria contínua no <i>lead time</i> para tempos de <i>setup</i> de 180 e 45 minutos	121
FIGURA 6.4 Efeito de ações de melhoria contínua no <i>lead time</i> para taxas de defeitos 10% e 5%.....	123
FIGURA 6.5: Efeito de ações de melhoria contínua no <i>lead time</i> para taxas de defeitos de 5% e 1%.....	123
FIGURA 6.6: Efeito de ações de melhoria contínua no <i>lead time</i> para os tempos entre falhas de 4800 e 9600 minutos.....	125

FIGURA 6.7: Efeito de ações de melhoria contínua no <i>lead time</i> para os tempos entre falhas de 9600 e 19200 minutos.....	126
FIGURA 6.8: Efeito de ações de melhoria contínua no <i>lead time</i> para os tempos de reparo de 480 e 960 minutos.	128
FIGURA 6.9: Efeito de ações de melhoria contínua no <i>lead time</i> para os tempos de reparo de 240 e 480 minutos.	128
FIGURA 6.10: Efeito de ações de melhoria contínua no <i>lead time</i> para os coeficientes de variação do tempo de processamento de 1,5 e 1.....	130
FIGURA 6.11: Efeito de ações de melhoria contínua no <i>lead time</i> para dois diferentes coeficientes de variação do tempo de processamento de 1e 0,5.....	131
FIGURA 6.12: Efeito de ações de melhoria contínua no <i>lead time</i> para os coeficientes de variação de chegadas de 1,5 e 1.....	132
FIGURA 6.13: Efeito de ações de melhoria contínua no <i>lead time</i> para os coeficientes de variação de chegadas de 1 e 0,5.....	133
FIGURA 6.14: Interação entre tempo de reparo e tempo entre falhas.....	140
FIGURA 6.15: Interação entre tempo de reparo e o CV do tempo de processamento.	141
FIGURA 6.16: Interação entre tempo de <i>setup</i> e tempo de reparo.	142
FIGURA 6.17: Interação entre taxa de defeitos e tempo entre falhas.....	143
FIGURA 6.18: Interação entre tempo de <i>setup</i> e o tempo entre falhas.....	144
FIGURA 6.19: Interação entre tempo de <i>setup</i> e o CV do tempo de processamento.	145
FIGURA 6.20: Interação entre CV do tempo de processamento e tempo entre falhas.....	146
FIGURA 6.21: Interação entre taxa de defeitos e o tempo de reparo.	147
FIGURA 7.1: Efeito de ações de melhoria contínua no <i>lead time</i> para tempos de <i>setup</i> de 240 e 180 minutos.	152
FIGURA 7.2: Efeito de ações de melhoria contínua no <i>lead time</i> para tempos de <i>setup</i> de 180 e 45 minutos.	153
FIGURA 7.3: Efeito de ações de melhoria contínua no <i>lead time</i> para as taxas de defeitos de 5% e 10%.....	155
FIGURA 7.4: Efeito de ações de melhoria contínua no <i>lead time</i> para as taxas de defeitos de 5% e 1%.....	155
FIGURA 7.5: Efeito de ações de melhoria contínua no <i>lead time</i> para os tempos entre falhas de 4800 e 9600 minutos.....	157
FIGURA 7.6: Efeito de ações de melhoria contínua no <i>lead time</i> para os tempos entre falhas de 9600 e 19200 minutos.....	158
FIGURA 7.7: Efeito de ações de melhoria contínua no <i>lead time</i> para os tempos de reparo de 960 e 480 minutos.	160
FIGURA 7.8 Efeito de ações de melhoria contínua no <i>lead time</i> para os tempos de reparo de 480 e 240 minutos.	160
FIGURA 7.9: Efeito de ações de melhoria contínua no <i>lead time</i> para os coeficientes de variabilidade do tempo de processamento de 1,5 e 1	162
FIGURA 7.10: Efeito de ações de melhoria contínua no <i>lead time</i> para os coeficientes de variabilidade do tempo de processamento de 1e 0,5.	163
FIGURA 7.11: Efeito de ações de melhoria contínua no <i>lead time</i> para os coeficientes de variação de chegadas 1,5 e 1.	165
FIGURA 7. 12: Efeito de ações de melhoria contínua no <i>lead time</i> para os coeficientes de variação de chegadas de 1 e 0,5.....	166
FIGURA 7.13: Interação entre tempo de reparo e tempo entre falhas.....	174
FIGURA 7.14: Interação entre tempo de <i>setup</i> e tempo de reparo.	175
FIGURA 7.15: Interação entre tempo de <i>setup</i> e tempo entre falhas.....	176
FIGURA 7.16: Interação entre tempo de <i>setup</i> e taxa de defeitos.....	177

FIGURA 7.17: Interação entre taxa de defeitos e tempo de reparo.	178
FIGURA 7.18: Interação entre taxa de defeitos e tempo entre falhas.....	179
FIGURA 7.19 Interação entre tempo de reparo e cv do tempo de processamento.	180

LISTA DE TABELAS

TABELA 5.1: Valores utilizados no modelo desenvolvido por Godinho Filho e Uzsoy (2009)	105
TABELA 6.1: Interações mais significantes no ambiente de máquina para $\alpha= 5\%$	139
TABELA 7.1: Coeficiente de variabilidade de chegadas de todas as estações de trabalho para os 3 sistemas produtivos do cenário 12.	165
TABELA 7.2: Interações mais significantes no ambiente <i>flow shop</i> para $\alpha= 5\%$	173

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1.1: Síntese da escolhas do método de pesquisa.....	23
QUADRO 5.1: Sumário das principais diferenças entre o modelo desenvolvido por godinho filho e uzsoy (2009) e o modelo proposto neste trabalho.....	116
QUADRO 6.1: Sumário da ordem de impacto de cada ação de melhoria na redução do <i>lead time</i> para diferentes valores de tempo de <i>setup</i>	135
QUADRO 6.2: Sumário da ordem de impacto de cada ação de melhoria na redução do <i>lead time</i> para diferentes valores de taxa de defeitos	136
QUADRO 6.3: Sumário da ordem de impacto de cada ação de melhoria na redução do <i>lead time</i> para diferentes valores de tempos entre falhas.	136
QUADRO 6.4: Sumário da ordem de impacto de cada ação de melhoria na redução do <i>lead time</i> para diferentes valores de tempo de reparo.	137
QUADRO 6.5: Sumário da ordem de impacto de cada ação de melhoria na redução do <i>lead time</i> para diferentes valores de variabilidade do tempo de processamento.....	137
QUADRO 6.6: Sumário da ordem de impacto de cada ação de melhoria na redução do <i>lead time</i> para diferentes valores de variabilidade de chegadas.....	138
QUADRO 6.7: Síntese das influências de características do sistema produtivo no efeito das ações de melhoria estudadas para ambiente de máquina única.	149
QUADRO 7.1: Sumário da ordem de impacto de cada ação na redução do <i>lead time</i> para diferentes valores de tempo de <i>setup</i>	169
QUADRO 7.2: Sumário da ordem de impacto de cada ação na redução do <i>lead time</i> para diferentes valores de taxa de defeitos	169
QUADRO 7.3: Sumário da ordem de impacto de cada ação na redução do <i>lead time</i> para diferentes valores de tempos entre falhas.....	170
QUADRO 7.4: Sumário da ordem de impacto de cada ação na redução do <i>lead time</i> para diferentes valores de tempo de reparo.	170
QUADRO 7.5: Sumário da ordem de impacto de cada ação na redução do <i>lead time</i> para diferentes valores da variabilidade do tempo de processamento.....	171
QUADRO 7.6: Sumário da ordem de impacto de cada ação na redução do <i>lead time</i> para diferentes valores de variabilidade de chegadas.....	171
QUADRO 7.7: Síntese das influências de características do sistema produtivo no efeito das ações de melhoria estudadas para ambiente flow shop.	182
QUADRO 8.1: Interações 2 a 2 mais significantes para ambiente de máquina única e <i>flow shop</i>	186
QUADRO 8.2: Síntese das influências de características de sistema produtivo no efeito das ações de melhoria estudadas para ambientes de máquina única e <i>flow shop</i>	187

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	17
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO.....	17
1.2 QUESTÕES DE PESQUISA E OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
1.3 JUSTIFICATIVA DA IMPORTÂNCIA DO TEMA.....	19
1.4 METODOLOGIA DE PESQUISA	21
1.4.1 Métodos de abordagem	21
1.4.2 Abordagem de pesquisa	22
1.4.3 Método de pesquisa	22
1.5 TÉCNICA DE PESQUISA	23
1.5.1 Planejamento de experimentos	23
1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	27
CAPÍTULO 2: AS VARIÁVEIS DO CHÃO DE FÁBRICA ESTUDADAS E O EFEITO DE ALGUNS MÉTODOS E AÇÕES DE MELHORIA CONTÍNUA NESSAS VARIÁVEIS	29
2.1 INTRODUÇÃO.....	29
2.2 VARIÁVEIS DO CHÃO DE FÁBRICA	30
2.2.1 Tempo médio de <i>setup</i>	30
2.2.2 Taxa média de defeitos	32
2.2.3 Tempo médio entre falhas de equipamentos	32
2.2.4 Tempo médio de reparo da máquina.....	33
2.2.5 Variabilidade do tempo de processamento	34
2.2.6 Variabilidade do tempo entre as chegadas de ordens	35
2.3 MELHORIA CONTÍNUA: DEFINIÇÃO E ALGUMAS AÇÕES E MÉTODOS QUE CONTRIBUEM PARA A MELHORIA DAS VARIÁVEIS ESTUDADAS.....	36
2.3.1 Troca Rápida de Ferramentas.....	37
2.3.2 Manutenção produtiva total (<i>Total Productive Maintenance - TPM</i>)	39
2.3.3 Programa Zero Defeito	40
2.3.4 Seis <i>Sigma</i>	42
2.3.5 Coordenação de ordens no chão de fábrica.....	44
2.4 EFEITO DOS MÉTODOS E AÇÕES DE MELHORIA CONTÍNUA CITADOS NAS VARIÁVEIS DO CHÃO DE FÁBRICA ESTUDADAS NESSE TRABALHO.....	45
2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
CAPÍTULO 3: SYSTEM DYNAMICS- CONCEITUAÇÃO E ANÁLISE DE SUA APLICABILIDADE NA GESTÃO DA PRODUÇÃO	49
3.1. INTRODUÇÃO.....	49
3.2 ORIGEM	50
3.3 DEFINIÇÃO	51
3.4 ESTRUTURAS BÁSICAS DE <i>SYSTEM DYNAMICS</i>	52
3.5 PRINCÍPIOS PARA FORMULAÇÃO DE MODELOS DE <i>SYSTEM DYNAMICS</i>	60
3.6 A EVOLUÇÃO DA APLICAÇÃO <i>SYSTEM DYNAMICS</i> NA GESTÃO DA PRODUÇÃO	62
3.6.1. Trabalhos de SD no período de 1990-1995	63
3.6.2 Trabalhos de SD no período de 1996-2001	64
3.6.3 Trabalhos de SD no período de 2002-2007	65
3.6.4. Análise dos Resultados	68

CAPÍTULO 4: <i>FACTORY PHYSICS</i>	72
4.1 INTRODUÇÃO.....	72
4.2 ORIGEM E DEFINIÇÃO	72
4.3 DEFINIÇÕES, MEDIDAS DE DESEMPENHO CHAVES E PARÂMETROS BÁSICOS DE <i>FACTORY PHYSICS</i>	75
4.3.1 Definições básicas.....	75
4.3.2 Medidas de desempenho chave.....	77
4.4 EQUAÇÕES DA TEORIA <i>FACTORY PHYSICS</i> UTILIZADAS NO PRESENTE TRABALHO	80
4.4.1 A variabilidade no tempo de processamento.....	80
4.4.2 A variabilidade no fluxo produtivo.....	83
4.4.3 O efeito da variabilidade no tempo de processamento e no fluxo produtivo nas medidas de desempenho chave da manufatura	87
4.5 <i>FACTORY PHYSICS</i> NA GESTÃO DA PRODUÇÃO	91
4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A TEORIA <i>FACTORY PHYSICS</i>	93
CAPÍTULO 5: O MODELO PROPOSTO NESTE TRABALHO	94
5.1 A COMBINAÇÃO DAS TEORIAS <i>SYSTEM DYNAMICS-FACTORY PHYSICS</i>	94
5.2 O MODELO DESENVOLVIDO POR GODINHO FILHO E UZSOY (2009).....	96
5.2.2 O modelo	96
5.3 O MODELO PROPOSTO NESTE TRABALHO.....	105
5.3.1 Etapas realizadas na modelagem do trabalho desenvolvido	105
5.3.2 O modelo proposto nesse trabalho.....	106
5.4 VERIFICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO NESTE TRABALHO	109
5.4.1 Verificação para cada uma das estações de trabalho	110
5.4.2 Verificação para o fluxo da linha de produção.....	111
5.5 SUMÁRIO DAS DIFERENÇAS ENTRE OS DOIS MODELOS.....	116
5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	117
CAPÍTULO 6: O EFEITO DE AÇÕES DE MELHORIA CONTÍNUA NO <i>LEAD TIME</i> PARA DIFERENTES CARACTERÍSTICAS DE UM AMBIENTE PRODUTIVO COM MÁQUINA ÚNICA	118
6.1 OS RESULTADOS OBTIDOS POR GODINHO FILHO E UZSOY (2009).....	118
6.2 INVESTIGANDO A QUESTÃO DE PESQUISA 1	119
6.2.2 CENÁRIO 1: O efeito das ações de melhoria contínua no <i>lead time</i> para sistemas com diferentes tempos de <i>setup</i>	120
6.2.3 CENÁRIO 2: O efeito das ações de melhoria contínua no <i>lead time</i> para sistemas com diferentes taxas de defeito.	122
6.2.4 CENÁRIO 3: O efeito das ações de melhoria contínua no <i>lead time</i> para sistemas com diferentes tempos entre falhas.....	125
6.2.5 CENÁRIO 4: O efeito das ações de melhoria contínua no <i>lead time</i> para sistemas com diferentes tempos de reparo	127
6.2.6 CENÁRIO 5: O efeito das ações de melhoria contínua no <i>lead time</i> para sistemas com diferentes variabilidades do tempo de processamento.	130
6.2.7 CENÁRIO 6: O efeito das ações de melhoria contínua no <i>lead time</i> para sistemas com diferentes variabilidades de chegadas.....	132
6.2.8 Sumário das conclusões obtidas com a investigação da questão de pesquisa 1.	134
6.3 INVESTIGANDO A QUESTÃO DE PESQUISA 2.	138
6.3.1 Sumário das conclusões obtidas com a investigação da questão de pesquisa 2.....	148
CAPÍTULO 7: O EFEITO DE AÇÕES DE MELHORIA CONTÍNUA NO <i>LEAD TIME</i> PARA DIFERENTES CARACTERÍSTICAS DO AMBIENTE PRODUTIVO PARA MAIS ESTAÇÕES DE TRABALHO	151

7.1 INTRODUÇÃO.....	151
7.2 INVESTIGANDO A QUESTÃO DE PESQUISA 1	151
7.2.1 CENÁRIO 7: O efeito das ações de melhoria contínua no <i>lead time</i> para sistemas com diferentes tempos de <i>setup</i>	152
7.2.2 CENÁRIO 8: O efeito das ações de melhoria contínua no <i>lead time</i> para sistemas com diferentes taxas de defeitos.....	154
7.2.3 CENÁRIO 9: O efeito das ações de melhoria contínua no <i>lead time</i> para sistemas com diferentes tempos entre falhas.....	157
7.2.4 CENÁRIO 10: O efeito das ações de melhoria contínua no <i>lead time</i> para sistemas com diferentes tempos de reparo.....	159
7.2.5 CENÁRIO 11: O efeito das ações de melhoria contínua no <i>lead time</i> para sistemas com diferentes variabilidades do tempo de processamento.....	162
7.2.6 CENÁRIO 12: O efeito das ações de melhoria contínua no <i>lead time</i> para sistemas com diferentes variabilidades de chegadas.....	164
7.2.7 Sumário das conclusões obtidas com a investigação da questão de pesquisa 1.....	167
7.3 INVESTIGANDO A QUESTÃO DE PESQUISA 2.	172
CAPÍTULO 8: CONCLUSÕES	184
8.1 AVALIAÇÃO DAS QUESTÕES DE PESQUISA E DOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	184
8.1.3 Considerações finais	189
8.1.4 Avaliação dos objetivos específicos do trabalho	189
8.2 CONTRIBUIÇÕES ESPERADAS	190
8.3 PROPOSTAS PARA ESTUDOS FUTUROS	190
CAPÍTULO 9: REFERÊNCIAS	191

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO

Ao longo da história da manufatura, muitos foram os modelos que se propuseram a auxiliar a tarefa de gerir a manufatura. Todos estes paradigmas podem ser estudados de uma forma conjunta em prol de um maior entendimento, comparações e maior utilização prática. Prova disso é a proposta do termo PEGEM (Paradigmas Estratégicos de Gestão da Manufatura), por Godinho Filho e Fernandes (2005). Segundo esses autores PEGEMs são modelos/padrões estratégicos e integrados de gestão, direcionados a certas situações do mercado, que se propõem a auxiliar as empresas a alcançarem determinado(s) objetivo(s) de desempenho.

A partir desta definição, consideram-se como PEGEMs os seguintes paradigmas: Manufatura em Massa Atual (MMA); Manufatura Enxuta (ME); Manufatura Responsiva (MR), Customização em Massa (CM) e Manufatura Ágil (MA). O presente trabalho foca no paradigma da Manufatura Responsiva (MR) que enfatiza a redução do *lead time* em um ambiente com alta variedade de produtos, acreditando-se que este PEGEM é adequado para a grande parte das situações industriais no mercado atual globalizado.

Apesar da importância do *lead time* para as empresas, grande parte da literatura sobre o tema é bastante conceitual e exploratória (TREVILLE et al., 2004), faltando estudos que mostrem como esforços para melhoria em variáveis do chão de fábrica impactam na redução do *lead time* propriamente dito.

É exatamente com a finalidade de auxiliar no preenchimento deste *gap* que surge o objetivo geral do presente trabalho: **Avaliar o efeito da implantação de ações de melhoria contínua na redução do *lead time* para dois ambientes produtivos com diferentes características.**

Esses dois ambientes avaliados são:

- Ambiente com máquina única
- Ambiente *flow shop* (com 5 estações de trabalho)

Para cada um dos dois ambientes são estudadas diferentes situações que simulam diferentes características encontradas em um sistema de produção. Essas diferentes situações são conseguidas variando-se o nível de 6 variáveis do chão de fábrica estudadas

nessa dissertação, a saber: tempo médio de *setup*, taxa média de defeitos, tempo entre falhas, tempo de reparo, variabilidade no tempo de processamento e variabilidade no tempo entre as chegadas de ordens.

Em cada um dos dois ambientes (máquina única e *flow shop*) essas variáveis são simuladas para 3 níveis diferentes, por exemplo, o tempo de *setup* é simulado para os valores de 45, 180 e 240 minutos, a taxa de defeitos para valores de 1%, 5% e 10%, e assim por diante. A partir dessa alteração dos valores, o efeito das ações de melhoria contínua nas seis variáveis em estudo para a redução do *lead time* é analisado.

Para se avaliar o efeito destas ações de melhoria contínua na redução do *lead time* pretende-se utilizar um modelo quantitativo que relaciona as teorias de *System Dynamics* (FORRESTER, 1961) e *Factory Physics* (HOPP e SPEARMAN, 2008). Este modelo foi originalmente criado pelo Prof. Moacir Godinho Filho e pelo Prof. Reha Uzsoy por ocasião do estágio de pós-doutorado realizado pelo Prof. Moacir na *North Carolina State University* em 2007 (GODINHO FILHO e UZSOY, 2008a, 2008b, 2009). Os resultados fornecidos por esse modelo são analisados por meio de projeto fatorial de experimentos.

1.2 QUESTÕES DE PESQUISA E OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Por meio do aprimoramento do modelo desenvolvido em Godinho Filho e Uzsoy (2008a, 2008b, 2009) duas questões de pesquisas serão respondidas. Estas questões são:

Questão de pesquisa 1: No que os resultados obtidos por Godinho Filho e Uzsoy (2008a, 2008b, 2009) se alteram para cenários com diferentes características do sistema produtivo?

Questão de pesquisa 2: O efeito positivo no *lead time* de uma ação de melhoria contínua nas variáveis do chão de fábrica estudadas nesse trabalho é sensível a características do sistema produtivo? Se sim, como é esse relacionamento entre a ação de melhoria e o sistema produtivo?

A questão de pesquisa 2 também servirá para auxiliar a determinação, na prática, de ações alternativas de melhoria que podem/ devem ser utilizadas em situações nas quais é muito difícil melhorar alguma variável do sistema produtivo, ou mesmo no qual é estratégico se manter um sistema produtivo com aquelas características. Por exemplo,

supondo um sistema com alta variabilidade nos tempos de processamento, e que para a empresa em questão seja estratégico manter essa variabilidade, a qual é ocasionada pela alta variedade do mix de produtos que essa empresa possui (tal conceito de variedade estratégica é proposto por Hopp e Spearman (2008)). Nessa situação, é de extrema importância determinar uma ação de melhoria em alguma outra variável do chão de fábrica, que em um sistema com essa característica (alta variabilidade) possa levar a uma grande contribuição com relação à redução do *lead time*.

Dessa forma, os objetivos específicos deste trabalho são:

Objetivo Específico 1: Verificar se os resultados encontrados por Godinho Filho e Uzsoy (2008a, 2008b, 2009) são os mesmos para cenários com diferentes características do sistema produtivo.

Objetivo Específico 2: Determinar se o efeito positivo no *lead time* de uma ação de melhoria nas variáveis do chão de fábrica estudadas é sensível a características do sistema produtivo e se sim, como é o relacionamento entre a ação de melhoria e o sistema em questão.

Objetivo específico 3: Comparar os resultados com relação aos dois objetivos anteriores para os casos de máquina única e *flow shop* (com 5 estações de trabalho).

1.3 JUSTIFICATIVA DA IMPORTÂNCIA DO TEMA

O tema desta dissertação é verificar o efeito de ações de melhoria contínua em 6 variáveis do chão de fábrica na redução do *lead time* utilizando uma abordagem híbrida *System Dynamics-Factory Physics*.

O *lead time* é um dos conceitos mais importante da logística e deve ser levado em consideração em todas as atividades do sistema, pois está associado ao custo da operação. O *lead time* pode apresentar diferentes significados, a depender do tipo de gestão empregada no sistema de manufatura. Neste trabalho entende-se *lead time* como sinônimo do termo MCT (*manufacturing critical-path time* = tempo do caminho crítico para a manufatura), proposto por Ericksen e Suri (2001). De acordo com esses autores MCT ou *lead time* é o típico tempo, medidos 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.

No paradigma da Manufatura Responsiva a principal medida de desempenho é a redução do *lead time*. A sociedade moderna e a tecnologia têm produzido consumidores impacientes, sempre procurando por produtos novos, customizados e com melhores funcionalidades para as suas necessidades. Como resultado as companhias têm adotado o tempo como um critério competitivo (SURI, 1998). Essa importância nos leva a tratar deste assunto nessa dissertação.

De acordo com Leede e Looise (1999) a melhoria contínua é vital no atual ambiente competitivo e é uma das principais atividades necessárias para se ter excelência na manufatura. Mesmo tendo uma grande importância, e tendo sido relativamente bastante pesquisada, ainda existem diversas lacunas na literatura sobre o assunto. Uma destas lacunas é a falta de estudos que mostrem o efeito positivo de ações melhoria contínua em medidas de desempenho da manufatura, tais como *lead time*, utilização, estoque em processo (WIP), dentre outras (KERRIN, 1999). Por conta de suprir essa carência, esse trabalho trata desse assunto.

Para cumprir os objetivos propostos, este trabalho utilizará um modelo quantitativo a respeito do comportamento dos sistemas de manufatura que combina o uso de *System Dynamics* (FORRESTER, 1961) e *Factory Physics* (HOPP e SPEARMAN, 2008) de uma forma híbrida.

A simulação utilizando *System Dynamics* ajuda a entender as interações entre diferentes ações de melhoria contínua e seus efeitos em indicadores de desempenho dos sistemas de manufatura ao longo do tempo. De acordo com Adams et al. (1999) a simulação pode dar suporte aos esforços de melhoria contínua de diversas formas, tais como: (i) auxiliando na identificação dos problemas; e; (ii) medindo e avaliando o efeito as várias opções de melhoria. Nessa pesquisa, a simulação usando SD é usada exatamente para cumprir o objetivo (ii), ou seja, medir e avaliar ao longo do tempo o efeito de ações de melhoria contínua no *lead time* da manufatura para um ambiente com múltiplos produtos.

Um estudo realizado por Baines e Harrison (1999) revela que a utilização da teoria *System Dynamics*, quando comparada com a simulação de eventos discretos, ainda é pouco utilizada, constituindo uma oportunidade a ser explorada.

A teoria *Factory Physics*, por sua vez, contribui no uso da simulação por descrever através de leis o comportamento de um sistema. De acordo com Standridge (2004) as leis advindas de *Factory Physics* ajudam nos estudos de simulação. Apesar da sua relevância, essa teoria ainda é pouco utilizada. Ai reside outro *gap* que este trabalho pretende explorar.

As técnicas de planejamento de experimentos, por sua vez, são particularmente úteis na engenharia a fim de melhorar o desempenho dos processos e permitem eficiência e economia no processo experimental, além de objetividade científica na retirada de conclusões (MONTGOMERY e RUNGER, 2003).

1.4 METODOLOGIA DE PESQUISA

Para Carvalho (1995), a metodologia investiga fundamentalmente os métodos, ou seja, os procedimentos que a ciência deve seguir para alcançar êxito, além de se preocupar em articular critérios que permite avaliar o desempenho de teorias formuladas e possibilitar decidir entre teorias concorrentes. Demo (1995) afirma que o método é indispensável sob vários motivos: de um lado, para transmitir à atividade marcas de racionalidade, ordenação, otimizando o esforço; de outro, para garantir contra credulidades, generalizações apressadas, exigindo para tudo que se digam os respectivos argumentos, para permitir criatividade, ajudando a descobrir novos horizontes.

Esta seção tem como objetivo apresentar, as abordagens e métodos de pesquisa utilizados nesta dissertação.

1.4.1 Métodos de abordagem

Para Lakatos e Marconi (2001), o método de abordagem fornece a base lógica à investigação. O método utilizado nessa dissertação é o método dedutivo. Para Lakatos e Marconi (2001) o método dedutivo é aquele que a partir de teorias e leis prediz a ocorrência dos fenômenos particulares.

O presente trabalho pode ser classificado como dedutivo, pois para a criação do modelo proposto nesta dissertação serão utilizadas fórmulas derivadas de uma teoria já existente e consolidada: teoria das filas.

1.4.2 Abordagem de 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 e MARCONI, 2001). Segundo Amaratunga et al.(2002), as abordagens de pesquisa podem ser: quantitativa, qualitativa ou a combinação das duas.

De acordo com Yin (1994), a abordagem de pesquisa deve ser escolhida como uma função da situação de pesquisa. Cada abordagem escolhida tem sua própria maneira para coletar e analisar os dados, e possui suas próprias vantagens e desvantagens.

O presente trabalho se enquadra dentro da abordagem quantitativa. Ainda de acordo com Bryman (1989) as principais características constituintes da abordagem quantitativa são: pouca atenção ao contexto; tendência a usar apenas uma fonte de dados; amostras grandes e abrangentes; a ênfase na interpretação é menor.

1.4.3 Método de pesquisa

Definida a abordagem de pesquisa como quantitativa, o método de pesquisa utilizado nesse trabalho é o de modelagem/simulação.

Para Bertrand e Fransoo (2002), a modelagem baseia-se na hipótese que modelos podem 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. Segundo esses autores, na modelagem o relacionamento entre as variáveis são descritos como causais e são explicitados. A simulação tem por objetivo construir um modelo de um processo individual ou em grupo e experimentá-lo através da replicação do processo (BERENDS E ROMME, 1999).

Essa pesquisa utiliza as teorias *Factory Physics* e *System Dynamics* para realizar a modelagem e a simulação de cenários de chão de fábrica. A equação de *Factory Physics*, derivadas da teoria de filas, estabelece um conjunto de leis para explicar o comportamento e o relacionamento entre variáveis no chão de fábrica. Ela é aplicada a fim de se examinar a inter-relação entre os componentes do sistema e fornece um domínio teórico para entender o comportamento do sistema. A teoria de *System Dynamics* permite a

representação de cenários do sistema real, considerando seus principais componentes e busca o entendimento da dinâmica que rege o sistema.

No presente trabalho a simulação será feita por meio do *software* Vensim.

1.5 TÉCNICA DE PESQUISA

As técnicas de pesquisa podem ser de diversos tipos- questionários, entrevistas, observação, análises estatísticas, etc. Nesse trabalho a técnica utilizada é a de planejamento fatorial de experimentos.

O quadro 1.1. sumariza a abordagem e métodos escolhidos para a realização dessa dissertação.

Método de abordagem	Dedutivo
Abordagem de pesquisa	Quantitativa
Método de pesquisa	Simulação/Modelagem
Técnica de pesquisa	Planejamento de experimentos

QUADRO 1.1: Síntese da escolhas do método de pesquisa.

Fonte: AUTOR

A técnica de planejamento de experimentos será melhor explicada na subseção abaixo. E as teorias *Factory Physics* e *System Dynamics* presentes nesse trabalho serão detalhadas ao longo dos capítulos 3 e 4 respectivamente.

1.5.1 Planejamento de experimentos

Segundo Tahara (2009), o planejamento de experimentos é um teste, ou série de testes, no qual são feitas mudanças nas variáveis de entrada de um processo, de modo a podermos observar e identificar mudanças correspondentes na resposta.

Por meio da técnica de planejamento de experimentos, pode-se determinar se subconjunto das variáveis dos processos tem a maior influência no desempenho do processo (MONTGOMERY e RUNGER, 2003).

Para Tahara (2009), os planejamentos de experimentos podem ser usados tanto no desenvolvimento do processo quanto na solução de problemas do processo, para melhorar

o seu desempenho ou obter um processo que seja robusto ou não-sensível a fontes externas de variabilidade. O planejamento de experimentos pode ser útil também no controle estatístico do processo, como por exemplo, para um gráfico de controle que indique que o processo está fora de controle, e que o processo tenha várias variáveis de entrada controláveis. A menos que se saibam quais variáveis de entrada são as importantes, será muito difícil trazer o processo de volta ao controle (TAHARA,2009). Portanto, o projeto de experimentos permite identificação das variáveis mais influentes do processo.

Os resultados de um projeto de experimento podem conduzir a (MONTGOMERY e RUNGER, 2003):

- Melhor rendimento do processo
- Redução na variabilidade do processo e uma melhor obediência aos requerimentos nominais ou alvos
- Redução nos tempos de projeto e desenvolvimento
- Redução nos custos de operação

Segundo Montgomery e Runger (2003), métodos de planejamento de experimentos são úteis também em atividades de projeto de engenharia, em que novos produtos sejam desenvolvidos e produtos já existentes sejam melhorados. Algumas aplicações típicas de experimentos planejados estatisticamente em projeto de engenharia incluem: i) Avaliação e comparação de configurações básicas de projeto; ii) Avaliação de materiais diferentes; iii) Seleção de parâmetros de projeto de modo que o produto trabalhe bem sob uma ampla variedade de condições de campo (ou de modo que o projeto seja robusto); iv) Determinação dos parâmetros de projeto dos produtos chaves que causem impacto no desempenho do produto.

Existem diversos tipos de planejamento de experimentos, mas os mais comuns são:

1)Planejamento com único fator: Quando apenas um fator é de interesse do experimento. Montogomery e Runger (2003) fornecem o seguinte exemplo de planejamento de experimentos com único fator: Considerando que a engenharia de produto de uma fábrica de papel esteja interessada em melhorar a resistência à tensão de seu produto, e que esta, por sua vez, imagina-se ser função de concentrações de madeira de lei presentes em sua polpa. O time de engenheiros responsável decide investigar quatro níveis de concentração de madeira de lei (5%,10%15% e 20%). Esse tipo de experimento consiste em um planejamento com

único fator de interesse (concentração de madeira de lei e quatro níveis desse fator (as quatro diferentes concentrações)).

2)Planejamento fatorial de experimentos: Quando vários fatores são de interesse em um experimento. Por um planejamento fatorial, entende-se que, em cada tentativa completa ou réplica do experimento, todas as combinações possíveis dos fatores são investigadas. Montgomery e Runger (2003) fornecem o seguinte exemplo de planejamento fatorial de experimentos: um time de engenheiros está trabalhando em um novo processo de soldagem de componentes eletrônicos de maneira a diminuir o número de defeitos nas juntas soldadas. Esse processo possui inúmeras variáveis com diferentes graus de importância para o seu desempenho. O time de engenharia está interessado em determinar quais fatores afetam a ocorrência de defeitos nas placas (temperatura, velocidade da esteira, densidade do fluxo, etc.), para tal, ele pode utilizar uma técnica de planejamento fatorial a fim de verificar quais desses fatores são mais críticos para o processo, a direção de efeito desses fatores e a interação entre esses fatores. Os experimentos fatoriais são a única maneira de descobrir interações entre as variáveis.

As interações entre variáveis se referem à distribuição dos valores dessas variáveis de maneira consistente, ou seja, existe interação entre as variáveis se seus valores correspondem sistematicamente uns aos outros para um dado número de observações (por exemplo, existe uma interação entre peso e altura, já que indivíduos altos são mais pesados que indivíduos baixos). A interação entre as variáveis é, em geral, o objetivo da maioria das pesquisas e/ou análises científicas (REIS, 2003).

Montgomery e Runger (2003) explicam graficamente o conceito de interação:

A figura X plota dois níveis do fator A (A_{BAIXO} e A_{ALTO}) para dois níveis do fator B (B_{BAIXO} e B_{ALTO}) Note- que as linhas de B_{BAIXO} e B_{ALTO} são aproximadamente paralelas para os diferentes níveis do fator A, indicando que esses dois fatores não interagem significativamente.

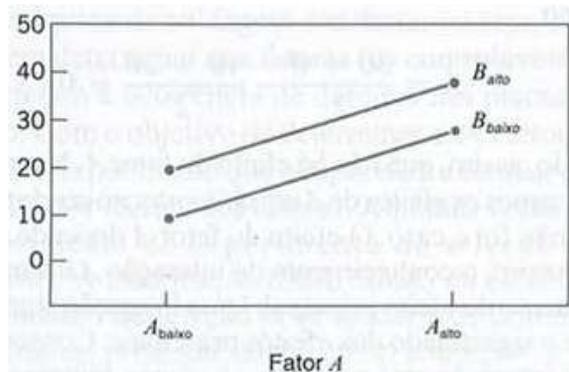


FIGURA 1.1:Experimento fatorial sem interação.

Fonte: Montgomery e Runger (2003)

Já na figura Y, pode-se perceber que as linhas de B_{BAIXO} e B_{ALTO} não são paralelas, indicando interação entre os fatores A e B.

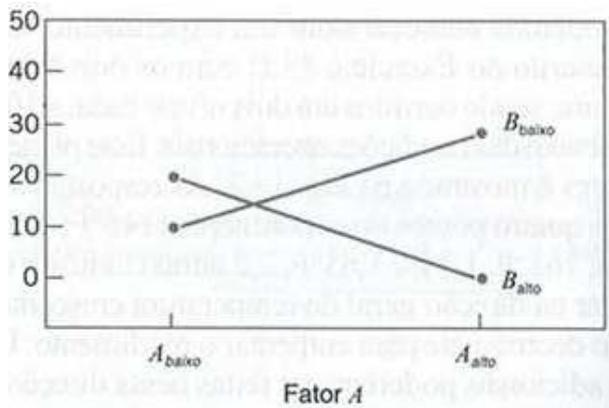


FIGURA 1.2:Experimento fatorial com interação.

Fonte: Montgomery e Runger (2003)

Esses gráficos são chamados gráficos de interação dois a dois e muitos programas computacionais usados para analisar dados construirão esses gráficos automaticamente, como por exemplo, os *softwares* Statistica, Minitab, entre outros.

Outro fator importante a ser considerado no momento de fazer o planejamento de experimentos e que quantifica a interação entre as variáveis é o nível de significância estatística (α) a ser considerado. Isso quer dizer que existe $\alpha\%$ de probabilidade de uma hipótese verdadeira ser dada como falsa.

O valor de α representa um índice decrescente de confiabilidade de um resultado, ou seja, quanto mais alto o seu valor menos provável que a relação observada entre as variáveis no experimento seja um indicador confiável da interação entre essas variáveis na população em estudo (REIS, 2003).

A escolha do nível de significância acima do quais resultados serão rejeitados é arbitrária. Essa decisão depende se o resultado foi previsto *a priori* ou apenas *a posteriori* baseado em análises e comparações dos dados. Na maioria das ciências os resultados que atingem o valor de α de 0,05 são considerados estatisticamente significantes (REIS, 2003).

A técnica de planejamento de experimentos é largamente utilizada nas mais diversas áreas da pesquisa, tais como melhoria de processos (Leal et al.,2007), processos de soldagem (Silva e Silva, 2008), etc.

1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação contém 8 capítulos, divididos da seguinte maneira:

Esse primeiro capítulo apresenta uma breve introdução e objetivo geral do trabalho, bem como as questões de pesquisas que devem ser respondidas nesse trabalho, a justificativa para sua execução e os métodos de pesquisa escolhido para o desenvolvimento do trabalho.

O segundo capítulo mostra as variáveis do chão de fábrica estudadas nessa dissertação e o efeito de alguns métodos e ações de melhoria contínua nessas variáveis. Esse capítulo fornece uma visão prática da existência de ações que afetam diretamente as variáveis estudadas, fornecendo um subsídio mais prático para o modelo desenvolvido nessa dissertação.

O terceiro capítulo apresenta a teoria *System Dynamics*, suas definições fundamentais, os princípios básicos para formulação de um modelo e uma revisão de literatura feita com base no uso da teoria na gestão da produção.

O quarto capítulo apresenta a teoria *Factory Physics*, suas principais definições e as fórmulas e leis necessárias ao desenvolvimento deste trabalho.

O quinto capítulo apresenta e explica o modelo desenvolvido por Godinho Filho e Uzsoy (2009) (máquina única) e o modelo expandido para mais estações de trabalho (*flow shop*) desenvolvido nessa dissertação. Este capítulo também apresenta as estruturas de melhoria contínua utilizadas nesse trabalho.

O sexto capítulo se propõe a responder as questões de pesquisa desse trabalho para o ambiente com máquina única (1 estação de trabalho).

O sétimo capítulo se propõe a responder as questões de pesquisa desse trabalho para o ambiente *flow shop* de 5 estações de trabalho.

O oitavo capítulo apresenta as principais conclusões obtidas com a pesquisa desenvolvida nessa dissertação.

CAPÍTULO 2: AS VARIÁVEIS DO CHÃO DE FÁBRICA ESTUDADAS E O EFEITO DE ALGUNS MÉTODOS E AÇÕES DE MELHORIA CONTÍNUA NESSAS VARIÁVEIS

2.1 INTRODUÇÃO

De acordo com Hopp e Spearman (2008), um sistema de manufatura é uma rede orientada aos objetivos dos processos através dos quais entidades (partes manufaturadas e informações) fluem. Para esses autores, a manufatura é um sistema composto por fluxos de produtos e informações, os quais são suportados por vários subsistemas e variáveis. Este capítulo foca exatamente em importantes variáveis do chão de fábrica, a saber: tempo médio de *setup*, taxa média de defeitos, tempo médio entre falhas, tempo médio de reparo da máquina, variabilidade do tempo de processamento e variabilidade do tempo entre as chegadas de ordens.

Tendo-se como base que este trabalho tem como objetivo avaliar o efeito de ações de melhoria contínua em variáveis do chão de fábrica para a redução do *lead time*, esse capítulo visa, por meio de um estudo teórico baseado em pesquisas e trabalhos disponíveis, reunir o que a literatura traz a respeito do tema melhoria contínua e o efeito de alguns de seus métodos e ações em determinadas variáveis do chão de fábrica. Como o tema melhoria contínua é bastante amplo, possuindo inúmeros métodos e ações, esse capítulo não esgota o assunto, apenas fornece uma visão mais prática a respeito desses métodos de melhoria contínua que afetam diretamente as variáveis do chão de fábrica estudadas nessa dissertação, apresentando, assim, subsídio prático para o modelo desenvolvido neste trabalho e apresentado no capítulo 5.

As técnicas/ações/ferramentas de melhoria contínua focadas neste capítulo são: troca rápida de ferramentas, manutenção produtiva total, programa zero defeito, 6 sigma e coordenação de ordens no chão de fábrica.

O capítulo está estruturado da seguinte forma: na seção 2 são apresentadas as variáveis do chão de fábrica focadas nessa dissertação, na seção 3 é apresentada uma conceituação da literatura a respeito dos métodos e ações de melhoria contínua tratados neste capítulo, na seção 4 é mostrado o efeito desses métodos e ações de melhoria contínua nas

variáveis descritas anteriormente e na seção 5 são realizadas algumas considerações finais sobre o capítulo.

2.2 VARIÁVEIS DO CHÃO DE FÁBRICA

As variáveis abordadas no presente trabalho são: i) tempo médio de *setup*; ii) taxa média de defeitos; iii) tempo médio entre falhas; iv) tempo médio de reparo da máquina; v) variabilidade do tempo de processamento; vi) variabilidade do tempo entre as chegadas de ordens.

As seis variáveis citadas acima envolvem na verdade dois parâmetros: a) variabilidade, a qual é medida em termos de coeficiente de variação, ou seja, em termos da relação entre desvio padrão e média; e, b) tempos e taxas médias (HOPP e SPEARMAN, 2008). A seguir são descritas estas variáveis.

2.2.1 Tempo médio de *setup*

Tempo médio de *setup* é o tempo médio que uma tarefa gasta esperando em uma estação de trabalho por preparação da máquina (HOPP e SPEARMAN, 2008).

Shingo (2003) divide as operações de *setup* em duas partes: i) *Setup* interno, as quais são operações de preparação que só podem ser feitas quando a máquina está parada; ii) *Setup* externo, na qual as operações de preparação podem ser feitas quando a máquina ainda está funcionando. Segundo esse autor, todas as operações de *setup* compreendem uma seqüência de passos, os quais são descritos a seguir:

- a) **preparação, ajustes pré-processamento, verificação de materiais, ferramentas:**
Nesse passo, assegura-se que todos os componentes e ferramentas estejam onde deveriam estar e funcionando corretamente. É incluído também a limpeza da máquina e o período após o processamento quando estes itens são removidos e retornam ao local de estocagem;

- b) **montagem e remoção de navalhas, ferramentas, componentes:** Inclui a remoção dos componentes e das ferramentas após o término do processamento e a sua fixação para o próximo lote;
- c) **medições, posicionamentos e calibrações:** Nesse passo são feitas as medições e calibrações necessárias para realizar a operação de fabricação;
- d) **corridas de testes e ajustes:** São realizados os ajustes após o processamento de uma peça. Quanto maior a precisão das medições do passo anterior, mais fáceis serão os ajustes nessa fase.

Hopp e Spearman (2008) consideram os *setups* como um tipo de parada não preemptiva. Paradas não preemptivas são aquelas que inevitavelmente ocorrem, mas para os quais existe um tipo de controle

De acordo com Diaby (2000), o mais importante pré-requisito para o sucesso de todas as tecnologias de manufatura (Tecnologia de Grupo, Sistemas de Manufatura Flexível, Manufatura *Just in Time*, etc.) é um curto tempo de *setup*. Curtos *setups* permitem pequenos lotes e inventários, os quais podem: i) aumentar a qualidade; ii) diminuir desperdícios e retrabalhos; iii) aumentar a produtividade; iv) descobrir a causa de erros e atrasos; e v) melhorar a flexibilidade e responsividade (SCHONBERGER, 1984).

Setups são inevitáveis quando um processo de manufatura faz mais de um produto, mas são indesejáveis, já que requerem tempo do processo de produção. As manufaturas tradicionais optam por longas corridas de produção a fim de diminuir a quantidade de *setups*; porém essa prática ocasiona grandes estoques em processo, longos *lead times*, grandes inventários de bens terminados, entre outros problemas.

Segundo Culley et al. (2003), a implementação de iniciativas de redução de *setup* têm sido abordadas de maneira *ad hoc*, sem estrutura e sem o compromisso da alta gerência necessário para o sucesso. De acordo com esses autores, a implementação tem sido levada para o chão de fábrica através de times de melhoria contínua, mas falta conhecimento para levar para a fase de projetos melhorias significativas e torná-las sustentáveis a longo prazo.

2.2.2 Taxa média de defeitos

A taxa média de defeitos é a proporção de itens defeituosos produzidos em um dado período de tempo. De acordo com Fenton (1999), o termo defeito pode ser definido de várias maneiras, mas a mais comum é como um desvio das especificações ou expectativas, as quais podem gerar falhas nas operações.

Shingo (1986) classifica os defeitos em dois tipos: os isolados os quais ocorrem apenas uma vez e os defeitos em série, que ocorrem repetidamente. Já para Besterfield (1986), os defeitos podem ser classificados em três classes de acordo com sua severidade:

- a) **defeitos críticos:** É um defeito que a experiência e o julgamento indicam que estão propensos a originar situações perigosas;
- b) **defeitos maiores:** Esse tipo de defeito reduz a utilidade do produto para a finalidade proposta;
- c) **defeitos menores:** São defeitos associados à aparência do produto.

Segundo Hopp e Spearman (2008), problemas de qualidade muitas vezes aumentam a utilização das estações de trabalho. E por afetar a variabilidade e a capacidade podem causar conseqüências operacionais graves. Para Lee (2008), a proporção de defeitos influencia no custo da manufatura, custo do inventário e perda da lucratividade.

Nogueira (1998) afirma que foi nas décadas de 40 e 50, período onde o mundo estava bipolarizado e a questão da confiabilidade era associada à segurança que estudos mais profundos e específicos, como os relacionados à taxa de defeitos e a vida útil em componentes, foram feitos.

2.2.3 Tempo médio entre falhas de equipamentos

Tempo médio entre falhas é o intervalo de tempo entre duas falhas consecutivas para equipamentos reparáveis. Geralmente é medido em termos de horas de operação. Para Gharbi e Kenne (2000), o aumento do tempo médio entre falhas dos equipamentos de produção é uma das medidas das organizações para tentar reduzir os custos da produção.

As falhas das máquinas são uma das maiores interrupções as quais os sistemas de produções são submetidos. Cada interrupção baixa a capacidade do sistema e pode causar altos custos operacionais (CHELBI e REZG, 2006). Todinov (2006) em seu estudo, afirma que as falhas nos equipamentos causam perda de tempo e volume de produção.

Segundo Amari (2006), o tempo médio entre falhas é uma medida comum usada para descrever as características de confiabilidade de um sistema reparável. A confiabilidade representa a habilidade de um sistema, produto ou processo desempenhar a função necessária sob certas condições durante um dado intervalo de tempo (TRIVEDI, 2006).

As pressões competitivas e as mudanças de paradigmas de gestão da produção têm aumentado a importância da confiabilidade e consistência dos equipamentos de produção (AHUJA e KHAMBA, 2008). De acordo Chen e Tseng (2003), com o aumento da dependência de tecnologias avançadas na manufatura, a disponibilidade e confiabilidade do equipamento se tornam uma preocupação crítica para manutenção. Para esses autores, a informação sobre esses dois fatores facilitam o planejamento e a alocação de recursos para desempenhar tarefas necessárias aos sistemas.

A proposta da manutenção é estender o tempo de vida do equipamento ou pelo menos o tempo até a próxima falha. Além disso, é esperado que políticas de manutenção eficazes possam reduzir a frequência das interrupções de serviço e muita das conseqüências indesejáveis dessas interrupções (ENDRENYI, 2001). Nos sistemas reparáveis, as atividades de manutenção preventiva são desempenhadas para reduzir a frequência das falhas e assim, aumentam o tempo médio entre falhas (AMARI, 2006).

2.2.4 Tempo médio de reparo da máquina

Tempo médio de reparo é o tempo médio necessário para consertar uma máquina, do momento em que ela falha até o momento em que está operando novamente (SLACK et al. 2002). Esse tempo inclui os tempos de preparação, de diagnóstico, correção e checagem final (SHERIF, 2003).

O tempo médio de reparo é uma importante métrica de reparabilidade. O conceito de reparabilidade apareceu pela primeira vez em 1954 nos Estados Unidos e foi

descrito como um importante fator para determinar a disponibilidade, representando a probabilidade que um item tem de ser reparado após uma falha no tempo (SILVA et al. 2008).

Segundo Hopp e Spearman (2008), confiabilidade (ex: tempo médio entre falhas) e reparabilidade (ex: tempo médio de reparo) são importantes para determinar a capacidade e a disponibilidade de uma máquina.

Melhorando o tempo médio entre falhas ou o tempo médio de reparo, aumenta-se a disponibilidade da máquina e isso aumenta a sua capacidade. Ao diminuir-se o tempo médio de reparo pode-se significativamente reduzir a variabilidade na máquina e também o tamanho de filas na estação de trabalho (HOPP e SPEARMAN, 2008).

2.2.5 Variabilidade do tempo de processamento

O tempo de processamento é o tempo que as tarefas gastam sendo processadas na estação e é uma das variáveis mais importantes do chão de fábrica (HOPP e SPEARMAN, 2008). Segundo esses autores, a variabilidade está presente em todos os sistemas de produção e por essa razão a habilidade em medir, entender e geri-la é crítica para uma gestão eficaz da manufatura.

De acordo com Gerchak (2000), já que um processo de produção, assim como projetos, consiste em uma série de atividades, a variabilidade total é função da variabilidade das atividades individuais. Para esse autor, reduzir a variabilidade nos componentes dos produtos é um caminho para reduzir a variação nos tempos de processamento e no sistema de produção como um todo.

Segundo Mapes et al. (2000), uma maneira tradicional de lidar com a variabilidade no tempo de processamento é introduzir estoque em processo entre os estágios. Isso assegura que a variação nos tempos de processamento entre os primeiros estágios da manufatura não provoquem atrasos nos últimos estágios. Entretanto, isso não reduz a variabilidade no tempo de saída, além de aumentar os custos e reduzir a confiabilidade dos tempos de entrega.

Segundo Godinho Filho e Uzsoy (2009), o tempo de processamento é construído a partir do tempo natural por meio da adição de três efeitos: (a) efeito de paradas preemptivas (falhas de máquinas); (b) efeitos de paradas não preemptivas (tempos de *setup*); (c) efeito de itens defeituosos. Portanto, a variabilidade do tempo de processamento é

composta pela variabilidade presente em cada um desses componentes. O efeito de cada um desses componentes na variabilidade do tempo de processamento será explicado mais detalhadamente no capítulo 4.

2.2.6 Variabilidade do tempo entre as chegadas de ordens

O tempo médio entre chegadas representa o tempo médio entre chegadas de duas ordens consecutivas ao sistema de produção. A variabilidade associada a esse tempo é a variabilidade do tempo entre chegadas. De acordo com Hopp e Spearman (2008), a forma pelo qual as tarefas chegam a uma estação de trabalho é o ponto inicial para entender o fluxo de um processo e a sua variabilidade.

Segundo Penttilla (2005), a variabilidade em uma estação de trabalho depende de dois fatores: fluxo de chegada do material e tempo de processamento atual da estação de trabalho. A variação no fluxo de chegada do material é descrita usando distribuição entre os tempos de chegada.

As típicas fontes de variabilidade de chegada são: variabilidade dos processos iniciais, lotes de produção e política de chegadas. A variabilidade dos processos iniciais é criada, por exemplo, durante troca de ferramentas em operações do início da linha, as quais podem causar variabilidade de chegadas de estação de trabalho se as estações acima não têm confiabilidade. O uso de lotes é outra fonte de variabilidade de chegadas em situações onde as operações finais do processo usam diferentes tamanhos de lotes que as operações iniciais. A política de chegada é a terceira fonte de variabilidade nas chegadas. Ela se refere a como um novo material é liberado na linha. Algumas vezes essa programação é controlada por previsão de demanda e dependendo da volatilidade dessa demanda, ela pode causar variações drásticas na liberação de material (PENTTILLA, 2005).

Esses autores sugerem alguns métodos para a redução da variabilidade na taxa de chegada das tarefas: (i) melhor programação da produção (*scheduling*); (ii) melhor controle de chão de fábrica; (iii) utilização de um sistema puxado, como por exemplo, o sistema Conwip (*Constant Work in Process*).

De acordo com Hopp e Spearman (2008), um programa bem sucedido de redução de variabilidade (tanto dos tempos entre chegadas como de outros tipos) pode gerar benefícios que serão transferidos para outras partes do negócio.

2.3 MELHORIA CONTÍNUA: DEFINIÇÃO E ALGUMAS AÇÕES E MÉTODOS QUE CONTRIBUEM PARA A MELHORIA DAS VARIÁVEIS ESTUDADAS.

Melhoria contínua significa a implementação de uma cultura de melhoria sustentável dirigida à eliminação do desperdício em todos os sistemas e processos da organização (BHUYAN e BAGHEL, 2005). Segundo esses autores, o processo de melhoria pode ocorrer de uma forma evolucionária; nesse caso, as melhorias são incrementais, ou através de mudanças radicais como resultado de uma idéia inovadora ou de novas tecnologias.

Apesar da melhoria contínua ser considerada uma questão estratégica, o seu gerenciamento muitas vezes não é bem feito. Esse problema ocorre pelo errôneo entendimento de que ela se refere apenas aos resultados obtidos, excluindo a importância do processo pelo qual eles são alcançados (BESSANT et al., 2001). Segundo Alstrup (2000), após uma fase de sucesso inicial em atividades de melhoria contínua, muitos gerentes de qualidade e programas de melhoria, experimentam uma dificuldade em manter esse processo funcionando continuamente.

Para Gieskes et al.(1999), os critérios essenciais para apoiar e tornar a melhoria contínua sustentável em uma organização são: (i) Envolvimento e comprometimento da alta gerência; (ii) Liderança e comprometimento ativo para melhoria contínua demonstrada por gerentes de todos os níveis; (iii) Foco nas necessidades do cliente; (iv) Integração das atividades de melhoria contínua e dos objetivos estratégicos através de toda a organização, em todos os níveis; (v) Estabelecimento de uma cultura de melhoria contínua e encorajar elevado envolvimento em inovação; (vi) Foco em pessoas; (viii) Foco nos processos críticos; (ix) Padronização das realizações nos sistemas de gerenciamento de qualidade; (x) Estabelecimento de sistemas de medição e *feedbacks*; (xi) Aprendizado a partir dos resultados da melhoria contínua.

Para sobreviver, as organizações precisam tornar sustentáveis suas vantagens competitivas. Como base para alcançar essas vantagens, as organizações podem procurar otimizar as operações dos seus sistemas de manufatura, melhorando continuamente os seus processos (KARIM, 2008). De acordo com Grunberg (2004), selecionar as ferramentas apropriadas para a melhoria da manufatura, juntamente com a sua aplicabilidade, incorporação e aceitação por parte dos operadores é um dos principais problemas enfrentados pelas companhias

De acordo Upton e Kim (1998), muitos pesquisadores têm tentado identificar atributos fundamentais que afetam o processo pelo qual as organizações selecionam métodos para melhorar o desempenho das suas operações de manufatura. Cagliano e Spina (2000) sugerem um modelo para escolha de programas de melhoria que leva em consideração no processo decisório os seguintes fatores: (i) Experiência passada, a qual pode ajudar os gerentes a avaliar a eficácia do programa para um objetivo específico; (ii) Fatores internos como competências, práticas de aprendizado, cultura, estilo gerencial, os quais podem afetar a habilidade da companhia em implementar programas; (iii) Fatores externos como mercado, competidores, clientes e *stakeholders*.

Bhuyan e Baghel (2005) afirmam que para alcançar o máximo de benefícios com programas de melhoria contínua, os gestores precisam avaliar o projeto do produto, o processo de escolha e o grau de padronização envolvido na organização, e assim decidir os métodos apropriados para usar e as melhores práticas de melhoria a implementar.

Para fins desse trabalho, nessa seção são apresentados algumas ações, métodos e técnicas de melhoria contínua, a saber: Troca Rápida de Ferramentas, Manutenção Produtiva Total, Programa Zero Defeito, 6 Sigma e Coordenação de ordens no chão de fábrica.

2.3.1 Troca Rápida de Ferramentas

A troca rápida de ferramentas ou SMED (*Single-Minute Exchange of Die*) é uma técnica para se reduzir tempos de *setup*. Essa técnica foi desenvolvida por Shingo ao longo de 19 anos como resultado de seus estudos e resultados práticos (MOXHAM e GREATBANKS, 2001).

Segundo Shingo (2003), os estágios conceituais envolvidos em melhoria de *setup* são os seguintes:

- a) **estágio inicial (Condições de *setup* interno e externo não se distinguem):** O que poderia ser realizado externamente é realizado internamente e por esse motivo as máquinas ficam paradas longos períodos. As principais ferramentas nesse estágio são: uma análise contínua da produção realizada com um cronômetro, um estudo do tipo de amostragem do trabalho, um estudo das reais condições do chão de fábrica por meio de entrevista com operações e filmagem da operação de *setup*;

- b) **estágio 1 (Separar *setup* interno e externo):** As atividades de preparação de componentes, manutenção, etc. não devem ser realizadas quando a máquina estiver parada. Se o máximo de operações de *setup* for feito como *setup* externo, o tempo de *setup* interno pode ser reduzido de 30 % a 50%. Nessa fase as principais ferramentas utilizadas são:
- Utilização de uma lista de verificação (*checklist*) de todos os componentes e passos necessários em uma operação (nomes, especificações, número de itens necessários, etc.). Essa lista pode evitar corridas de teste e muitos erros que roubam tempo;
 - O uso de uma mesa de verificação (*check table*). Trata-se de uma mesa onde foram feitos os desenhos de todos os componentes e ferramentas necessárias para o *setup*. Basta olhar para mesa e perceber se falta algum componente necessário;
 - Verificação das condições de funcionamento: São verificados se todos os elementos estão ou não em perfeitas condições de trabalho;
 - Melhoria no transporte de matrizes e componentes: Os componentes têm de transportados do estoque para as máquinas e retornar ao estoque após o término do lote. Essa operação deve ser feita como *setup* externo, ou seja, enquanto a máquina trabalha automaticamente ou então outro trabalhador é designado para realizar o transporte.
- c) **estágio 2 (Convertendo *setup* interno em externo):** Esse estágio envolve reexaminar as operações para verificar se algum passo foi erroneamente considerado como interno e encontrar meios para converter estes passos para *setup* externo. Isso pode ser feito através do reexame das reais funções dessas operações e por meio da adoção de novas perspectivas que não são abordadas nos procedimentos tradicionais. Nesse estágio, uma importante ferramenta a ser utilizada é a padronização de funções. Ela procura padronizar somente as partes cujas funções são necessárias do ponto de vista do *setup*, ou seja, as operações completas são divididas nos seus elementos básicos e decide-se quais delas precisam ser padronizadas;
- d) **estágio 3 (Reexaminado todos os aspectos da operação *setup*):** Esse estágio necessita de uma análise detalhada de cada elemento da operação para uma redução ainda maior dos tempos de *setup*. Nesse estágio algumas melhorias radicais podem ser utilizadas nas operações de *setup* interno e externo. Como por exemplo, melhorias em armazenagem e movimentação de materiais podem contribuir para racionalizar operações de *setup* externo e a implementação de operações em paralelo, as operações de *setup* interno.

Ainda segundo Shingo (2003), os resultados da aplicação do SMED vão além da redução dos tempos de *setup* e melhores taxas operacionais. Entre os benefícios citados por ele estão: (i) Aumento das taxas de utilização de máquinas e de capacidade produtiva; (ii) Eliminação de erros de *setup*: os erros de *setup* são reduzidos e a incidência de defeitos diminui devido à eliminação de operações experimentais; (iii) Qualidade melhorada; (iv) Maior segurança; (v) Menores despesas: a troca rápida de ferramentas possibilita aumentos drásticos na produtividade a um custo relativamente baixo; (vi) Tempo de produção reduzido: a técnica elimina a espera por processos, elimina a espera por lotes e possibilita a produção em pequenos lotes; (vii) Aumento na flexibilidade de produção: A implementação da troca rápida de ferramentas possibilita uma resposta rápida a mudanças de demanda; (viii) Redução de estoques: Os estoques intermediários diminuem ou desaparecem quando ordens de produção de baixo volume são feitos. A troca rápida de ferramentas possibilita uma produção com maior variedade, em pequenos lotes e com nível mínimo de estoques.

2.3.2 Manutenção produtiva total (*Total Productive Maintenance* - TPM)

A manutenção produtiva total (TPM) realiza a manutenção do equipamento através de um sistema que cobre toda a vida útil do equipamento e envolve todos os empregados desde funcionários da produção e da manutenção até o alto gerenciamento (McKONE et al., 2001). A TPM, a qual foi construída em cima do conceito de manutenção preventiva importada dos EUA, começou no Japão em 1969. Ela combina as melhores características da manutenção produtiva e preventiva com estratégias inovadas de gerenciamento e envolvimento total do empregado (SING, 2006).

Segundo McKone et al. (2001), a TPM fornece uma abordagem para gestão da manutenção, a qual é geralmente dividida em elementos de curto e longo prazo. Em curto prazo, a atenção é voltada para programas de manutenção autônoma nos departamentos de produção, em programas de planejamento departamento de manutenção e no desenvolvimento de habilidades em operações. No longo prazo, o foco são projetos de novos equipamentos e eliminação da fonte e perda de tempo em equipamentos.

Para Ahuja e Khamba (2008), a TPM é projetada para otimizar a confiabilidade do equipamento e assegurar a gestão eficiente dos ativos através do uso de envolvimento dos empregados, *empowerment* e da ligação manufatura, manutenção e engenharia. Segundo os

autores, ela é baseada no conceito de zero perdas, ou seja, zero quebras, acidentes e defeitos a fim de alcançar alta confiabilidade, disponibilidade, flexibilidade de equipamentos, drásticas reduções nos tempos de *setup* e nos tempos de manutenção.

As atividades do programa TPM focam na eliminação de seis grandes perdas. Essas perdas incluem falha de equipamentos, tempo de *setup* e ajustes, reduções de velocidade, defeitos em processos, parada temporária, queda no rendimento (SWANSON, 2001).

Nakajima (1988), conhecido como o pai da TPM, afirma que ao reduzirem-se as perdas por paradas melhora-se a sincronização da produção, os estoques e os padrões operacionais estabelecidos (tempo de ciclo, seqüência de produção e tempos padrões de folgas).

McKone et al. (2001) considera 7 elementos da TPM: *housekeeping* na linha de produção, treinamento polivalente dos operadores para desempenhar tarefas de manutenção; times de produção e pessoal de manutenção; envolvimento do operador no sistema de manutenção; planejamento disciplinado das tarefas; monitoramento disciplinado; programação flexível.

Sing (2006) divide a implantação do programa TPM nos seguintes estágios: (i) Estágio de preparação: é anunciada ao alto gerenciamento a decisão de introduzir a TPM, são criados grupos para promover-la dentro da organização, estabelecidos as políticas básicas e os objetivos do programa, e é formulado um plano mestre para o seu desenvolvimento; (ii) Estágio preliminar: dar o pontapé inicial na TPM; (iii) Estágio de implantação: é melhorada a eficácia de cada peça do equipamento, são desenvolvidos programas de manutenção autônoma e de manutenção programada, são conduzidos treinamentos para melhorar as operações e as habilidades em manutenção; (iv) Estágio de estabilização: espera-se ter havido uma perfeita implementação programa e um crescimento dos níveis TPM.

2.3.3 Programa Zero Defeito

A garantia de qualidade com o foco no zero defeito começou a ser construída no início da década de 1960 quando Shingeo Shingo lançou a idéia de incorporar uma lista de verificação às operações sujeitas a falhas humanas.

De acordo com Shingo (1986), a evolução do método de controle zero defeitos se deu nos seguintes estágios:

- a) **estágio preliminar (O velho método da inspeção por julgamento):** Nesse estágio procurou-se reduzir os defeitos por meio de inspeções cada vez mais rigorosas e as inspeções por julgamento eram vistas como o único tipo de inspeção;
- b) **estágio 1 (Encontro com o método controle de qualidade estatístico):** Nessa fase a inspeção informativa foi considerada como um método revolucionário de controle que aumenta a qualidade e estatística, como a técnica mais racional disponível;
- c) **estágio 2 (Encontro com métodos *poka yoke*):** Nesse estágio reconheceu-se que todo ser humano pode falhar e dispositivos podem ser usados para prevenir erros inadvertidos. Com o uso de dispositivos *poka yoke* começou-se a utilizar inspeções 100%;
- d) **estágio 3 (Encontro com checagens sucessivas e *self-checks*):** Nessa etapa procurou-se fornecer uma ação mais rápida ao processo. A idéia era tornar o inspetor próximo do operador, então, o operador do processo seguinte se tornou o inspetor do trabalho anterior;
- e) **estágio 4 (Inspeção por amostragem não faz os procedimentos de inspeção mais racionais):** Começou-se a verificar que as inspeções por amostragem podiam representar uma racionalização dos métodos mas não representavam uma racionalização dos objetivos;
- f) **estágio 5 (Encontro com inspeções na fonte):** Ao invés de apenas reduzir defeitos, foi adotada uma postura mais radical, a de eliminá-los inteiramente. Foi concebido o conceito de inspeções na fonte, buscando eliminar as causas dos defeitos;
- g) **estágio 6 (Alcançar zero defeitos):** O objetivo de alcançar zero defeitos foi sustentado pelo o uso de inspeções na fonte, checagens sucessivas e pela instalação de dispositivos *poka-yoke*;
- h) **estágio 7: (O sistema controle de qualidade zero):** O sistema foi constituído a partir das seguintes idéias básicas: a) Usar de inspeções na fonte, isto não significa lidar com o resultado da geração de defeitos e sim aplicar funções de controle no estágio em que os defeitos surgem; b) Sempre usar inspeções 100% ao invés de inspeções por amostragem; c) Minimizar o tempo para tomar uma ação corretiva quando uma anormalidade aparecer; d) Considerar que os trabalhadores não são infalíveis.

Os dispositivos *poka yoke* têm sua origem na língua japonesa (*yokeru*- evitar, *poka*-erros inadvertidos). Eles são, em geral, acoplados as máquinas para prevenir a

ocorrência de falhas dos operadores que possam causar defeitos nas peças ou acidentes. O conceito do *Poka Yoke* foi concebido inicialmente por Shingo (1986), verificando que as características de controle em um determinado produto eram conduzidas, fundamentalmente, por meio de 3 técnicas baseadas em inspeção (CALARGE e DAVANSO,2004):

- a) **inspeção por julgamento:** Os produtos com defeito são separados dos produtos bons após o processamento, em geral através de amostragem, revelando alguns defeitos antes da entrega, mas não diminuindo o índice de defeitos verificados;
- b) **inspeção informativa:** Investigam-se estatisticamente as causas dos defeitos e essas informações são transmitidas aos processos apropriados a fim de serem tomadas medidas para reduzir os defeitos. No entanto, com muita frequência, essas informações demoram a chegar à origem do problema, o que faz com que os defeitos continuem a ser produzidos;
- c) **inspeção na fonte:** Trabalha na origem do processo, dando um retorno imediato e evitando que os erros se transformem em defeitos. Esse tipo de inspeção é conduzido durante o tempo limitado em que a peça está sendo posicionada para uma operação, ou logo depois que ela sai da máquina, de modo que, com essa inspeção, os erros podem ser corrigidos antes de se tornarem defeitos. Logo, a inspeção na fonte constitui um importante aspecto para que se elimine o defeito nos processos de controle de qualidade zero defeitos.

2.3.4 Seis Sigma

O 6 sigma é um programa focado no processo e um conjunto de métodos para melhoria do negócio. Ele foca na melhoria do desempenho do processo para assegurar satisfação para o cliente. A MOTOROLA criou o programa 6 sigma em 1987 e o seu uso por outras organizações cresceu rapidamente durante os anos 90 (SNEE e HOERL, 2005).

O sigma é um símbolo grego usada na notação estatística para representa desvio padrão. O desvio padrão é um indicador da quantidade de variação ou inconsistência em um grupo de itens ou processos (PANDE et al., 2000). Segundo esses autores, no vocabulário 6 sigma , a inconsistência de um sistema de negócio é chamada de variação e os tipos de variação ruim que tem impacto negativo nos clientes são chamados de defeitos. As

abordagens usadas pelo programa 6 sigma para criar, monitorar e melhorar a organização são chamadas de gestão do processo, projeto/reprojeto do processo e melhoria do processo.

O projeto/reprojeto do processo foca no projeto e reengenharia dos processos existentes. A melhoria do processo foca na melhoria dos processos existentes sem mudar o projeto fundamental do processo. O controle do processo foca em manter o processo operando dentro dos objetivos e requerimentos necessários para satisfazer o cliente (SNEE e HOERL, 2005).

O 6 sigma determina que, seja qual for o desempenho atual, a busca da melhoria por meio da redução contínua da variabilidade do processo deve ser a meta de todas as pessoas dentro da empresa (ECKES, 2001).

De acordo com Pande et al. (2000), o primeiro passo, fundamental para o 6 sigma, é definir claramente o que o cliente quer como um requerimento explícito. Esse requerimento é chamando de características críticas para qualidade. O próximo passo é contar o número de defeitos que ocorrem. Com o número de defeitos contabilizados, calcula-se o rendimento do processo e usa-se uma tabela para determinar o nível sigma. Os níveis sigma de desempenho são também expressos em defeitos por milhões de oportunidades (DPMO- *Defects Per Million Opportunities*). O DPMO indica quantos erros aconteceriam se uma atividade fosse repetida milhões de vezes. O objetivo é reduzir o numero de defeitos até alcançar um nível de 99, 9997% de itens perfeitos.

As ferramentas mais utilizadas no programa 6 sigma são: Mapeamento do processo, Matriz de causa e efeito, Análise do sistema de medição, Estudo da capacidade, Análise do Modo e Efeito de Falhas (FMEA) , Estudo Multi-vari, Projeto de Experimento e Plano de Controle (SNEE e HOERL, 2005).

O mapeamento do processo é normalmente a primeira ferramenta a ser utilizada. Ele prepara o estágio seguinte para as outras ferramentas e métodos através de uma cuidadosa documentação do processo como um todo. A matriz de causa e efeito (C&E) segue o mapeamento do processo. Ela é importante para determinar quais passos e variáveis do processo são chaves para alcançar as características críticas para a qualidade, e diz como cada passo e variável influencia nessas características.

Depois que a matriz de causa e efeito identifica os passos principais, é preciso assegurar que as variáveis chaves desses passos possam ser medidas com precisão. Isso acontece através da análise do sistema de medição. Na aplicação da manufatura ela consiste em estudos de reprodutibilidade e repetibilidade (*GR&R-Gauge Repeatability and Reproducibility*). O método FMEA também é usado para identificar potenciais falhas em

passos e variáveis prioritárias, para em seguida medidas proativas serem tomadas. Quando é provado que o sistema de medição faz medidas precisas à capacidade do processo é avaliada. O estudo de capacidade calcula o nível *sigma* do processo. O cálculo do nível *sigma* diz qual desempenho se espera do processo no futuro e pode ajudar a determinar se a variação é inerente ao processo ou acontece ao longo do tempo.

Assumindo-se que a capacidade é insuficiente usa-se uma análise multi-vari para identificar as variáveis chaves do processo que causam aumento da variação em processos de saída. A proposta da análise muti-vari é identificar as variáveis chaves do processo e entrada que parecem dirigir a variação e os defeitos nas características críticas de qualidade. A análise multi-vari tem um número de técnicas individuais, as quais incluem ferramentas estatísticas tradicionais como: intervalos de confiança, análise de regressão e correlação, *data mining*, teste de hipóteses, etc.

A saída de cada uma dessas ferramentas fornece entrada para o plano de controle pela determinação dos aspectos mais importantes do processo que precisam ser controlados para manter as melhorias. O controle estatístico do processo ou SPC (*Statistical Process Control*) é utilizado então pelo plano de controle para identificar rapidamente comportamentos anormais do processo e encontrar suas causas.

Para Pande et al.(2000), os benefícios dos 6 sigma são: gerar sucesso sustentável; configura um objetivo de desempenho para cada parte da organização; assegura valor aos clientes; acelera a taxa de melhorias; promove aprendizado, etc.

2.3.5 Coordenação de ordens no chão de fábrica

Recentemente, os ambientes de produção têm se tornado muitos severos, e para mantê-los em bom funcionamento é necessário considerar sistemas que realizem a coordenação de ordens determinando a liberação da ordem para cada parte do processo (TAKAHASHI e NAKAMURA, 2000).

Fernandes e Godinho Filho (2007) denominam esses sistemas de sistemas de coordenação de ordens (SCO). De acordo com esses autores, os SCO programam ou organizam/explodem as necessidades em termos de componentes e materiais, e/ou controlam a emissão/liberação das ordens de produção e compra, e/ou programam/seqüenciam as tarefas nas máquinas. Alguns sistemas de coordenação de ordens são: o sistema Kanban, o sistema

CONWIP (*Constant Work in Process*), o PBC (*Period Batch Control*), o POLCA (*Paired-cell Overlapping Loops of Cards with Authorization*), dentre outros.

Para Hiraki (1996), é importante desenvolver uma coordenação de ordens no chão de fábrica para melhorar a produtividade e a confiabilidade, considerando o *lead time* e a variação de demanda. Segundo Hopp e Spearman (2008) e Suri (1998), a coordenação de ordens apresenta como principais vantagens a redução dos custos de manufatura, a redução da variabilidade de chegadas e da linha produtiva e a melhoria da qualidade e confiabilidade do sistema.

Para Hopp e Spearman (2008), um sistema de coordenação de ordens que previne explosões no WIP, previne também possíveis explosões no *lead time*, já que estas duas medidas estão relacionadas pela Lei de *Little*. Por prevenir essas possíveis explosões de *lead time*, a variabilidade deste também é reduzida em uma linha produtiva.

Segundo Suri (1998), um sistema de coordenação de ordens como o *Kanban* e o CONWIP, que mantém os níveis de WIP baixos, necessita de alta qualidade dos produtos e alta confiabilidade das máquinas para evitar interrupções nas estações de trabalho. Isso motiva uma melhoria contínua em fatores que tragam vulnerabilidade ao sistema tais como falhas, *setups* e defeitos.

2.4 EFEITO DOS MÉTODOS E AÇÕES DE MELHORIA CONTÍNUA CITADOS NAS VARIÁVEIS DO CHÃO DE FÁBRICA ESTUDADAS NESSE TRABALHO.

Nesta seção são mostrados os efeitos dos métodos e ações de melhoria contínua nas variáveis do chão de fábrica focadas nesse trabalho por meio de uma revisão de literatura pesquisada.

A técnica de troca rápida de ferramentas ou SMED, segundo Cakmakci e Karasu (2007), pode fornecer uma redução do tempo de *setup* de aproximadamente 90% utilizando investimentos moderados.

Com relação ao método TPM, este proporciona melhoria nas variáveis taxa média de defeitos, tempo médio de reparo e tempo médio de *setup*. McKone et al. (2001) citam exemplos de empresas que obtiveram reduções nos tempos médios de *setup* entre 50-90% após a implantação da TPM. No que se refere ao tempo médio de reparo, segundo Swanson (2001), as atividades de TPM para melhoria na reparabilidade resultam na eficiência

da manutenção e na redução do tempo médio de reparo e os esforços de manutenção preventiva melhoram a disponibilidade do equipamento e os custos com manutenção. Ainda referente aos benefícios do TPM, Cooke (2000) cita estudos sobre firmas japonesas que conseguiram após a implantação do TPM as seguintes melhorias: a) falhas de equipamentos reduzidas de 1000 por mês para 20 por mês; b) defeitos reduzidos de 1% para 0,1%. As falhas nas máquinas podem sofrer redução de até 98%, conforme pesquisa feita por Maier et al. (1998).

O método zero defeito criado por Shingeo Shingo, como o próprio nome diz, propõem através de dispositivos *poka yoke*, inspeções 100% e inspeções na fonte dos problemas eliminar totalmente os defeitos.

Já o programa 6 sigma além de promover aprendizado organizacional e gerar sucesso sustentável, tem como um dos principais objetivos reduzir o número de defeitos até alcançar um nível de 99,9997% de itens perfeitos (PANDE et al., 2000; SNEE e HOERL, 2005). Além da redução no número de defeitos, o 6 sigma enfatiza a redução de variabilidade em todos os processos do negócio, através da utilização de pacotes de ferramentas para diagnóstico e melhoria da qualidade (SANTOS, 2006). Portanto, sob o ponto de vista do programa a redução da variabilidade no tempo de processamento e na variabilidade associada com a demanda (variabilidade de chegadas) é uma atividade primária.

A coordenação de ordens no chão de fábrica ajuda a coordenar e controlar o fluxo de materiais entre as estações de trabalhos, o que influencia diretamente na variabilidade do tempo médio entre chegada de ordens.

A figura 2.1 mostra quais métodos/ações de melhoria contínua afetam as variáveis em estudo.

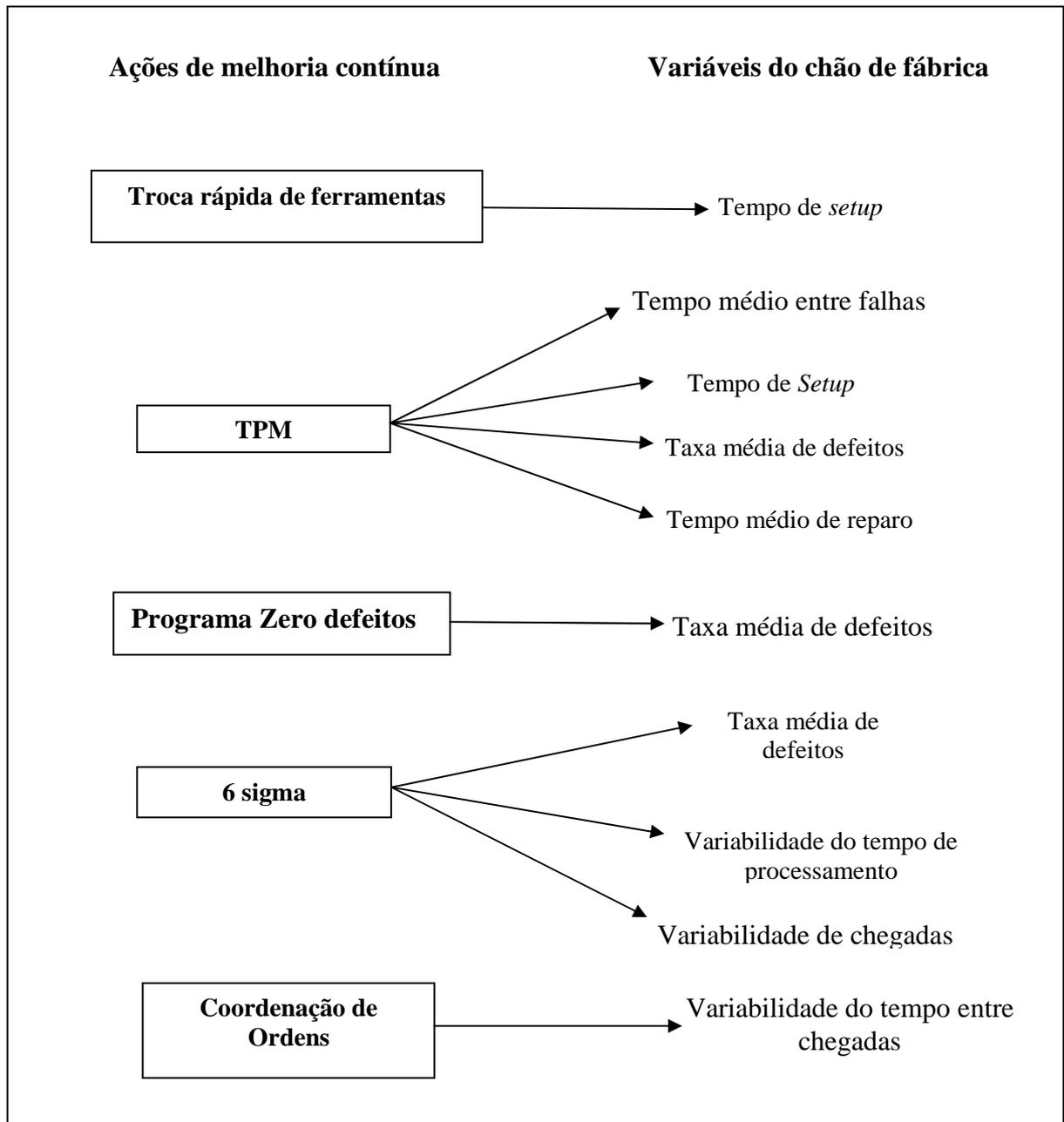


FIGURA 2.1: Relacionamento entre os métodos e ações de melhoria contínua e as variáveis do chão de fábrica.

Fonte: Autor

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse capítulo relacionou as variáveis de chão de fábrica estudadas neste trabalho com alguns métodos e ações de melhoria contínua que as afetam diretamente. Essa relação foi realizada por meio de um estudo teórico entre pesquisas e trabalhos anteriores

disponíveis da literatura. Com base nesse estudo teórico, foi apresentada uma figura mostrando o relacionamento entre as técnicas descritas anteriormente e as variáveis focadas.

Existem muitas outras ações, técnicas e métodos de melhoria contínua que afetam diretamente nessas variáveis, porém o intuito desse capítulo não é esgotar esse tema e sim mostrar que existem maneiras de melhorar continuamente cada uma dessas variáveis estudadas, o que dá uma visão mais prática do modelo desenvolvido nessa dissertação e apresentado no capítulo 5.

Além disso, de acordo com Hopp e Spearman (2008), com base em experiências e na análise de estudos anteriores, o resultado de melhorias em processos específicos (redução do tempo de *setup*, taxa média de defeitos, etc.) e uma consciência dos benefícios de programas da redução da variabilidade promove um ambiente em contínuo processo de melhoria e pode ser uma fonte de significativa vantagem competitiva.

CAPÍTULO 3: *SYSTEM DYNAMICS*- CONCEITUAÇÃO E ANÁLISE DE SUA APLICABILIDADE NA GESTÃO DA PRODUÇÃO

3.1. INTRODUÇÃO

Jay W. Forrester, professor e pesquisador da *Sloan School* do MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) desenvolveu, na década de 50, uma teoria de modelagem e simulação de sistemas complexos ao longo do tempo, teoria esse denominada *System Dynamics* (SD).

Sistemas complexos referem-se a uma quantidade de partes ou constituintes que são dependentes entre si, em ativas e organizadas interações, coordenados para realizar determinadas finalidades, de maneira a alcançar um objetivo comum (BASTOS, 2003). *System Dynamics* proporciona a compreensão dos sistemas complexos por meio da utilização de um pensamento sistêmico.

O pensamento sistêmico diz respeito a ver o todo, enxergar os inter-relacionamentos existentes, ao invés de eventos isolados. O pensamento sistêmico é cada vez mais necessário diante da complexidade dinâmica dos sistemas (SENGE, 1998). De acordo com o autor, a complexidade dinâmica se refere a situações, nas quais as relações de causa e efeito são sutis, onde o efeito das ações ao longo do tempo não é óbvio.

Para Sterman (2000), a complexidade dinâmica apresenta múltiplas barreiras para a compreensão dos sistemas. É necessário um mecanismo de inferência para conhecer e deduzir as conseqüências das interações dinâmicas entre elementos do sistema (ANDRADE, 1997). SD é uma poderosa para conhecer e ganhar *insights* sobre esses sistemas.

Esse capítulo tem como objetivo auxiliar na compreensão da teoria *System Dynamics*, o qual é utilizado no presente trabalho. O capítulo está estruturado da seguinte maneira: a seção 3.2 apresenta um breve histórico a respeito da teoria; a seção 3.3 apresenta definições fundamentais a respeito da teoria; a seção 3.4 mostra a estrutura básica que SD utiliza; a seção 3.5 mostra os princípios chaves para a formulação de um modelo de SD e a seção 3.6 apresenta uma revisão de trabalhos anteriores que aplicam SD na gestão da produção.

3.2 ORIGEM

Durante a Segunda Guerra Mundial, J.W. Forrester, um engenheiro eletricitista, foi contratado para prestar serviço nas forças armadas americanas como técnico no laboratório de servomecanismo do MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), organizando controles de armas e radares (TANG e VIJAY, 2001). Segundo os autores, durante todo este período, ele estudou e aplicou intensivamente teorias matemáticas de controle e conceitos de *feedback* e equilíbrio em situações práticas e projetos reais de engenharia.

Os estudos de Forrester levaram ao desenvolvimento de uma teoria para estudar e simular sistemas sociais como sistemas de informação por meio de *feedbacks*. A teoria foi primeiramente aplicada a problemas corporativos e chamada de *Industrial Dynamics*. Ele foi apresentado ao mundo no artigo *Industrial Dynamics- A Major Breakthrough for Decision Makers* publicado na *Harvard Business Review*. Esse artigo fala a respeito da tomada de decisões estratégicas em organizações industriais (VENNIX, 1996).

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

Em 1961, três anos após a publicação do artigo na *Harvard Business Review*, Forrester publicou o livro *Industrial Dynamics*, considerado o marco conceitual dessa área de pesquisa. Anos depois das publicações iniciais, a teoria começou a ser aplicada em uma grande variedade de problemas e como resultado seu nome mudou para *System Dynamics* (SD) (VENNIX, 1996).

Baseados no trabalho de Forrester, diversos pesquisadores, como Sterman, Senge, Morecroft e muitos outros, vêm desenvolvendo e aplicado SD para estudar sistemas dinâmicos e complexos. A motivação principal da abordagem desses pesquisadores reside na possibilidade de desenvolver simulações, os chamados micromundos, em laboratórios, onde podem ser observadas as conseqüências de decisões. Nesses micromundos podem-se identificar os padrões de comportamento dos sistemas reproduzidos e suas respectivas causas com mais facilidade de quando se encontra envolvido na complexidade do mundo real

(BASTOS, 2003). Esses pesquisadores utilizam os modelos SD em diferentes áreas de estudos tais como economia, biologia, manufatura, entre outros.

3.3 DEFINIÇÃO

Segundo Forrester (1961), a teoria SD permite a representação, ao longo do tempo, de sistemas que possuem inter-relacionamentos complexos e processos não lineares. De acordo com Fernandes (2001), a premissa central presente em SD é que o comportamento de um sistema é determinado por sua estrutura interna e que, por meio do uso de uma linguagem própria para modelar um sistema é possível testar diferentes tipos de comportamento desse sistema ao longo do tempo, possibilitando a identificação e avaliação de potenciais melhorias.

Para Forrester (1961), existem quatro áreas do saber que originaram a teoria SD: a teoria de realimentação de informação em sistemas; o conhecimento do processo de tomada de decisões; a abordagem experimental através de modelos; e a evolução do computador digital, que tornou possível a simulação dos modelos.

A partir de uma visão geral, a teoria SD assume que a análise de uma situação pode ser feita de um ponto de vista objetivo externo, e que a estrutura e os processos dinâmicos do mundo real podem ser recriados em diagramas com simbologia específica e modelos matemáticos (ZAMBOM, 2000). Segundo Bastos (2003), a recriação e compreensão das estruturas e processos do mundo real podem ser representadas por dois tipos de notação: diagramas de *loops* causais e diagramas de estoque-fluxo.

Wolstenholme (1997) apud Cavana e Maani (2000) apresenta uma síntese feita sobre o escopo da teoria SD:

- O QUE: uma maneira rigorosa para auxiliar a pensar, visualizar, dividir e comunicar a evolução de sistemas complexos ao longo do tempo;
- POR QUE: com o propósito de resolver problemas e criar projetos mais robustos, os quais minimizem consequências e resultados inesperados;
- COMO: por meio da criação de modelos e simulações que externalizam modelos mentais e capturem as inter-relações dos padrões comportamentais, políticas, limites organizacionais, *feedbacks* de informação e *delays*; e pelo uso de modelos e

conhecimentos desenvolvidos, permitindo testar o comportamento e as reações do sistema;

A teoria SD usa modelos computacionais de simulação para revelar como são estruturas e políticas que produzem os comportamentos do sistema. Existem diversos programas computacionais que servem como ambiente de simulação e modelagem para a teoria SD tais como, Stella, Powersim, Vensim, Ithink. As representações das estruturas básicas de SD discutidas na próxima seção são baseadas no *software* Vensim.

3.4 ESTRUTURAS BÁSICAS DE *SYSTEM DYNAMICS*

De acordo Wu e Yan (2008), em SD, um sistema é definido como uma coleção de elementos que interagem continuamente uns com os outros ou com elementos de fora, ao longo do tempo, para modificar o sistema como um todo. Segundo esses autores, dois elementos importantes do sistema são a estrutura e o comportamento. A estrutura é definida como uma coleção de componentes do sistemas, e seus relacionamentos. Já o comportamento é definido como a maneira pelo qual os elementos ou variáveis que compõem o sistema variam ao longo do tempo.

A estrutura de SD apresenta quatro níveis hierárquicos (FORRESTER, 1961):

- 1) Limite fechado;
- 2) Um *loop de feedback* como componente básico do sistema;
- 3) Níveis e fluxos;
- 4) Objetivos, condições e discrepâncias entre as condições observadas e a ação desejada.

Existem duas abordagens diferentes para se trabalhar com SD: a abordagem *soft*, também conhecida como qualitativa e a abordagem *hard* ou quantitativa. Segundo Wolsthenholme (1998), na abordagem *soft*, os *loops* causais podem externalizar modelos mentais e hipóteses e facilitam as inferências de modelos de comportamento. Já os modelos *hard* adicionam dimensão aos dados da estrutura, permitindo a simulação computacional ao longo do tempo.

Para Pidd (2004), na abordagem *soft* os modelos são baseados em conceitos relevantes do mundo real, a validação é feito por meio da avaliação da consistência da lógica e os dados são obtidos por meio de julgamentos e decisões . Na abordagem *hard*, o método e

modelos utilizados são baseados no senso comum, ou seja, são uma representação da realidade, sendo que a validação é feita por meio da comparação com o mundo real e os dados utilizados são obtidos por meio de fontes justificáveis.

- **Abordagem *soft***

Os modelos *soft* são apropriados para o entendimento amplo e não gerar pontos de predição, além de proporcionar uma ligação útil entre a descrição verbal e sua representação em modelos computacionais (BASTOS, 2003).

Na modelagem *soft* são utilizados diagramas que produzam uma descrição dos principais elementos que causam o comportamento de um sistema (FERNANDES, 2001). Para o autor, esses diagramas são particularmente úteis para o desenvolvimento de um entendimento compartilhado de como um sistema funciona, ou mesmo para comunicar alguma descoberta.

Essas estruturas são chamadas de diagramas de influências, diagramas de *feedback* ou diagramas de *loop* (BASTOS, 2003). Segundo esse autor, esses diagramas são estruturas em formas de grafos utilizados para a visualização de qualquer sistema, através da identificação de características estruturais, das relações causa-efeito-causa e dos tempos de espera presentes no comportamento do sistema.

Para Senge (1998), ao se traçar diagramas de influências, é possível ver os padrões que se repetem continuamente, melhorando ou piorando as situações. Segundo ele, para que isso seja aconteça é necessário ter um pensamento sistêmico, ou seja, enxergar inter-relacionamentos, ao invés de cadeias lineares de causa e efeito e observar os processos de mudança, em vez de simples fotos instantâneas da situação.

Senge (1998) afirma que o entendimento do pensamento sistêmico reside na compreensão do conceito de *feedback*, o qual mostra como ações podem se reforçar ou neutralizar (equilibrar) umas às outras. Para ilustrar um exemplo de diagrama de influências, Senge (1998) mostra um exemplo de um sistema bastante simples, encher um copo de água. Segundo ele, do ponto de vista linear, nós costumamos dizer: estou enchendo um copo de água. A figura 3.1 mostra a imagem que a maioria das pessoas tem na cabeça.

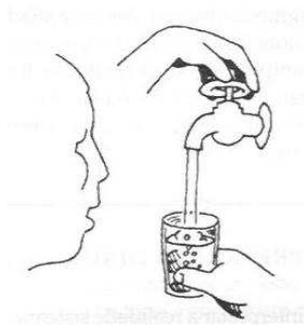


FIGURA 3.1: Pensamento que a maioria das pessoas tem sobre o ato de encher um copo de água.

Fonte: SENGE (1998)

Porém, o que acontece quando enchemos um copo de água é a seguinte situação: observamos o nível de água subir e monitoramos a diferença entre o nível atual e a nossa meta. Quando a água se aproxima do nível desejado, ajustamos a posição da torneira para reduzir o fluxo de água, até fechá-la quando o copo estiver cheio. Um diagrama de influências para representar esse sistema contém cinco variáveis: nível desejado de água, nível atual de água, diferença entre os dois, a posição da torneira e o fluxo de água. A figura 3.2 representa o sistema descrito acima.

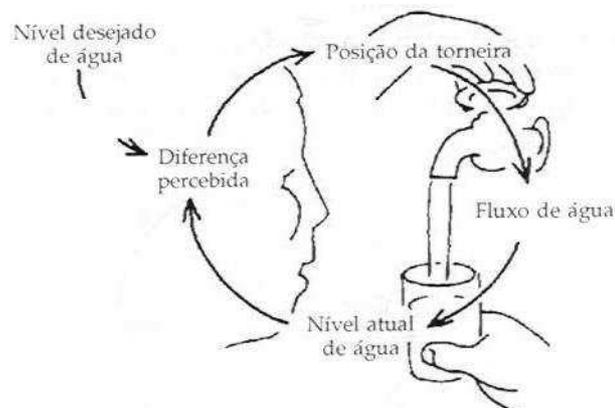


FIGURA 3.2: Diagrama de influências sobre o ato de encher um copo de água.

Fonte: SENGE (1998)

Os diagramas de influências são compostos por dois elementos centrais: os *feedbacks* e os *delays*. Segundo Georgiadis et al. (2004), os *feedbacks* podem ser de dois tipos: positivos (de reforço) e negativos (de equilíbrio). Para Vennix (1996), são as interações entre esses dois tipos de *feedback* que determinam as características dinâmicas de um sistema.

O *feedback* positivo ocorre se uma ação produz uma variação no mesmo sentido, originando assim um *loop* de reforço (FERNANDES, 2001). Em um processo de *feedback* positivo após um distúrbio inicial, a mudança é amplificada (GEORGIADIS et al., 2005). Os *loops* contendo *feedback* positivo podem ser representados por um sinal positivo, letra R ou um desenho de bola de neve, como mostrado na figura 3.3.

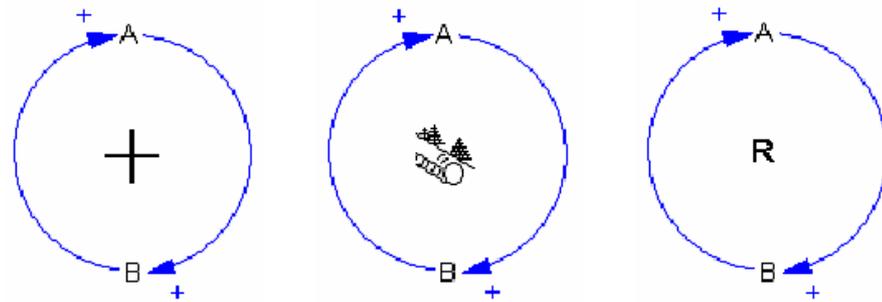


FIGURA 3.3: Loop positivo ou de reforço.

Fonte: BASTOS (2003).

Senge (1998) exemplifica um caso de *loop* de reforço, em que a venda de muitos produtos em uma organização crescem devido à propaganda boca a boca. O diagrama de influências que representa esse processo é visualizado na figura 3.4.



FIGURA 3.4: Exemplo de um *loop* de reforço.

Fonte: ADAPTADO DE SENGE (1998)

Quando há uma maior quantidade de clientes satisfeitos com um determinado produto, maior é a propaganda boca a boca positiva com outros consumidores em relação a esse produto. Essa propaganda positiva gera mais vendas, fechando esse ciclo ou *loop* de reforço. Esse tipo de *loop* gera um efeito bola de neve.

O *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 procura retornar a situação inicial. (GEORGIADIS et al., 2005). Um *loop* de equilíbrio pode ser representado por um sinal negativo, letra E ou um desenho de balança, como mostrado na figura 3.5.

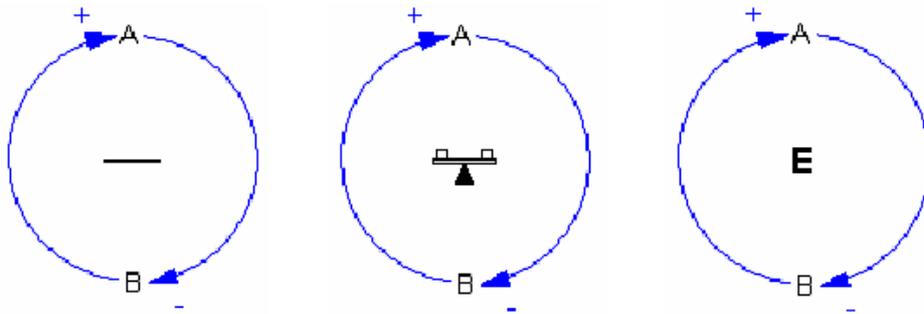


FIGURA 3.5: *Loop* negativo ou de equilíbrio.

Fonte: BASTOS (2003).

Um exemplo de *loop* de equilíbrio, fornecido por Senge (1998) acontece quando a temperatura ambiente baixa e então nos agasalhamos. Esse processo é representado pela figura 3.6. Quando ligamos o chuveiro e água está mais fria ou mais quente do que a temperatura que desejamos, nosso corpo sente a diferença de temperatura e assim acionamos o controle para alterar a temperatura do chuveiro. Ao acionarmos o controle de temperatura do chuveiro, a temperatura se modifica e o sistema volta a uma situação de equilíbrio (Senge, 1998).

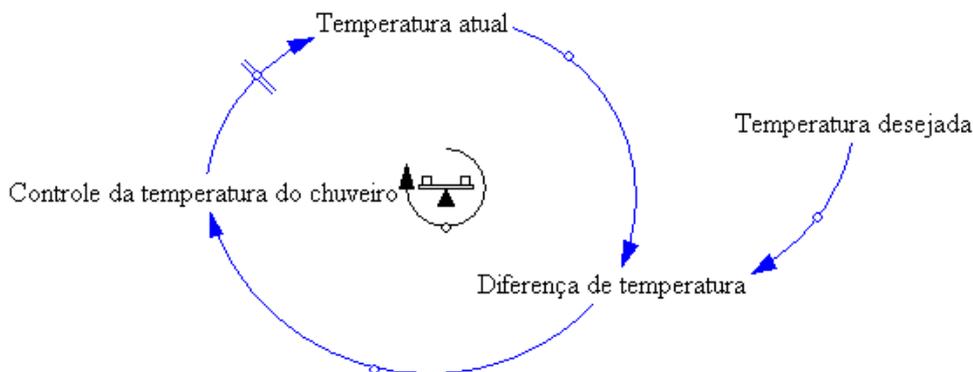


FIGURA 3.6: Exemplo de um *loop* de equilíbrio

Fonte: ADAPTADO DE SENGE (1998)

O outro elemento central da modelagem *soft* é o *delay*. Os *delays* são atrasos ou defasagens que fazem com que uma ação possa produzir efeitos diferentes no tempo e espaço (FERNANDES, 2001). De acordo com Bastos (2003), são os *delays* que se fazem presentes quando os efeitos da variação num dos elementos do sistema somente são percebidos após um tempo de espera.

Os *delays* são convenientemente divididos em dois tipos: *delays* envolvidos no processamento de materiais físicos (*delays* físicos) e *delays* envolvidos na percepção e tomada de ação diante de uma informação (*delays* de informação) (ROBERTS, 2001).

Os *delays* são ilustrados no diagrama por duas barras paralelas ao longo do relacionamento que produz efeito com atraso, como pode ser visto na figura 3.6 mostrada anteriormente. Nessa figura ocorre um *delay* (defasagem ou atraso) no momento em que acionamos o controle de temperatura do chuveiro até essa temperatura realmente modificar.

- **Abordagem *Hard***

De acordo com Sterman (2000), os diagramas de *loops*, característicos da modelagem *soft*, são úteis em diversas situações como representar interdependências, capturar *feedbacks* e capturar modelos mentais. Apesar disso, somente esses diagramas *soft* não são competentes para avaliar o comportamento das estruturas sistêmicas ao longo de tempo, sendo necessária a utilização de um modelo adequado à simulação como os diagramas de estoque-fluxo da modelagem *hard* (BASTOS, 2003).

A modelagem *hard* utiliza as características estruturais definidas na modelagem *soft* (diagramas de *loops*) para desenvolver modelos de simulação do sistema que evidenciem de forma gráfica, uma descrição completa dos elementos relevantes para análise (FERNANDES, 2001). Para o autor, essa abordagem quantitativa permite que se explore a evolução de um sistema ao longo do tempo e dentro de um período de interesse.

A estrutura e as inter-relações entre as variáveis, na modelagem *hard*, são representadas matematicamente por meios de diagramas estoque -fluxo (GEORGIDAIS et al., 2004). Os diagramas de estoque-fluxo funcionam de acordo com o princípio da acumulação. Segundo Radzicki (1997), o princípio de acumulação afirma 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.

Os diagramas de estoque-fluxo criados por Forrester (1961) foram baseados em uma metáfora hidráulica: O fluxo de água dentro de uma banheira. A banheira pode ser pensada como um estoque e o fluxo, como a quantidade de água que sai das torneiras e que se acumula na banheira ou então é drenada para o ralo.

Para uma compreensão correta da dinâmica do sistema é fundamental entender a diferença entre estoques e fluxos. Estoques são acumulações. Os fluxos representam ações, eles são responsáveis pelas mudanças no estado do estoque (BASTOS, 2003). A figura 3.7

mostra termos comuns usados para fazer a distinção entre os estoques e os fluxos em diversos campos de aplicação (STERMAN, 2000).

Campo de aplicação	Estoques	Fluxos
Matemática, física e engenharia	Integral, variáveis de estado	Derivadas, taxas de mudança
Química	Reagentes	Taxas de reação
Manufatura	Inventários, <i>buffers</i>	<i>Throughput</i>
Economia	Níveis	Taxas
Contabilidade	Folhas de balanço	Fluxos de caixa
Biologia	Compartimentos	Taxas de difusão
Medicina, epidemiologia	Reservatórios, prevalências	Infecção, taxas de mortalidade

FIGURA 3.7: Terminologia usada para distinguir entre fluxos e estoques em diferentes disciplinas.

Fonte: Adaptado de Sterman (2000)

Os diagramas de estoque-fluxo possuem quatro elementos principais: i) Estoques; ii) Fluxos; iii) Auxiliares; iv) Conectores. A seguir esses elementos são descritos de maneira detalhada.

- **Estoques:** Representam as acumulações de um recurso como, por exemplo, pedidos de carteira, trabalhadores, inventários ou capital intelectual. O nível de qualquer estoque é representado pela diferença entre o fluxo de entrada e o de saída (PIDD, 2004). Segundo Martin (1997 a), um estoque é uma simbologia genérica para tudo que se acumula ou se esgota como, por exemplo, a quantidade de água em uma banheira. A figura 3.8 mostra a representação de um estoque no *software* Vensim.

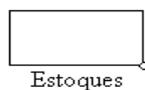


FIGURA 3.8: Estoques.

Fonte: AUTOR

Os estoques possuem quatro características que são cruciais na determinação do comportamento dinâmico do sistema (RADZICKI, 1997):

- Possuem memória (resistência ou inércia). Se o fluxo em um estoque é interrompido o nível ou quantidade acumulada no estoque não é alterado, permanecendo estático no nível em que se encontrava quando o fluxo foi interrompido. Por exemplo, se o fluxo de água da torneira para a banheira é interrompido, a quantidade de água presente na banheira será o mesmo do instante em que o fluxo parou;

- ii) O padrão de acumulação no estoque, normalmente, não exibirá o mesmo padrão do fluxo. Por exemplo, se o fluxo linear é constante e positivo gera um padrão de acúmulo crescente linear numa quantidade constante, em uma progressão aritmética. Se o fluxo for linear, crescente e positivo gera um padrão de acúmulo exponencial;
- iii) Interrompem ou separam os fluxos, ou seja, um estoque consegue isso diferenciando fluxos de alimentação dos fluxos de drenagem. A figura 3.9 mostra a separação dos fluxos pelos estoques.

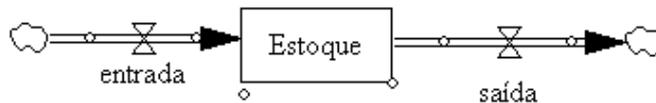


FIGURA 3.9: Estoques separando fluxos.

Fonte: AUTOR

- iv) Os estoques criam *delays*: Um *delay* sempre estará presente em qualquer mudança de qualquer estoque. Mesmo que pareça que um determinado estoque esteja se alterando instantaneamente, sempre existirá um tempo envolvido.
- **Fluxos:** São atividades que produzem crescimento ou redução dos estoques (FERNANDES, 2001). De acordo com Vilela (2005), os fluxos representam o transporte de recursos, físicos ou não, no sistema. Sem os fluxos, os estoques nunca mudariam e não existiria nenhuma dinâmica do sistema. (BASTOS, 2003). Para esse autor, os fluxos são, em geral, o resultado das decisões por parte da gestão ou de forças exógenas fora do controle dos gestores. A figura 3.10 mostra a representação de um fluxo no *software* Vensim. A flecha na extremidade do fluxo indica o seu sentido e a válvula, no centro, é o regulador ou taxa, a qual ajusta o volume do fluxo.

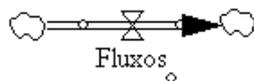


FIGURA 3.10: Representação de um fluxo

Fonte: AUTOR

- **Auxiliares (conversores e constantes):** Um conversor processa informações a respeito dos estoques e fluxos ou representam fontes de informação externas ao

sistema (FERNANDES, 2001). Ele pode servir de entrada para os fluxos, mas nunca para os estoques, já que os fluxos são os únicos que podem alterar os estoques (BASTOS, 2003). De acordo com Martin (1997a), um conversor é usado para entrar com dados e manipular ou converter uma entrada em algum sinal de saída. Segundo essa autora, em uma banheira, por exemplo, se mexermos na válvula que controla o fluxo de água, o conversor considerará essa ação como uma entrada e converterá o sinal em uma saída, que refletirá no fluxo da água. As constantes são elementos estáticos no tempo, são definidas com um valor inicial e mantém este valor ao longo de toda a simulação, a menos que o modelador mude (BASTOS, 2003).

- **Conectores:** São *links* de informação que descrevem a relação entre estoques, fluxos e conversores (FERNANDES, 2001). Para Bastos (2003), os conversores definem de que maneira os elementos do sistema se dispõem conjuntamente. A figura 3.11 mostra a representação de um conector no *software* Vensim.



FIGURA 3.11: Conector.

Fonte: AUTOR

3.5 PRINCÍPIOS PARA FORMULAÇÃO DE MODELOS DE *SYSTEM DYNAMICS*

Um modelo SD é uma representação de uma estrutura de um sistema. De acordo com Martin (1997b), uma vez que o modelo é construído e as condições iniciais são especificadas, um computador pode simular o comportamento de diferentes variáveis ao longo do tempo. Segundo Fernandes (2001), os modelos de simulação são usados para compreender porque um sistema se comporta daquela maneira, permitindo, assim, testar novas políticas e encontrar melhores formas de operá-lo, uma vez que se pode determinar de antemão, via simulação, os diferentes comportamentos originados pelos diferentes tipos de decisões.

A utilização de modelos dinâmicos é bastante ampla, podendo fornecer ao tomador de decisão o benefício de um melhor entendimento sobre o sistema em estudo, uma base para experimentação e responder determinadas questões (BASTOS, 2003; WU e YAN, 2008). A construção de modelos *System Dynamics* é uma ferramenta eficaz para promover sistemas de pensamento na organização (VENNIX, 1996). Segundo esse autor, para empregar essa ferramenta é necessário, ao menos, entender os princípios básicos dessa abordagem e os estágios para construção do modelo.

A modelagem é uma atividade inerentemente criativa e não há uma receita para uma modelagem de sucesso; apesar disso, de acordo com Sterman (2000), existem algumas etapas que devem ser seguidas no processo de modelagem para essa ser bem sucedida:

- a) **Articulação do problema:** Uma clara proposta é um dos principais ingredientes para o sucesso da modelagem. Nessa etapa decide-se o tema que será abordado, as variáveis e conceitos chaves que serão considerados, o horizonte de tempo e a definição do problema dinâmico (modo de referência);
- b) **Formulação de uma hipótese dinâmica:** Uma hipótese dinâmica deve fornecer uma explicação sobre a dinâmica que caracteriza o problema em termos de *feedback*, fluxos e estoques. Nessa fase são geradas uma hipótese inicial e uma explanação endógena que explique o comportamento das estruturas do sistema. É realizado também um mapeamento das estruturas causais, variáveis chaves e outros dados disponíveis, por meio de ferramentas como diagramas causais, diagramas estoque-fluxo, entre outros;
- c) **Formulação de um modelo de simulação:** Nessa fase são especificadas as estruturas e regras de decisão do modelo, são feitas estimativa dos parâmetros, dos relacionamentos comportamentais e das condições iniciais;
- d) **Teste:** Parte do teste é a comparação do comportamento simulado do modelo como o apresentado no mundo real, mas outra parte envolve a replicação do seu comportamento histórico. É avaliada a robustez do modelo sob extremas condições e a sensibilidade dele. A análise da sensibilidade busca mostrar quão sensível um modelo é a mudança nos valores dos parâmetros;
- e) **Projeto de política e avaliação:** Nessa etapa são incluídas novas estratégias, estruturas e regras de decisão para melhorar o sistema em estudo. São avaliadas as estruturas e parâmetros dos modelos em diversos cenários.

A figura 3.12 representa as principais etapas do processo de modelagem.

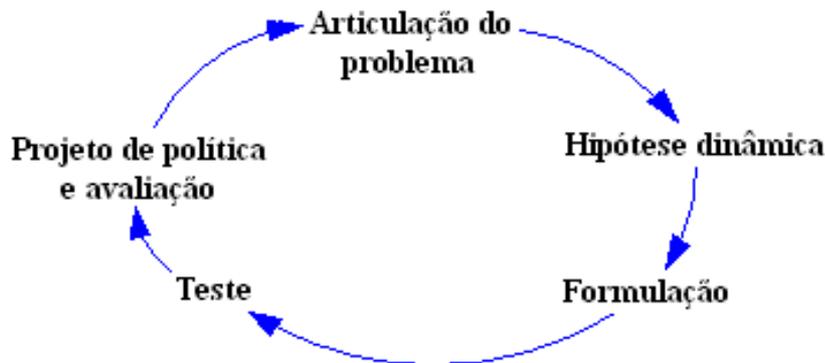


FIGURA 3.12: Processo de modelagem.

Fonte: Adaptado de STERMAN (2000)

3.6 A EVOLUÇÃO DA APLICAÇÃO *SYSTEM DYNAMICS* NA GESTÃO DA PRODUÇÃO

Segundo Forrester (1961), SD pode ser aplicado em qualquer situação que possa ser modelada como um sistema, que combine pessoas e/ou máquinas. Os modelos de SD têm sido aplicados em uma vasta gama de áreas para entendimento e resolução de problemas, tais como manufatura (Forrester, 1961); economia (Luzzi e Sussman, 1976); agricultura (Matthews et al., 1994); biologia (Foster, 1970), entre outras.

Essa subseção tem como objetivo fazer uma revisão de literatura sobre a aplicação de SD na Gestão da Produção e sua evolução no período de 1990 até 2007.

A Gestão da Produção é o projeto, a operação e a melhoria de sistemas que criam e distribuem os bens da empresa (CHASE et al., 2006). Segundo Shingo (1996), produção é uma rede de processos e operações, sendo que um processo é visto como o fluxo de materiais no tempo e no espaço e as operações podem ser visualizadas como o trabalho realizado para efetivar essa transformação.

A evolução da aplicação de SD é mostrada, nessa seção, em três etapas, cada etapa abrangendo um período correspondente a seis anos, ou seja, a primeira etapa corresponde aos anos de 1990-1995, a segunda etapa aos anos de 1996-2001 e a terceira etapa engloba os anos de 2002-2007. A primeira etapa foi obtida por meio de uma revisão de literatura anterior, realizada por Baines e Harrison (1999), os quais tentaram encontrar, por meio dessa análise, razões para a lacuna existente da aplicação de SD na área da manufatura.

A segunda e terceira etapas, realizadas no presente trabalho, baseou-se na pesquisa na base de dados COMPENDEX, buscando as palavras chaves *manufacturing, operations, quality, supply chain, development*, entre outras.

Dentro de cada um desses 3 períodos, os trabalhos foram divididos em quatro áreas da Gestão da Produção as quais são mais passíveis de aplicação de modelos SD: Sistemas de Produção/PCP (Planejamento e Controle da Produção); Gestão da Qualidade; Gestão do Desenvolvimento do Produto/Processos; Logística/Gestão da Cadeia de Suprimentos.

3.6.1. Trabalhos de SD no período de 1990-1995

a) Trabalhos com foco em Sistemas de Produção/ PCP

Jessen (1991) propõe o uso de um modelo SD para auxiliar os gerentes na tomada de decisões referentes à realização de um projeto. Ravishankar (1993) desenvolve alguns modelos SD para entender os efeitos de políticas de gestão na linha de produção de um semicondutor e constrói um modelo de alocação de recursos dentro da organização para ilustrar como políticas de decisões na produção impactam no desempenho das máquinas e na produtividade da fábrica.

b) Trabalhos com foco em Gestão em Desenvolvimento do Produto/ Processo

Tucci et al. (1991) estudam, via SD, um simulador do processo de manufatura de motores de indução, o qual fornece um *feedback* na programação da produção durante a o projeto do processo. A simulação fornece informação que auxilia no estágio de projeto do motor via *software*. Abdel- Hamid (1993) demonstra, por meio de SD, como as diversas fases de um projeto interagem entre si e influenciam o resultado final do desenvolvimento de um produto ou processo como um todo. Essa pesquisa foi desenvolvida com base em estudos de 5 organizações.

c) Trabalhos com foco em Logística/ Gestão da Cadeia de Suprimentos

Wikner et al. (1991) simulam uma cadeia de suprimentos, a qual oferece detalhes organizacionais e mudanças necessárias para melhorias. Através da modelagem e simulação em SD são oferecidas cinco diferentes abordagens para melhoria da dinâmica da cadeia de suprimentos, tais como a redução de sistemas que causam atrasos e mudança nas regras de decisão nos elos da cadeia. Towill (1992) revisa o estado de desenvolvimento do tema cadeia de suprimentos. Através da simulação com SD, este autor ressalta a importância do fluxo de bens e de informação e propõe um quadro conceitual que possibilita melhorias em

toda a cadeia. Towill e Del Vecchio (1994) propõem o uso da teoria do filtro e da simulação SD para minimizar o estoque total da cadeia de suprimentos diante das flutuações da demanda ao longo de três elos da cadeia.

d) Trabalhos com foco em Gestão da Qualidade

Não foram encontrados trabalhos com foco em gestão da qualidade nesse período.

e) Trabalhos com foco em mais de uma área

Byrne e Roberts (1994) investigam como o uso de SD pode melhorar o desempenho de um sistema completo de produção principalmente os níveis de inventário e a programação da produção de máquinas consideradas críticas. O estudo também investiga como a ligação entre o fornecedor e a manufatura é realizada e propõem melhorias que atingem todo o sistema.

3.6.2 Trabalhos de SD no período de 1996-2001

a) Trabalhos com foco em Sistemas da Produção/PCP

No trabalho de Ghrabi e Kenne (1997) trabalha-se com um problema cujo objetivo é encontrar o número ótimo de máquinas que minimize o custo médio total incluindo inventários e custos com reparos de máquinas. Utilizando SD o custo foi determinado para diferentes configurações do sistema e daí o melhor número de máquinas pode ser encontrado. O trabalho de Lin et al. (1998) propõe e detalha um modelo genérico de SD que fornece uma modelagem fácil em um nível agregado para sistemas de manufatura. Já Reid e Koljonem (1999) aplicam princípios da Teoria das Restrições em modelos de SD para estabelecer novos quadros conceituais, guiando os gerentes através de processos de melhoria contínua para identificar políticas e paradigmas de restrições em sistemas de produção. Williford e Chang (1999) descrevem o desenvolvimento de um modelo de SD que auxilia no treinamento, assessoria e a infra-estrutura em um período de cinco anos para a divisão de tecnologia de informação da FedEx.

b) Trabalhos com foco em Gestão em Desenvolvimento do Produto/ Processo

Madachy (1996) foca em um modelo que apóia o processo de avaliação quantitativo do processo de ciclo de vida do produto. SD é usada para modelar o fluxo de tarefas, erros e pessoal nas diferentes fases do desenvolvimento do produto e calibrar dados industriais. Ford e Serman (1998) também desenvolvem seu trabalho preocupando-se em entender a seqüência de tarefas no desenvolvimento do produto, seus efeitos e interações com

os recursos, escopo do projeto e objetivos. O modelo criado explora a interação entre quatro atividades do processo de desenvolvimento do produto e usa o projeto de um chip semicondutor para validá-lo. O trabalho de Sycamore e Collofello (1999) incorpora um modelo de SD em um software de gerenciamento especializado em desenvolvimento de processos concorrentes, o qual permite o planejamento em termos de programação, horas de retrabalho e qualidade.

c) Trabalhos com foco em Logística/ Gestão da Cadeia de Suprimentos

Minegishi e Thiel (2000) têm como objetivo mostrar como SD contribui para melhorar o conhecimento do comportamento complexo da logística em uma indústria de alimentos e como essa ferramenta pode fornecer importantes idéias para os gerentes. O trabalho de Akkermans (2001) usa um modelo de simulação com 100 atores distribuídos em três elos da cadeia. Uma análise do modelo mostra que a estabilidade em uma rede complexa emerge espontaneamente com preferências que se fixam ao longo do tempo.

d) Trabalhos com foco em Gestão da Qualidade

Não foram encontrados trabalhos com foco em gestão da qualidade nesse período.

e) Trabalhos com foco em mais de uma área

Não foram encontrados trabalhos com foco em mais de uma área nesse período.

3.6.3 Trabalhos de SD no período de 2002-2007

a) Trabalhos com foco em Sistemas da Produção/PCP

Marquez e Blanchar (2004) propõem um modelo de SD para acompanhar a variabilidade da demanda e *lead times*, utilizando técnicas de otimização para medir *trade-offs* entre estruturas de escolha alternativas. Em seu trabalho, Tesfamariam e Lindberg (2005) propõem um modelo para tomadas de decisões estratégicas em sistemas de produção, o qual captura os principais relacionamentos e interdependência entre diferentes fatores. Akkermans e Van Oorschot (2005) descrevem um estudo de caso em que a modelagem e simulação SD foi usada no desenvolvimento do *Balanced Scorecard* (BSC). Já o trabalho de Helal e Rabelo (2006) desenvolve uma simulação híbrida discreto-contínua de um sistema de manufatura, a qual representa uma ferramenta simples e econômica para diferentes escopos e níveis de planejamento. Zhang et al. (2006) construíram um *loop* causal mostrando as relações entre a capacidade da instalação, nível de estoque, *lead time*, preço do produto, parcela do mercado,

entre outros. Os resultados da simulação mostraram que o modelo é perfeitamente capaz de simular os padrões de comportamento dinâmico de capacidade da instalação. Adamides e Voutsina (2006) baseados na perspectiva de gerenciamento estratégico apresentam um estudo da co-evolução da manufatura e das estratégias de *marketing*. Através de um modelo SD e baseado em um estudo de caso longitudinal é fornecido um quadro conceitual da co-evolução das duas estratégias. Luo et al. (2007) descrevem a dinâmica dos relacionamentos entre os objetos de controle e as capacidades dos recursos em empresas de manufatura de aviões. O modelo proposto descreve três tipos de situações, as quais fornecem uma visão holística e apóiam a tomada de decisões. Grossler (2006) demonstra a utilidade de uma análise dinâmica para o desenvolvimento e gerenciamento de capacidades e recursos na manufatura. O trabalho de Zhou (2007) considera em seu modelo os relacionamentos dependentes o desempenho de diferentes recursos da manufatura e estabelece a sua validade e eficácia via aplicação de um caso real. Jia e Cheng (2007) utilizam um método de reengenharia de sistemas de produção baseado em SD e na Teoria das Restrições e usam o conceito de gerenciamento total das restrições com o objetivo de assegurar a eficácia e eficiência dos sistemas de produção pelo estabelecimento de um mecanismo de supervisão, previsão e gestão das restrições. Storck (2007) tem como objetivo mostrar como o *lead time* da fundição de um rotor pode ser melhorado por mudanças na função programação. Um modelo para melhorar os parâmetros que definem a configuração dessa programação, resultando em menores estoques em processo, aumento da eficiência da energia e menos oscilação do sistema é proposto. O trabalho de Pfahl et al. (2007) foca na análise de planos de projeto relacionando diversos fatores tais quais produtividade, volume de trabalho e grau de dependência entres as tarefas.

b) Trabalhos com foco em Gestão em Desenvolvimento do Produto/ Processo

Stamboulis et al. (2002) estudam o impacto de alternativas de tempo e examinam estratégias de aprendizado, assumindo específicas estruturas de custo através da elaboração de um modelo SD. Esse estudo mostra que em certas condições de maturidade tecnológica o processo de desenvolvimento de produtos é uma parte crítica e indica que determinados efeitos de não linearidade podem não ser vistos se toda a dinâmica do sistema não for considerada. O trabalho de D'Avino et al. (2005) analisa a dinâmica do comportamento do processo de desenvolvimento de um processo relacionado a um sub-sistema de um novo modelo de carro. A análise é apoiada pelo *feedback* dos gerentes técnicos e engenheiros envolvidos no projeto. Byrnes (2005) usa SD para descrever a síntese de um modelo de aeronave com o objetivo de expandir a habilidade de integração dentro do projeto.

Ou seja, não atribui apenas o tamanho do veículo e lista suas características físicas, mas liga a síntese do modelo a uma visão mais ampla do sistema.

c) Trabalhos com foco em Logística/ Gestão da Cadeia de Suprimentos

Georgiadis et al. (2005), através de SD desenvolvem estratégias para modelar múltiplos elos e elos únicos de uma cadeia de suprimentos de alimentos. Viswanadham et al. (2005) desenvolvem modelos SD para estudar o comportamento de uma rede e investigar o efeito chicote que surge na cadeia. O trabalho mostra também como a integração e a colaboração em todos os elos da rede assegura a lucratividade e minimiza o efeito chicote. O trabalho de Sachan et al. (2006) estuda a cadeia de fornecedores de grãos e analisa a eficácia de vários tipos de integração entres os participantes da cadeia. O modelo construído foi usado para validar nove cenários possíveis com base em três tipos de integração e suas probabilidades de ocorrências. Sun et al.(2006) comparam o uso de SD e Arena no estudo da cadeia de suprimentos, controlam as entradas do modelo e avaliam como essas interferem no desempenho do sistema. Ashayeri e Lemmes (2006) fornecem um modelo que permite aos gestores da cadeia de suprimentos examinarem como melhorias na confiabilidade da demanda impactam em toda cadeia a jusante e o validam através de um caso real. Schawninger e Vrhovec (2006) fazem uma contribuição para um gerenciamento eficaz da cadeia de suprimentos e redes propondo dois métodos sistemáticos para operar em altos níveis de agregação, os quais se complementam: SD para modelar e simular a cadeia de suprimentos e o controle cibernético que aplica conceitos teóricos e lógica recursiva para distribuição. Sun e Shuai (2007) estudam o desenvolvimento da logística na indústria chinesa e diversos fatores que afetam o seu comportamento através de *loops* causais. O trabalho de Yu e Du (2007) considera a influência do ambiente na cadeia de suprimentos; através da modelagem SD as operações do sistema são analisadas e uma investigação numérica do modelo é realizada ajudando a simular diferentes cenários. Speller et al. (2007) consideram um novo tipo de cadeia de valores que inclui produção e capacidade das linhas de produção existente e incorpora novos produtos e desenvolvimento de serviços. O modelo SD desenvolvido usa equações diferenciais para expressar as relações entre as diversas variáveis e utiliza o caso de uma indústria de aviação para validar o modelo. O estudo de Huang et al.(2007) apresenta uma análise alternativa do CONWIP (*Constant Work in Process*) em um nível agregado . O CONWIP é um método híbrido de sistemas puxados e empurrados, que oferece uma abordagem para a gestão da cadeia de suprimentos, onde o controle de inventário é um dos elementos mais importantes. O trabalho de Kumar e Yamaoka (2007) através de simulação

SD, fornece uma ferramenta que pode ser usada para prever o relacionamento entre diversas variáveis que impactam em tomada de decisões sobre a indústria de carro japonesa.

d) Trabalhos com foco em Gestão da Qualidade

Mandal et al. (2002), baseados relações causais, modelam questões de qualidade no ambiente da manufatura. Esse modelo pode ser usado para identificar as conseqüências de se escolher determinadas políticas de qualidade e o desempenho dos sistemas de manufatura. Wankade e Dabade (2006) fornecem uma estrutura que tenta entender a percepção sobre qualidade e investigar a mudança dos viabilizadores de mercado.

e) Trabalhos com foco em mais de uma área

O trabalho de Lai et al. (2003) usa SD para oferecer uma visão alternativa do JIT e do *kanban* fornecendo um novo paradigma para analisar políticas de logística da companhia, entender as interações entre clientes e fornecedores ao longo tempo. Nesse modelo as estratégias e os passos de ação foram identificados e adotados para melhorar o controle de inventário, qualidade e produtividade no chão de fábrica. Scholz-Reiter (2005) também direciona seu estudo para as áreas de sistema de produção/PCP e logística. São utilizadas duas abordagens diferentes para descrever um mesmo cenário de chão de fábrica: um modelo discreto é comparado com um modelo dinâmico de SD. A eficácia e robustez são investigadas pelo comportamento dinâmico e a logística do desempenho em casos de flutuações da carga de trabalho e distúrbios inesperados. Vlachos et al. (2007) focam no desenvolvimento de um planejamento de capacidade eficaz para instalações de remanufatura na cadeia de suprimentos reversa, considerando não apenas questões econômicas mas também questões ambientais.

3.6.4. Análise dos Resultados

No presente estudo 48 trabalhos de SD foram encontrados no período em estudo (1990-2007) com foco na Gestão da Produção. A evolução desses trabalhos ao longo do tempo é mostrada na figura 3.13.

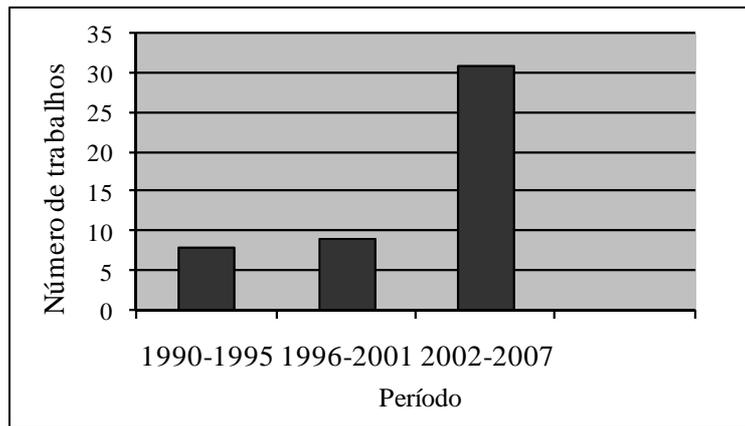


FIGURA 3.13: Evolução ao longo do tempo dos trabalhos de SD aplicados a Gestão da Produção.

Fonte: AUTOR

No período de 1990-1995 foram encontrados com base na revisão de literatura realizada por Baynes e Harrison (1999) 8 trabalhos com foco nas quatro áreas da Gestão da Produção incluídas nesse estudo. No segundo período (1996-2001) foram encontrados 9 trabalhos e o no período referente aos anos de 2002 a 2007 foram encontrados 31 trabalhos. Isso mostra que uma evolução bastante grande aconteceu no último período, revelando um aumento de quase quatro vezes em relação aos anos de 1990-1995, que representam o primeiro período. Os anos de 1996 a 2001 mantêm praticamente o mesmo número de trabalhos do primeiro período de tempo analisado. Segundo Baynes e Harrison (1999), a pouca utilização de SD na Gestão da Produção deve-se ao pensamento de que essa técnica é mais apropriada a um horizonte de planejamento maior e não a um nível operacional dentro da manufatura. Outro motivo levantado pelos mesmos autores é que os engenheiros prefeririam utilizar técnicas de simulação de eventos discretos. Pelo crescente uso de SD na gestão de produção revelada pelo crescente aumento de trabalhos encontrados nessa área supõe-se que possivelmente essa mentalidade esteja em processo de mudança.

Na figura 3.14 é mostrado o número total de trabalhos em cada uma das quatro áreas da Gestão da Produção focadas no período total de anos ao qual essa revisão abrange. Durante os anos abrangidos por esse estudo foram encontrados no total 22 trabalhos da área de sistemas de produção/PCP, 8 de gestão em desenvolvimento do produto/processo, 2 referentes a gestão da qualidade e 20 relacionados a área de logística/gestão da cadeia de suprimento. O total de trabalhos por área é superior aos 48 trabalhos encontrados nesse estudo; isso acontece já que há 4 trabalhos que pertencem a mais de uma área. A figura 3.14 revela que há uma maior aplicação de SD na área de sistemas de produção/PCP e na área de logística/gestão da cadeia de suprimentos. Esse resultado já era esperado, uma vez que os trabalhos iniciais de Forrester (1961) dentro da Gestão da Produção visavam exatamente aplicações nestas áreas.

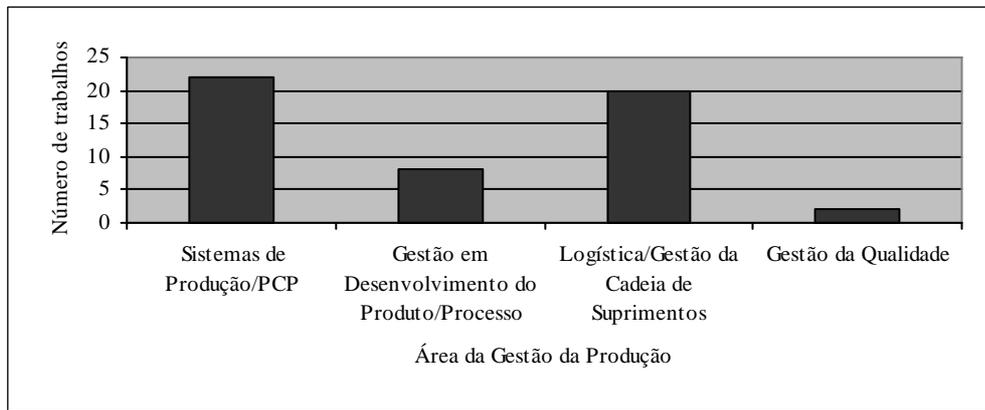


FIGURA 3.14: Número total de trabalhos por área da Gestão de Produção.

Fonte:AUTOR

A figura 3.15 mostra a evolução ao longo do tempo em cada uma das áreas da Gestão da Produção focadas.

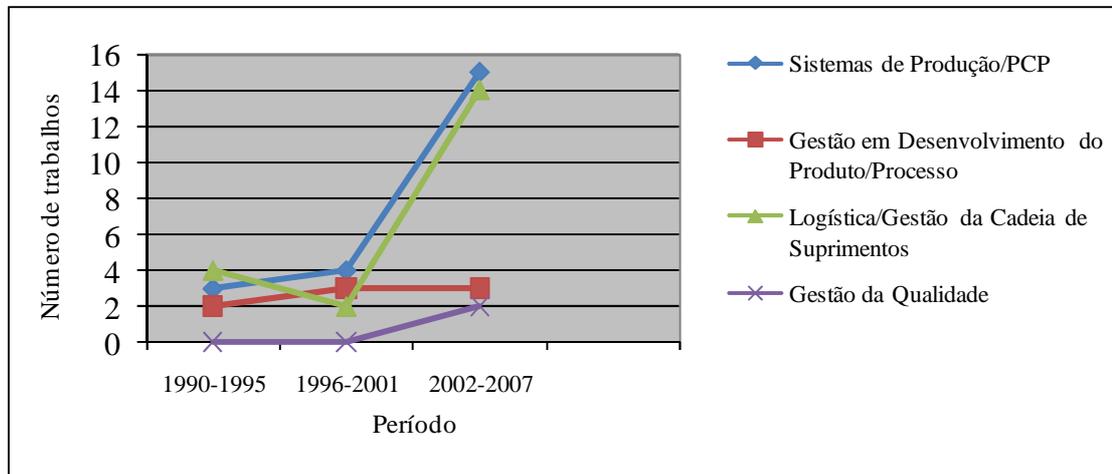


FIGURA 3.15: Evolução ao longo do tempo das 4 áreas de Gestão da Produção.

Fonte:AUTOR

A figura 3.15 mostra que todas as áreas apresentaram crescimento no período de tempo desse estudo, destacando-se as áreas de sistemas de produção/PCP e logística/gestão da cadeia de suprimentos. A área de logística/gestão da cadeia de suprimentos tem uma queda no período de 1996-2001 e volta a crescer no período seguinte.

Analisando-se qualitativamente os estudos encontrados nas 4 áreas de Gestão da Produção, temos:

- a) Na área de sistemas de produção/PCP observa-se predominantemente a utilização de SD para auxiliar na tomada de decisões, avaliar a escolha de alternativas e capturar o relacionamento existente entre variáveis do chão de fábrica, tais como capacidade, recursos, *lead times* e estoques. Dois trabalhos (Reid e Koljonem, 1999; Jia e Cheng, 2007) nessa área também associam SD aos princípios da Teoria das Restrições, a fim de ajudar na identificação e gestão das restrições, assegurando assim um desempenho eficiente dos sistemas de produção;

- b) Na área de gestão em desenvolvimento do produto/processo, 3 dos 8 trabalhos encontrados são direcionados a entender como as diversas atividades/fases do desenvolvimento do produto/processo interagem entre si e afetam o projeto como um todo;
- c) Os dois estudos referentes à gestão da qualidade se preocupam em entender como determinadas ações na área de qualidade ocorrem e determinar suas conseqüências globais para as organizações;
- d) A maioria dos trabalhos na área de logística/gestão da cadeia de suprimentos se focam no estudo da integração entre os elos da cadeia, na tentativa de minimizar o estoque total da rede e evitar o efeito chicote.

Apesar dos dados encontrados revelarem um considerável aumento do uso de SD na Gestão da Produção, ela é ainda uma técnica pouco aplicada quando comparada com a simulação de eventos discretos, por exemplo, e tendo-se em consideração que foi desenvolvida no início dos anos 60. Com cerca de cinco décadas, SD é uma ferramenta madura e que possui diversos pacotes computacionais competentes, além de ser versátil, podendo ser aplicado em diversas situações. Mesmo assim, os números encontrados mostram que o uso de SD ainda é uma oportunidade a ser explorada nas áreas da Gestão da Produção. A pesquisa também mostra que há espaço para estudos envolvendo SD nas 4 áreas da Gestão da Produção focadas, até mesmo nas áreas de gestão em desenvolvimento do produto/processo e gestão da qualidade, as quais a princípio poderiam parecer não tão adequadas a sua aplicação.

Com base nessa oportunidade que a exploração da teoria SD traz para as mais diversas áreas da Gestão da Produção, até mesmo as que a princípio poderiam parecer não tão adequadas, o presente trabalho utiliza os modelos SD para analisar um chão de fábrica, para isso tanto a área de PCP quanto a de qualidade são estudadas através do modelo, possibilitando a captura de relacionamentos existentes entre as variáveis do chão de fábrica e o entendimento de como programas de qualidade influenciam o funcionamento global de um chão de fábrica.

CAPÍTULO 4: *FACTORY PHYSICS*

4.1 INTRODUÇÃO

A teoria *Factory Physics* encara a manufatura como uma ciência, por meio do estabelecimento de conceitos básicos através de princípios fundamentais tais como leis da manufatura e identificação de *insights* gerais para práticas específicas (HOPP e SPEARMAN, 2008). Isso é feito por meio de um conjunto de equações matemáticas derivadas da teoria das filas (GODINHO FILHO e UZSOY, 2009).

Segundo Hopp e Spearman (2008), a gestão da manufatura necessita de uma ciência, pois, apesar de considerável sabedoria popular existente sobre a manufatura, há ainda um pequeno corpo de conhecimento generalizável para apoiar o projeto, controle e gestão desses sistemas. Para Pentilla (2005), a teoria proporciona ferramentas aos gestores para analisar operações existentes, projetar esforços de melhoria e analisar os *trade-offs* existentes.

Esse capítulo tem como objetivo proporcionar um entendimento sobre a teoria *Factory Physics*, por meio das definições utilizadas na teoria e das fórmulas contidas nele que são utilizadas no presente trabalho. Na seção 4.2 é apresentada a origem da teoria, sua definição e a importância dele para uma boa gestão da manufatura; na seção 4.3 são mostradas as principais definições e medidas de desempenho chaves e necessários para compreensão da teoria e das fórmulas presentes nele; a seção 4.4 apresenta as fórmulas utilizadas na dissertação e algumas leis de *Factory Physics* que servirão de base para este trabalho. A seção 4.5 faz uma rápida revisão de literatura sobre os trabalhos encontrados sobre *Factory Physics*. E a seção 4.6 apresenta algumas considerações finais a respeito da teoria.

4.2 ORIGEM E DEFINIÇÃO

As primeiras idéias que deram origem a teoria *Factory Physics* surgiram em 1988, quando Wallace Hopp e Mark Spearman, professores da *Northwestern University*, trabalhavam como consultores em uma planta da IBM, localizada no Texas. Eles começaram

a observar os relacionamentos entre diversas variáveis do chão de fábrica e a partir disso, começaram a caracterizar o comportamento básico da manufatura, identificar áreas de influências e comparar políticas de controle alternativas. A consolidação da teoria aconteceu em 1996 quando Hopp e Spearman publicaram a primeira edição do livro *Factory Physics* (Hopp e Spearman, 1996), o qual contém os princípios que governam os sistemas de manufatura e fornece *insights* sobre práticas de gestão que podem melhorar esses sistemas.

Segundo Hopp e Spearman (2008), *Factory Physics* é uma descrição sistemática do comportamento básico dos sistemas de manufatura. De acordo com eles, a teoria apresenta três propriedades fundamentais de uma abordagem científica: fornece relações quantitativas, é fundamentada em relações simples e contém relacionamentos chaves.

Os fundadores da teoria afirmam que a ciência oferece um número de usos no contexto da gestão da manufatura, sendo que, os principais benefícios da utilização dela para os sistemas de manufatura são:

1. **Precisão:** A ciência fornece caracterização de como sistemas de manufatura funcionam. Relações que fornecem previsões são a base para a ciência. Por exemplo, $F=ma$, é uma relação básica da física;
2. **Intuição:** A fórmula $F=ma$ é uma relação básica da física. Sabendo-se que a força é dobrada e que a quantidade de massa permanece a mesma, intuitivamente, conclui-se que a aceleração foi dobrada. Similarmente, um gestor, freqüentemente, não tem tempo de conduzir uma análise detalhada de uma decisão. Nesses casos, ter-se em mãos um bom modelo ou um relacionamento claro do sistema em análise que forneça *insights*, permite aos gerentes focar suas energias em questões de máxima importância;
3. **Síntese:** A ciência facilita síntese de sistemas complexos pelo fornecimento de uma estrutura unificada. Na manufatura, medidas de desempenho chaves, como estoque em processo (WIP) e *lead time* são muitas vezes tratadas como independente; porém a compreensão da manufatura como ciência fornece uma visão estruturada desses relacionamentos.

A teoria *Factory Physics* tem foco na manufatura, mais especificamente nas operações. Segundo Hopp e Spearman (2008), o termo operações se refere à aplicação de recursos (capital, materiais, tecnologia, habilidades humanas e conhecimento) para produção de bens e serviços. Nesse ponto uma observação se faz necessária: a teoria *Factory Physics* considera que os sistemas de produção encontram-se em estado de equilíbrio, ou seja, em

situação estável. No estado de equilíbrio, os parâmetros do sistema nunca devem mudar e o sistema deve estar operando tempo suficiente para que as condições iniciais já não importem.

De acordo com Hopp e Spearman (2008), do ponto de vista das operações, os gestores tendem a tentar identificar políticas que sejam efetivas no presente momento e flexíveis o suficiente para se adaptarem as necessidades futuras; e para isso, utilizam algumas abordagens convencionais que ficam aquém dos seus objetivos. Essas abordagens e práticas são descritas a seguir:

- a) **Gestão por imitação.** Observar a competição pode fornecer a companhia uma valiosa fonte de *benchmarking* e pode evitar que a empresa fique presa em modos estabelecidos de pensamento. Mas a imitação não pode fornecer o ímpeto de uma vantagem competitiva significativa. Novas idéias devem vir de dentro, não de fora;
- b) **Gestão por *buzzwords* (“modismos”).** Firms de manufatura têm se tornado inundadas por uma onda de revoluções nos anos recentes. Esses movimentos contêm muitos *insights* valiosos. Entretanto, eles são muito perigosos como sistemas de gestão porque podem afastar os gestores dos objetivos fundamentais dos negócios e seus resultados podem ser decisões pobres ao longo do tempo;
- c) **Gestão por consultoria.** Um bom consultor pode fazer uma avaliação objetiva da firma e fornecer novas idéias. Entretanto, por estar do lado de fora, o consultor não está em posição de obter um apoio das pessoas chaves para implementar novos sistemas de gestão.

Para Hopp e Spearman (2008), a resposta para essa questão não é o que fazer a respeito dos problemas de manufatura e sim como pensar a respeito deles. Segundo eles, cada ambiente de manufatura é único. Portanto, nenhum conjunto de procedimentos pode funcionar bem em todas as condições, mas há tendências de comportamentos compartilhadas por todas as empresas de manufatura. A proposta da teoria *Factory Physics* é que esses comportamentos e tendências podem ser organizados dentro de um corpo de conhecimento para servir como base para os gestores.

4.3 DEFINIÇÕES, MEDIDAS DE DESEMPENHO CHAVES E PARÂMETROS BÁSICOS DE FACTORY PHYSICS

O método científico requer uma terminologia específica. Porém, termos da manufatura na indústria e literatura sobre as operações de gestão estão longe de serem padronizados. Isso pode ser extremamente difícil para gestores de diferentes companhias para comunicar e aprender uns com outros. Por essa razão, alguns termos importantes para gestão do chão de fábrica serão definidos de acordo com a teoria *Factory Physics* (HOPP e SPEARMAN, 2008). A presente seção é dividida em 2 subseções, nas quais são apresentadas as definições básicas e as medidas de desempenho chaves para os sistemas de manufatura.

4.3.1 Definições básicas

Para que seja possível descrever tanto processos individuais como linhas de produção e toda a planta com precisão, algumas definições precisam estar bem claras. As definições mais importantes para o entendimento do trabalho são descritas a seguir:

- **Estação de trabalho:** É uma coleção de uma ou mais máquinas ou estações manuais que desempenham funções idênticas. Exemplos de estações de trabalho incluem estação composta por tornos verticais, bancadas manuais operadas por inspetores de qualidade, entre outros. Em *layouts* orientados ao processo, as estações de trabalho são fisicamente organizadas de acordo com as operações que elas desempenham (Por exemplo, todas as máquinas de trituração localizadas no mesmo departamento). Em *layouts* orientados aos produtos, elas são organizadas em linhas que fazem produtos específicos (Por exemplo, uma única máquina de trituração dedicada a uma linha individual). Nesse trabalho, os termos estação, centro de trabalho e centro de processamento são sinônimos de estação de trabalho;
- **Parte** é uma peça de matéria prima, um componente, um subconjunto, ou um conjunto que é processado em alguma estação de trabalho na planta. O termo **matéria-prima** refere-se a partes compradas fora da planta. **Componentes** são peças individuais que são montados em produtos mais complexos. **Subconjuntos** são unidades montadas que serão transformadas em produtos mais complexos. **Conjuntos** são produtos

completamente montados ou itens finais. **Itens finais** são partes que são vendidas para o cliente, já completamente 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, entre outros. Normalmente, diferentes sistemas de compra são utilizados para as partes (que estão incluídas na lista de materiais) e para os materiais de consumo. Os primeiros são gerenciados por sistemas, como por exemplo, MRP, enquanto os últimos são comprados através de um sistema de revisão contínua.
- **Roteiro de fabricação:** descreve a seqüência de estações de trabalho por qual uma parte passa. Roteiros de fabricação se iniciam com matéria-prima, componente, ou estoque de subconjuntos e terminam em estoques intermediários ou inventário de bens acabados;
- **Uma ordem do cliente** é um pedido de um cliente para um determinado produto, em uma quantidade particular, para ser entregue em uma determinada data;
- **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 uniformidade de uma classe de entidades. Por exemplo, um grupo de indivíduos que apresentam o mesmo peso não apresenta variabilidade, enquanto um grupo com diferentes pesos tem uma alta variabilidade. Em sistemas de manufatura, há muitos atributos nos quais a variabilidade é de interesse como, dimensões físicas, tempos de processamento, tempos de reparo, medidas de qualidade, tempos de *setup*, entre outros. Para analisar efetivamente a variabilidade, devemos saber quantificá-la. Isso é feito usando medidas padrões da estatística para definir um conjunto de classes de variabilidade;
- A **variância**, comumente denotada por σ^2 , é uma medida de variabilidade absoluta, assim como o **desvio padrão**, definido como a raiz quadrada da variância. Algumas vezes, a variabilidade absoluta é menos importante que a variabilidade relativa. Por exemplo, um desvio padrão de 10 micrômetros indicaria uma variabilidade muito baixa para parafusos com um tamanho de 2 polegadas, mas representaria uma alta variação se fosse no tamanho de um chip com 5 micrômetros. Uma medida relativa apropriada de variabilidade para uma variável aleatória é o **coeficiente de variação** (CV), o qual é o desvio padrão dividido pela média. Se a média denotada por t e a

variância é denotada por σ , o coeficiente de variação, denotado por c , pode ser escrito como:

$$c = \frac{\sigma}{t} \quad (4.1)$$

Em muitos casos, é mais conveniente utilizar o quadrado do coeficiente de variação:

$$c^2 = \frac{\sigma^2}{t^2} \quad (4.2)$$

O coeficiente de variação é responsável por definir um conjunto de classes de variabilidade: Para Hopp e Spearman (2008) uma variável aleatória tem **baixa variabilidade** se o CV é menor que 0,75, que tem **variabilidade média** se o CV é entre 0,75 e 1,33, e que tem **alta variabilidade** se o CV é maior que 1,33;

- Para entender as causas e efeitos da variabilidade, deve-se entender o conceito de variações controláveis e variações aleatórias. **Variações controláveis** ocorrem como resultado direto das decisões, por exemplo, se muitos produtos são produzidos em uma planta, haverá muita variabilidade nas características dos produtos (dimensões físicas, tempo para manufatura, etc.). Igualmente se um material é movido em lotes de um processo para o outro, a primeira parte a terminar terá que esperar um maior tempo para ser movido do que a última parte a ser fabricada, logo os tempos de espera serão mais variáveis do que nos processos em que a movimentação acontece produto a produto. **Variações aleatórias** são consequências de eventos que estão além de um controle imediato. Por exemplo, os tempos entre os pedidos do cliente não estão sobre controle das companhias. Igualmente, não se sabe o momento em que uma máquina vai falhar;

4.3.2 Medidas de desempenho chave

Tendo bem definidas as terminologias básicas, algumas medidas de desempenho chave podem ser definidas (HOPP e SPEARMAN, 2008):

- **Throughput (TH) ou Taxa de Throughput** é a 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. Entretanto, gerentes da linha de produção controlam o que é feito e não o que é vendido. Logo, para uma planta, linha ou estação de trabalho, *throughput* é a quantidade de bens produzidos por unidade de tempo.

- A **capacidade efetiva**, r_e , é a capacidade efetiva de uma estação de trabalho. Ela é representada por:

$$r_e = \frac{n}{t_e} \quad (4.3)$$

Onde:

n é o número de máquinas idênticas que compõem a estação de trabalho;

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

- A **utilização**, u , de uma estação de trabalho é a fração de tempo que a estação não está ociosa. Isto inclui a fração de tempo em que uma estação está trabalhando em partes ou que as partes estejam esperando por falhas de máquinas, *setups*, manutenção, entre outros. A utilização por ser definida por:

$$u = \frac{r_a}{r_e} \quad (4.4)$$

Onde:

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

r_e é a capacidade efetiva de uma estação de trabalho.

- **Estoque em processo** ou **WIP** (*Work in Process*) é o inventário entre os pontos inicial e final de um roteiro de fabricação. Já que os roteiros começam nos pontos iniciais e finais de estoque, o WIP abrange todos os produtos entre esses pontos, com exceção dos pontos de estoque finais;
- O **lead time**, também conhecido como **tempo de ciclo**, **tempo de fluxo**, **tempo de throughput** já foi definido no capítulo 1 de acordo Ericksen e Suri (2001). O *lead time* e o tempo de ciclo são tratados nesse trabalho como sinônimos e são representados por *TC*;
- **Disponibilidade**: É a fração do tempo que uma estação não está sendo reparada. Ela é definida como a razão entre o tempo médio entre falhas e o somatório do tempo médio entre falhas e o tempo médio de reparo, e pode ser representada por:

$$A = \frac{mf}{mf + mr} \quad (4.5)$$

Onde:

mf é o tempo médio entre falhas ;

mr é o tempo médio de reparo.

- **Lei de Little:** fornece um relacionamento fundamental entre três medidas de desempenho presentes em todos os sistemas de produção: *throughput*, *WIP* e *lead time*. A Lei de *Little* é válida para todas as linhas de produção, não apenas aquelas sem variabilidade. Ela é mostrada na fórmula 4.6.

$$WIP = TH \times TC \quad (4.6)$$

Onde:

TC é o *lead time* ou tempo de ciclo;

TH é o *throughput*;

WIP é o estoque em processo.

A Lei de *Little* é amplamente utilizada e pode ser aplicada em uma única estação, uma linha, ou uma planta inteira. Algumas utilizações simples dessa lei são:

- a) Cálculo do tamanho de filas: Ela pode ser usada para calcular o tamanho esperado da fila e a utilização de cada estação na linha, já que ela se aplica a estações individuais;
- b) Redução do tempo de ciclo: Já que a lei de *Little* pode ser escrita

$$TC = \frac{WIP}{TH} \quad (4.7)$$

Logo uma redução do *lead time* implica numa redução do *WIP* para TH constante. Logo, grandes filas são uma indicação de oportunidade para redução do *lead time* bem como *WIP*;

- c) Mensuração do *lead time*: Medir o *lead time* diretamente pode muitas vezes ser difícil, já que isso necessita do registro dos tempos de entrada e saída de cada parte em um sistema. Sendo o TH e o WIP rotineiramente medidos, é possível medir o tempo de ciclo;
- d) Sistemas com vários produtos: Se uma empresa tem diferentes tipos de partes com diferentes níveis de WIP , TC e TH , pode-se aplicar a Lei de *Little* para cada parte separadamente. Mas é possível também medir estoques e fluxos em unidades monetárias. Por exemplo, se o TH é medido em custo de bens vendidos, ou seja, unidades monetárias por dia (reais por dias, dólares por dia, *etc.*) e o WIP em unidades monetárias (reais, dólares, *etc.*), então a lei de *Little* pode ser aplicada para computar o *lead time* de todos os produtos simultaneamente.

4.4 EQUAÇÕES DA TEORIA *FACTORY PHYSICS* UTILIZADAS NO PRESENTE TRABALHO

Conforme salientado anteriormente, a teoria *Factory Physics* apresenta uma série de equações matemáticas que descrevem o comportamento dos sistemas de manufatura. Estas equações basicamente mostram: i) o efeito da variabilidade no tempo de processamento de uma estação de trabalho sujeita a paradas preemptivas, não preemptivas e a efeitos de qualidade; ii) o efeito da variabilidade no fluxo produtivo (chegada de peças em uma estação de trabalho); iii) o efeito de ambos os tipos de variabilidade (itens i e ii) nas medidas de desempenho chave dos sistemas de produção.

A seguir apresentam-se as fórmulas de acordo com essas 3 categorias, lembrando que todas elas estão contidas em Hopp e Spearman (2008).

4.4.1 A variabilidade no tempo de processamento

A variável aleatória de maior interesse em *Factory Physics* é o tempo de processamento efetivo de uma estação de trabalho. O tempo de processamento efetivo é o tempo que uma tarefa gasta sendo processada na estação de trabalho.

O tempo médio de processamento efetivo é construído a partir do tempo natural de processamento por meio da adição de três efeitos: (a) efeito de paradas preemptivas (falhas de máquinas); (b) efeitos de paradas não preemptivas (tempos de *setup*); (c) efeito de problemas de qualidade (GODINHO FILHO e UZSOY, 2009).

O tempo natural de processamento é o tempo normal necessário para processar uma tarefa excluindo-se qualquer variabilidade do processo, exceto a variabilidade natural (GODINHO FILHO e UZSOY, 2009). A variabilidade natural é a variabilidade inerente do tempo natural de processamento, tais como pequenas variações no processo devido à diferença entre operadores, máquinas e materiais (HOPP e SPEARMAN, 2008). Segundo esses autores, a variabilidade natural do processo exclui paradas aleatórias, *setups* e outras influências externas.

Considerando t_0 e σ_0^2 como a média e a variância respectivamente do tempo natural de processamento, pode-se expressar o coeficiente de variação do tempo natural de processamento por:

$$c_0 = \frac{\sqrt{\sigma_0^2}}{t_0} \quad (4.8)$$

O tempo natural de processamento é somente o ponto inicial para se avaliar o tempo de processamento efetivo de uma estação de trabalho. Em qualquer sistema de produção real, estações de trabalho estão sujeitas a várias fontes de variabilidade, incluindo quebra de máquinas, *setups*, indisponibilidade do operador, entre outros. Essas fontes de variabilidade inflam tanto a média como o desvio padrão do tempo de processamento efetivo.

Outro fator que influencia no tempo de processamento efetivo são as paradas preemptivas das estações de trabalho. Paradas preemptivas são aquelas que ocorrem independente das nossas vontades e que podem ocorrer no meio de uma determinada tarefa, como por exemplo, quedas de energia, falhas de máquinas, término de materiais de consumo, etc. Nesse trabalho as paradas preemptivas incluem apenas as falhas de máquinas.

O tempo de processamento efetivo considerando além do tempo natural de processamento, o efeito dessas paradas preemptivas é denotado por t_e^f , e pode ser representado por:

$$t_e^f = \frac{t_0}{A} \quad (4.9)$$

Onde:

A é a disponibilidade da máquina;

t_0 é o tempo natural de processamento.

A variância e o coeficiente de variação de t_e^f são respectivamente:

$$(\sigma_e^f)^2 = \left(\frac{\sigma_0}{A}\right)^2 + \frac{(m_r^2 + \sigma_r^2)(1-A)t_0}{Am_r} \quad (4.10)$$

$$(c_e^f) = \sqrt{c_0^2 + (1 + c_r^2)A(1-A)\frac{m_r}{t_0}} \quad (4.11)$$

Onde:

σ_r^2 é a variância no tempo de reparo;

m_r é tempo médio de reparo;

c_r é o coeficiente de variação do tempo de reparo.

O outro fator que compõem o tempo de processamento efetivo é o efeito de paradas não preemptivas. Paradas não preemptivas representam as paradas que inevitavelmente ocorrem, mas para o qual se tem algum controle do momento que ela ocorrerá. Um exemplo de parada preemptiva ocorre quando uma ferramenta começa a ficar desgastada e precisa ser trocada. No caso desse trabalho, as paradas preemptivas são constituídas por paradas para *setups*. Segundo Hoop e Spearman (2008), o *setup* tem igual probabilidade de ocorrer após o processamento de qualquer peça, com número esperado de peças entre dois *setups* consecutivos iguais ao tamanho médio de lote.

O tempo de processamento efetivo incorporando, além do o tempo natural de processamento, o efeito de paradas preemptivas e de paradas não preemptivas, é denotado agora por t_e^o e pode ser apresentado por:

$$t_e^o = t_e^f + \frac{t_s}{N_s} \quad (4.12)$$

Onde:

t_s é o tempo médio de duração dos *setups*;

N_s é o número médio de peças processadas entre *setups*.

A variância de t_e^o é dado por:

$$(\sigma_e^o)^2 = (\sigma_e^f)^2 + \frac{\sigma_s^2}{N_s} + \frac{N_s - 1}{N_s^2} t_s^2 \quad (4.13)$$

E o coeficiente de variação, c_e^o , é dado por:

$$c_e^o = \sqrt{\frac{(\sigma_e^o)^2}{(t_e^o)^2}} \quad (4.14)$$

Por fim, 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, não preemptivas e de problemas de qualidade é denotado por

$$t_e = \frac{\frac{t_0}{A} + \frac{t_s}{N_s}}{1-p}, \quad (4.15)$$

Onde:

p é a proporção de itens defeituosos.

A variância para o tempo médio de processamento efetivo é dado por:

$$\sigma_e^2 = \frac{(\sigma_e^o)^2}{1-p} + \frac{p(t_e^o)^2}{(1-p)^2} \quad (4.16)$$

E o coeficiente de variação, c_e , é representado por:

$$c_e = \sqrt{\left(\frac{\sigma_e}{t_e}\right)^2}. \quad (4.17)$$

4.4.2 A Variabilidade no fluxo produtivo

A variabilidade de uma estação pode afetar o comportamento de outras estações em uma linha produtiva por meio de outro tipo de variabilidade, a variabilidade no fluxo. Os fluxos referem-se à transferência de tarefas ou partes de uma estação para outra. Se uma estação de trabalho do início da linha tem alta variabilidade nos tempos de processamento, o fluxo que alimenta as estações a jusante da linha também será altamente variável. O ponto de estudo inicial para entender o fluxo produtivo é a chegada de tarefas em uma única estação de trabalho. Uma vez descrita a variabilidade de chegadas em uma estação e determinada como ela afeta a variabilidade das partidas para outra estação, a variabilidade do fluxo de toda a linha pode ser descrita (HOOP e SPEARMAN, 2008).

O primeiro termo que descreve as chegadas na estação de trabalho é a taxa de chegada, r_a , que é medida em tarefas por unidade de tempo. O tempo médio entre duas chegadas consecutivas, t_a , é dado por:

$$t_a = \frac{1}{r_a} \quad (4.18)$$

Por coerência, as unidades da taxa de chegadas deve ser a mesma que a da taxa de produção efetiva. Por exemplo, se consideramos a taxa de produção efetiva de uma estação em unidades de tarefas por hora, então a taxa de chegadas deve ser considerada em termos de unidades de tarefas por hora. Para que uma estação de trabalho seja capaz de processar todas as tarefas, é essencial que a taxa de produção efetiva, r_e , exceda a taxa de chegadas, isto é:

$$r_e > r_a \quad (4.19)$$

Assim como na variabilidade dos tempos de processamento, há também a variabilidade do tempo entre chegadas. Uma medida apropriada para a variabilidade dos tempos entre chegadas pode ser definida exatamente da mesma maneira que a variabilidade do tempo de processamento, por meio do coeficiente de variação. Nesse caso, o coeficiente de variação de chegadas, c_a , é dado por:

$$c_a = \frac{\sigma_a}{t_a} \quad (4.20)$$

Onde:

σ_a é o desvio padrão dos tempos entre chegadas;

t_a é o tempo médio entre chegadas.

Intuitivamente, um baixo coeficiente de variação indica chegadas regulares ou espaçadas, enquanto um alto coeficiente indica chegadas irregulares. O coeficiente de variação de chegadas, c_a juntamente com t_a , resumam os principais aspectos do processo de chegada em uma estação de trabalho.

O próximo passo é caracterizar as partidas de uma estação de trabalho para outra. Podem ser usadas medidas análogas as de chegadas para descrever o comportamento das partidas. Como, o tempo médio entre partidas, t_d , a taxa de partidas, $r_d = \frac{1}{t_d}$, e o coeficiente de variação de partidas, c_d . Em uma linha de produção, onde todas as partidas de uma estação i se tornam entradas para estação $i+1$, então:

$$t_a(i+1) = t_d(i) \quad (4.21)$$

Logo, por consequência:

$$r_a(i+1) = r_d(i) \quad (4.22)$$

Segundo Hopp e Spearman (2008) em uma linha de produção em série sem perdas de rendimento ou retrabalho, a taxa de chegadas, r_a , em toda a estação é igual ao *throughput* (TH). Os autores intitulam essa afirmação de lei da conservação de material:

Lei da Conservação de Material: Em sistemas estáveis, em longo prazo, a taxa de saída em um sistema deverá ser igual à taxa de entrada, subtraindo-se qualquer perda de rendimento, e adicionando-se qualquer produção de partes dentro do sistema.

Portanto, considerando a lei de conservação de material e a fórmula 4.22, pode-se concluir que:

$$r_a(i+1) = r_d(i) = TH(i) \quad (4.23)$$

Também se pode afirmar, segundo Hopp e Spearman (2008), que em uma linha em série onde as partidas de i se tornam chegadas em $i+1$, o coeficiente de partidas da estação i é a mesmo coeficiente de chegadas da estação $i+1$, logo podemos dizer que:

$$c_a(i+1) = c_d(i) \quad (4.24)$$

Essas relações são descritas graficamente na figura 4.1:

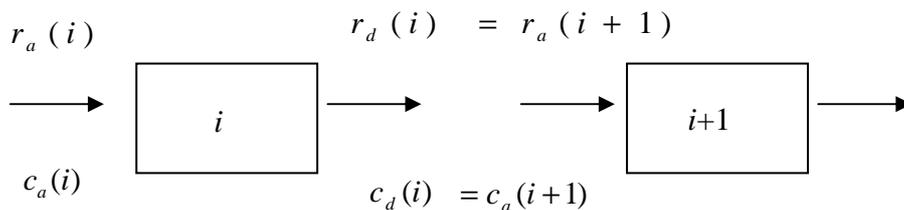


FIGURA 4.1: Fluxo produtivo em uma linha de produção

Fonte: AUTOR

Outra questão relacionada à variabilidade do fluxo é como caracterizar a variabilidade de partidas da estação em termos da variabilidade das chegadas e dos tempos de processamento. A contribuição relativa desses dois fatores para a variabilidade do fluxo produtivo depende da utilização da estação de trabalho. Como pode ser observada na fórmula 4.4 a utilização cresce tanto com a taxa de chegada como com o tempo de processamento efetivo. Obviamente o limite máximo de utilização é 100%, o que implica que o tempo de processamento efetivo deve satisfazer a seguinte condição:

$$t_e < \frac{n}{r_a} \quad (4.25)$$

Onde:

n é o número de máquinas na estação;

Se u está próximo de 1, então a estação está quase cheia. Sob essas condições, o tempo entre partidas de uma estação será essencialmente idêntico aos tempos de processamento. Logo, o coeficiente de variação de partida será igual ao coeficiente de variação do tempo de processamento ($c_d = c_e$). Já quando u é próximo de zero, a estação encontra-se pouco carregada. Assim, quando uma tarefa termina de ser processada na estação, esta terá que esperar muito tempo até outra tarefa chegar. Como o tempo de processamento é uma pequena fração do tempo entre partidas, o tempo entre as partidas será quase idêntico ao tempo entre chegadas. Portanto, nessas condições, o coeficiente de variação de partidas e o coeficiente de chegadas são iguais ($c_d = c_a$). Para casos intermediários, quando a utilização encontra-se entre 0 e 1, utiliza-se um método de interpolação simples, que faz uso dos coeficientes de variação de chegada e de partida:

$$c_d = \sqrt{u^2 c_e^2 + (1-u^2) c_a^2} \quad (4.26)$$

Quando há mais de uma máquina na estação, a maneira mais confiável de estimar c_d é por meio da seguinte equação:

$$c_d = \sqrt{1 + (1-u^2)(c_a^2 - 1) + \frac{u^2(c_e^2 - 1)}{\sqrt{n}}} \quad (4.27)$$

A variabilidade do fluxo produtivo, assim como a variabilidade do fluxo de processamento, pode variar bastante em situações práticas. Usando a mesma estrutura de classificação que é usado para a variabilidade dos tempos de processamento, podem-se classificar as chegadas de acordo com o coeficiente de variação c_a :

Baixa variabilidade	$c_a < 0,75$
Média variabilidade	$0,75 < c_a < 1,33$
Alta variabilidade	$c_a > 1,33$

As partidas podem ser classificadas da mesma maneira de acordo com o coeficiente de variação c_d .

4.4.3 O efeito da variabilidade no tempo de processamento e no fluxo produtivo nas medidas de desempenho chave da manufatura

A variabilidade no tempo de processamento e a variabilidade no fluxo produtivo constroem blocos para caracterizar os efeitos de variabilidade em toda a linha de produção. Hoop e Spearman (2008) enunciam como lei fundamental da teoria *Factory Physics*, a lei de variabilidade:

Lei da Variabilidade: O aumento da variabilidade sempre degrada o desempenho de um sistema de produção.

Este é um conceito extremamente forte, já que implica que uma alta variabilidade de qualquer tempo deve afetar uma medida de desempenho. Conseqüentemente, a redução da variabilidade é o centro para a melhoria do desempenho.

Um corolário importante derivado dessa lei diz respeito à importância da localização dessa variabilidade no fluxo produtivo:

Corolário (Localização da variabilidade): Em uma linha de produção onde as liberações são independentes, a variabilidade no início do roteiro produtivo aumenta o *lead time* mais que a variabilidade no final.

A implicação deste corolário é que o esforço para reduzir a variabilidade deve ser direcionado primeiramente na frente da linha, porque é lá onde elas trarão maior impacto para o sistema.

Hoop e Spearman (2008) fizeram uma avaliação do efeito dessas variabilidades nas medidas de desempenho chaves para linha, a saber, WIP, *lead time (TC)* e *throughput (TH)*. Para essa avaliação, foram observados que o tempo de processamento efetivo (incluindo *setups*, tempo de manutenção e outras paradas) corresponde somente a uma pequena fração de tempo (5 a 10%) do *lead time* total na planta. Segundo os autores, isso foi constatado através de inúmeros *surveys* publicados. A maior parte do tempo é gasta esperando por vários recursos, tais como estações de trabalho, dispositivos de transporte, operadores de máquinas, *etc.* A teoria *Factory Physics* busca entender as causas básicas de toda essa espera a partir de fórmulas advindas da teoria das filas.

A teoria das filas é a ciência da espera. Ela é uma teoria a respeito de permanecer parado nas filas ou linhas de produção. Já que as tarefas permanecem na linha de produção enquanto esperam para ser processadas, esperam para ser movidas, esperam por

outras partes, etc.; a teoria das filas é uma poderosa ferramenta para analisar os sistemas de manufatura.

A teoria das filas combina diversos componentes do processo de chegada, processo de produção e da fila. Por exemplo, as chegadas podem consistir de tarefas individuais ou lotes; as tarefas podem ser idênticas ou ter diferentes características; o tempo entre chegadas pode ser constante ou aleatório; as estações de trabalho podem ter uma única máquina ou várias máquinas em paralelo, as quais podem ter tempos de processamento constantes ou aleatórios; as filas podem ter espaço infinito ou limitado; e a disciplina das filas pode atender o primeiro a chegar, o último a chegar, e mais uma variedade de comportamentos.

Para utilização da teoria das filas faz-se necessária algumas caracterizações. A seguir são apresentadas as possíveis configurações de sistemas de filas aplicados na manufatura; algumas relações fundamentais necessárias para descrever o comportamento da fila; e em seguida o sistema de fila que é utilizado nessa dissertação é descrito em maiores detalhes.

4.4.3.1 Sistemas de filas

Os sistemas de filas são caracterizados por uma gama de hipóteses específicas, incluindo o tipo de distribuição dos tempos de chegadas e tempos de processamento, regras de liberação da tarefa, lotes de chegadas ou processamento, se há uma única classe de tarefas ou múltiplas, e muitas outras hipóteses. Uma classificação parcial dada para uma única estação com um único tipo de tarefa é dada pela notação de *Kendall* (HOPP e SPEARMAN, 2008), que caracteriza uma estação de fila por meio de 4 parâmetros:

$A/B/m/b$

Onde:

A: descreve a distribuição de tempos de chegadas;

B: descreve a distribuição dos tempos de processamento;

m : é o número de servidores;

b : é o número máximo de tarefas que pode esta no sistema.

Valores típicos de A e B são:

D: distribuição constante (determinística);

M: distribuição exponencial (markoviana)

G: distribuição completamente geral (por exemplo, distribuição normal);

Em muitas situações, o tamanho da fila não é explicitamente restrito, nesses casos indica-se simplesmente $A/B/m$. Por exemplo, a notação $M/G/3$ refere-se a um sistema de filas composto por uma estação de 3 máquinas com distribuição exponencial dos tempos entre chegadas e distribuição geral dos tempos de processamento e tamanho de *buffer* irrestrito.

4.4.3.2 Relações fundamentais

Antes de considerar sistemas de fila específicos, nota-se que alguns relacionamentos permanecem para todos os sistemas. O primeiro deles, considerando uma única estação, é a expressão para utilização, que já foi vista anteriormente na fórmula 4.4, e que para apenas uma estação pode ser resumida a:

$$u = r_a t_e = \frac{r_a}{r_e}$$

O segundo relacionamento fundamental acontece entre o tempo total gasto na estação, TC , e o tempo médio gasto na fila, TC_f e pode ser representado por:

$$TC = TC_f + t_e \quad (4.28)$$

O terceiro relacionamento é dado pela Lei de *Little*, a qual já foi explicada anteriormente. O relacionamento produzido pela lei entre WIP , TC e o TH foi mostrado anteriormente na fórmula 4.6:

$$WIP = TH \times TC$$

O quarto relacionamento é conseguido, aplicando-se a Lei de *Little* para uma fila sem perda de rendimentos:

$$WIP_f = r_a \times TC_f \quad (4.29)$$

4.4.3.3 Sistema de filas com tempo de processamento e tempo entre chegadas gerais e sem máquinas em paralelo (G/G/1)

Esse sistema de filas é o tipo de configuração que é usado no presente trabalho. As medidas de desempenho da fila G/G/1 podem ser estimadas por meio da aproximação de dois momentos, os quais fazem uso apenas da média e do desvio padrão (ou coeficiente de variação) das distribuições dos tempos de processamento e dos tempos entre chegadas. Os casos construídos através dessas aproximações são bem precisos e confiáveis na maioria das vezes (exceto para casos nos quais c_a e c_e são muito maiores que 1, ou quando u é maior que 0.95 ou menor que 0.1). Logo, por funcionar bem, esta aproximação é a base para diversos pacotes de análises de filas de manufatura disponíveis comercialmente.

O tempo de espera gasto na fila, TC_f , para o caso G/G/1 é dado pela equação de Kingman (HOOP e SPEARMAN, 2008):

$$TC_f(G/G/1) = \left(\frac{c_a^2 + c_e^2}{2} \right) \left(\frac{u}{1-u} \right) t_e \quad (4.30)$$

A equação de Kingman pode ser separada em três termos bem definidos: o termo de variabilidade V , o termo de utilização U , e o termo de tempo T :

$$TC_f(G/G/1) = \underbrace{\left(\frac{c_a^2 + c_e^2}{2} \right)}_V \underbrace{\left(\frac{u}{1-u} \right)}_U \underbrace{t_e}_T \quad (4.31)$$

Ou então:

$$TC_f = VUT \quad (4.32)$$

De acordo Hopp e Spearman (2008) a equação de Kingman sugere que há duas maneiras de controlar o tempo de fila: utilização e variabilidade. A utilização tem um efeito mais dramático. A razão para isso é que a equação de Kingman tem o termo $(1-u)$ no denominador, logo quando a utilização se aproxima de 1, o *lead time* tende ao infinito. Derivada dessa observação vem a lei da utilização de *Factory Physics*:

Lei da utilização: Se uma estação aumenta sua utilização sem fazer qualquer outra alteração, o WIP médio e o *lead time* irão crescer de maneira altamente não linear.

O termo altamente não linear gera um problema. Para ilustrar isso, Hoop e Spearman (2008) fornecem o seguinte exemplo: Supondo que $u=97\%$, e o *lead time* é 2 dias,

e os coeficiente de variação do tempo de processamento e do tempo entre chegadas é 1. Se a utilização é aumentada em 1%, ou seja, $u = 0,9797$, o *lead time* se torna 2,96 dias, um aumento 48%. Como observado, o *lead time* é muito sensível a variação da utilização. Isso é mais pronunciado quando a utilização chega perto de 1, como pode ser visto na figura 4.2.

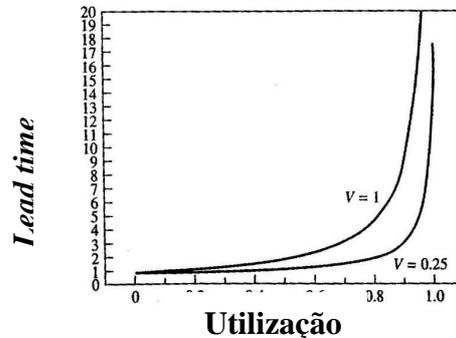


FIGURA 4.2: Relação entre o *lead time* e a utilização.

Fonte: HOOP E SPEARMAN (2008)

O gráfico mostra o relacionamento entre o *lead time* e a utilização para $V=1$ e $V=0,25$, onde $V = \left(\frac{c_a^2 + c_e^2}{2} \right)$. Ambas as curvas explodem quando u se aproxima de 1, mas a curva com uma variabilidade mais alta ($V=1$) explode mais rápido.

Duas observações técnicas são feitas. Primeiro, se $V=0$, então o *lead time* permanece constante para todos os níveis de utilização até 100% e então se torna infinito (inviável) quando a utilização é maior que 100%. Segundo, nenhuma estação real tem um espaço para construir uma fila infinita. Tempo, espaço e política servirão para conduzir o WIP em algum nível finito. Logo, a relação quantitativa da figura ainda é mantida, mas o limite do tamanho da fila fará impossível alcançar a parte da curva de alta utilização; alto *lead time*.

4.5 FACTORY PHYSICS NA GESTÃO DA PRODUÇÃO

Esta seção tem como objetivo fazer uma rápida revisão de literatura sobre a aplicação de *Factory Physics* na Gestão da Produção. Por ser uma teoria nova, criada no final dos anos 90 por Hopp e Spearman, existem poucos trabalhos a respeito da teoria e sua aplicação na Gestão da Produção, o que representa uma grande lacuna nessa área.

A revisão de literatura foi feita utilizando a base de dados COMPENDEX e buscando pela palavra *Factory Physics* em todo período de tempo contido na base. Foram encontrados 8 artigos relacionados, cujos resumos seguem abaixo.

1. ***An application of factory physics tools in a complex manufacturing environment:*** Nesse trabalho de Watkins e Kurz (2004) as ferramentas *Factory Physics* são apresentadas como estrutura para analisar e melhorar processos de manufatura. As leis de variabilidade, equação de *Kingman*, técnicas de benchmarking interno são explicados aos leitores.
2. ***How factory physics helps simulation:*** No trabalho de Standridge (2004) é ressaltada a descrição sistemática do comportamento de um sistema fornecida por *Factory Physics* e o suporte que suas leis dão para estudos de simulação. Esse trabalho examina a aplicação da teoria para atividades de simulação e traz exemplos da aplicação desses princípios em projetos industriais, projetos de mestrado e graduação.
3. ***Combining system dynamics and factory physics to study the effect of continuous improvement in operating curves:*** Godinho Filho e Uzsoy (2008b) utilizam um modelo *system dynamics* para estudar o efeito da melhoria contínua em curvas de operação em um sistema de máquina única e a teoria *Factory Physics* para descrever o desempenho de um sistema dentro de um período de tempo. Os resultados mostram a importância da redução de variabilidade e dos programas de melhoria contínua.
4. ***Combining System Dynamics And Factory Physics Approach To Study The Effect Of Continuous Improvement On Lot Size – Cycle Time Relationships:*** Godinho Filho e Uzsoy (2008a) comparam os efeitos de melhoria contínua em seis variáveis (variabilidade do processo, variabilidade de chegadas, taxa de defeitos, tempo entre falhas, tempo de reparo, tempo de *setup*) no relacionamento entre tamanho de lote e tempo de ciclo em um ambiente de máquina única. Para isso os autores utilizam *System Dynamics* para capturar a evolução do sistema ao longo do tempo e *Factory Physics* para representar o relacionamento entre as seis variáveis e o tempo de ciclo. Alguns dos resultados encontrados são: i) o efeito positivo de melhoria no tempo de *setup* e na taxa de defeitos aumenta quando o tamanho de lote é menor; ii) melhorias na variabilidade do processo alcançam melhores resultados quando os tamanhos de lotes são maiores.
5. ***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:*** Godinho Filho e Uzsoy (2009) apresentam um modelo quantitativo que utiliza *System Dynamics* e *Factory Physics* objetivando estudar os efeitos conjunto de seis programas de melhoria contínua e de

redução de tamanhos de lote nos níveis médios de estoque em processo (WIP) e utilização em um ambiente de máquina única. Os resultados dos experimentos realizados utilizando-se o modelo desenvolvido fornecem *insights* e subsídios que dão suporte a uma série de modernas ferramentas e filosofias de gestão da manufatura tais como Seis Sigma, SMED, entre outros.

6. ***Applied factory physics study on semiconductor assembly and test manufacturing:*** Li et al. (2005) expandem os princípios de *Factory Physics* e desenvolvem um método chamado O_L graph, que integra a lei de *Little* e a curva de operação para quantificar a interdependência de fatores operacionais como tempo de ciclo, WIP, *throughput*, OEE, *etc.* Esse método foi implementado na Intel Shangai em uma linha de montagem de chips e operações de teste para identificar oportunidades de melhoria. O tempo de ciclo e o nível de WIP têm uma redução de 10%.
7. ***A course in manufacturing systems with simulation:*** Kline (2005) utiliza a teoria *Factory Physics* e o *software* Promodel para montar um curso para estudantes. Esse curso fornece perspectivas do processo de produção e também de soluções sobre parâmetros de desempenho de produção.
8. ***Cycle time reduction in assembly and test manufacturing factories: A KPI driven methodology:*** Nesse trabalho Zheng et al. (2008) exploram uma maneira sistemática para estruturar o tempo de ciclo e indicadores chaves de desempenho utilizando conceitos de *Factory Physics*. Os autores expandem a discussão para alguns métodos de controle e melhoria como CONWIP e *Value Stream Mapping* (VSM).

4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A TEORIA *FACTORY PHYSICS*.

A teoria *Factory Physics* por meio das suas fórmulas e da sua visão científica a respeito do chão de fábrica visa contribuir para uma melhor gestão da manufatura. A teoria busca caracteriza os principais relacionamentos entre as medidas de desempenho chaves de um chão de fábrica, os efeitos nocivos da variabilidade em determinadas variáveis, o comportamento de sistemas de manufatura sujeito a filas, além de desmistificar algumas relações antes tratadas pelos gestores com base puramente na intuição. É ainda pouco utilizado, o que constitui uma lacuna a ser preenchida e uma oportunidade para entender o comportamento sistêmico e as relações existentes em um chão de fábrica.

CAPÍTULO 5: O MODELO PROPOSTO NESTE TRABALHO

O capítulo 5 tem como objetivo descrever as principais estruturas e elementos presentes no modelo desenvolvido por Godinho Filho e Uzsoy (2009) e do modelo desenvolvido neste trabalho. A seção 5.1 mostra as características presentes nas teorias *System Dynamics* e *Factory Physics*, que possibilitaram a utilização delas para a construção do modelo, bem como permitiram a combinação dessas teorias de maneira híbrida.

A seção 5.2 explica as etapas do processo de modelagem, o modelo desenvolvido por Godinho Filho e Uzsoy (2009) e explicita as considerações e condições utilizadas pelos autores para a construção do modelo. Esta seção também mostra como o mecanismo de melhoria contínua foi modelado, permitindo a propagação dos seus efeitos ao longo do tempo.

A seção 5.3 mostra o processo de modelagem feito nesse trabalho e o modelo desenvolvido, ou seja, como foi feita a expansão do modelo desenvolvido por Godinho Filho e Uzsoy (2009) com uma estação de trabalho para cinco estações e os novos parâmetros inseridos para que a caracterização do fluxo produtivo desse novo sistema de manufatura pudesse ser feito. A seção 5.4 faz a verificação do modelo proposto neste trabalho a partir de resultados obtidos por Godinho Filho e Uzsoy (2009). As fórmulas utilizadas no modelo são todas retiradas da teoria *Factory Physics* (Hopp e Spearman, 2008) e foram previamente apresentadas no capítulo 4, porém essas fórmulas são novamente mostradas ao longo da descrição do modelo para evitar que o leitor tenha necessidade de consultar o capítulo anterior para visualizá-las, facilitando, assim, a sua compreensão. A seção 5.4 mostra um sumário das diferenças entre o modelo desenvolvido por Godinho Filho e Uzsoy (2009) e o modelo desenvolvido neste trabalho.

5.1 A COMBINAÇÃO DAS TEORIAS *SYSTEM DYNAMICS-FACTORY PHYSICS*

Para Standridge (2004), a teoria *Factory Physics* fornece uma descrição sistemática do comportamento de um sistema por meio de leis, as quais podem fornecer uma importante ajuda no desempenho de estudos de simulação. Segundo o autor, essas leis ajudam a decidir quais medidas de desempenho coletar, a interpretar os resultados de simulação e a

identificar as propriedades dos sistemas que podem ser importantes para incluir nos modelos. Ainda, segundo Standrige (2004) cada uma das leis *Factory Physics* tem se mostrado útil em conduzir projetos de simulação, impactando desde a seleção das medidas de desempenho a serem incluídas no escopo dos modelos até a sua verificação e validação.

Para Godinho Filho e Uzsoy (2009), a utilização da teoria *Factory Physics* em um modelo de simulação de *System Dynamics* pode parecer, em uma primeira análise, difícil de ser feita. Isso acontece, pois, a teoria *Factory Physics* é baseada em uma análise do sistema de produção no longo prazo, após este ter atingido o chamado estado de equilíbrio (na linguagem da Teoria de Filas), enquanto a teoria *System Dynamics* enfatiza o comportamento dinâmico de sistemas complexos que não estão necessariamente no estado de equilíbrio. Entretanto, segundo os autores, as equações mostradas na teoria *Factory Physics* são únicas em fornecer uma modelagem matemática sistêmica para o comportamento do sistema de produção. Essa modelagem consegue medir o impacto de valores médios e desvios padrões de variáveis chave do sistema de produção (tais como tempos de *setup*, tempo de reparo, taxa de defeito, etc.) em medidas de desempenho do sistema, tais como WIP, tempo de ciclo, utilização.

Para que ambos as teorias *Factory Physics* e SD pudessem ser utilizados conjuntamente no modelo, Godinho Filho e Uzsoy (2009) assumem que os incrementos de tempo (*Time Step*) que formam a base do modelo de SD desenvolvido são longos, correspondendo a períodos de três meses. Esta suposição é razoável, uma vez que geralmente demora algum tempo para que a oportunidade de melhoria seja identificada, implementada e os resultados alcançados. Também é assumido que, dentro de cada intervalo de tempo, o sistema encontra-se em equilíbrio; dessa forma, as equações de *Factory Physics* possam ser utilizadas. Esta suposição de longos períodos de tempo também permite que o comportamento transiente do sistema nas fronteiras entre os períodos seja desconsiderado.

5.2 O MODELO DESENVOLVIDO POR GODINHO FILHO E UZSOY (2009)

5.2.1 Etapas realizadas na modelagem do trabalho desenvolvido por Godinho Filho e Uzoy(2009)

Godinho Filho e Uzsoy (2009) utilizaram as seguintes etapas para o desenvolvimento do modelo apresentado nesse trabalho, baseados nas etapas de processo de modelagem definidas por Sterman (2000) e apresentadas na seção 3.5 do capítulo 3:

1. **Articulação do problema:** Nessa etapa decidiu-se que o sistema simulado seria um ambiente de chão de fábrica de máquina única e decidiram-se quais variáveis fariam parte desse sistema, o horizonte de tempo simulado e a variável que deveria ser referência para análise (*lead time*).
2. **Formulação de uma hipótese dinâmica:** Nessa etapa foram formuladas as hipóteses iniciais que explique o comportamento do sistema, ou seja, a importância que uma melhoria contínua em cada uma das variáveis tem na redução do *lead time* do sistema.
3. **Formulação de um modelo de simulação:** Nessa etapa foram especificadas as estruturas que compõem o sistema, os valores dos parâmetros e as condições iniciais foram estimadas bem como os relacionamentos entre variáveis por meio das fórmulas de *Factory Physics*.
4. **Teste:** O modelo desenvolvido foi testado para valores representativos da realidade e seus resultados foram avaliados.

5.2.2 O modelo

O modelo desenvolvido por Godinho Filho e Uzsoy (2009) considera um sistema de manufatura modelado como um servidor único, ou seja, uma estação composta por apenas uma máquina. Os tempos de chegada e de processamento desse sistema de manufatura apresentam comportamento genérico. Podendo, assim, ser representados por uma fila do tipo *G/G/1*. O modelo foi construído utilizando as abordagens SD e *Factory Physics*, tendo como ambiente de simulação o *software Vensim*.

O sistema em estudo é simulado por um período equivalente a 10 anos (19200 horas). O período de tempo de incremento no modelo *-Time Step-* é de 3 meses (4800 horas, já que considera-se que cada mês contém 160 horas). Os valores utilizados para os demais variáveis foram escolhidos, segundo Godinho Filho e Uzsoy (2009), com base em dados reais de indústrias já estudadas pelos autores e existentes na literatura. Logo, esses valores e seus resultados guardam forte relação com a situação prática.

O modelo considera um ambiente de chão de fábrica com uma estação de trabalho composta de 1 máquina, a qual recebe tarefas a uma determinada taxa de chegadas e as processa a uma mesma taxa de *throughput*. A taxa média de chegadas de ordens à estação, considerando que o sistema está em equilíbrio, deve ser igual à demanda média para evitar a acumulação de tarefas na fila. Logo a taxa de chegadas, r_a , pode ser representada por:

$$r_a = \frac{D}{LH} \quad (5.1)$$

Onde :

D é a demanda média anual (Considerada de 11520 peças nesse trabalho);

L é o tamanho de lote (Considerada de 200 peças);

H é o número de horas trabalhadas no ano (1920 horas).

A taxa de produção da estação de trabalho, r_e , é dada, segundo Hopp e Spearman (2008), por:

$$r_e = \frac{1}{L \times t_e} \quad (5.2)$$

Onde:

L é o tamanho de lote;

t_e é o tempo de processamento efetivo global.

O tempo de processamento efetivo global, t_e , é construído a partir do tempo natural de processamento por meio da adição de três efeitos (GODINHO FILHO e UZSOY, 2009):

- a) efeito de paradas preemptivas (neste caso, falhas de máquinas);
- b) efeito de paradas não preemptivas (nesse caso, tempos de *setup*);
- c) efeito de problemas de qualidade (taxa de defeitos).

O tempo natural de processamento, c_0 , tem seu valor determinado como 6 minutos e a variância associada a esse tempo, σ_0^2 , é de 36 minutos. Logo o coeficiente de variação do tempo natural de processamento, o qual é dado pela fórmula 5.3 tem valor 1:

$$c_0 = \frac{\sqrt{\sigma_0^2}}{t_0} \quad (5.3)$$

Onde:

t_0 é o tempo natural de processamento;

σ_0^2 é a variância do tempo natural de processamento.

O tempo de processamento efetivo considerando além do tempo natural de processamento, o efeito dessas paradas preemptivas (falhas de máquinas) é denotado por t_e^f , e pode ser representado por:

$$t_e^f = \frac{t_0}{A} \quad (5.4)$$

Onde:

A é a disponibilidade da máquina;

A variância e o coeficiente de variação de t_e^f são respectivamente:

$$(\sigma_e^f)^2 = \left(\frac{\sigma_0}{A}\right)^2 + \frac{(m_r^2 + \sigma_r^2)(1-A)t_0}{Am_r} \quad (5.5)$$

$$(c_e^f) = \sqrt{c_0^2 + (1 + c_r^2)A(1-A)\frac{m_r}{t_0}} \quad (5.6)$$

Onde:

σ_r^2 é a variância no tempo de reparo (Considerado como 280400 minutos);

m_r é tempo médio de reparo (Considerado como 480 minutos ou 1 dia);

c_r é o coeficiente de variação do tempo de reparo (Considerado como 1).

A disponibilidade da estação de trabalho, denotada por A , e utilizada nas equações 5.3 a 5.5, é representada por:

$$A = \frac{mf}{mf + mr} \quad (5.7)$$

Onde:

mf é o tempo médio entre falhas (Considerado como 9600 minutos ou 20 dias)

O tempo de processamento efetivo incorporando, além do o tempo natural de processamento, o efeito de paradas preemptivas e de paradas não preemptivas, é denotado agora por t_e^o e pode ser apresentado por:

$$t_e^o = t_e^f + \frac{t_s}{N_s} \quad (5.8)$$

Onde:

t_s é o tempo médio de duração dos *setups* (Considerado como 180 minutos ou 3 horas);

N_s é o número médio de peças processadas entre *setups* (Considerado como 200- igual ao tamanho de um lote);

A variância de t_e^o é dado por:

$$(\sigma_e^o)^2 = (\sigma_e^f)^2 + \frac{\sigma_s^2}{N_s} + \frac{N_s - 1}{N_s^2} t_s^2 \quad (5.9)$$

Onde:

σ_s^2 é a variância do tempo de *setup* (Considerada como 32400 minutos)

E o coeficiente de variação, c_e^o , é dado por:

$$c_e^o = \sqrt{\frac{(\sigma_e^o)^2}{(t_e^o)^2}} \quad (5.10)$$

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, não preemptivas e de problemas de qualidade é denotado por

$$t_e = \frac{\frac{t_0}{A} + \frac{t_s}{N_s}}{1 - p}, \quad (5.11)$$

Onde:

p é a taxa de itens defeituosos (Considerado como 5%)

A variância para o tempo médio de processamento efetivo é dado por:

$$\sigma_e^2 = \frac{(\sigma_e^o)^2}{1-p} + \frac{p(t_e^o)^2}{(1-p)^2} \quad (5.12)$$

E o coeficiente de variação, c_e , é representado por:

$$c_e = \sqrt{\left(\frac{\sigma_e}{t_e}\right)^2}. \quad (5.13)$$

A utilização da estação de trabalho considerada no modelo é formulada a partir da equação *Factory Physics* (Hopp e Spearman, 2008):

$$u = \frac{r_a}{r_e} \quad (5.14)$$

Onde:

r_a é a taxa de chegadas de ordens na estação;

r_e É a taxa de produção efetiva da estação.

Logo a utilização da estação considerada pode ser representada por:

$$u = \frac{D}{LH} \times Lt_e = \frac{Dt_e}{H} \quad (5.15)$$

Outra medida de desempenho de grande importância no estudo dos ambientes de manufatura e que se encontra representado no modelo desenvolvido por Godinho Filho e Uzsoy (2009) é o *lead time* médio, TC :

$$TC = TC_f + t_e \quad (5.16)$$

Onde:

TC_f é o tempo médio de fila

Considerando-se que o tempo médio de fila, TC_f , para um sistema do tipo G/G/1 pode ser representado por meio da equação de Kingman:

$$TC_f (G/G/1) = \left(\frac{c_a^2 + c_e^2}{2}\right) \left(\frac{u}{1-u}\right) t_e \quad (5.17)$$

E que o tempo médio de processamento de um lote de tamanho L é dado por, Lt_e , o *lead time* médio da estação de trabalho em estudo pode ser calculado por:

$$TC = \left(\frac{c_a^2 + c_e^2}{2}\right) \left(\frac{u}{1-u}\right) Lt_e + Lt_e \quad (5.18)$$

Outra medida de desempenho avaliada no modelo é o *WIP*, dada pela lei de *Little*. Assumindo-se que o *throughput*, TH , é igual a taxa de chegadas de tarefas em uma estação de trabalho, r_a , o *WIP* também pode ser representado por:

$$WIP = r_a \times TC \times L \quad (5.19)$$

Onde:

TC é o *lead time* médio da estação

A figura 5.1 mostra a parte principal do modelo desenvolvido por Godinho Filho e Uzsoy (2009) com todos os relacionamentos entre as diversas variáveis e parâmetros do chão de fábrica descritos anteriormente. Os números presentes na figura 1 indicam as fórmulas utilizadas nesse capítulo para representar as variáveis e os parâmetros do chão de fábrica correspondentes.

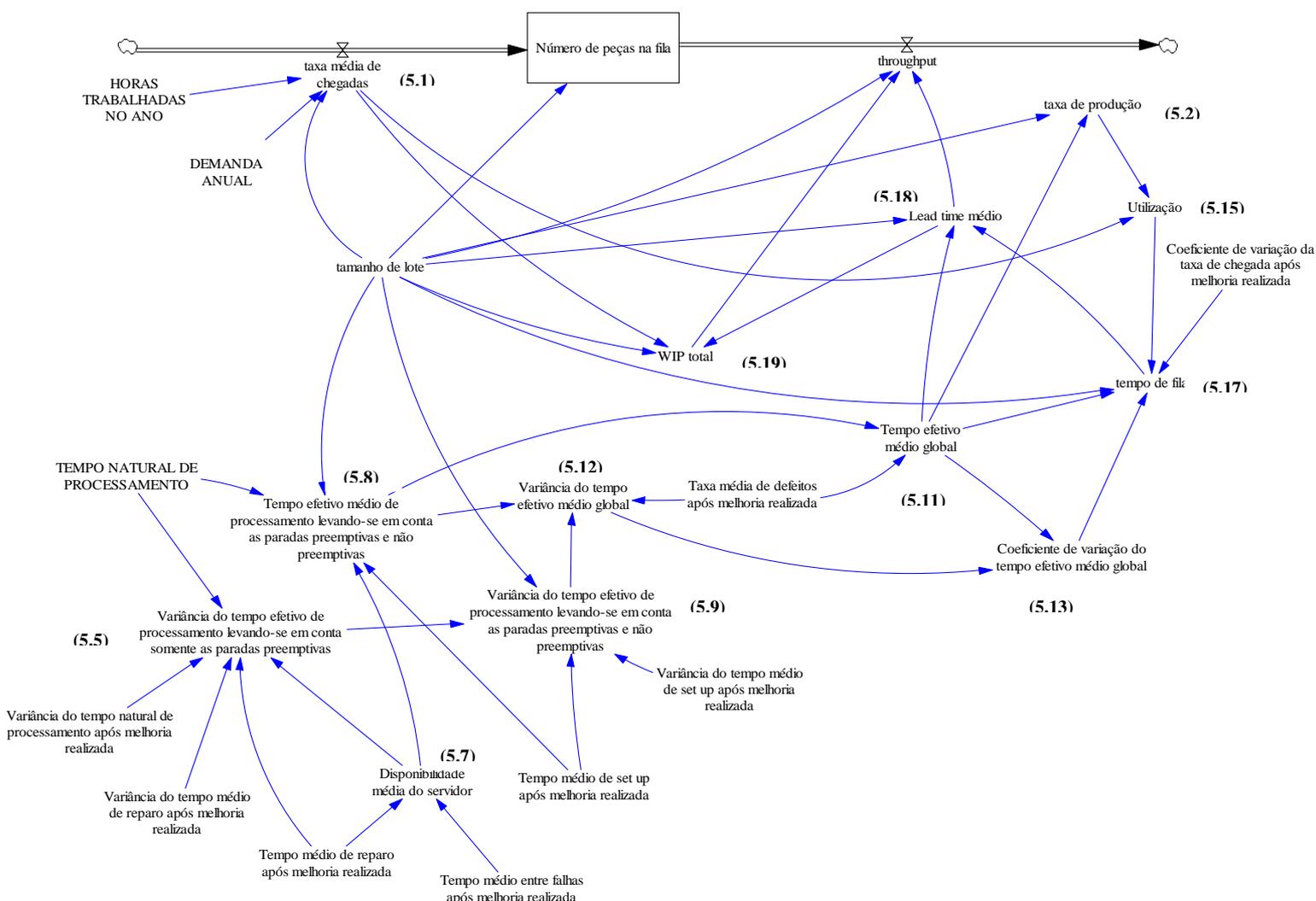


FIGURA 5.1: Parte principal do modelo desenvolvido por Godinho Filho e Uzsoy (2009).

Fonte: GODINHO FILHO E UZSOY (2009)

O modelo também estuda o efeito de ações de melhoria contínua em seis variáveis do chão de fábrica:

- 1) Tempo médio de *setup*;
- 2) Tempo médio entre duas falhas consecutivas;
- 3) Tempo médio de reparo;
- 4) Taxa média de defeitos;
- 5) Variabilidade do tempo entre chegadas;
- 6) Variabilidade do tempo de processamento efetivo global (a qual os autores consideram como resultado da variabilidade do tempo médio de *setup*, variabilidade do tempo médio de reparo e variabilidade do tempo natural de processamento).

É importante deixar claro que quando se fala em alteração na variabilidade de alguma das variáveis do modelo, os autores fazem referência à alteração no coeficiente de variação dessa variável, ou seja, o termo utilizado para representar a variabilidade nesse modelo é o coeficiente de variação.

Para analisar o efeito dessas ações de melhoria contínua é necessário um mecanismo que modele a melhoria contínua. Na literatura, grande parte dos trabalhos utiliza a distribuição exponencial para modelar o processo de melhoria (por exemplo, HWANG et al, 1993 e BILLINGTON, 2003). Diante disso, Godinho Filho e Uzsoy (2009) utilizaram um modelo de melhoria exponencial. Essa melhoria exponencial pode ser representada da seguinte maneira:

$$A(t) = (A_0 - G)e^{t/\tau} \quad (5.20)$$

Onde:

$A(t)$ é o valor da variável que está sob ação da melhoria contínua em um dado tempo;

A_0 é o valor inicial da variável;

G é o nível mínimo que a variável pode ser reduzida;

τ é o tempo de ajuste (Dado como 1.43 anos ou 2743 horas). O tempo de ajuste é o tempo que demora até a melhoria acontecer, ou seja, até o *gap* ($A_0 - G$) ser corrigido.

Segundo Sterman (2000), o valor de τ é estabelecido baseando-se em uma regra simples (chamada regra dos 70): 70% do valor de τ é igual à meia-vida do *gap*. Por exemplo, caso tenha-se um *gap* de 200 unidades e deseja-se que no instante 14 semanas esse

gap seja reduzido a 50% (100 unidades), deve-se estabelecer o valor de τ como sendo igual a 20 semanas (70% de 20 semanas igual a meia-vida do decaimento exponencial).

A Figura 5.2 mostra como foi modelada a estrutura de melhoria contínua para o tempo médio de *setup*.

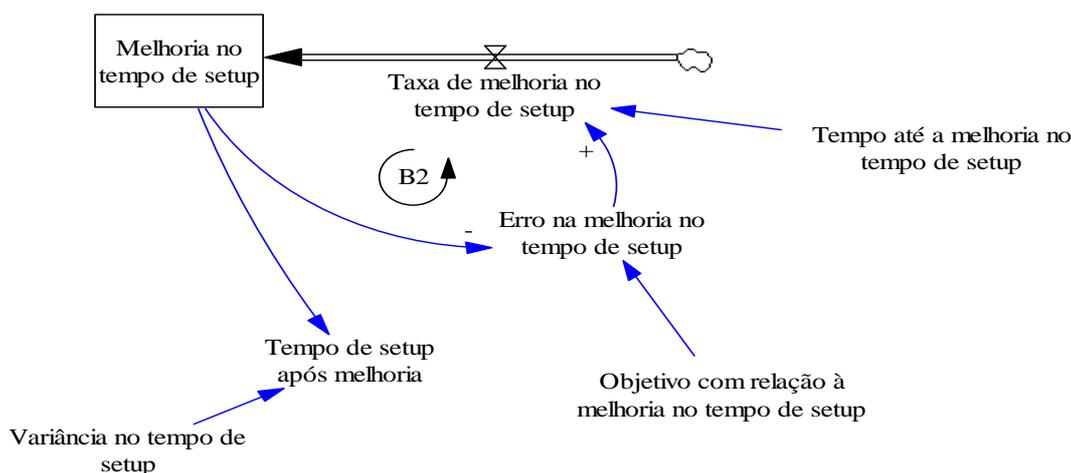


FIGURA 5.2. Estrutura de melhoria para o tempo médio de *setup*.

Fonte: GODINHO FILHO E UZSOY (2009)

O erro na melhoria no tempo de *setup* é dado pela diferença entre a melhoria e o objetivo com relação à melhoria no tempo de *setup*. E a taxa de melhoria é dada pelo quociente entre o erro na melhoria e o tempo até que a melhoria no tempo de *setup* seja percebida no sistema.

Como pode ser visto, a estrutura de melhoria contínua mostrada na figura 2 é ligada na variável tempo de *setup* após melhoria. Essa realimentação entre a estrutura de melhoria contínua e a variável a qual ela influencia (nesse caso o tempo de *setup*) caracteriza a estrutura de *feedback* típica de um modelo SD. É por meio desse *feedback* entre a estrutura de melhoria contínua e o restante do sistema que é possível visualizar os efeitos da melhoria contínua no ambiente de manufatura modelado.

Pode-se observar através da figura 5.2 que o *feedback* existente nessa estrutura é um *feedback* negativo gerado a partir de um *gap* existente entre o tempo de *setup* que se deseja obter (variável objetivo com relação à melhoria no tempo médio de *setup*) e o tempo de *setup* atual (variável melhoria no tempo médio de *setup*). Esse *feedback* negativo dá origem a um *loop* de equilíbrio: Quanto maior o *gap* existente, maior a taxa de melhoria no tempo

médio de *setup* e melhor (menor) o tempo médio de *setup* atual. Quanto melhor o tempo médio de *setup* atual, menor o *gap*, fechando assim o *loop*.

Outras sete estruturas similares à mostrada na figura 5.2, contendo *feedbacks* negativos, são utilizadas no modelo para modelar as melhorias contínuas nas seguintes variáveis: variabilidade da taxa de chegada das ordens no sistema, variabilidade natural do processo, variabilidade do tempo de reparo das máquinas, variabilidade do tempo de *setup*, taxa média de defeitos do processo, tempo médio entre falhas de máquina e tempo médio de reparo da máquina. Estas estruturas são ligadas, respectivamente, às seguintes variáveis mostradas na figura 1: coeficiente de variação da taxa de chegada após melhoria realizada, variância do tempo natural de processamento após melhoria realizada, variância do tempo médio de reparo após melhoria realizada, variância do tempo médio de *setup* após melhoria realizada, taxa média de defeitos após melhoria realizada, tempo médio entre falhas após melhoria realizada e tempo médio de reparo após melhoria realizada.

Portanto, a junção da parte principal do modelo representada pela figura 1 e das oito estruturas de melhoria contínua (exemplificada pela figura 2) formam o modelo desenvolvido por Godinho Filho e Uzsoy (2009).

De acordo Godinho Filho e Uzsoy (2009), em cada período, os novos valores das variáveis são calculados baseados nas melhorias implementadas no período anterior e as equações da *Factory Physics* são usadas para propagar os efeitos das melhorias nas medidas de desempenho de interesse para o sistema. Isso acontece por meio dos *feedbacks* entre as estruturas de melhorias e as variáveis em questão.

Segundo os autores, o modelo desenvolvido também assume um comportamento determinístico das variáveis, seguindo a sugestão de Sterman (2000), o qual cita que uma abordagem determinística é suficiente para capturar as principais relações de interesse em um estudo de SD. Ainda de acordo com os autores, apesar dessa suposição, os efeitos da aleatoriedade no sistema são capturados pelas variâncias consideradas, as quais estão incluídas nas equações da teoria *Factory Physics*.

Alguns dos valores de variáveis e parâmetros utilizados no modelo proposto por Godinho Filho e Uzsoy (2009) são determinados *a priori*, os principais são apresentados na tabela 5.1.

Variáveis e Parâmetros	Valores
Demanda média	11520 peças/ano
Tempo trabalhado	1920 horas/ano
Tempo médio entre falhas	9600 minutos (1 mês)
Tempo médio de reparo	480 minutos (1 dia)
Tempo médio de <i>setup</i>	180 minutos
Taxa média de defeitos	5%
Tempo natural de processamento	6 minutos
Coefficiente de variação do tempo de <i>setup</i>	1 (Variabilidade moderada)
Coefficiente de variação do tempo de reparo	1 (Variabilidade moderada)
Coefficiente de variação do tempo natural de processamento	1 (Variabilidade moderada)
Coefficiente de variação de chegadas	1 (Variabilidade moderada)

TABELA 5.1: Valores utilizados no modelo desenvolvido por Godinho Filho e Uzsoy (2009)

Fonte: AUTOR

5.3 O MODELO PROPOSTO NESTE TRABALHO

5.3.1 Etapas realizadas na modelagem do trabalho desenvolvido

Assim como na modelagem realizada no trabalho desenvolvido por Godinho Filho e Uzsoy (2009), foram utilizadas as seguintes etapas de modelagem no desenvolvimento do modelo proposto nesse trabalho:

- 1 Articulação do problema:** Nessa etapa decidiu-se que o sistema simulado seria uma expansão do modelo desenvolvido por Godinho Filho e Uzsoy (2009) para 5 estações de trabalho com a inclusão de variáveis que fazem parte do fluxo produtivo. As variáveis que fazem parte do sistema de Godinho Filho e Uzsoy (2009), o horizonte de tempo simulado e a variável referência para análise (*lead time*) continuam iguais no modelo proposto nesse trabalho.
- 2 Formulação de uma hipótese dinâmica:** Nessa etapa foram formuladas as hipóteses iniciais que explique o comportamento do sistema baseada nos resultados encontrados por Godinho Filho e Uzsoy (2009). Essas hipóteses deram origem as duas questões de pesquisa proposta nesse trabalho e apresentadas na seção 1.2 do capítulo 1.

- 3 Formulação de um modelo de simulação:** Nessa etapa a expansão para cinco estações de trabalho foi feita assim como a inclusão de outras variáveis que fazem parte do fluxo produtivo do sistema.
- 4 Teste:** A primeira parte do teste é a verificação se o modelo expandido nesse trabalho obedece às mesmas especificações (relacionamentos entre as variáveis) que o modelo desenvolvido por Godinho Filho e Uzsoy (2009). A outra parte do teste é feita variando-se o valor das variáveis do chão de fábrica estudadas a fim de se observar o efeito de cada uma delas na variável referência do sistema (*lead time*).
- 5 Projeto de política e avaliação:** Nessa etapa os resultados encontrados nos diversos cenários simulados são avaliados.

5.3.2 O modelo proposto nesse trabalho

No presente trabalho o modelo desenvolvido por Godinho Filho e Uzsoy (2009) foi expandido para cinco estações de trabalho. Os tempos de chegadas de tarefas às estações de trabalho e os tempos de processamento são gerais e cada uma das estações de trabalho é constituída de apenas 1 máquina (um único servidor), logo, o sistema modelado pode continuar a ser representado por filas do tipo $G/G/1$. A figura 5.3 mostra o esquema do modelo desenvolvido nesse trabalho.

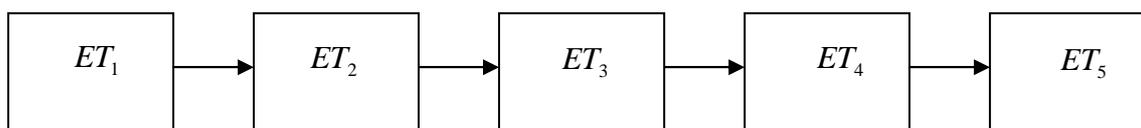
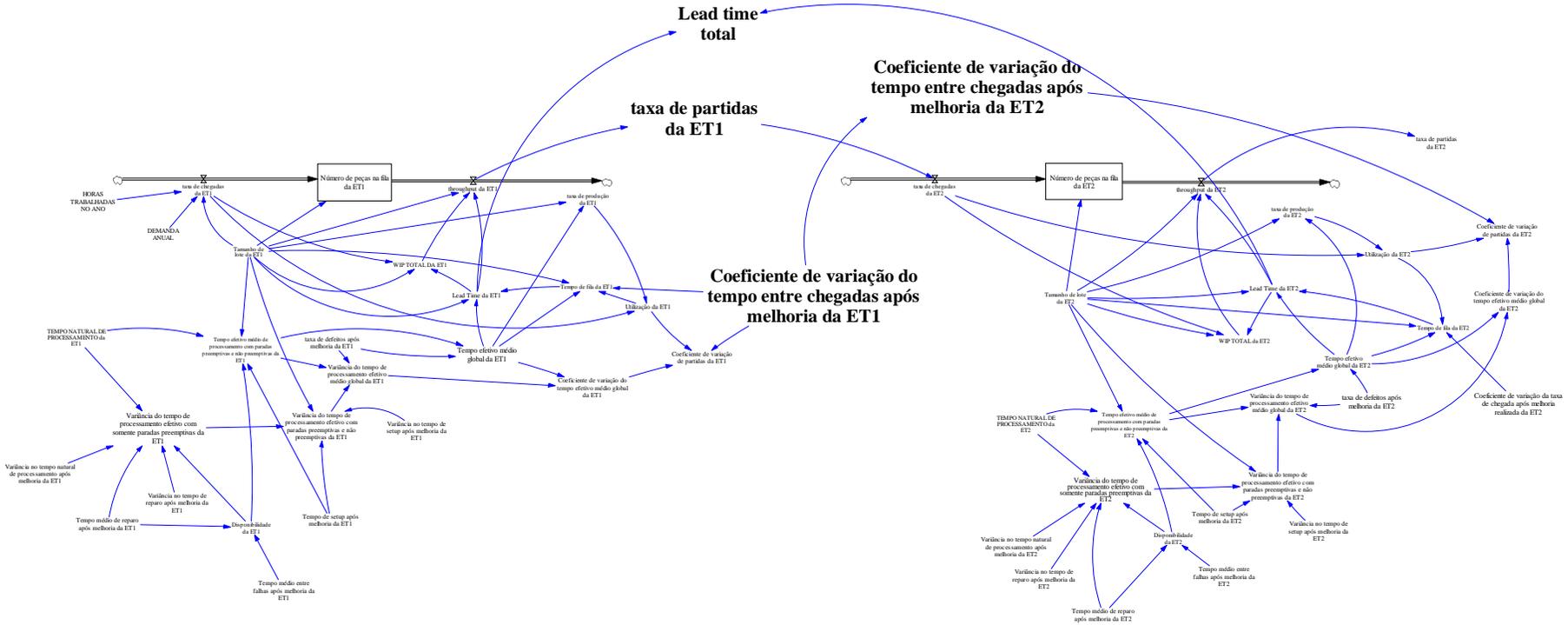


FIGURA 5.3: Ilustração esquemática do modelo desenvolvido neste trabalho.

Fonte: AUTOR

A figura 5.4 mostra uma parte do modelo, com as estações de trabalho 1 e 2 e todas as variáveis que compõem o relacionamento entre essas duas estações. Essa estrutura mostrada na figura 5.4 se repete para a terceira, quarta e quinta estação de trabalho. O modelo não é mostrado em sua forma integral por ser muito grande.

FIGURA 5.4: Parte principal do modelo desenvolvido neste trabalho



As tarefas chegam a estação de trabalho (i) a uma taxa r_a determinada pela demanda anual média e representada pela fórmula 5.1. Porém, agora, a estação de trabalho (i) apresenta uma taxa de partida das tarefas, r_d , para a estação seguinte ($i+1$). Essa taxa de partidas da estação (i) é igual ao *throughput* (TH) da estação i .

O coeficiente de variação de partidas, c_d , da estação i é representada pela fórmula

$$c_d = \sqrt{u^2 c_e^2 + (1-u^2) c_a^2} \quad (5.21)$$

Onde:

u é utilização da estação;

c_e é o coeficiente de variação do tempo de processamento efetivo global da estação (i);

c_a é o coeficiente de variação do tempo entre chegadas da estação (i).

Na estação de trabalho ($i+1$), a taxa de chegadas deve ser igual à taxa com que as tarefas partem da estação anterior (i), logo:

$$r_a(i+1) = r_d(i). \quad (5.22)$$

Do mesmo modo, o coeficiente de variação de chegada das tarefas estação ($i+1$) deve ser igual ao coeficiente de variação de partidas da estação (i), portanto:

$$c_a(i+1) = c_d(i) \quad (5.23)$$

Outra variável de fundamental importância no modelo proposto neste trabalho é o *lead time* total do fluxo produtivo da linha. Essa variável representa o *lead time* de todas as estações presentes no modelo. Segundo Hopp e Spearman (2009), o *lead time* total de uma linha é igual à soma dos *lead times* das estações individuais menos as sobreposições de 2 ou mais estações. Nesse trabalho supõem-se que não há sobreposição de nenhuma das estações, logo o *lead time* total da linha produtiva é dada pela soma dos *lead times* individuais de cada estação:

$$TC_{total} = TC_{ET_1} + TC_{ET_2} + \dots + TC_{ET_N} \quad (5.24)$$

Onde:

N é o número de estações de trabalho presente na linha de produção.

Todos os parâmetros e variáveis presentes no modelo com uma estação de trabalho desenvolvido por Godinho Filho e Uzsoy (2009), encontram-se presentes em todas as estações consideradas no modelo expandido. A única exceção é a demanda anual e o número de horas anuais trabalhadas, presentes apenas na primeira estação de trabalho, pois servem para determinar a taxa de chegadas apenas dessa primeira estação, sendo que a taxa de chegada das demais estações é determinada pela taxa de saída da estação anterior, como foi explicado anteriormente.

As 8 estruturas de melhoria contínuas presentes no modelo de máquina única desenvolvido por Godinho Filho e Uzsoy (2009), também estão presentes em cada uma das 5 estações do modelo desenvolvido neste trabalho.

5.4 VERIFICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO NESTE TRABALHO

Nesta seção, o modelo desenvolvido neste trabalho é verificado em relação aos resultados do modelo de Godinho Filho e Uzsoy (2009). Segundo Askin e Strandidge (1993), a verificação assegura que o modelo especificado no papel e o implementado no computador são equivalentes. Ou seja, a verificação certificará que as especificações (nesse caso, relacionamentos entre as variáveis descritas no modelo desenvolvido por Godinho Filho e Uzsoy (2009) e nas equações *Factory Physics* (Hopp e Spearman (2008))) do modelo foram transcritos de maneira adequada para a linguagem de simulação.

Para isso, o modelo proposto neste trabalho é simulado obedecendo os valores utilizados por Godinho Filho e Uzsoy (2009) em seus estudos, os quais são apresentados na tabela 5.1 e nas fórmulas da seção 5.2 desse capítulo.

A verificação é feita seguindo os seguintes passos: Primeiramente, faz-se a verificação de cada uma das estações de trabalho com os mesmos dados utilizados por Godinho Filho e Uzsoy (2009); em seguida, a verificação é feita para o fluxo de toda a linha de produção, a fim de verificar o comportamento dela como um todo.

5.4.1 Verificação para cada uma das estações de trabalho

As condições ,em que a verificação de cada um das estações é feita, são as mesmas utilizadas nas análises feitas por Godinho Filho e Uzsoy (2009) e apresentadas na tabela 5.1. A partir disso, foram feitas simulações para cada uma das 5 estações. Nesta primeira parte da verificação foi avaliado o comportamento individual de cada estação e comparado ao comportamento do modelo desenvolvido por Godinho Filho e Uzsoy (2009).

A primeira estação de trabalho desse novo modelo possui todos os parâmetros e variáveis com valores iguais à estação do modelo de Godinho Filho e Uzsoy (2009), logo nenhuma alteração foi feita. Para as demais estações (2, 3, 4 e 5), as quais possuem taxa de chegadas e coeficiente de chegada de tarefas determinadas pelas estações anteriores, foram realizadas algumas alterações. Essas alterações consistiram em fazer a taxa de chegadas, assim como no modelo desenvolvido por Godinho Filho e Uzsoy (2009), ser influenciada apenas pela demanda anual e considerar o coeficiente de chegadas como um valor determinado previamente e não mais como resultado do coeficiente de partidas da estação anterior.

Feitas essas considerações, as simulações para verificação do modelo foram realizadas. As simulações para cada uma das cinco estações mostra que todas as estações presentes no modelo proposto neste trabalho apresentaram resultados idênticos aos obtidos por Godinho Filho e Uzsoy (2009). A figura 5.5 mostra o resultado obtido por Godinho Filho e Uzsoy (2009), o qual é o mesmo obtido na simulação de cada uma das estações de trabalho.

Para cada estação de trabalho, foram feitos testes para 7 possíveis cenários: melhoria de 50% no tempo de *setup*, melhoria de 50% no tempo de reparo, melhoria de 50% na taxa de defeitos, melhoria de 50% na variabilidade de chegadas de tarefas (o qual neste trabalho refere-se ao coeficiente de variação de chegadas), 50% de melhoria no tempo entre falhas e 50% de melhoria simultânea nas variabilidades do tempo de natural de processamento, do tempo de reparo, do tempo de *setup* (as quais influenciam na variabilidade do tempo de processamento efetivo global).

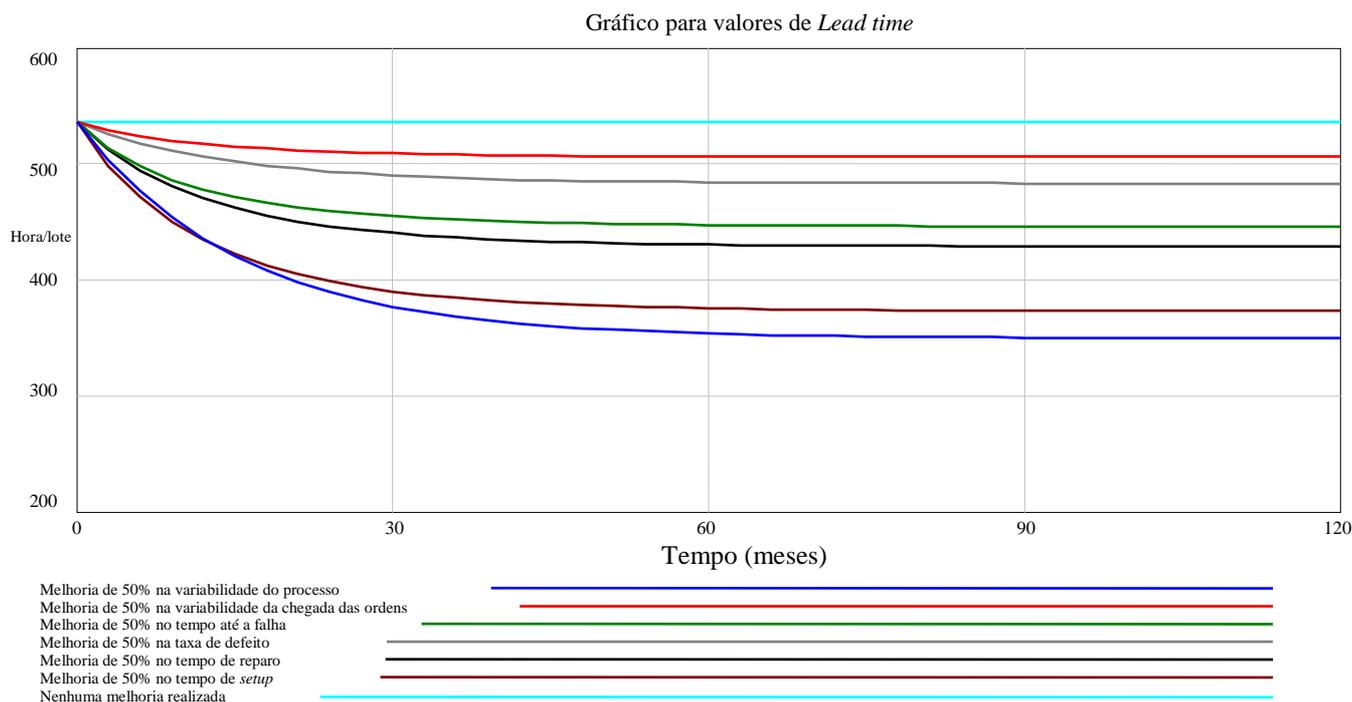


FIGURA 5.5: Resultados obtidos para o modelo desenvolvido por Godinho Filho e Uzsoy (2009)

Fonte: GODINHO FILHO E UZSOY (2009)

Diante dos resultados da verificação, considera-se que cada estação de trabalho do modelo desenvolvido nesse trabalho se comporta da mesma maneira que a estação do modelo desenvolvido por Godinho Filho e Uzsoy (2009).

5.4.2 Verificação para o fluxo da linha de produção

Para a verificação do fluxo foram considerados seis medidas chaves que caracterizam o comportamento da linha de produção e os relacionamentos existentes. Essas seis medidas são: *throughput*, coeficiente de variação de partidas, taxa de partidas, coeficiente de variação de chegadas, taxa de chegadas e *lead time* total da linha.

Como representado pela equação 5.22, a taxa de chegadas em uma estação ($i+1$) é igual à taxa de partidas na estação anterior (i), a qual é igual ao *throughput* da estação (i) Logo, para o modelo desenvolvido nesse trabalho:

$$r_a(2) = r_d(1) = TH(1)$$

$$r_a(3) = r_d(2) = TH(2)$$

E assim por diante.

O coeficiente de chegadas de cada estação e o coeficiente de partidas obedecem à relação mostrada na equação 5.23. Logo, para o modelo desenvolvido neste trabalho:

$$c_a(2) = c_d(1)$$

$$c_a(3) = c_d(2)$$

E assim por diante.

A outra medida chave a ser verificado é o *lead time* total da linha produtiva. Esse *lead time* total é dado pela soma dos *lead times* individuais de cada estação como representado pela equação 5.24. E para o modelo desenvolvido pode ser considerado como:

$$TC_{total} = TC_{ET_1} + TC_{ET_2} + \dots + TC_{ET_3} + TC_{ET_4} + TC_{ET_5}$$

Com base nas condições e relacionamentos explicados acima, o fluxo produtivo do modelo é verificado entre cada uma das estações (entre as estações 1 e 2, 2 e 3, etc.). E o *lead time* total de uma linha produtiva foi verificado para uma linha com 5 estações. Foi realizada também uma simulação do modelo desenvolvido neste trabalho para diversos cenários (50% de melhoria no tempo de *setup*, 50% de melhoria no coeficiente de variação de chegadas, etc.). Em todas as situações testadas e em todos os cenários simulados, os resultados se mantiveram coerente, conforme mostrado a seguir.

- **RELAÇÃO 1:** $r_a(i+1) = r_d(i) = TH(i)$

As figuras 5.6 a 5.8 descrevem o relacionamento de um fluxo produtivo entre as estações 2 e 3 de uma linha produtiva em um cenário sem nenhuma melhoria realizada. Com base na observação dessas figuras, é possível notar que elas apresentam o mesmo comportamento ao longo do tempo, logo a relação 1 é verdadeira. A verificação foi feita para os demais fluxos entre estações, porém é desnecessário apresentá-los já que todos obtiveram o mesmo resultado.

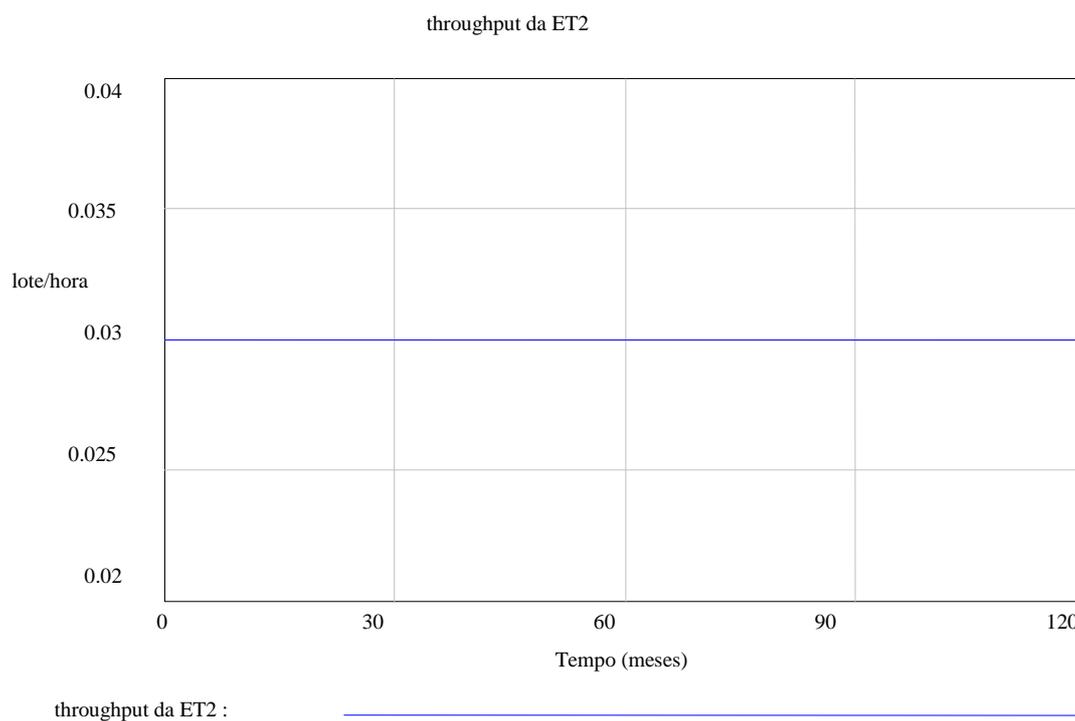


FIGURA 5.6: Gráfico para *throughput* da segunda estação de trabalho

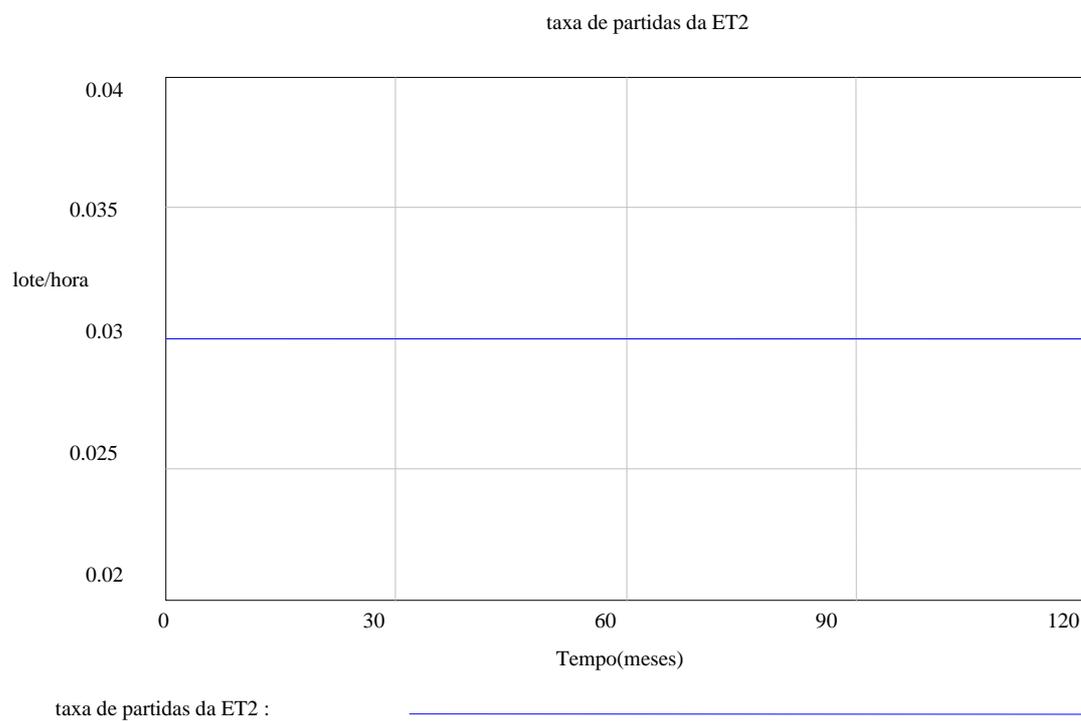


FIGURA 5.7: Gráfico para taxa de partidas da segunda estação de trabalho

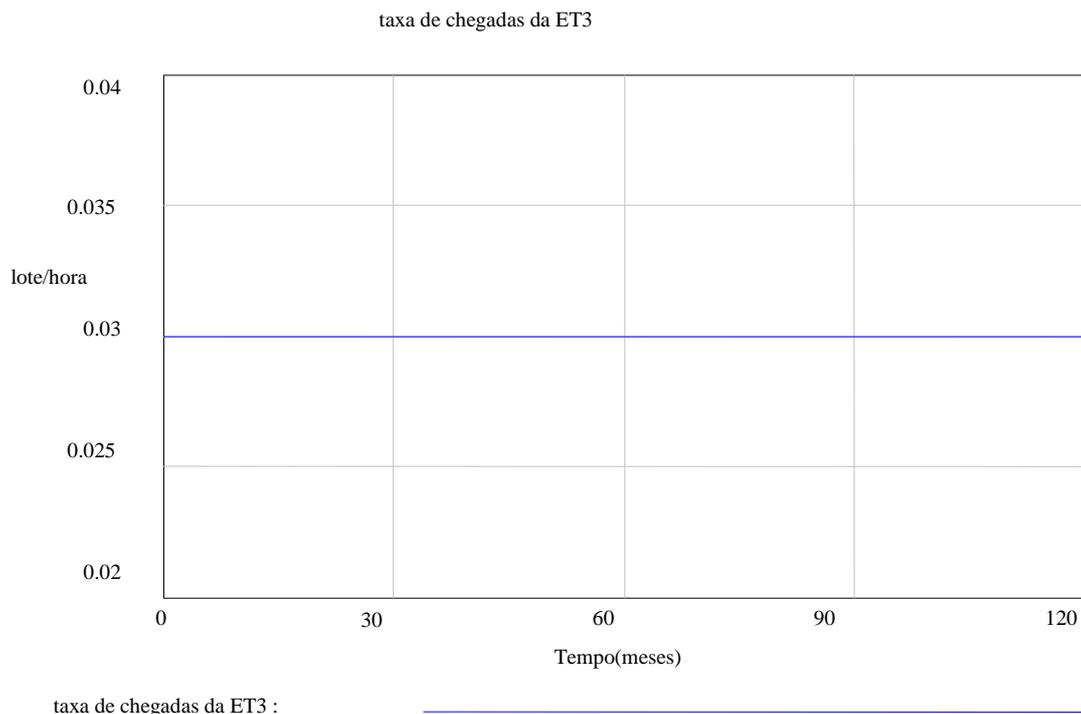


FIGURA 5.8: Gráfico para taxa de chegadas da terceira estação de trabalho

- **RELAÇÃO 2:** $c_a(i+1) = c_d(i)$

As figuras 5.9 e 5.10 descrevem o relacionamento dos coeficientes de chegadas e de partidas entre as estações 2 e 3 de uma linha produtiva em um cenário sem nenhuma melhoria realizada. Com base na observação dessas figuras, é possível notar que elas apresentam o mesmo comportamento ao longo do tempo, logo a relação 2 é verdadeira. A verificação foi feita para os demais fluxos entre estações, porém é desnecessário apresentá-los pela mesma razão anterior.

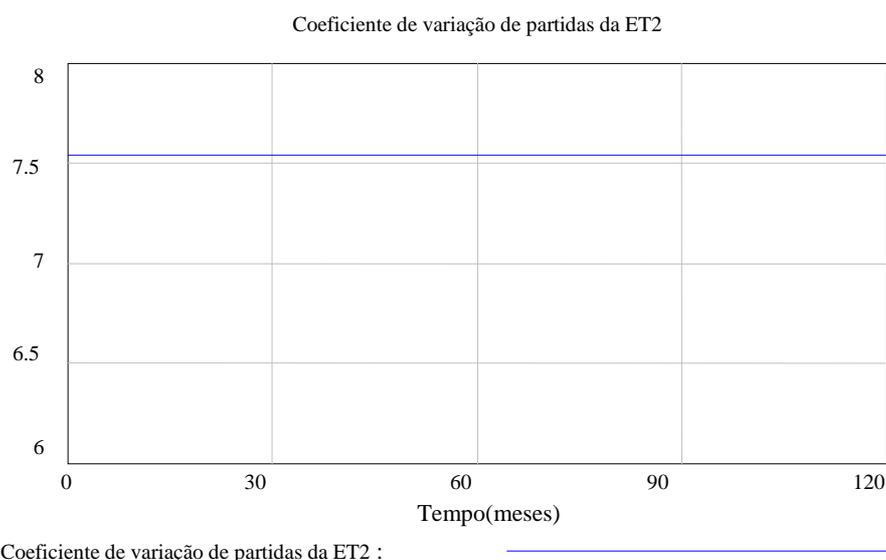


FIGURA 5.9: Gráfico para coeficiente de variação de partidas da segunda estação

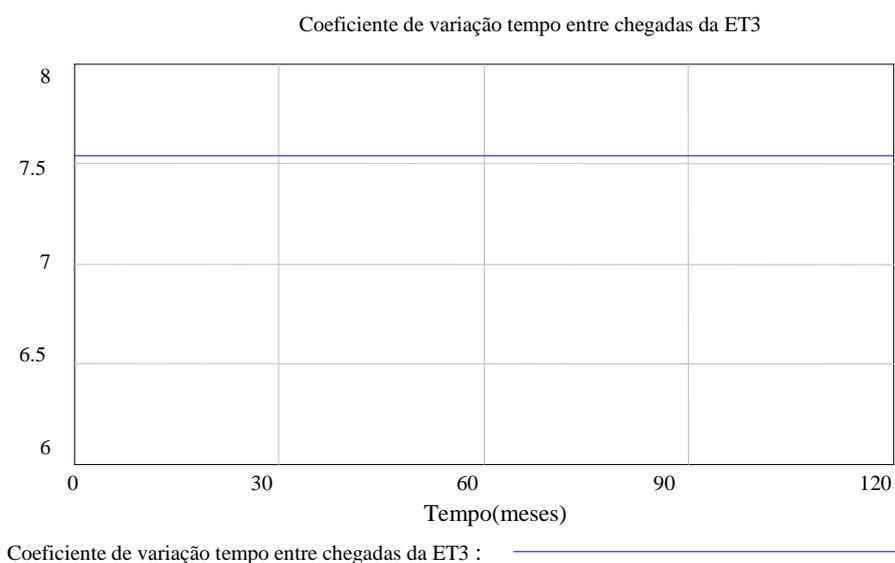


FIGURA 5.10: Gráfico para coeficiente de variação de chegadas da terceira estação

- **RELAÇÃO 3.:** $TC_{total} = TC_{ET_1} + TC_{ET_2} + \dots + TC_{ET_3} + TC_{ET_4} + TC_{ET_5}$

Para a linha produtiva composta por 5 estações de trabalho e representada pela figura 5.11, o *lead time* total foi igual a soma do *lead time* de cada uma das estações.

$$TC_{total} = 53568(ET_1) + 783263(ET_2) + 88861(ET_3) + 933546(ET_4) + 952641(ET_5) = 40937$$

Logo, a relação 3 foi verificada.

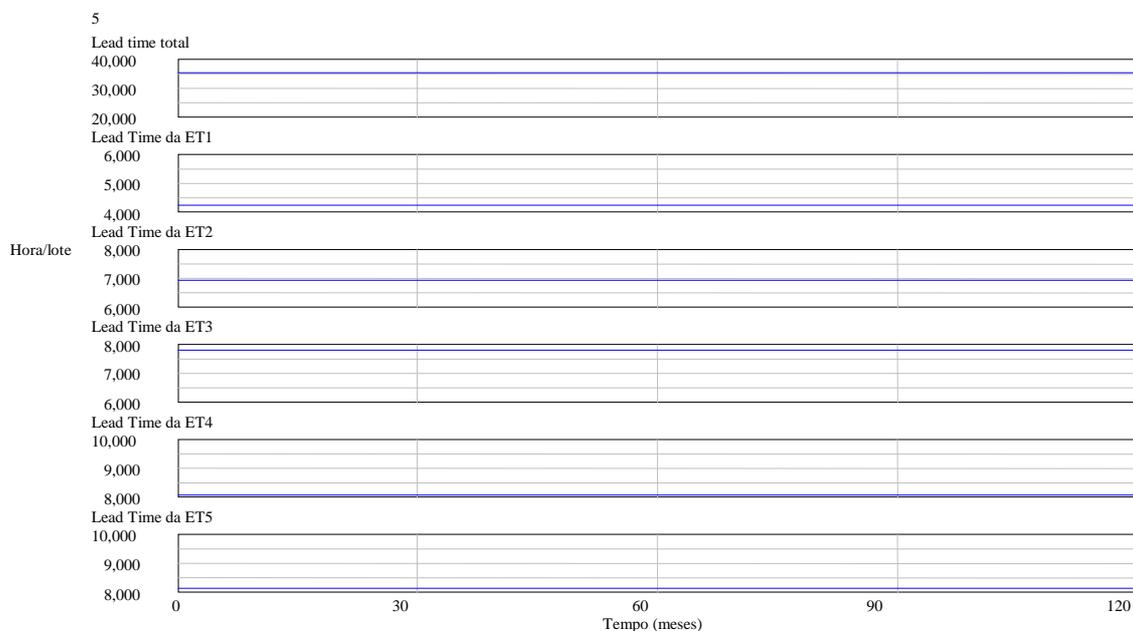


FIGURA 5.11: *Lead time* de uma linha produtiva com 5 estações

5.5 SUMÁRIO DAS DIFERENÇAS ENTRE OS DOIS MODELOS

Esta seção faz um resumo das principais diferenças existentes entre o modelo desenvolvido por Godinho Filho e Uzsoy (2009) e o modelo proposto neste trabalho. O modelo desenvolvido por Godinho Filho e Uzsoy (2009) apresenta uma estação de trabalho enquanto o desenvolvido neste trabalho faz uma expansão desse modelo para 5 estações de trabalho. A variabilidade na chegadas de tarefas a estação de trabalho no modelo desenvolvido por Godinho Filho e Uzsoy (2009) é definida pela influência externa da demanda anual que determina a taxa de chegadas na estação; no modelo proposto essa variabilidade de chegadas na primeira estação de trabalho continua a ser definida pela demanda anual, já nas estações seguintes passa a ser definida pelo coeficiente de variação das partidas das estações anteriores, como é mostrada na equação 5.23.

Com a existência de mais estações no modelo proposto neste trabalho há possibilidade de melhoria nas variáveis de mais estações; isso não é possível no modelo desenvolvido por Godinho Filho e Uzsoy (2009), o qual é composto por apenas 1 estação de trabalho.

Nesse novo modelo, com 5 estações de trabalho, o *lead time* a ser analisado passa a ser o *lead time* total da linha produtiva, o qual é formado pelo *lead time* de todas as estações.

O quadro 5.1 representa as principais diferenças nesses dois modelos.

	Modelo desenvolvido por Godinho Filho e Uzsoy (2009)	Modelo desenvolvido no presente trabalho
Número de estações	1	5
Variabilidade na chegada	Depende de condições externas	Depende da variabilidade das estações anteriores
Possibilidade de melhoria nas variáveis	Somente em 1 estação de trabalho	Melhoria em até 5 estações de trabalhos
<i>Lead time</i>	<i>Lead time</i> de 1 estação de trabalho	<i>Lead time</i> da linha produtiva

QUADRO 5.1: Sumário das principais diferenças entre o modelo desenvolvido por godinho filho e uzsoy (2009) e o modelo proposto neste trabalho.

Fonte: AUTOR

5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar da utilização de modelos de simulação para dar suporte a esforços de melhoria contínua não ser algo novo (ADAMS et al., 1999), o modelo desenvolvido por Godinho Filho e Uzsoy (2009) é um dos primeiros que reúne um modelo quantitativo a respeito do comportamento dos sistemas de manufatura com um modelo de SD a fim de estudar as interações entre as diferentes ações de melhoria contínua e seus efeitos em indicadores de desempenho dos sistemas de manufatura ao longo do tempo.

O modelo proposto neste trabalho através da expansão para mais estações de trabalho, proporcionará o estudo dessas interações entre variáveis e ações de melhoria contínua, considerando a influência do comportamento do fluxo produtivo da linha, além de investigar as questões de pesquisa apresentadas no capítulo 1.

CAPÍTULO 6: O EFEITO DE AÇÕES DE MELHORIA CONTÍNUA NO *LEAD TIME* PARA DIFERENTES CARACTERÍSTICAS DE UM AMBIENTE PRODUTIVO COM MÁQUINA ÚNICA

6.1 OS RESULTADOS OBTIDOS POR GODINHO FILHO E UZSOY (2009)

Godinho Filho e Uzsoy (2009) estudaram o efeito de diversas ações de melhoria contínua nas variáveis do chão de fábrica (estudadas neste trabalho) para redução do *lead time*. A figura 6.1 apresenta o resultado obtido por esses pesquisadores.

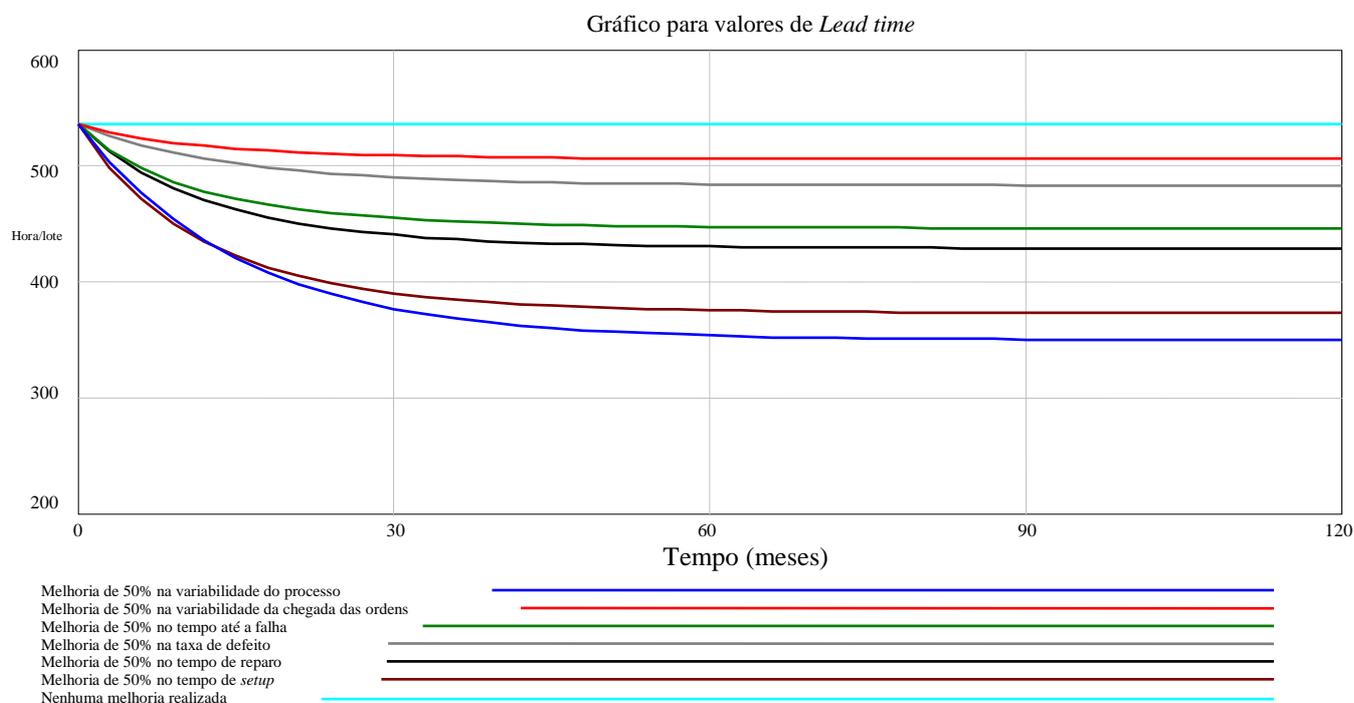


FIGURA 6.1: Resultados obtidos por Godinho Filho e Uzsoy (2009)

Fonte: GODINHO FILHO E UZSOY (2009)

Através da análise do gráfico pode-se concluir que:

- A ação para melhoria contínua de 50% nas variabilidades do tempo de processamento (formada pela melhoria de 50% na variabilidade do tempo de *setup*, variabilidade do tempo de reparo e variabilidade do tempo natural de processamento) é a ação de melhoria que obtém a maior redução no *lead time* do processo, seguido por 50% de melhoria no tempo de *setup*, 50% de melhoria no tempo de reparo, 50% na melhoria do tempo entre falhas e 50% na melhoria da taxa de defeitos. A melhoria de 50% na

variabilidade de chegadas, de acordo com o estudo, é a que proporciona a menor redução no *lead time* do processo.

Esses resultados foram obtidos para um sistema produtivo cujos valores das variáveis são apresentadas na tabela 5.1 do capítulo anterior. A partir da observação da figura 6.1 e sabendo-se que ela é obtida por meio de um sistema produtivo com determinadas características, as questões que surgem são:

- **Questão 1:** No que os resultados obtidos por Godinho Filho e Uzsoy (2008a, 2008b, 2009) se alteram para cenários com diferentes características do sistema produtivo?
- **Questão 2:** O efeito positivo no *lead time* de uma ação de melhoria contínua nas variáveis do chão de fábrica estudadas nesse trabalho é sensível a características do sistema produtivo? Se sim, como é esse relacionamento entre a ação de melhoria e sistema produtivo?

6.2 INVESTIGANDO A QUESTÃO DE PESQUISA 1

Para responder a questão de pesquisa 1, é simulado o comportamento das variáveis de fábricas em estudo e verificado o efeito das ações de melhoria contínua nessas variáveis e no *lead time* para diferentes características do sistema produtivo. Isso tudo para o ambiente de máquina única (apenas 1 estação de trabalho). Os sistemas produtivos tratados nesse trabalho simulam cenários com diferentes níveis de: 1) tempo de *setup*, 2) taxa de defeitos; 3) tempo entre falhas; 4) tempo de reparo; 5) variabilidade do tempo de processamento; 6) variabilidade de chegadas. As seções a seguir mostram os resultados encontrados para cada um desses sistemas produtivos.

6.2.2 CENÁRIO 1: O efeito das ações de melhoria contínua no *lead time* para sistemas com diferentes tempos de *setup*.

As figuras 6.2 e 6.3 mostram o comportamento das ações de melhoria contínua no *lead time* para diferentes valores do tempo de *setup* (240, 180 e 45 minutos). Na figura 6.2 é apresentado o resultado para os tempos de 240 e 180 minutos e a figura 6.3 mostra o resultado para os tempos de 180 e 45 minutos. O *software* Vensim, no qual as simulações foram feitas, não permite a plotagem dos resultados para todos os níveis de tempo de *setup* juntos. Diante disso, para que fosse possível uma comparação visual que facilitasse a compreensão desses resultados, os resultados foram plotados para cada dois tipos de sistemas produtivos (*setup* 240 e 180 minutos em um gráfico e depois *setup* 180 e 45 minutos em outro gráfico). O mesmo procedimento foi feito para os outros cenários mostrados nas seções seguintes.

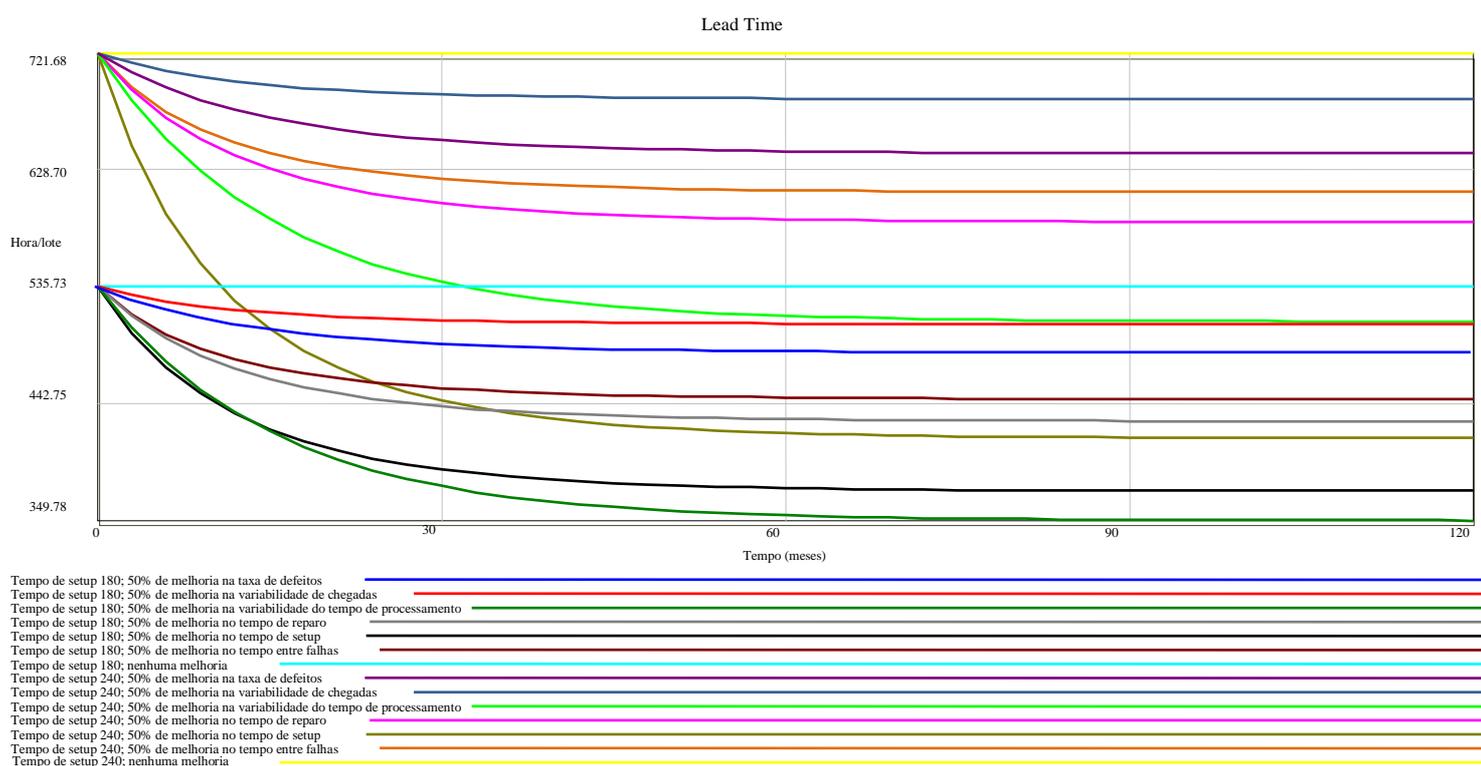


FIGURA 6.2: Efeito de ações de melhoria contínua no *lead time* para tempos de *setup* de 240 e 180 minutos.

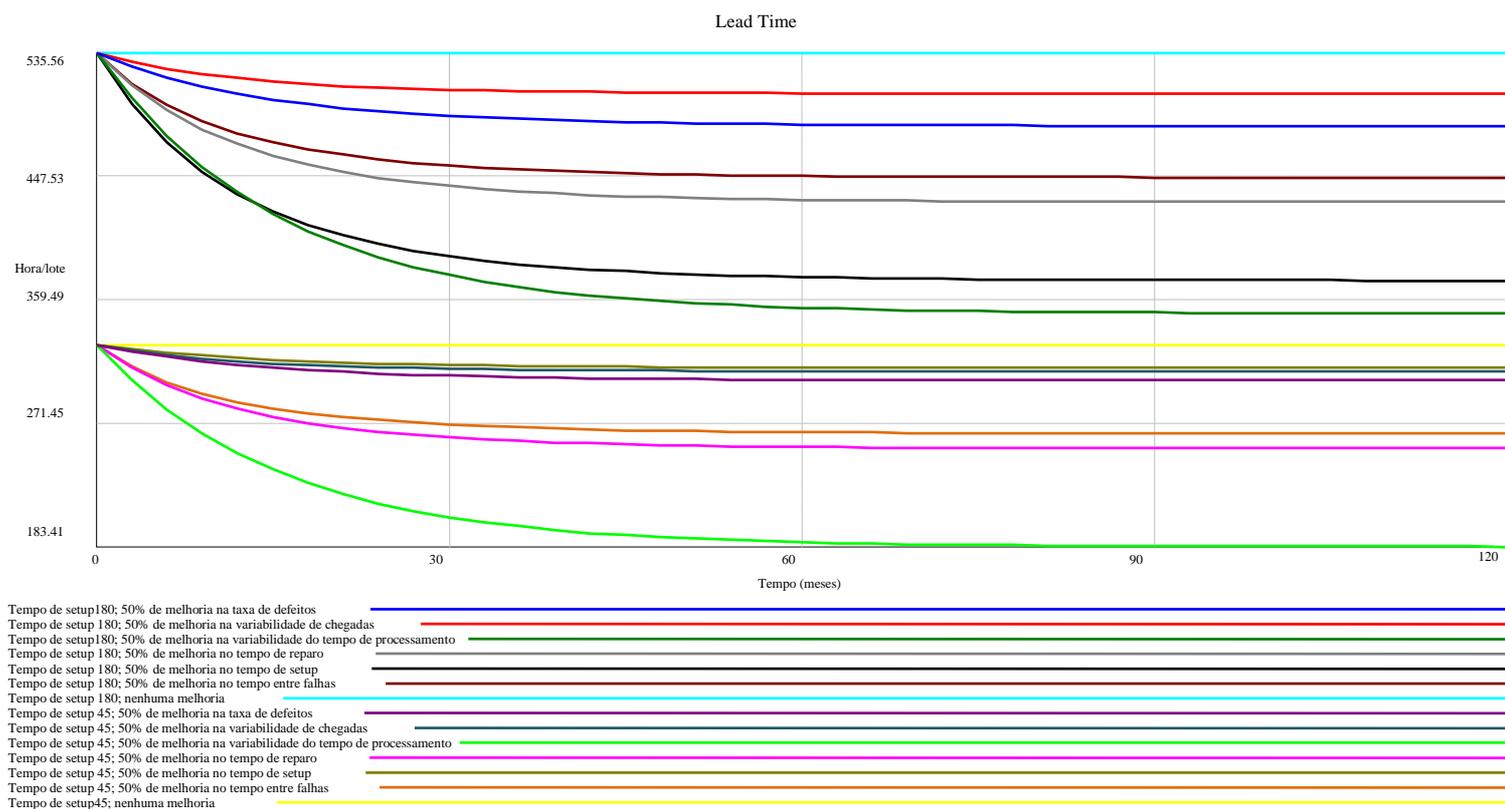


FIGURA 6.3: Efeito de ações de melhoria contínua no *lead time* para tempos de *setup* de 180 e 45 minutos

As figuras 6.2 e 6.3 mostram que:

- Quanto menor o tempo de *setup* inicial, menor é o *lead time* do processo;
- Conforme nota-se nas figuras 6.2 e 6.3, o efeito no *lead time* das diferentes ações de melhoria para cada um dos 3 tempos de *setup* estudados é bastante diferenciado. Nota-se claramente nos gráficos que nenhuma ação (com exceção da ação de melhoria nessa própria variável) com um nível de *setup* mais elevado apresenta desempenho superior com relação à redução do *lead time* do que outra ação de melhoria com tempo de *setup* menor. Por exemplo, o sistema com tempo *setup* de 45 minutos e sem nenhuma melhoria tem o *lead time* menor do que todas as ações de melhoria para um sistema com 180 minutos. Quando se compara o sistema com tempo de *setup* de 240 e 180 minutos, percebe-se que apenas a própria ação de 50% melhoria no *setup* para o sistema com tempo de 240 minutos consegue atingir um *lead time* menor do que algumas ações de melhoria do sistema com tempo de 180 minutos. Isso mostra a importância que a melhoria do tempo de *setup* é realmente uma política muito eficaz para a redução do *lead time*;

- No sistema com tempo de *setup* de 240 minutos, a ação de melhoria que mais impacta no *lead time* é a de 50% de melhoria no tempo de *setup*, seguida pela melhoria na variabilidade do tempo de processamento, tempo de reparo, tempo entre falhas, taxa de defeitos e por fim, variabilidade de chegadas. Para o tempo de *setup* de 180 minutos, a ordem de importância é quase idêntica que a do sistema anterior, porém, a ação de maior impacto nesse sistema é o de melhoria na variabilidade do tempo de processamento e a segunda mais importante é o de melhoria no tempo de *setup*. No sistema com tempo de 45 minutos, a ação que mais afeta a redução do *lead time* é a de melhoria na variabilidade do tempo de processamento, seguida pela melhoria no tempo de reparo, tempo entre falhas, taxa de defeitos, variabilidade de chegadas e por último, a ação de melhoria no tempo de *setup*.

6.2.3 CENÁRIO 2: O efeito das ações de melhoria contínua no *lead time* para sistemas com diferentes taxas de defeito.

Nessa seção sistemas com 3 níveis diferentes de taxas de defeitos (10%, 5% e 1%) são simulados. As figuras 6.4 e 6.5 mostram os resultados das ações de melhoria contínua na redução do *lead time* para cada um desses sistemas.

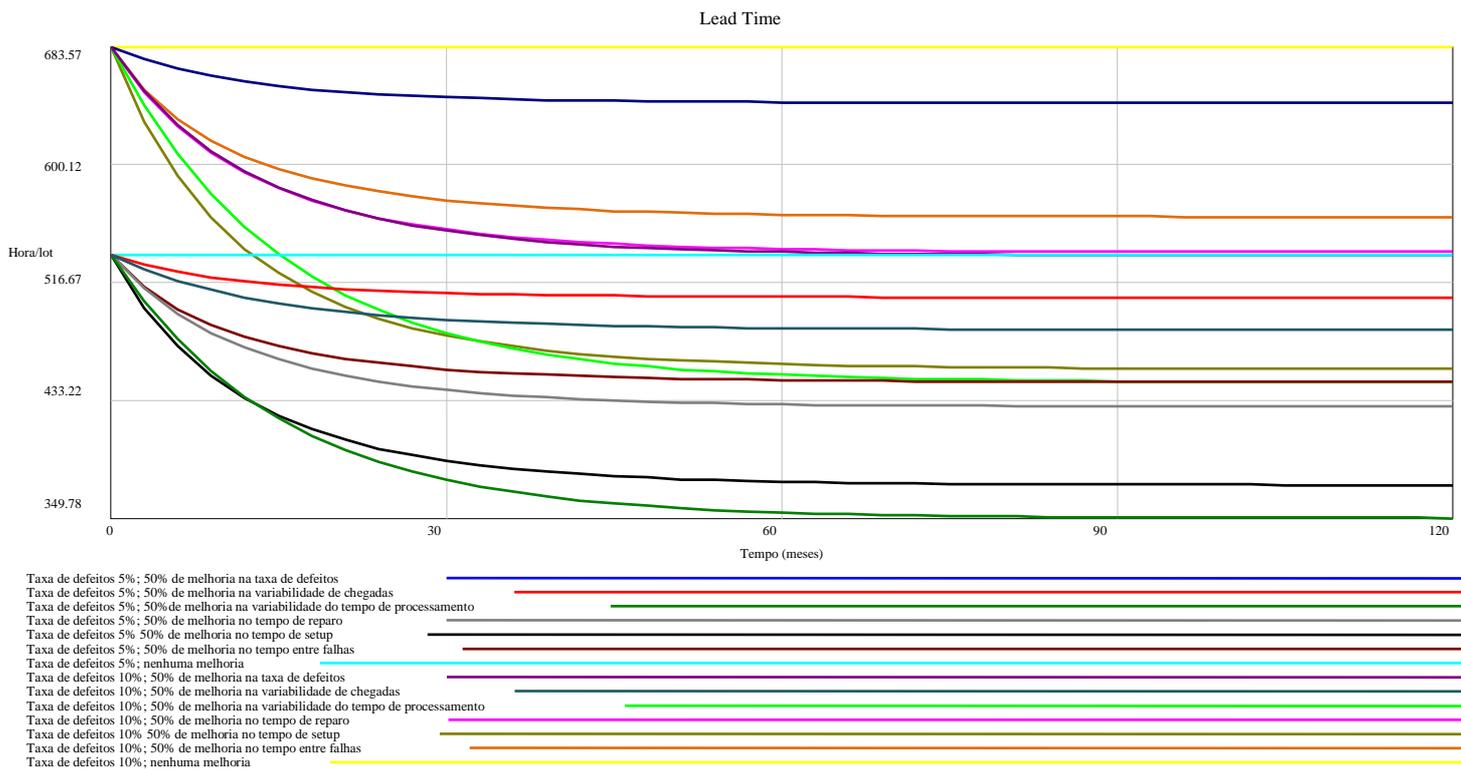


FIGURA 6.4 Efeito de ações de melhoria contínua no lead time para taxas de defeitos 10% e 5%.

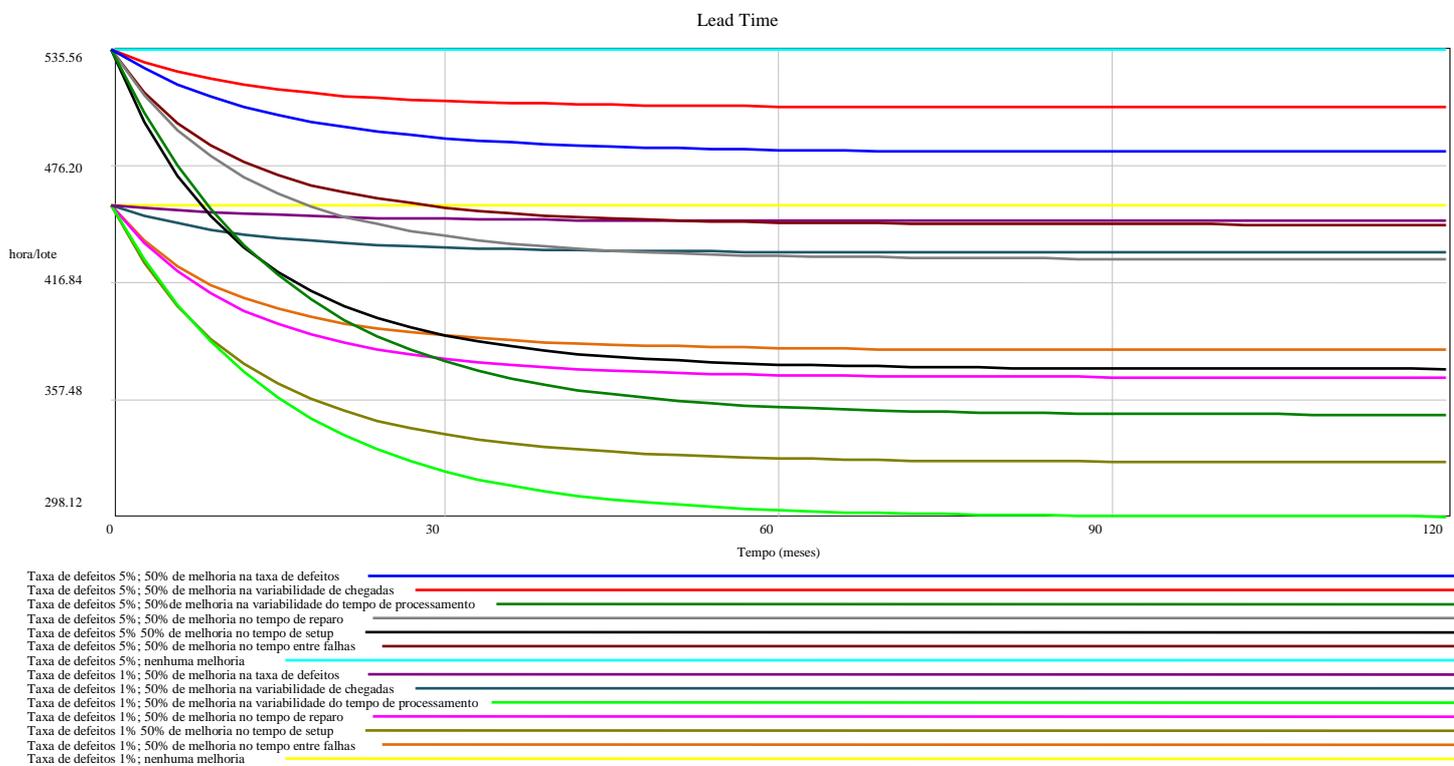


FIGURA 6.5: Efeito de ações de melhoria contínua no lead time para taxas de defeitos de 5% e 1%.

As figuras 6.4 e 6.5 mostram que:

- Quanto menor a taxa de defeitos, menor é o *lead time* do processo;
- Conforme nota-se nas figuras 6.4 e 6.5, o efeito no *lead time* das diferentes ações de melhoria para cada um das 3 taxas de defeitos estudadas é parecido. Nota-se claramente nos gráficos que algumas ações com taxa de defeitos mais elevada apresenta desempenho superior com relação à redução do *lead time* do que outras ações com taxa de defeitos menor. Por exemplo, as ações de melhoria na variabilidade do tempo de processamento e no tempo de *setup* têm maior efeito na redução do *lead time* no sistema com taxa de defeitos de 5% do que as ações de melhoria na taxa de defeitos, variabilidade de chegadas, tempo entre falhas e tempo de reparo no sistema com taxa de defeitos de 1%. Isso mostra que o valor da taxa de defeitos não tem grande interferência no efeito das ações de melhoria na redução do *lead time*;
- A ordem do efeito das ações estudadas é bastante parecida para as três taxas de defeitos estudadas: No sistema com taxa de defeitos de 10% a ação que se destaca é de melhoria de 50% na variabilidade do tempo de processamento, seguido pela melhoria no tempo de *setup*, tempo de reparo, taxa de defeitos, tempo entre falhas e por fim, variabilidade de chegadas. Com a taxa de defeitos de 5%, as três primeiras ações em ordem de importância na redução do *lead time* são as mesmas (variabilidade do tempo de processamento, tempo de *setup* e tempo de reparo), seguida pela melhoria na tempo entre falhas, taxa de defeitos e variabilidade de chegadas. No sistema com 1% de taxa de defeitos, as ações de melhoria contínua apresentam a mesma ordem de impacto que a do sistema com 5% de taxa de defeitos, com exceção da ação de melhoria na taxa de defeitos, a qual passa a ser a última em ordem de importância.

6.2.4 CENÁRIO 3: O efeito das ações de melhoria contínua no *lead time* para sistemas com diferentes tempos entre falhas.

Nessa seção três diferentes sistemas produtivos são simulados, dessa vez para diferentes valores do tempo entre falhas (19200, 9600 e 4800 minutos). As figuras 6.6 e 6.7 apresentam os resultados das ações de melhoria na redução do *lead time* para esses sistemas.

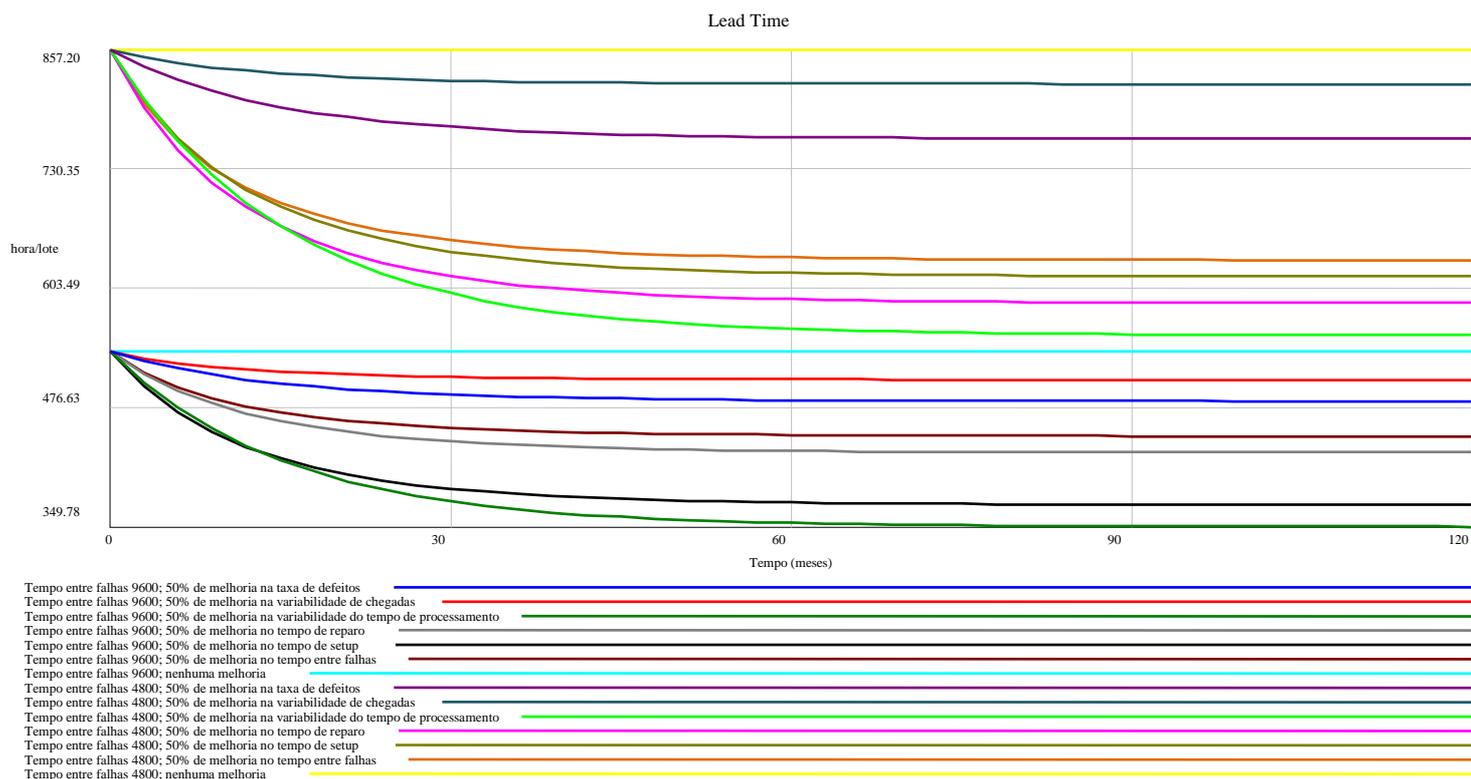


FIGURA 6.6: Efeito de ações de melhoria contínua no *lead time* para os tempos entre falhas de 4800 e 9600 minutos.

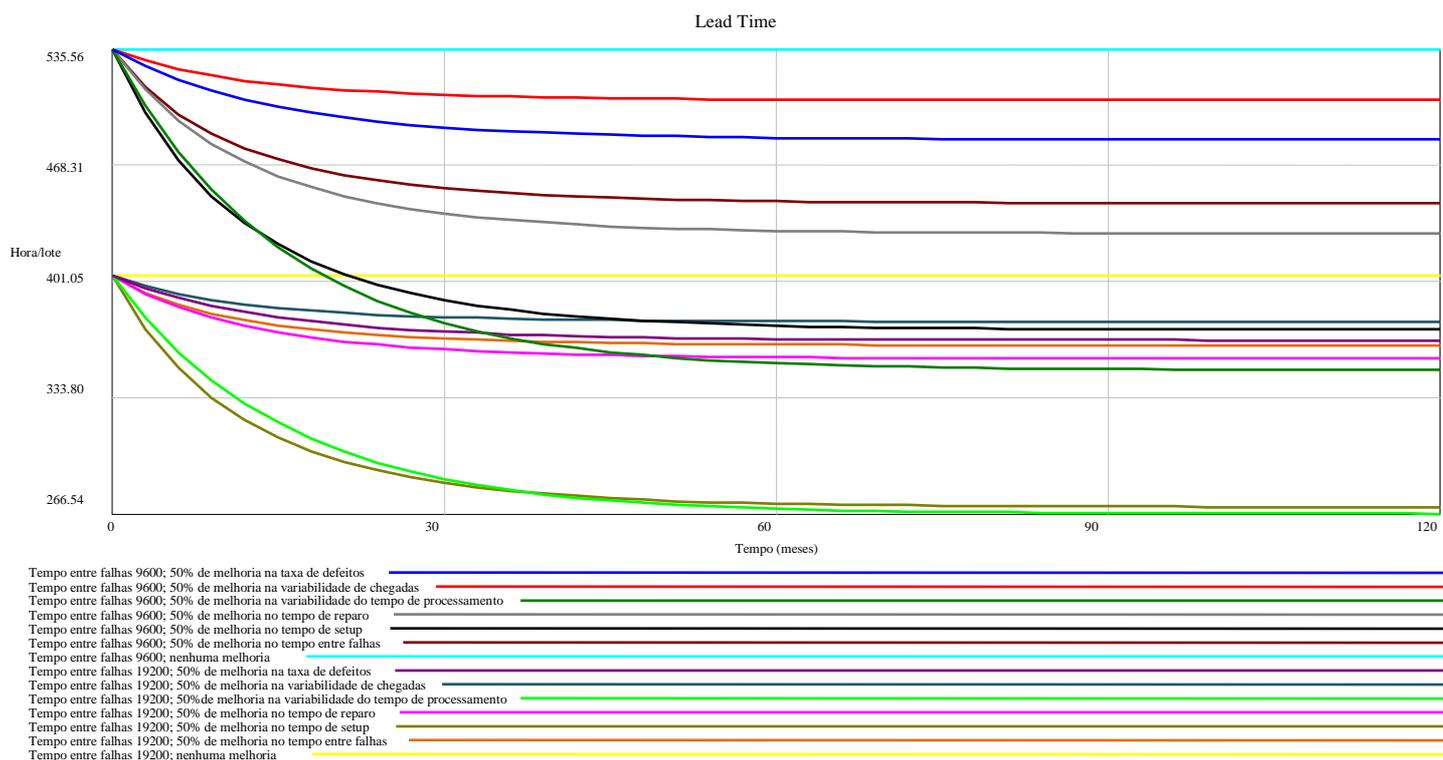


FIGURA 6.7: Efeito de ações de melhoria contínua no *lead time* para os tempos entre falhas de 9600 e 19200 minutos.

As figuras 6.6 e 6.7 mostram que:

- Quanto mais freqüentes forem as falhas de máquinas, ou seja, quanto menor for o tempo entre falhas, maior é o *lead time* do processo;
- A redução do tempo entre falhas assim como a redução do tempo de *setup* é uma política bastante eficaz na diminuição do *lead time*. Essa importância pode ser observada na grande diferença entre os efeitos de diversas ações de melhoria contínua dependendo da freqüência entre as falhas. Por exemplo, no sistema com tempo entre falhas de 9600 minutos e sem nenhuma melhoria implementada, o *lead time* apresentado é menor que todas as situações de melhoria para tempo entre falhas de 4800 minutos. Porém, para o sistema com tempo entre falhas de 9600 minutos, a ação de melhoria na variabilidade do tempo de processamento consegue atingir *lead time* menor que 4 ações de melhoria para o sistema com tempo entre falhas menor. Isso pode ser uma política alternativa a ser adotada quando o aumento da confiabilidade passa a ser difícil a partir de um determinado momento;

- A ordem do efeito das ações estudadas para os 3 diferentes tempos entre falhas é bastante parecida. Para um sistema com menor tempo entre falhas (4800 minutos), a ação que mais afeta na redução do *lead time* é o de 50% de melhoria na variabilidade do tempo de processamento, seguido pela de melhoria no tempo de reparo, tempo de *setup*, tempo entre falhas, taxa de defeitos e por fim, variabilidade de chegadas. No sistema com tempo entre falhas de 9600, a ação que mais afeta na redução do *lead time* também é a de melhoria na variabilidade do tempo de processamento, seguida pela melhoria no tempo de *setup*, tempo de reparo, tempo entre falhas, taxa de defeitos e por fim, variabilidade de chegadas. No sistema com maior tempo entre falhas (19200 minutos), o comportamento das ações de melhoria contínua segue o mesmo comportamento do sistema com 9600 minutos.

6.2.5 CENÁRIO 4: O efeito das ações de melhoria contínua no *lead time* para sistemas com diferentes tempos de reparo.

Nessa seção, 3 sistemas produtivos com diferentes valores de tempos de reparo (960, 480 e 240 minutos) são simulados. Os resultados das ações de melhoria contínua na redução do *lead time* para esses 3 sistemas são mostrados nas figuras 6.8 e 6.9.

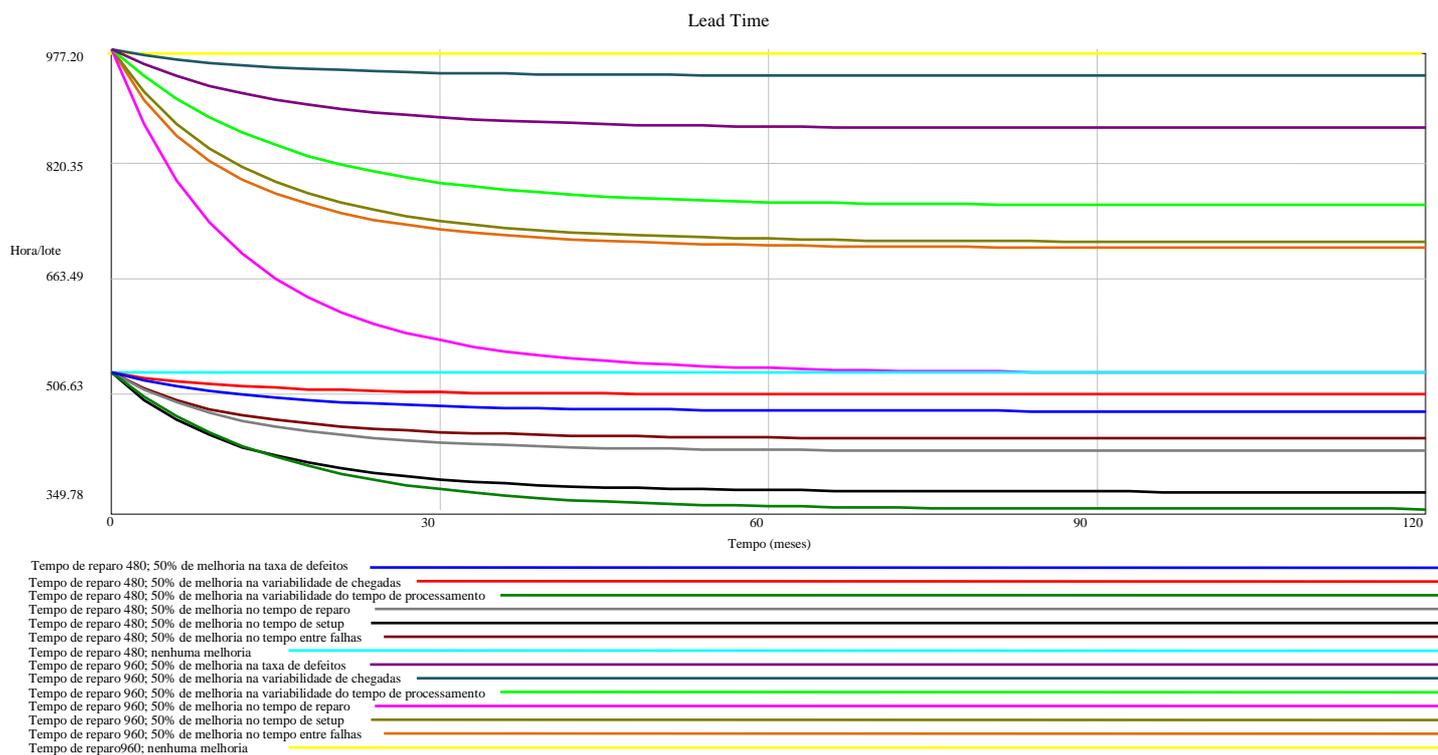


FIGURA 6.8: Efeito de ações de melhoria contínua no *lead time* para os tempos de reparo de 480 e 960 minutos.

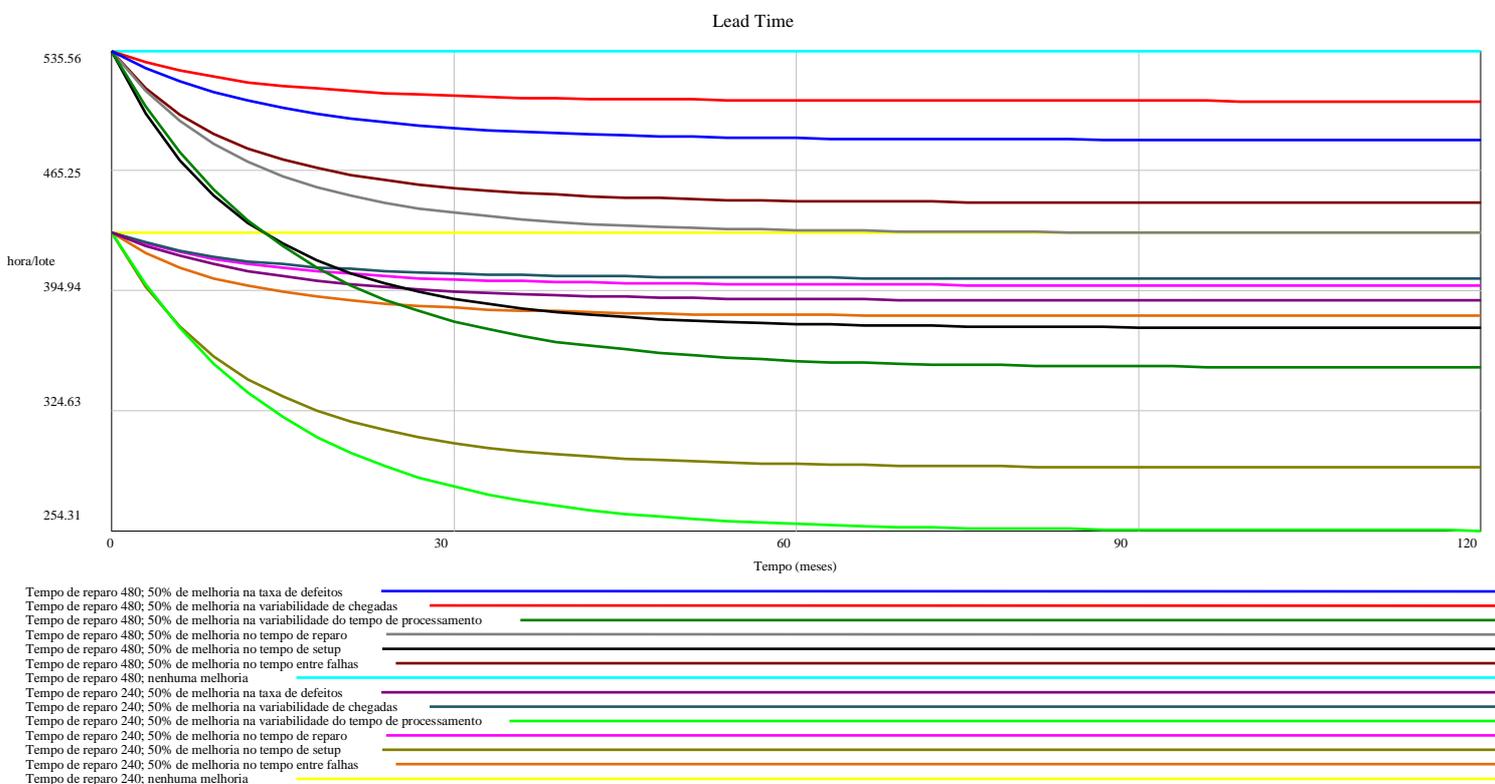


FIGURA 6.9: Efeito de ações de melhoria contínua no *lead time* para os tempos de reparo de 240 e 480 minutos.

As figuras 6.8 e 6.9 mostram que:

- Quanto menor o tempo de reparo, menor é o *lead time* do processo;
- A redução do tempo de reparo é uma medida eficaz na diminuição do *lead time*. Essa importância pode ser observada através da grande diferença entre o resultado das ações de melhoria na redução *lead time* dependendo do tempo de reparo do sistema produtivo. Por exemplo, o sistema com tempo de reparo de 480 minutos e sem nenhuma melhoria apresenta *lead time* menor do que todos os sistemas com melhoria e tempo de reparo de 960 minutos. Porém quando o sistema com tempo de reparo de 240 minutos é comparado ao sistema com o dobro desse tempo (480 minutos), as ações de melhoria na variabilidade do tempo de processamento e no tempo de *setup* para o sistema com tempo de 480 minutos conseguem reduzir o *lead time* mais do que algumas ações de melhoria para o tempo de reparo de 240 minutos. Essas duas ações podem ser alternativas para reduzir o *lead time* quando não é mais possível ou muito difícil reduzir o tempo de reparo;
- No sistema com maior tempo de reparo, a ação que mais impacta na redução do *lead time* é a de 50% de melhoria nessa própria variável, seguido pela melhoria no tempo entre falhas, tempo de *setup*, na variabilidade do tempo de processamento, taxa média de defeitos e variabilidade de chegadas. Já no sistema com tempo de reparo de 480 minutos, a ação que mais efeito tem sobre o *lead time* é a de 50% de melhoria na variabilidade do tempo de processamento, seguida pela de melhoria no tempo de *setup*, tempo de reparo, tempo entre falhas, taxa de defeitos e por fim, variabilidade de chegadas. No sistema com tempo de reparo de 240 minutos as duas ações mais importantes na redução do *lead time* também são a de melhoria na variabilidade do tempo de processamento e melhoria no tempo de *setup*; a terceira ação mais importante é a de melhoria no tempo entre falhas, seguida pela de melhoria na taxa de defeitos, tempo de reparo e variabilidade de chegadas.

6.2.6 CENÁRIO 5: O efeito das ações de melhoria contínua no *lead time* para sistemas com diferentes variabilidades do tempo de processamento.

São simulados sistemas com 3 diferentes coeficientes de variabilidade das (1,5; 1 e 0,5) do tempo de processamento. Os resultados das ações de melhoria contínua na redução do *lead time* para esses 3 sistemas são mostrados nas figuras 6.10 e 6.11.

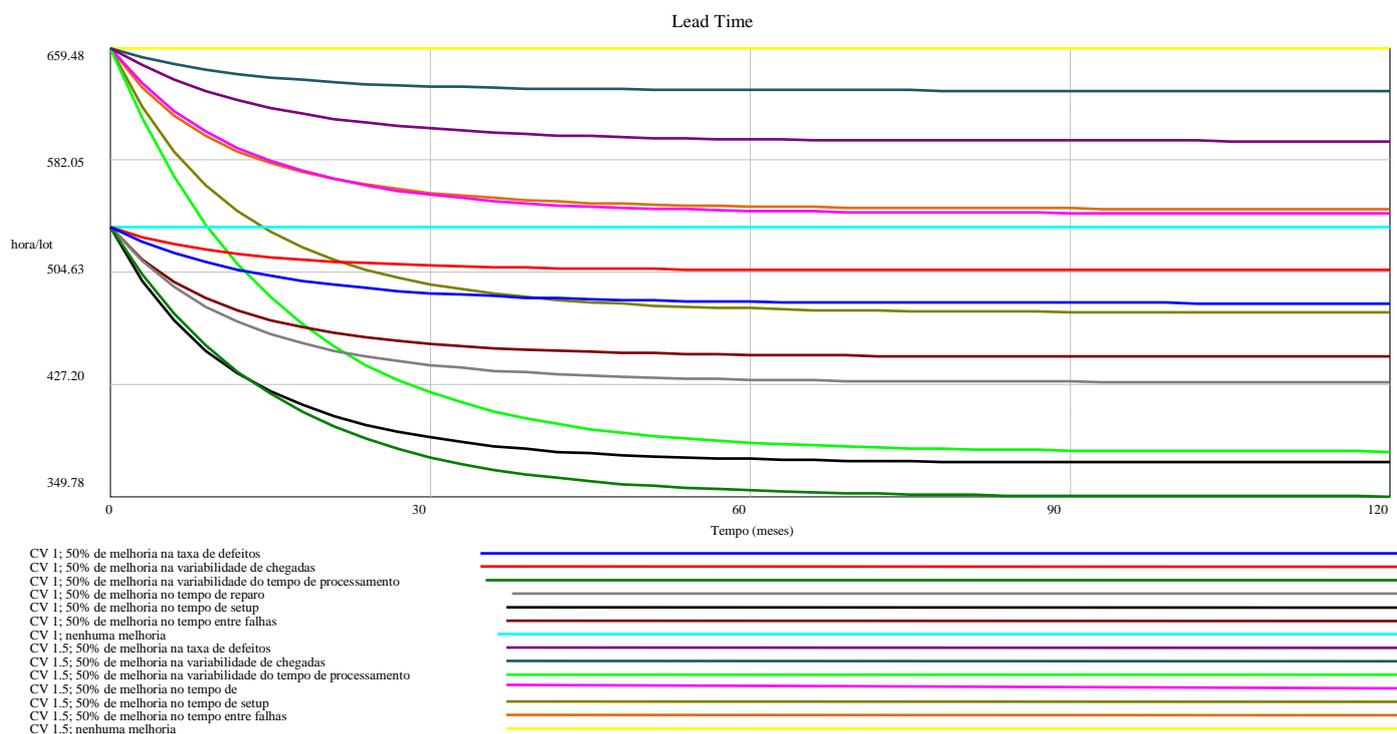


FIGURA 6.10: Efeito de ações de melhoria contínua no *lead time* para os coeficientes de variação do tempo de processamento de 1,5 e 1.

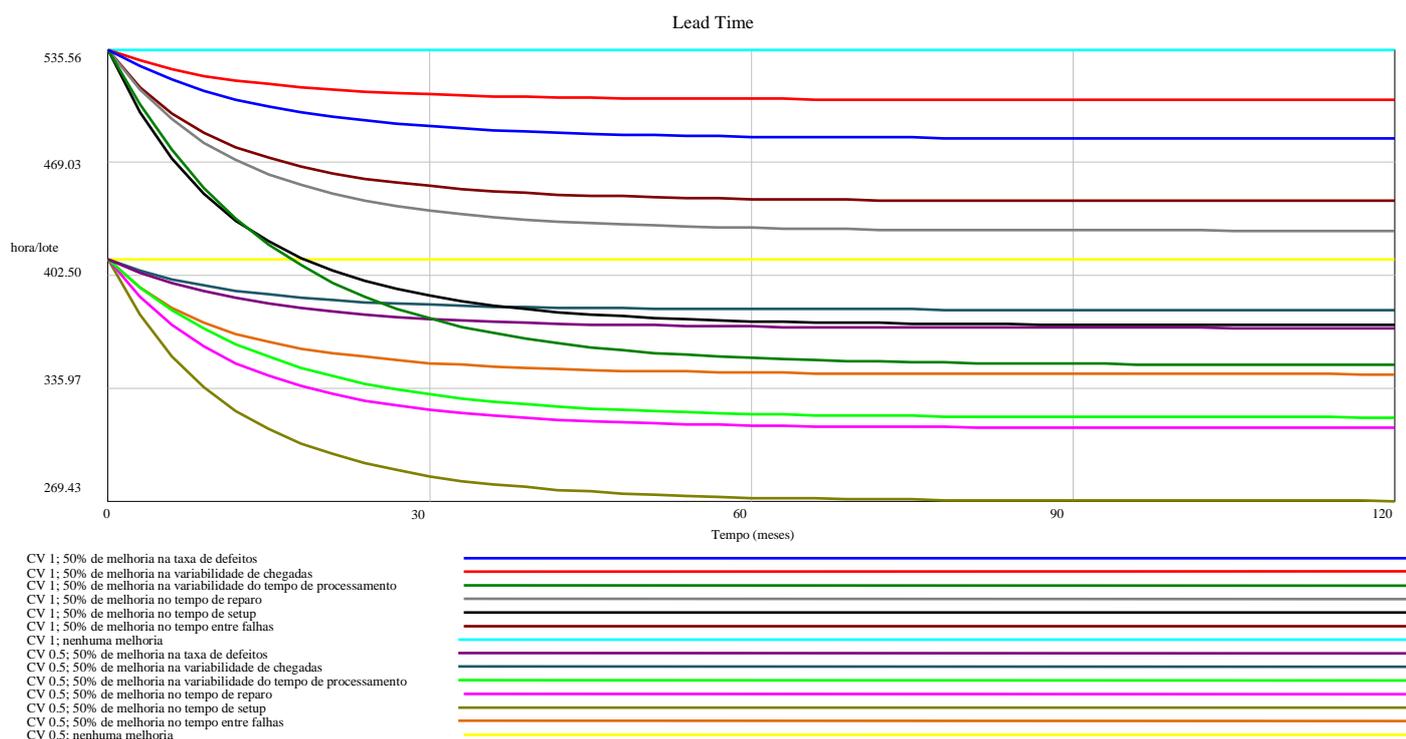


FIGURA 6.11: Efeito de ações de melhoria contínua no *lead time* para dois diferentes coeficientes de variação do tempo de processamento de 1e 0,5.

As figuras 6.10 e 6.11 mostram que:

- Quanto menor o valor da variabilidade do tempo de processamento, menor é o *lead time* do processo;
- A variabilidade no tempo de processamento é importante na redução do *lead time*, pois o efeito das ações de melhoria contínua é atingido pelo valor do coeficiente de variação do tempo de processamento. Por exemplo, para os sistemas com CV de 1 as ações em geral conseguem um *lead time* menor do que as ações de melhoria para sistemas com maior variabilidade. A exceção ocorre para, além da própria melhoria na variabilidade do tempo de processamento, a ação de melhoria no tempo de *setup*. Isso se repete também para os sistemas com CV 1 e 0,5. Logo, além de confirmar a importância da variabilidade do tempo de processamento, mostra a melhoria do tempo de *setup* como uma política alternativa quando não é possível reduzir a variabilidade;
- No sistema com CV de 1,5 a ação que mais impacta na redução do *lead time* é a ação de 50% de melhoria na própria variabilidade do tempo de processamento, seguida pela melhoria no tempo de *setup*, tempo de reparo, tempo entre falhas, taxa de defeitos e por fim, variabilidade de chegadas. No sistema com variabilidade moderada (CV 1) o

impacto dessas ações na redução do *lead time* seguem essa mesma ordem de importância. Já no sistema com a menor de variabilidade a ação de melhoria na variabilidade do tempo de processamento passa de primeira para terceira em ordem de importância na redução do *lead time*, antecedidas pela melhoria no tempo de *setup* e no tempo de reparo; as outras ações seguem a mesma ordem.

6.2.7 CENÁRIO 6: O efeito das ações de melhoria contínua no *lead time* para sistemas com diferentes variabilidades de chegadas.

São simulados sistemas produtivos para 3 diferentes valores de variabilidades de chegadas (CV 1,5, 1 e 0,5). As figuras 6.12 e 6.13 apresentam os resultados obtidos do impacto de ações de melhoria contínua na redução do *lead time*.

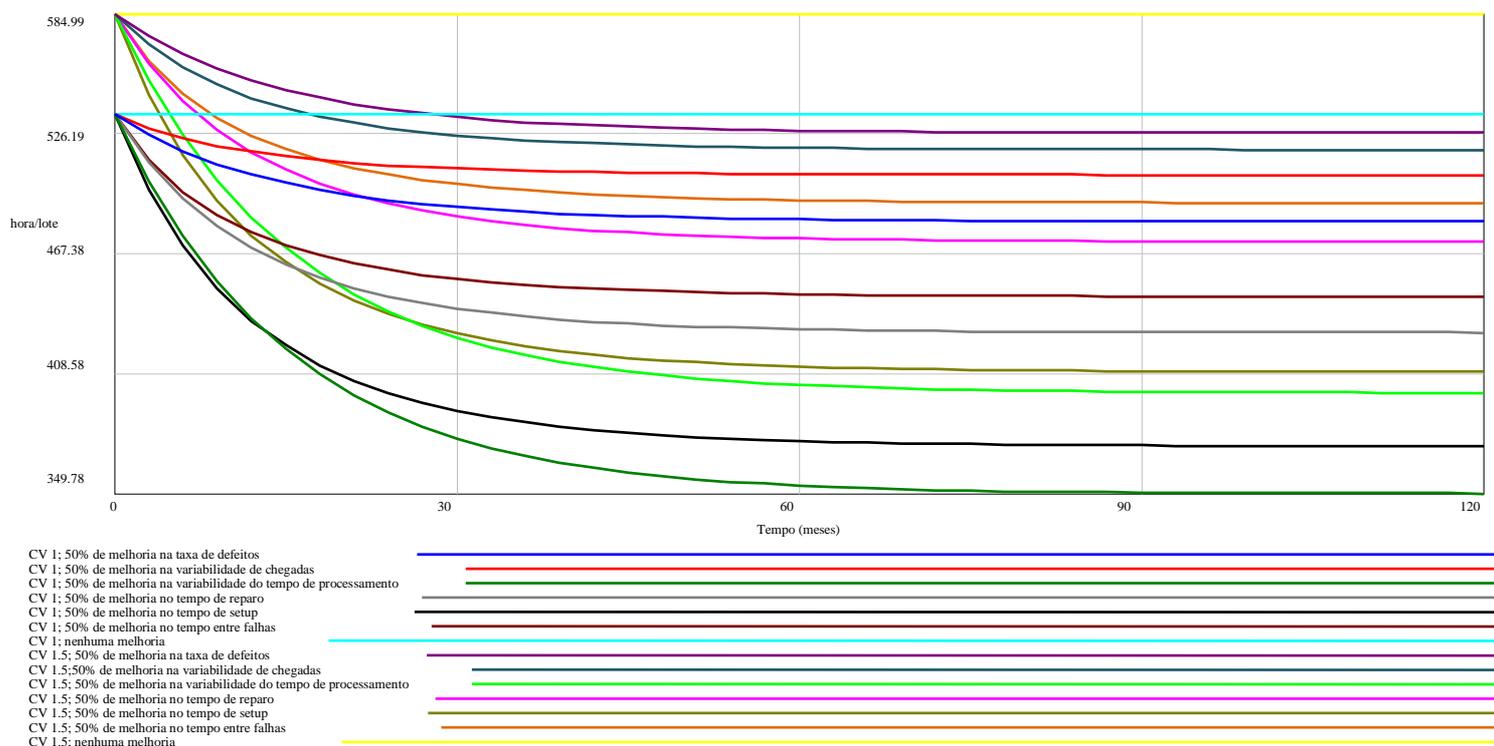


FIGURA 6.12: Efeito de ações de melhoria contínua no *lead time* para os coeficientes de variação de chegadas de 1,5 e 1.

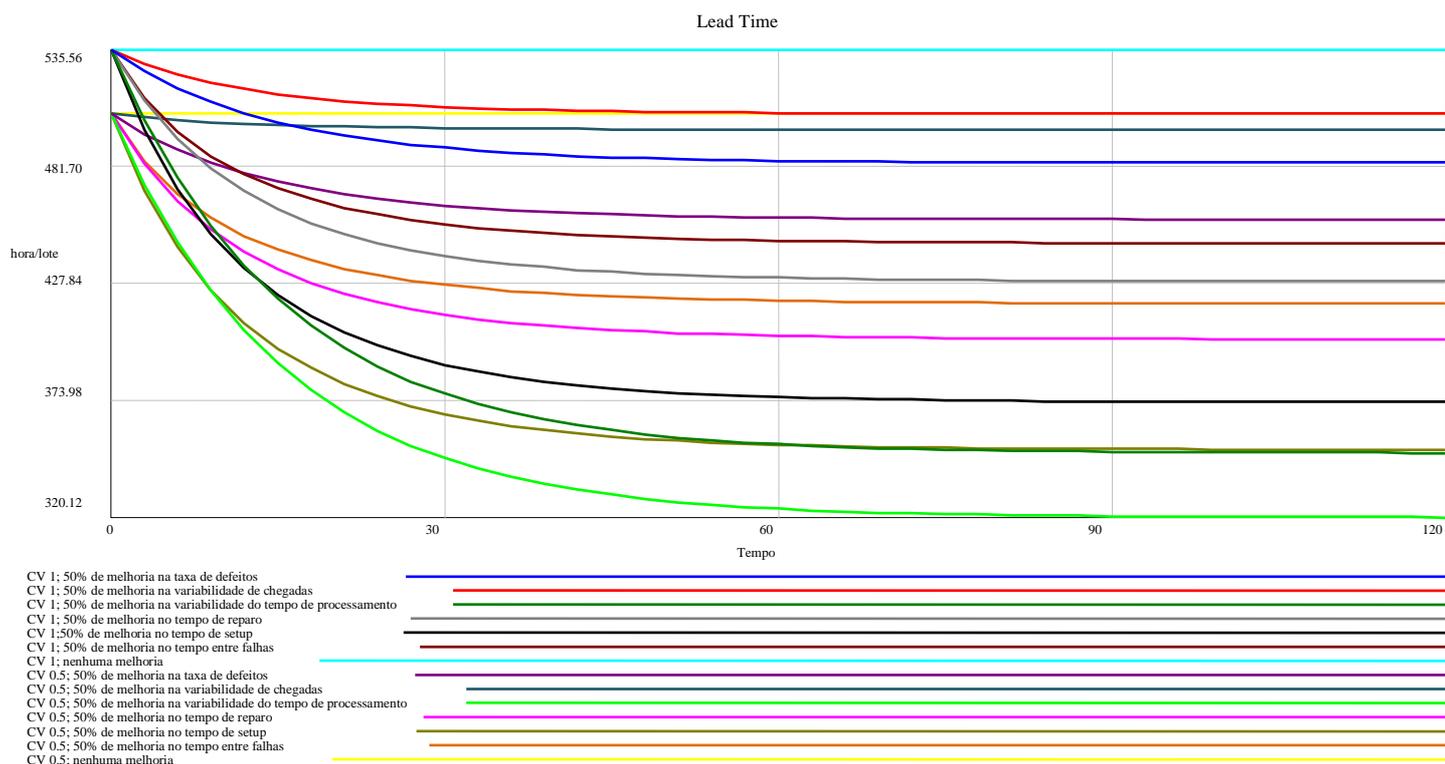


FIGURA 6.13: Efeito de ações de melhoria contínua no *lead time* para os coeficientes de variação de chegadas de 1 e 0,5.

As figuras 6.12 e 6.13 mostram que:

- Quanto menor a variabilidade do coeficiente de chegadas, menor é o *lead time* do processo;
- A variabilidade de chegadas não tem grande influência no efeito das ações de melhoria contínua na redução do *lead time*, uma vez que, existem ações de melhoria que mesmo em um sistema com alta variabilidade de chegadas tem melhor desempenho que outras ações em sistemas com baixa variabilidade de chegadas. Por exemplo, as ações de melhoria na variabilidade do tempo de processamento e no tempo de *setup*. Essas duas ações têm maior efeito na redução do *lead time* no sistema com alta variabilidade de chegadas (CV 1,5) do que as ações de melhoria no tempo de reparo, tempo entre falhas, taxa de defeitos e variabilidade de chegadas no sistema com variabilidade moderada (CV 1);
- A ordem do efeito das ações estudadas é bastante parecida para os três CVs de chegadas: No sistema com coeficiente de variabilidades 1,5 a ação que mais efeito tem na redução do *lead time* é a de 50% melhoria na variabilidade do tempo de processamento, seguida pela melhoria no tempo de *setup*, tempo de reparo, tempo

entre falhas, variabilidade de chegadas e por fim, taxa de defeitos. Nos sistemas com CV 1 e 0,5 a ordem é quase a mesma do sistemas com CV 1,5, com exceção da melhoria da variabilidade de chegadas que passa de quinto para sexto em ordem de importância.

6.2.8 Sumário das conclusões obtidas com a investigação da questão de pesquisa 1.

As simulações desenvolvidas nessa seção tiveram como objetivo responder a questão de pesquisa 1 levantada nesse trabalho (No que os resultados obtidos por Godinho Filho e Uzsoy (2008a, 2008b, 2009) se alteram para cenários com diferentes características do sistema produtivo?) para o ambiente com máquina única. Para isso características desse sistema produtivo foram variadas.

Considerando-se que os resultados obtidos por Godinho Filho e Uzsoy (2009), para determinada característica do sistema produtivo (mostrado na tabela 5.1, do capítulo 5), apresentam a seguinte ordem de importância das ações com relação à redução do *lead time* (em ordem decrescente):

- 1) variabilidade do tempo de processamento;
- 2) tempo de *setup*;
- 3) tempo de reparo;
- 4) tempo entre falhas;
- 5) taxa de defeitos
- 6) variabilidade de chegadas.

Pode-se afirmar que os sistemas produtivos simulados nesse capítulo confirmam a robustez do modelo desenvolvido por Godinho Filho e Uzsoy (2009), pois os resultados encontrados para esses 12 sistemas (já excluindo os 6 com características produtivas iguais ao modelo desenvolvido anteriormente por Godinho Filho e Uzsoy (2009)) apresentam os seguintes números:

- A melhoria na variabilidade do tempo de processamento foi a ação de maior efeito na redução do *lead time* em 9 dos 12 sistemas (75%) simulados nesse capítulo;
- A melhoria no tempo de *setup* foi a segunda ação de maior efeito na redução do *lead time* em 7 dos 12 sistemas (58%) simulados nesse capítulo;

- A melhoria no tempo de reparo foi a terceira ação de maior efeito na redução do *lead time* em 7 dos 12 sistemas (58%) simulados nesse capítulo;
- A melhoria no tempo entre falhas foi a quarta ação de maior efeito na redução do *lead time* em 8 dos 12 sistemas (67%) simulados nesse capítulo;
- A melhoria na taxa de defeitos foi a quinta ação de maior efeito na redução do *lead time* em 7 dos 12 sistemas (58%) simulados nesse capítulo;
- A melhoria na variabilidade de chegadas foi a última ação a afetar na redução do *lead time* em 9 dos 12 sistemas (75%) simulados nesse capítulo.

Os quadros 6.1 a 6.6, resumizam a importância de cada um das ações de melhoria para cada um desses ambientes simulados.

SETUP (minutos)		45	180	240
Ações de melhoria contínua que mais afetam o <i>lead time</i>	1°	Variabilidade do tempo de processamento	Variabilidade do tempo de processamento	Tempo de <i>setup</i>
	2°	Tempo de reparo	Tempo de <i>setup</i>	Variabilidade do tempo de processamento
	3°	Tempo entre falhas	Tempo de reparo	Tempo de reparo
	4°	Taxa de defeitos	Tempo entre falhas	Tempo entre falhas
	5°	Variabilidade de chegadas.	Taxa de defeitos	Taxa de defeitos
	6°	Tempo de <i>setup</i>	Variabilidade de chegadas	Variabilidade de chegadas

QUADRO 6.1: Sumário da ordem de impacto de cada ação de melhoria na redução do *lead time* para diferentes valores de tempo de *setup*

TAXA DE DEFEITOS		1%	5%	10%
Ações de melhoria contínua que mais afetam o <i>lead time</i>	1º	Variabilidade do tempo de processamento	Variabilidade do tempo de processamento	Variabilidade do tempo de processamento
	2º	Tempo de <i>setup</i>	Tempo de <i>setup</i>	Tempo de <i>setup</i>
	3º	Tempo de reparo	Tempo de reparo	Tempo de reparo
	4º	Tempo entre falhas	Tempo entre falhas	Taxa de defeitos
	5º	Variabilidade de chegadas.	Taxa de defeitos	Tempo entre falhas
	6º	Taxa de defeitos	Variabilidade de chegadas	Variabilidade de chegadas

QUADRO 6.2: Sumário da ordem de impacto de cada ação de melhoria na redução do *lead time* para diferentes valores de taxa de defeitos

TEMPO ENTRE FALHAS (minutos)		4800	9600	19200
Ações de melhoria contínua que mais afetam o <i>lead time</i>	1º	Variabilidade do tempo de processamento	Variabilidade do tempo de processamento	Variabilidade do tempo de processamento
	2º	Tempo de reparo	Tempo de <i>setup</i>	Tempo de <i>setup</i>
	3º	Tempo de <i>setup</i>	Tempo de reparo	Tempo de reparo
	4º	Tempo entre falhas	Tempo entre falhas	Tempo entre falhas
	5º	Taxa de defeitos	Taxa de defeitos	Taxa de defeitos
	6º	Variabilidade de chegadas	Variabilidade de chegadas	Variabilidade de chegadas

QUADRO 6.3: Sumário da ordem de impacto de cada ação de melhoria na redução do *lead time* para diferentes valores de tempos entre falhas.

TEMPO DE REPARO (minutos)		240	480	960
Ações de melhoria contínua que mais afetam o <i>lead time</i>	1º	Variabilidade do tempo de processamento	Variabilidade do tempo de processamento	Tempo de reparo
	2º	Tempo de <i>setup</i>	Tempo de <i>setup</i>	Tempo entre falhas
	3º	Tempo entre falhas	Tempo de reparo	Tempo de <i>setup</i>
	4º	Taxa de defeitos	Tempo entre falhas	Variabilidade do tempo de processamento
	5º	Tempo de reparo	Taxa de defeitos	Taxa de defeitos
	6º	Variabilidade de chegadas	Variabilidade de chegadas	Variabilidade de chegadas

QUADRO 6.4: Sumário da ordem de impacto de cada ação de melhoria na redução do *lead time* para diferentes valores de tempo de reparo.

Variabilidade do tempo de processamento (CV)		0,5	1	1,5
Ações de melhoria contínua que mais afetam o <i>lead time</i>	1º	Tempo de <i>setup</i>	Variabilidade do tempo de processamento	Variabilidade do tempo de processamento
	2º	Tempo de reparo	Tempo de <i>setup</i>	Tempo de <i>setup</i>
	3º	Variabilidade do tempo de processamento	Tempo de reparo	Tempo de reparo
	4º	Tempo entre falhas	Tempo entre falhas	Tempo entre falhas
	5º	Taxa de defeitos	Taxa de defeitos	Taxa de defeitos
	6º	Variabilidade de chegadas	Variabilidade de chegadas	Variabilidade de chegadas

QUADRO 6.5: Sumário da ordem de impacto de cada ação de melhoria na redução do *lead time* para diferentes valores de variabilidade do tempo de processamento.

Variabilidades de chegadas (CV)		0,5	1	1,5
Ações de melhoria contínua que mais afetam o <i>lead time</i>	1°	Variabilidade do tempo de processamento	Variabilidade do tempo de processamento	Variabilidade do tempo de processamento
	2°	Tempo de <i>setup</i>	Tempo de <i>setup</i>	Tempo de <i>setup</i>
	3°	Tempo de reparo	Tempo de reparo	Tempo de reparo
	4°	Tempo entre falhas	Tempo entre falhas	Tempo entre falhas
	5°	Taxa de defeitos	Taxa de defeitos	Variabilidade de chegadas
	6°	Variabilidade de chegadas	Variabilidade de chegadas	Taxa de defeitos

QUADRO 6.6: Sumário da ordem de impacto de cada ação de melhoria na redução do *lead time* para diferentes valores de variabilidade de chegadas.

6.3 INVESTIGANDO A QUESTÃO DE PESQUISA 2.

A investigação da questão de pesquisa 2 foi feita utilizando-se a técnica de planejamento de experimentos, por meio do *software* Statistica. O planejamento de experimentos utilizado no trabalho é o fatorial já que se pretende descobrir as interações entre as variáveis.

Primeiramente, para cada uma das 6 variáveis do chão de fábrica foram escolhidos os valores máximos e mínimos utilizados nesse trabalho, por exemplo, para o tempo de *setup* foram escolhidos os valores 45 e 240 minutos, para o CV de chegadas, os valores de 0,5 e 1,5, e assim por diante. E com cada um desses valores das variáveis do chão de fábrica, foi simulado diferentes cenários, o que resultou em 64 cenários (2^6) e observado o valor do *lead time* para cada um desses cenários. Vale ressaltar que esses cenários simulados para verificar a interação entre as variáveis são diferentes dos simulados para responder a questão 1 e conseqüentemente geram valores de *lead time* diferentes.

Em seguida, os dados foram normalizados, ou seja, o menor valor utilizado para cada uma das variáveis foi colocado como -1 e o maior valor como +1 e depois disso foram colocados no *software* Statistica e as interações entre as variáveis foram analisadas 2 a 2 com um grau de significância (α) de 5%. Esse valor foi escolhido, baseado em trabalhos sobre o tema (Montgomery e Runger (2003)).

Os dados geraram a tabela 6.1, a qual mostra em destaque as interações entre as variáveis estudadas mais significantes, isto é, as que afetam o valor do *lead time* e também as interações 2 a 2 mais importantes. estatisticamente, quanto menor o valor da significância obtida, mais importante é a interação para o sistema.

É importante ressaltar que dentre as 6 variáveis do chão de fábrica estudadas nesse trabalho, a variabilidade de chegadas foi a única que não apresentou significância estatística no valor do *lead time*, ou seja, o valor da variabilidade de chegadas não afeta significativamente o valor do *lead time* tendo como base o grau de significância de 5% e os cenários estudados nessa dissertação.

Interação	Significância
Setup e taxa de defeitos	0,051375
Setup e tempo de reparo	0,001551
Setup e tempo entre falhas	0,011824
Setup e CV do tempo de processamento	0,016440
Setup e CV de chegadas	0,893066
Taxa de defeitos e tempo de reparo	0,019053
Taxa de defeitos e tempo entre falhas	0,009843
Taxa de defeitos e CV do tempo de processamento	0,255980
Taxa de defeitos e CV de chegadas	0,904407
Tempo de reparo e tempo entre falhas	0,000003
Tempo de reparo e CV do tempo de processamento	0,001194
Tempo de reparo e CV de chegadas	0,921395
Tempo entre falhas e CV do tempo de processamento	0,018387
Tempo entre falhas e CV de chegadas	0,910829
CV do tempo de processamento e CV de chegadas	0,993863

TABELA 6.1: Interações mais significantes no ambiente de máquina para $\alpha= 5\%$.

Como se pode ver na tabela 6.1, as interações mais significantes foram 8: tempo de reparo e tempo entre falhas ($\alpha=0,000003$); tempo de reparo e CV do tempo de processamento($\alpha=0,001194$); tempo de *setup* e tempo de reparo ($\alpha=0,001551$); taxa de defeitos e tempo entre falhas ($\alpha=0,009843$); tempo de *setup* e tempo entre falhas ($\alpha=0,011824$), tempo de *setup* e CV do tempo de processamento($\alpha=0,016440$); tempo entre falhas e CV do tempo de processamento($\alpha=0,018387$) e taxa de defeitos e tempo de reparo ($\alpha=0,019053$).

Ainda buscando investigar a questão de pesquisa 2, as interações 2 a 2 mais importantes foram gerados gráficos, os quais mostram o relacionamento dessas variáveis para os dois valores simulados nesse experimento. Os gráficos 6.14 a 6.21 apresentam esses relacionamentos.

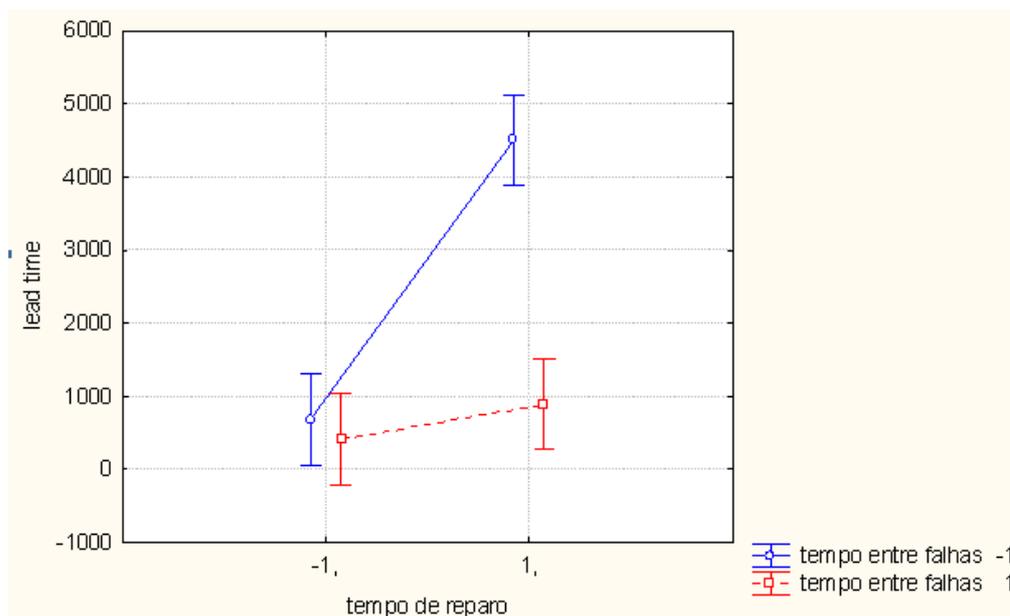


FIGURA 6.14: Interação entre tempo de reparo e tempo entre falhas

A figura 6.14 mostra a interação entre as variáveis tempo de reparo e tempo entre falhas. Dessa forma, pode-se concluir que em termos absolutos, existe diferença estatisticamente significativa (com relação ao efeito positivo no *lead time*) entre implantar uma ação de melhoria contínua no tempo entre falhas em um sistema com tempo de reparo alto (nesse estudo, 960 minutos) e implantar essa mesma ação em um sistema com tempo de reparo baixo (nesse estudo, 240 minutos). Na verdade, o efeito positivo no *lead time* de uma ação para melhoria no tempo entre falhas é bem maior para o tempo de reparo de 960 minutos. De maneira análoga, também, em virtude dessa interação, pode concluir que existem diferença estatisticamente significativa entre implementar uma ação para melhoria do tempo de reparo em um sistema alta frequência de falhas (nesse estudo, 4800 minutos) e implementar essa mesma melhoria em um sistema com menor frequência de falhas (nesse estudo, 19200 minutos). Nesse caso, também o efeito positivo no *lead time* de uma melhoria no tempo de reparo é bem maior para o tempo entre falhas de 4800 minutos.

Em outras palavras, pode-se afirmar (com significância estatística) que o efeito positivo no *lead time* da implantação de uma ação para melhoria no tempo entre falhas é sensível a sistemas com diferentes tempos de reparo. Da mesma forma, também o efeito positivo no *lead time* da implantação de uma ação de melhoria no tempo de reparo é sensível a sistemas com diferentes tempos entre falhas.

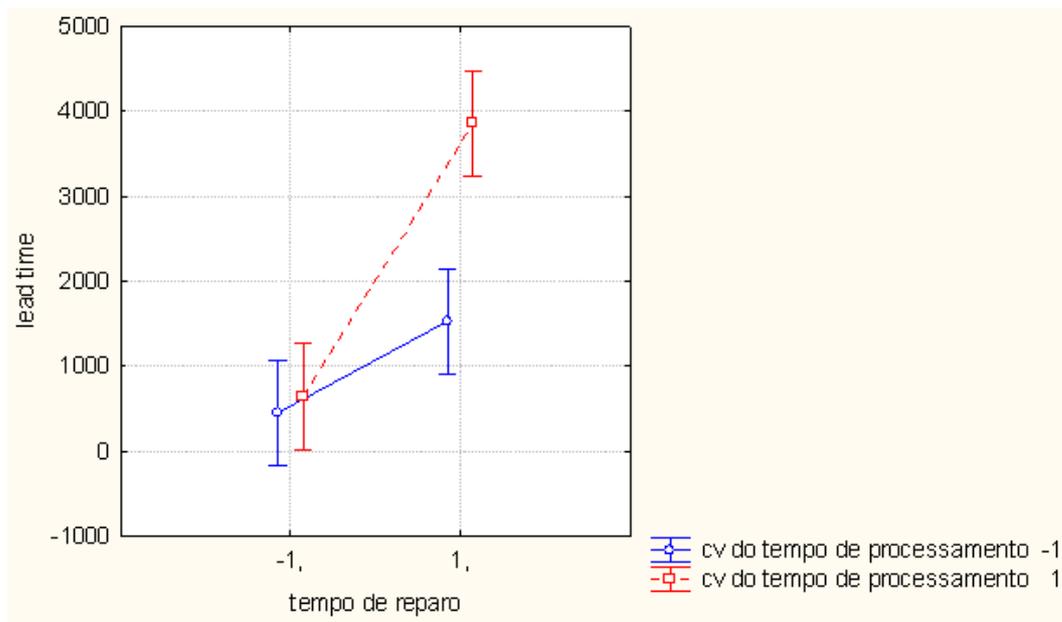


FIGURA 6.15: Interação entre tempo de reparo e o CV do tempo de processamento.

A figura 6.15 mostra a interação entre as variáveis tempo de reparo e variabilidade do tempo de processamento. Dessa forma, pode-se concluir que em termos absolutos, existe diferença estatisticamente significativa (com relação ao efeito positivo no *lead time*) entre implantar uma ação de melhoria contínua na variabilidade do tempo de processamento em um sistema com tempo de reparo alto (nesse estudo, 960 minutos) e implantar essa mesma ação em um sistema com tempo de reparo baixo (nesse estudo, 240 minutos). Na verdade, o efeito positivo no *lead time* de uma ação para melhoria na variabilidade do tempo de processamento é bem maior para o tempo de reparo de 960 minutos. De maneira análoga, também, em virtude dessa interação, pode concluir que existem diferença estatisticamente significativa entre implementar uma ação para melhoria do tempo de reparo em um sistema produtivo com alta variabilidade de processamento (nesse estudo, CV=1.5) e implementar essa mesma melhoria em um sistema com variabilidade de processamento baixa (nesse estudo, CV=0.5). Nesse caso, também o efeito positivo no *lead time* de uma melhoria no tempo de reparo é bem maior para a variabilidade do tempo de processamento alta.

Em outras palavras, pode-se afirmar (com significância estatística) que o efeito positivo no *lead time* da implantação de uma ação para melhoria na variabilidade do tempo de processamento é sensível a sistemas com diferentes tempos de reparo. Da mesma forma, também o efeito positivo no *lead time* da implantação de uma ação de melhoria no tempo de reparo é sensível a sistemas com diferentes variabilidades do tempo de processamento.

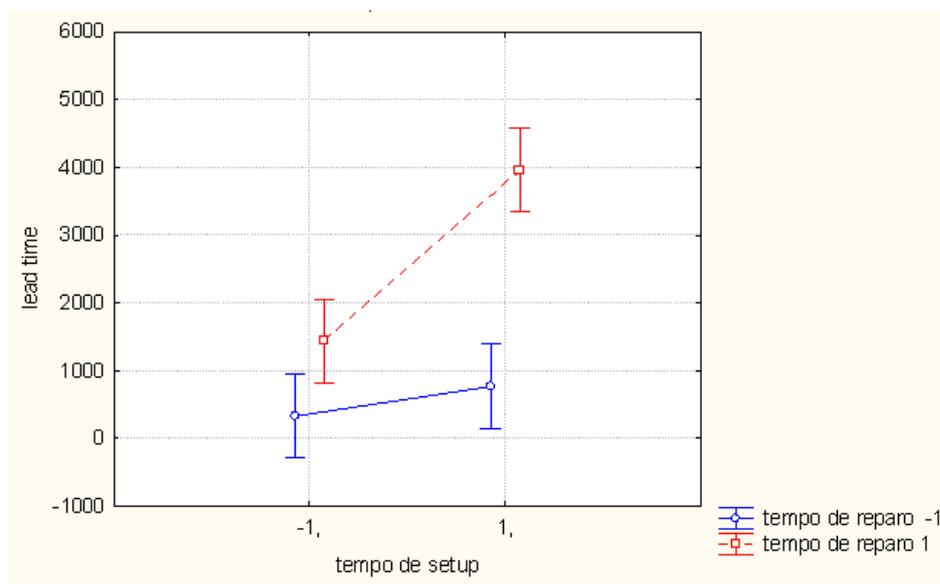


FIGURA 6.16: Interação entre tempo de *setup* e tempo de reparo.

A figura 6.16 mostra a interação entre as variáveis tempo de *setup* e tempo de reparo. Dessa forma, pode-se concluir que em termos absolutos, existe diferença estatisticamente significativa (com relação ao efeito positivo no *lead time*) entre implantar uma ação de melhoria contínua no tempo de reparo em um sistema produtivo com tempo de *setup* alto (nesse estudo, 240 minutos) e implantar essa mesma ação em um sistema com tempo de *setup* baixo (nesse estudo, 45 minutos). Na verdade, o efeito positivo no *lead time* de uma ação para melhoria no tempo de reparo é bem maior para o tempo de *setup* de 240 minutos. De maneira análoga, também, em virtude dessa interação, pode concluir que existem diferença estatisticamente significativa entre implementar uma ação para melhoria do tempo de *setup* em um sistema com alto tempo de reparo (nesse estudo, 960 minutos) e implementar essa mesma melhoria em um sistema com tempo de reparo baixo (nesse estudo, 240 minutos). Nesse caso, também o efeito positivo no *lead time* de uma melhoria no *setup* é bem maior para o tempo de reparo de 960 minutos.

Em outras palavras, pode-se afirmar (com significância estatística) que o efeito positivo no *lead time* da implantação de uma ação para melhoria no tempo de reparo é sensível a sistemas com diferentes tempos de *setup*. Da mesma forma, também o efeito positivo no *lead time* da implantação de uma ação de melhoria no tempo de *setup* é sensível ao sistema com diferentes tempos de reparo.

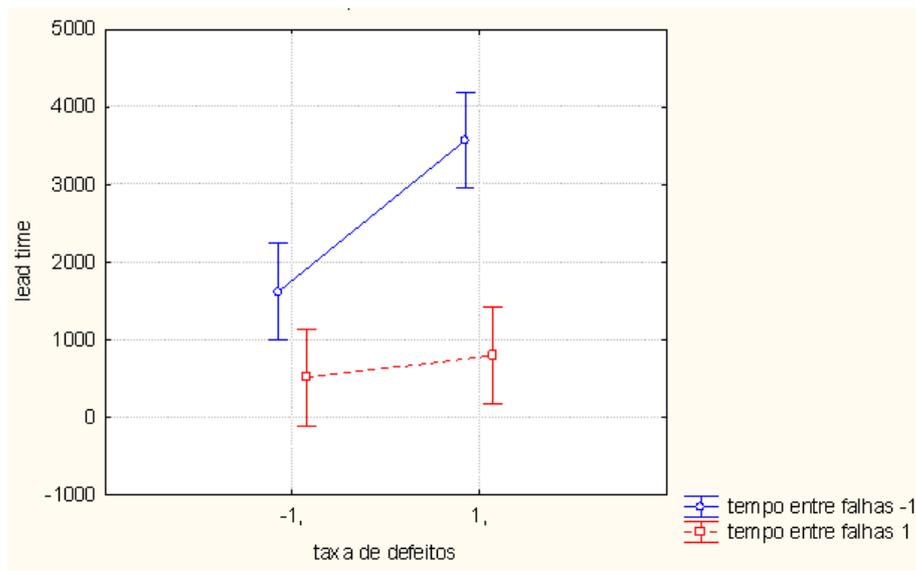


FIGURA 6.17: Interação entre taxa de defeitos e tempo entre falhas.

A figura 6.17 mostra a interação entre as variáveis taxa de defeitos e tempo entre falhas. Dessa forma, pode-se concluir que em termos absolutos, existe diferença estatisticamente significativa (com relação ao efeito positivo no *lead time*) entre implantar uma ação de melhoria contínua no tempo entre falhas em um sistema produtivo com taxa de defeitos alta (nesse estudo, 10%) e implantar essa mesma ação em um sistema com taxa de defeitos baixa (nesse estudo, 1%). Na verdade, o efeito positivo no *lead time* de uma ação para melhoria no tempo entre falhas é bem maior em um sistema com taxa de defeitos de 10%. De maneira análoga, também, em virtude dessa interação, pode concluir que existem diferença estatisticamente significativa entre implementar uma ação para melhoria na taxa de defeitos em um sistema com falhas mais freqüentes (nesse estudo, 4800 minutos) e implementar essa mesma melhoria em um sistema produtivo com falhas menos freqüentes (nesse estudo, 19200 minutos). Nesse caso, também o efeito positivo no *lead time* de uma melhoria na taxa de defeitos é bem maior para o tempo entre falhas de 19200 minutos

Em outras palavras, pode-se afirmar (com significância estatística) que o efeito positivo no *lead time* da implantação de uma ação para melhoria no tempo entre falhas é sensível a sistemas com diferentes taxas de defeitos. Da mesma forma, também o efeito positivo no *lead time* da implantação de uma ação de melhoria na taxa de defeitos é sensível a sistemas produtivos com diferentes tempos entre falhas.

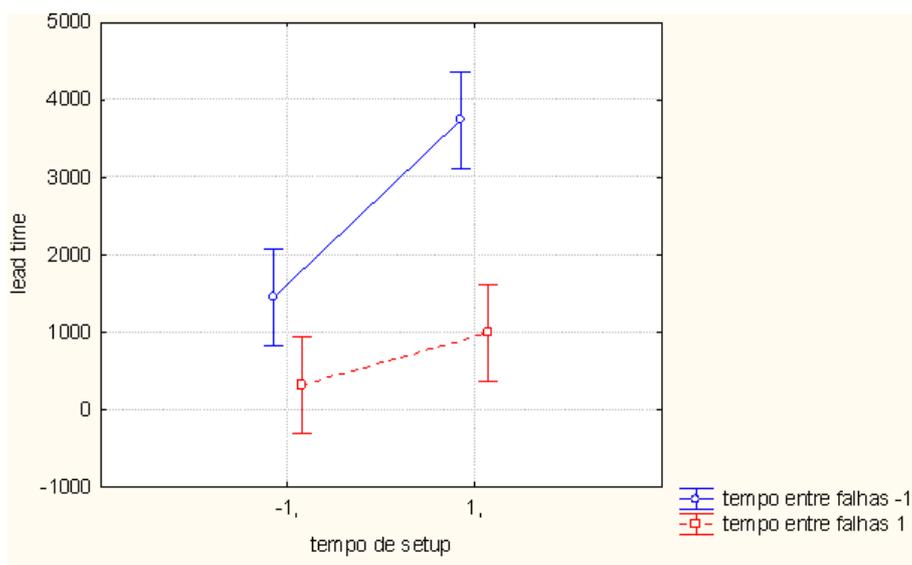


FIGURA 6.18: Interação entre tempo de *setup* e o tempo entre falhas.

A figura 6.18 mostra a interação entre as variáveis tempo de *setup* e tempo entre falhas. Dessa forma, pode-se concluir que em termos absolutos, existe diferença estatisticamente significativa (com relação ao efeito positivo no *lead time*) entre implantar uma ação de melhoria contínua no tempo entre falhas em um sistema com tempo de *setup* alto (nesse estudo, 240 minutos) e implantar essa mesma ação em um sistema com tempo de *setup* baixo (nesse estudo, 45 minutos). Na verdade, o efeito positivo no *lead time* de uma ação para melhoria no tempo entre falhas é bem maior para o tempo de *setup* de 240 minutos. De maneira análoga, também, em virtude dessa interação, pode concluir que existem diferença estatisticamente significativa entre implementar uma ação para melhoria do tempo de *setup* em um sistema com alta frequência de falhas (nesse estudo, 4800 minutos) e implementar essa mesma melhoria em um sistema produtivo com baixa frequência de falhas (nesse estudo, 19200 minutos). Nesse caso, também o efeito positivo no *lead time* de uma melhoria no *setup* é bem maior para um tempo entre falhas de 4800 minutos.

Em outras palavras, pode-se afirmar (com significância estatística) que o efeito positivo no *lead time* da implantação de uma ação para melhoria no tempo entre falhas é sensível a sistemas com diferentes tempos de *setup*. Da mesma forma, também o efeito positivo no *lead time* da implantação de uma ação de melhoria no tempo de *setup* é sensível a sistemas com diferentes tempos de reparo.

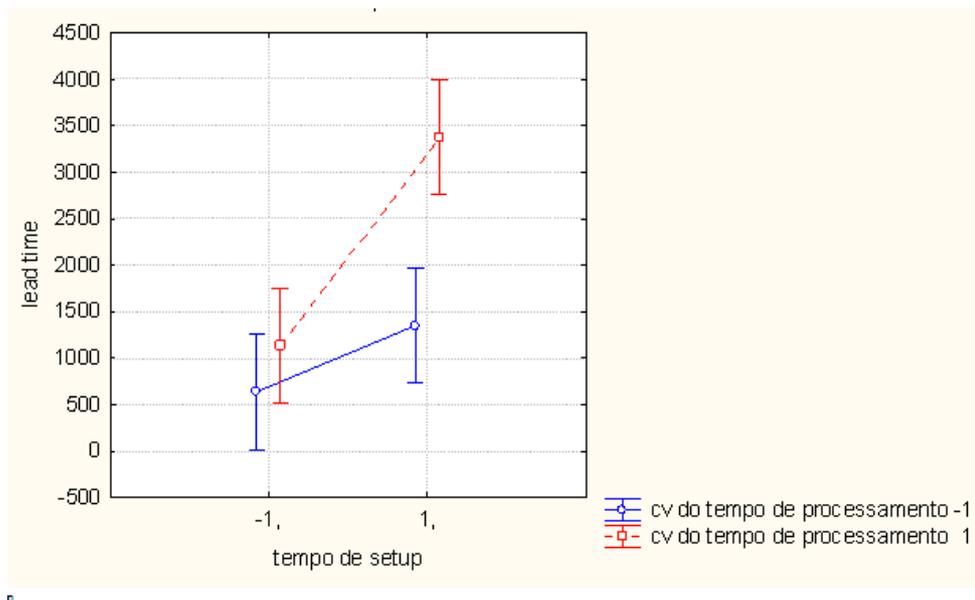


FIGURA 6.19: Interação entre tempo de *setup* e o CV do tempo de processamento.

A figura 6.19 mostra a interação entre as variáveis tempo de *setup* e variabilidade do tempo de processamento. Dessa forma, pode-se concluir que em termos absolutos, existe diferença estatisticamente significativa (com relação ao efeito positivo no *lead time*) entre implantar uma ação de melhoria contínua na variabilidade do tempo de processamento em um sistema com tempo de *setup* alto (nesse estudo, 240 minutos) e implantar essa mesma ação em um sistema com tempo de *setup* baixo (nesse estudo, 45 minutos). Na verdade, o efeito positivo no *lead time* de uma ação para melhoria na variabilidade do tempo de processamento é bem maior para o tempo de *setup* de 960 minutos. De maneira análoga, também, em virtude dessa interação, pode concluir que existem diferença estatisticamente significativa entre implementar uma ação para melhoria do tempo de *setup* em um sistema com alta variabilidade (nesse estudo, CV=1;5) e implementar essa mesma melhoria em um sistema produtivo com menor variabilidade do tempo de processamento (nesse estudo, CV=0.5). Nesse caso, também o efeito positivo no *lead time* de uma melhoria no tempo de *setup* é bem maior para a variabilidade do tempo de processamento alta.

Em outras palavras, pode-se afirmar (com significância estatística) que o efeito positivo no *lead time* da implantação de uma ação para melhoria na variabilidade do tempo de processamento é sensível a sistemas com diferentes tempos de *setup*. Da mesma forma, também o efeito positivo no *lead time* da implantação de uma ação de melhoria no tempo de *setup* é sensível a sistemas com diferentes valores de variabilidade do tempo de processamento.

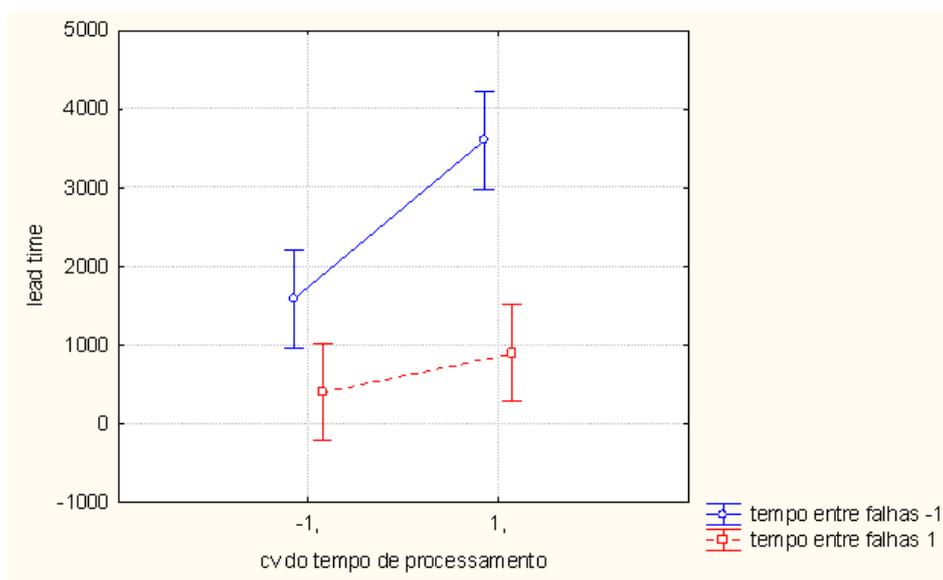


FIGURA 6.20: Interação entre CV do tempo de processamento e tempo entre falhas.

A figura 6.20 mostra a interação entre as variáveis variabilidade do tempo de processamento e tempo entre falhas. Dessa forma, pode-se concluir que em termos absolutos, existe diferença estatisticamente significativa (com relação ao efeito positivo no *lead time*) entre implantar uma ação de melhoria contínua no tempo entre falhas em um sistema com alta variabilidade do tempo de processamento (nesse estudo, $CV= 1.5$) e implantar essa mesma ação em um sistema com variabilidade do tempo de processamento baixa (nesse estudo, $CV=0.5$). Na verdade, o efeito positivo no *lead time* de uma ação para melhoria no tempo entre falhas é bem maior para CV do tempo de processamento = 1.5 (variabilidade alta). De maneira análoga, também, em virtude dessa interação, pode concluir que existem diferença estatisticamente significativa entre implementar uma ação para melhoria na variabilidade do tempo de processamento em um sistema com alta frequência de falhas (nesse estudo, 4800 minutos) e implementar essa mesma melhoria em um sistema produtivo com baixa frequência de falhas (nesse estudo, 19200 minutos). Nesse caso, também o efeito positivo no *lead time* de uma melhoria na variabilidade do tempo de processamento é bem maior para o tempo entre falhas de 4800 minutos.

Em outras palavras, pode-se afirmar (com significância estatística) que o efeito positivo no *lead time* da implantação de uma ação para melhoria no tempo entre falhas é sensível a sistemas com diferentes variabilidades do tempo de processamento. Da mesma forma, também o efeito positivo no *lead time* da implantação de uma ação de melhoria

variabilidade do tempo de processamento é sensível a sistemas com diferentes tempos entre falhas.

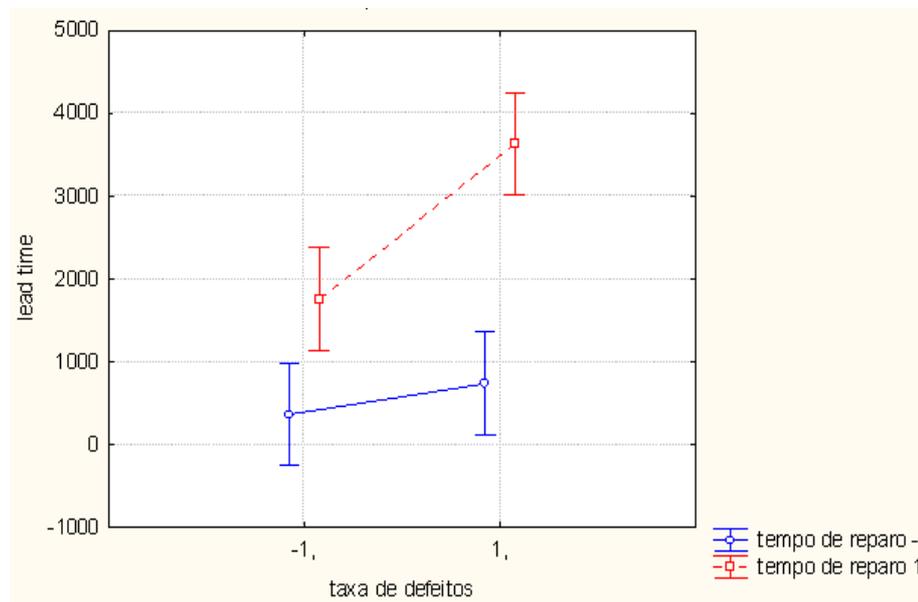


FIGURA 6.21: Interação entre taxa de defeitos e o tempo de reparo.

A figura 6.21 mostra a interação entre as variáveis taxas de defeitos e tempo de reparo. Dessa forma, pode-se concluir que em termos absolutos, existe diferença estatisticamente significativa (com relação ao efeito positivo no *lead time*) entre implantar uma ação de melhoria contínua no tempo de reparo em um sistema com taxa de defeitos alta (nesse estudo, 10%) e implantar essa mesma ação em um sistema produtivo com taxa de defeitos baixa (nesse estudo, 1%). Na verdade, o efeito positivo no *lead time* de uma ação para melhoria no tempo de reparo é bem maior para taxa de defeitos de 10%. De maneira análoga, também, em virtude dessa interação, pode concluir que existem diferença estatisticamente significativa entre implementar uma ação para melhoria na taxa de defeitos em um sistema com alto tempo de reparo (nesse estudo, 960 minutos) e implementar essa mesma melhoria em um sistema com tempo de reparo baixo (nesse estudo, 240 minutos). Nesse caso, também o efeito positivo no *lead time* de uma melhoria na taxa de defeitos é bem maior para o tempo de reparo de 960 minutos.

Em outras palavras, pode-se afirmar (com significância estatística) que o efeito positivo no *lead time* da implantação de uma ação para melhoria no tempo de reparo é sensível a sistemas com diferentes taxas de defeitos. Da mesma forma, também o efeito

positivo no *lead time* da implantação de uma ação de melhoria na taxa de defeitos é sensível a sistemas com diferentes tempos de reparo.

6.3.1 Sumário das conclusões obtidas com a investigação da questão de pesquisa 2.

A partir da análise dos relacionamentos significantes entre as variáveis do chão de fábrica estudadas nesse trabalho pode-se perceber que existiram interações em determinados sistemas produtivos e determinadas ações de melhoria. Foram identificadas oito interações a um nível de significância de 5%. Essas oito interações identificadas podem ser divididas em 3 grupos, conforme seus níveis de significância. Esses grupos são:

As interações mais significantes: Estas foram encontradas nos relacionamentos do tempo de reparo e tempo entre falhas ($\alpha=0,000003$); tempo de reparo e variabilidade do tempo de processamento ($\alpha=0,001194$) e tempo de reparo e tempo de *setup* ($\alpha=0,001551$). Essas três interações têm um nível de significância entre 0 e 0,16%.

Outras interações estaticamente significantes: São relacionamentos que se mostraram estatisticamente significantes, mas em uma escala de importância de menor importância. São elas: taxa de defeitos e tempo entre falhas, tempo de *setup* e tempo entre falhas, tempo de *setup* e variabilidade do tempo de processamento, tempo entre falhas e variabilidade do tempo de processamento e taxa de defeitos e tempo de reparo. Essas interações têm um nível de significância entre 0,9 e 2%.

Interações estatisticamente não significantes: Sete interações não se mostraram estatisticamente significantes. São elas: tempo de *setup* e taxa de defeitos, tempo de *setup* e variabilidade de chegadas; taxa de defeitos e variabilidade do tempo de processamento; taxa de defeitos e variabilidade de chegadas; tempo de reparo e variabilidade de chegadas; tempo entre falhas e variabilidade de chegadas e variabilidade do tempo de processamento e variabilidade de chegadas. Essas interações têm um nível de significância entre 5% e 99%. Isso significa que, por exemplo, o efeito positivo no *lead time* da implementação de uma ação de melhoria no *setup* é o mesmo independente da taxa de defeitos. Da mesma forma, o efeito de todas as ações de melhoria nas outras variáveis com relação à variabilidade de chegada de ordens.

O quadro 6.7 sumariza para cada característica do sistema, as ações de melhoria contínua em cada uma das variáveis do chão de fábrica estudadas que se mostraram sensíveis a essas características.

Características do sistema estudado	Ações de melhoria que se mostraram sensíveis a características do sistema estudado	Ações de melhoria contínua que não apresentaram interação estatisticamente significativa para o sistema estudado
Diferentes tempos de <i>setup</i>	Tempo de reparo, tempo entre falhas e variabilidade do tempo de processamento	Taxa de defeitos e variabilidade de chegadas
Diferentes tempos de reparo	Tempo entre falhas, variabilidade do tempo de processamento, tempo de <i>setup</i> e taxa de defeitos	Variabilidade de chegadas
Diferentes tempos entre falhas	Tempo de reparo, taxa de defeitos, tempo de <i>setup</i> , variabilidade do tempo de processamento	Variabilidade de chegadas
Diferentes taxas de defeitos	Tempo entre falhas, tempo de reparo	Tempo de <i>setup</i> , variabilidade do tempo de processamento, variabilidade de chegadas
Diferentes variabilidades do tempo de processamento	Tempo de reparo, tempo de <i>setup</i> , tempo entre falhas	Taxa de defeitos, variabilidade de chegadas
Diferentes variabilidades de chegadas	Nenhum	Todos

QUADRO 6.7: Síntese das influências de características do sistema produtivo no efeito das ações de melhoria estudadas para ambiente de máquina única.

Pode-se constatar por meio do quadro 6.7 que as ações de melhoria no tempo de reparo e ações de melhoria no tempo entre falhas são as que mais possuem interações significantes (quatro, cada uma), ou seja, são as que mais têm seu efeito na redução do *lead time* influenciado por outras características do sistema produtivo. Por exemplo, uma ação de melhoria no tempo de reparo é influenciada por diferentes valores de tempo entre falhas, variabilidade do tempo de processamento, tempo de *setup* e taxa de defeitos. Já uma ação de melhoria no tempo entre falhas é influenciada pelo tempo de reparo, taxa de defeitos, tempo de *setup* e variabilidade do tempo de processamento.

Portanto, ações de melhoria no tempo de reparo e no tempo entre falhas são as que se mostraram como melhores alternativas em sistemas com certas características negativas com relação a altos tempos de *setup* e altas variabilidades do tempo de processamento, nos quais essas características não podem ser alteradas por motivos

estratégicos ou mesmo por restrições do processo. Por exemplo, em um processo em que os *setups* são longos devido à característica do produto ou em processos nos quais a alta variabilidade do tempo de processamento devido a um grande mix de produto, uma alternativa para a redução do *lead time* é investir-se em uma melhoria no tempo de reparo ou no tempo entre falhas. Outras ações alternativas podem ser encontradas por meio dos resultados mostrados no quadro 6.7.

Em contrapartida, uma ação de melhoria contínua na variabilidade de chegadas não possui influência e nem influencia nenhuma outra característica do sistema produtivo para o ambiente com máquina única. Ou seja, uma ação de melhoria na variabilidade de chegadas mantém seu pequeno efeito na redução do *lead time* independente da característica do sistema produtivo em que ela aja.

Outra variável que apresenta pouca sensibilidade a características do sistema produtivo é a taxa de defeitos, a qual sofre influência e influencia o tempo de reparo e do tempo entre falhas. Logo, uma ação de melhoria na taxa de defeitos mantém seu efeito na redução do *lead time* igual para quase todas as características do sistema produtivo, sendo sensível apenas a diferenças no tempo entre falhas e no tempo de reparo.

CAPÍTULO 7: O EFEITO DE AÇÕES DE MELHORIA CONTÍNUA NO *LEAD TIME* PARA DIFERENTES CARACTERÍSTICAS DO AMBIENTE PRODUTIVO PARA MAIS ESTAÇÕES DE TRABALHO

7.1 INTRODUÇÃO

O capítulo 7, assim como o capítulo anterior, tem como objetivo responder as mesmas questões de pesquisa levantadas nesse trabalho, mas para um ambiente *flow shop* (nesse caso para 5 estações).

Utilizando um ambiente *flow shop* para realizar as simulações, pretende-se também observar as diferenças com relação aos resultados encontrados para apenas uma estação do trabalho. Desse modo, é possível identificar a influência do fluxo produtivo no *lead time* e verificar como isso atinge o comportamento de ações de melhoria contínua nas variáveis do chão de fábrica estudadas.

7.2 INVESTIGANDO A QUESTÃO DE PESQUISA 1

O ambiente produtivo mostrado nesse capítulo contém 5 estações de trabalho e os cenários simulados possuem as mesmas características produtivas do cenários do capítulo 6 (seção 6.2), ou seja, as simulações são feitas para diferentes níveis de: 1) tempo de *setup*, 2) taxa de defeitos; 3) tempo entre falhas; 4) tempo de reparo; 5) variabilidade do tempo de processamento; 6) variabilidade de chegadas.

Nesse ambiente com 5 estações de trabalhos, cada estação apresenta os mesmos valores de variáveis das outras, os quais são iguais aos valores do ambiente simulado no capítulo 6.

As próximas subseções mostram os resultados encontrados para um ambiente com 5 estações de trabalho.

7.2.1 CENÁRIO 7: O efeito das ações de melhoria contínua no *lead time* para sistemas com diferentes tempos de *setup*.

As figuras 7.1 e 7.2 mostram o comportamento das ações de melhoria contínua no *lead time* para diferentes valores do tempo de *setup* (240, 180 e 45 minutos). Na figura 7.1 é apresentado o resultado para os tempos de 240 e 180 minutos e a figura 7.2 mostra o resultado para os tempos de 180 e 45 minutos. Em todos os cenários simulados o valor das variáveis em questão foi alterado para todas as estações de trabalho, por exemplo, nesse cenário, todas as cinco estações tiveram seus valores de tempo de *setup* alterados.

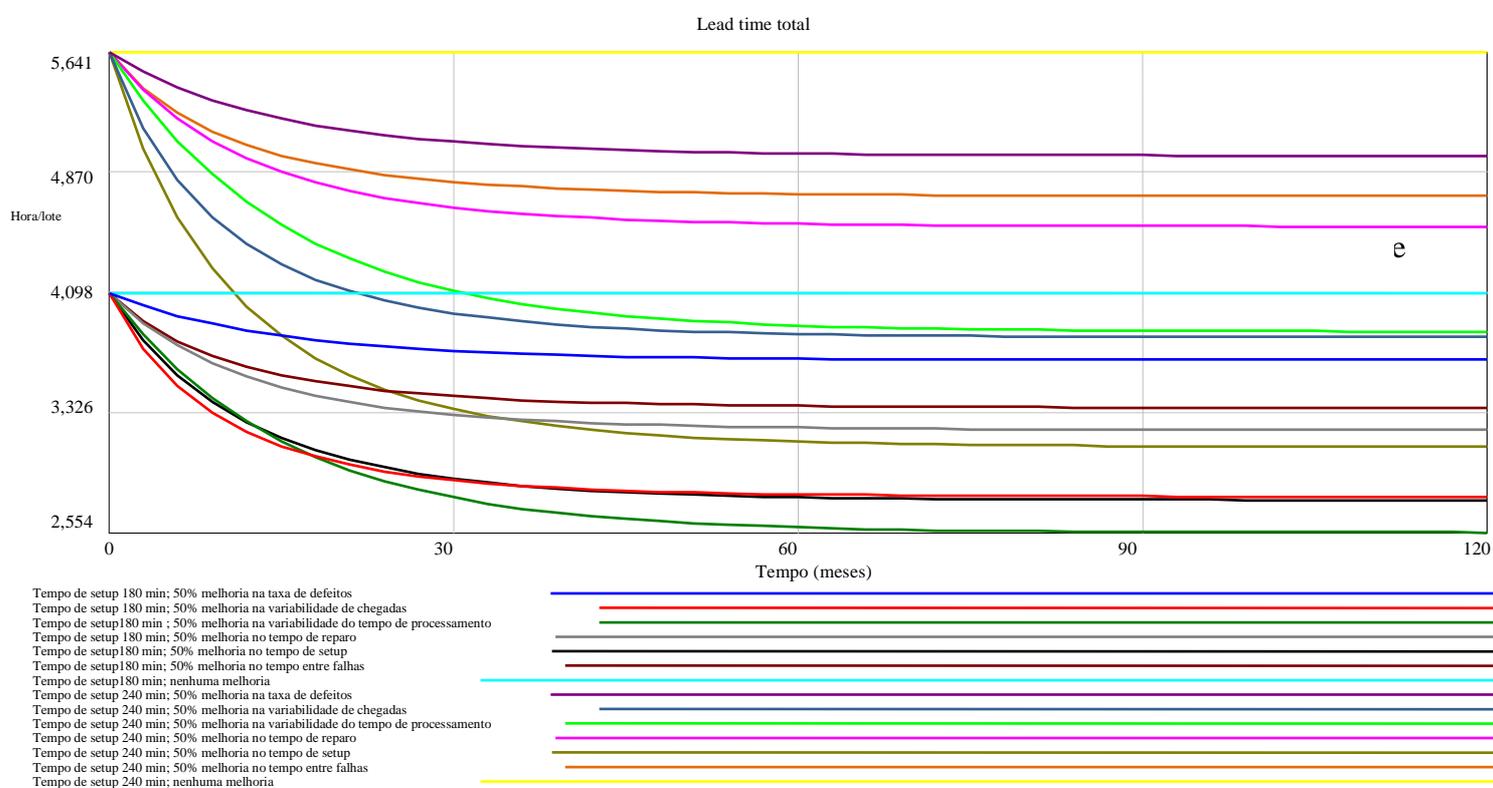


FIGURA 7.1: Efeito de ações de melhoria contínua no *lead time* para tempos de *setup* de 240 e 180 minutos.

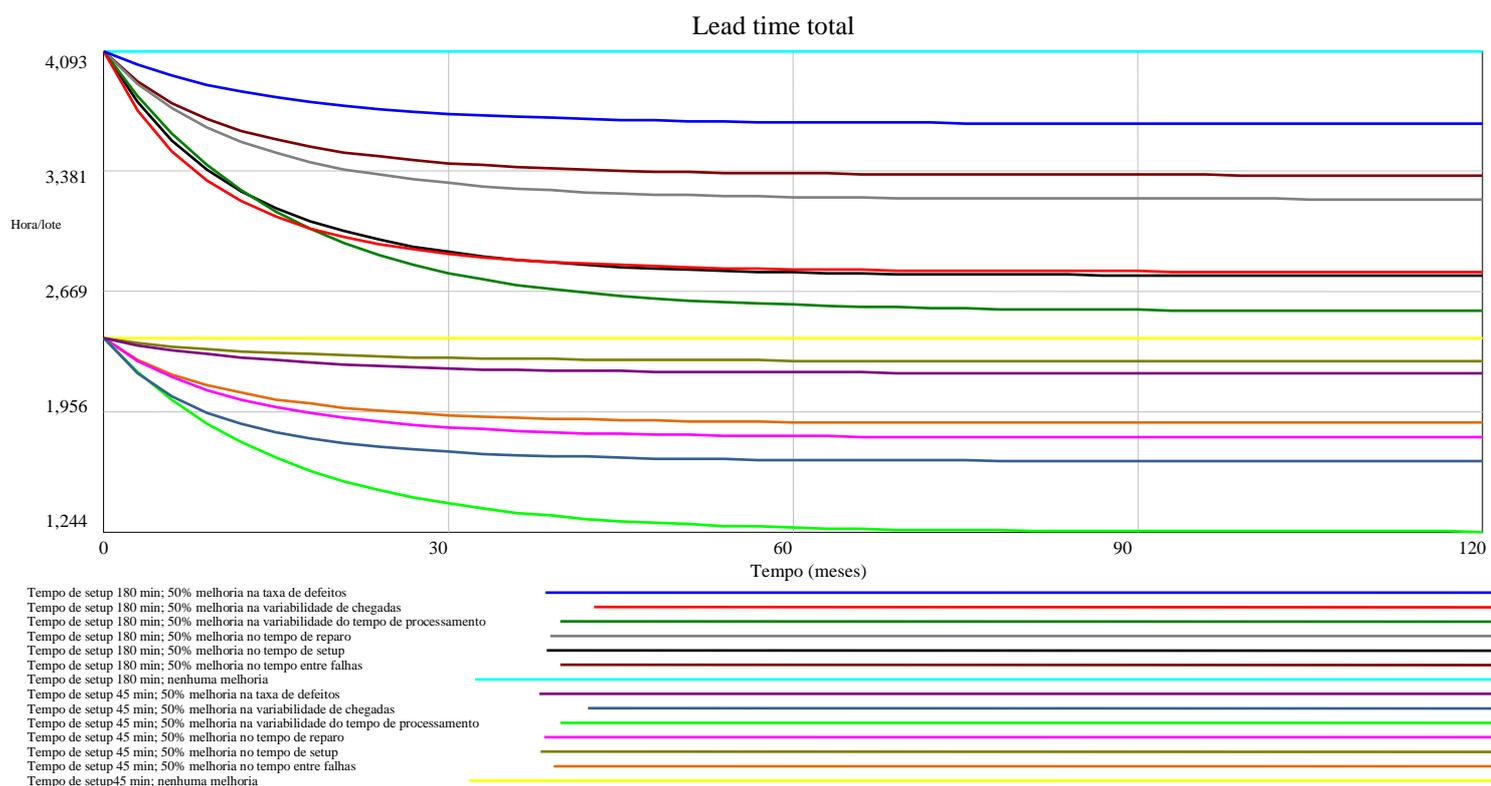


FIGURA 7.2: Efeito de ações de melhoria contínua no *lead time* para tempos de *setup* de 180 e 45 minutos.

As figuras 7.1 e 7.2 mostram que:

- Quanto menor o tempo de *setup* inicial, menor é o *lead time* do processo;
- Conforme nota-se nas figuras 7.1 e 7.2, o efeito no *lead time* das diferentes ações de melhoria para cada um dos 3 tempos de *setup* estudadas é bastante diferenciado. Nota-se claramente nos gráficos que nenhuma ação de melhoria (com exceção da melhoria nessa própria variável) com um nível de *setup* mais elevado apresenta desempenho superior com relação à redução do *lead time* do que outra ação de melhoria com tempo de *setup* menor. Por exemplo, o sistema produtivo com tempo *setup* de 45 minutos e sem nenhuma melhoria tem o *lead time* menor do que todas as ações de melhoria para um sistema com 180 minutos. Quando se compara o sistema produtivo com tempo de *setup* de 240 e 180 minutos, percebe-se que apenas a 50% melhoria no *setup* para o sistema com tempo de 240 minutos consegue atingir um *lead time* menor do que algumas ações de melhoria do sistema com tempo de 180 minutos. Isso mostra a importância que a melhoria do tempo de *setup* é realmente uma política muito eficaz

para a redução do *lead time*. Esse fato também acontece para o sistema produtivo de máquina única.

- A ordem de importância para os três sistemas simulados nesse cenário são bem parecidas com a ordem encontrada para o cenário 1 do capítulo 6 (sistema produtivo com máquina única). No sistema produtivo com tempo de *setup* de 240 minutos, a ação que mais efeito tem na redução do *lead time* é o de 50% de melhoria no próprio tempo de *setup*, seguido pela melhoria na variabilidade de chegadas, variabilidade do tempo de processamento, tempo de reparo, tempo entre falhas e por fim, taxa de defeitos. Com o tempo de 180 minutos, a ação que mais redução provoca no *lead time* é a de variabilidade no tempo de processamento, seguida pela melhoria no tempo de *setup*, variabilidade de chegadas, tempo de reparo, tempo entre falhas, e taxa de defeitos. Para o sistema com tempo de 45 minutos, por exemplo, a ação de melhoria que mais reduz o *lead time* é também a de melhoria na variabilidade do tempo de processamento, seguida pela melhoria na variabilidade de chegadas, tempo de reparo, tempo entre falhas, taxa de defeitos e tempo de *setup*.

Os resultados das figuras 7.1 e 7.2 mostram que os resultados encontrados para 5 estações de trabalho são bastante parecidos para o sistema produtivo com 1 estação de trabalho. Nesse novo sistema o tempo de *setup* continua sendo muito importante para a redução do *lead time*. Muitas vezes, a implementação de outras ações de melhoria em sistemas com alto valor dessa variável, resultará em pouco ganho com relação do *lead time*, principalmente se os resultados dessa ação de melhoria forem comparados com os resultados de uma alternativa de redução do tempo de *setup*. A ordem de importância das ações de melhoria continua quase a mesma assim como o potencial de redução no *lead time*.

7.2.2 CENÁRIO 8: O efeito das ações de melhoria contínua no *lead time* para sistemas com diferentes taxas de defeitos.

Nessa seção sistemas com 3 níveis diferentes de taxas de defeitos (10%, 5% e 1%) são simulados. As figuras 7.3 e 7.4 mostram os resultados das ações de melhoria contínua na redução do *lead time* para cada um desses sistemas produtivos.

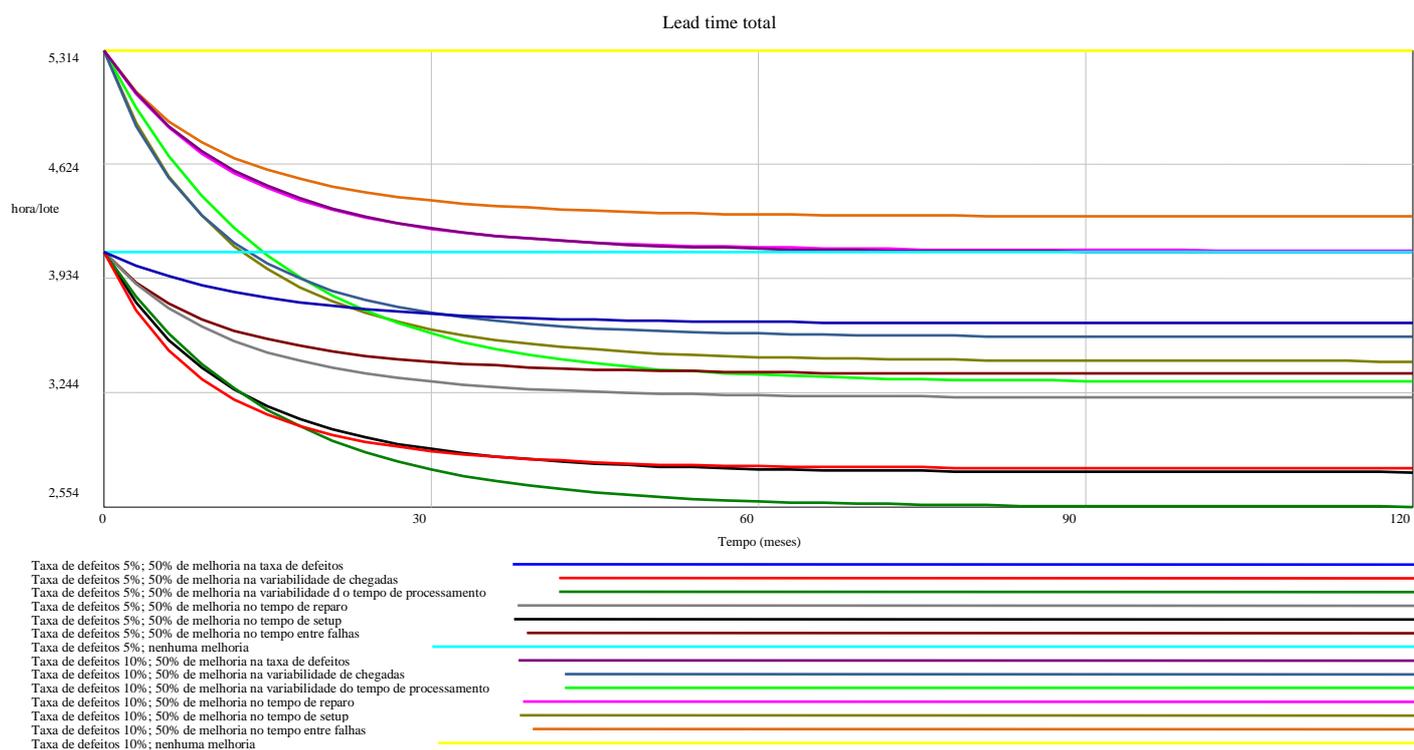


FIGURA 7.3: Efeito de ações de melhoria contínua no lead time para as taxas de defeitos de 5% e 10%.

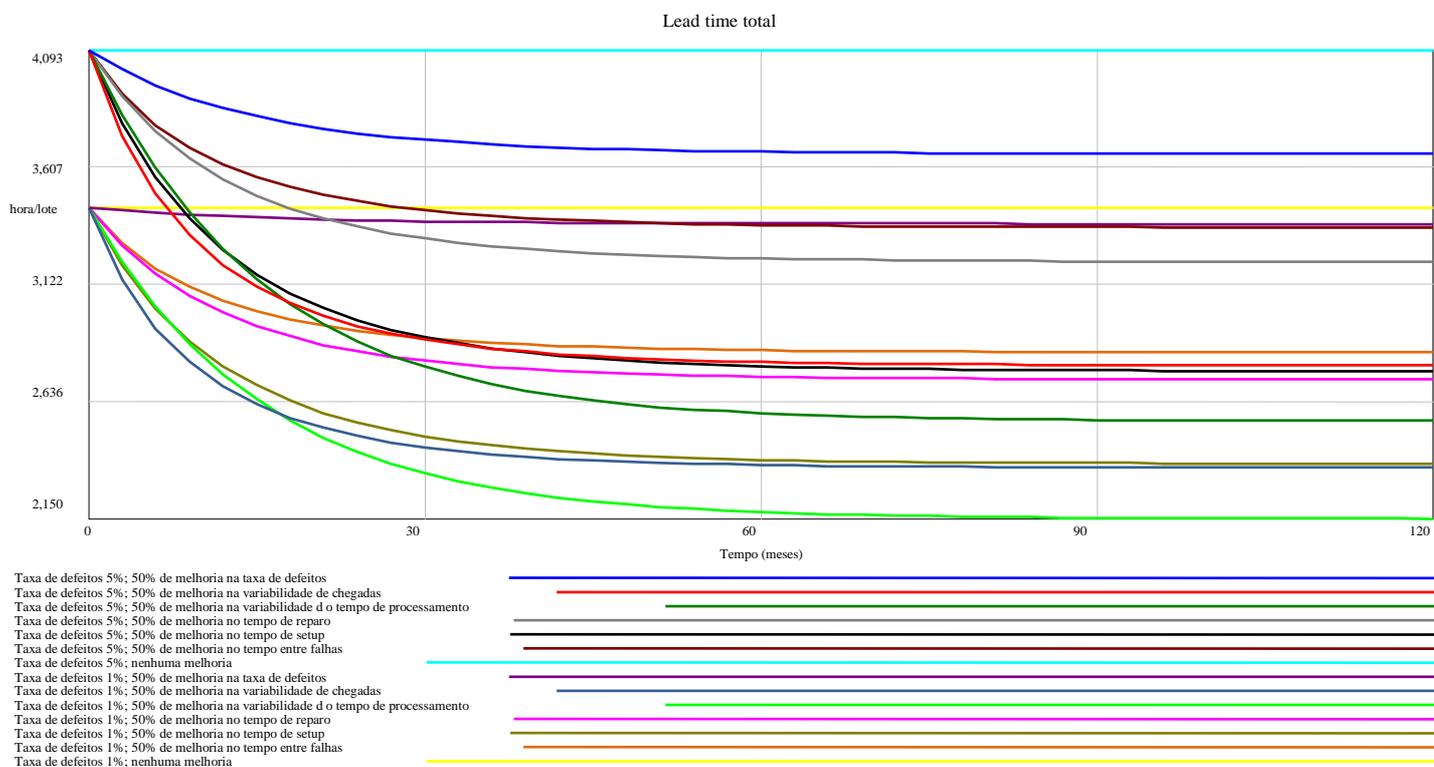


FIGURA 7.4: Efeito de ações de melhoria contínua no lead time para as taxas de defeitos de 5% e 1%.

As figuras 7.3 e 7.4 mostram que:

- Quanto menor a taxa de defeitos, menor é o *lead time* do processo;
- Assim como nos cenários com máquina única, o valor da taxa de defeitos não tem grande interferência no efeito das ações de melhoria na redução do *lead time*, pois existem ações que mesmo em um sistema com alta taxa de defeitos tem melhor desempenho que outras em sistemas com baixa taxa de defeitos. Por exemplo, uma ação de melhoria na variabilidade do tempo de processamento no sistema com taxa de defeitos de 5% apresenta melhor desempenho na redução do *lead time* do que as ações de melhoria na taxa de defeitos, no tempo entre falhas e no tempo de reparo para o sistema produtivo com taxa de defeitos de 1%. Isso não ocorre com a variável tempo de *setup*, o que demonstra que a redução da taxa de defeitos tem um efeito não tão expressivo com relação à redução do *lead time*, mesmo para um ambiente com mais estações de trabalho;
- A ordem do efeito das ações estudadas é bastante parecida para as três taxas de defeitos estudadas e também para o ambiente com apenas 1 estação de trabalho. No sistema com taxa de defeitos de 10%, a ação de melhoria que mais efeito tem na redução do *lead time* é a de melhoria de 50% na variabilidade do tempo de processamento, seguida pela melhoria no tempo de *setup*, variabilidade de chegadas, tempo de reparo, taxa de defeitos e tempo entre falhas. Com a taxa de defeitos de 5%, as quatro primeiras ações em ordem de importância na redução do *lead time* são as mesmas (variabilidade do tempo de processamento, tempo de *setup*, variabilidade de chegadas e tempo de reparo), seguidas pela melhoria no tempo entre falhas e na taxa de defeitos. No sistema com 1% de taxa de defeitos, a ação de melhoria que mais contribui para redução do *lead time* também é a de variabilidade do tempo de processamento, seguida pela melhoria de variabilidade de chegadas, tempo de *setup*, tempo de reparo, tempo entre falhas e por fim, taxa de defeitos.

Os resultados das figuras 7.3 e 7.4 mostram que os sistemas com 1 e com 5 estações apresentam várias semelhanças. A ordem de importância das ações de melhoria para a redução do *lead time* também são bastante parecidas.

7.2.3 CENÁRIO 9: O efeito das ações de melhoria contínua no *lead time* para sistemas com diferentes tempos entre falhas.

Nessa seção mais três diferentes sistemas produtivos são simulados, nessa vez para diferentes valores de tempo entre falhas (19200, 9600 e 4800 minutos). As figuras 7.5 e 7.6 apresentam os resultados das ações de melhoria na redução do *lead time* para esses sistemas.

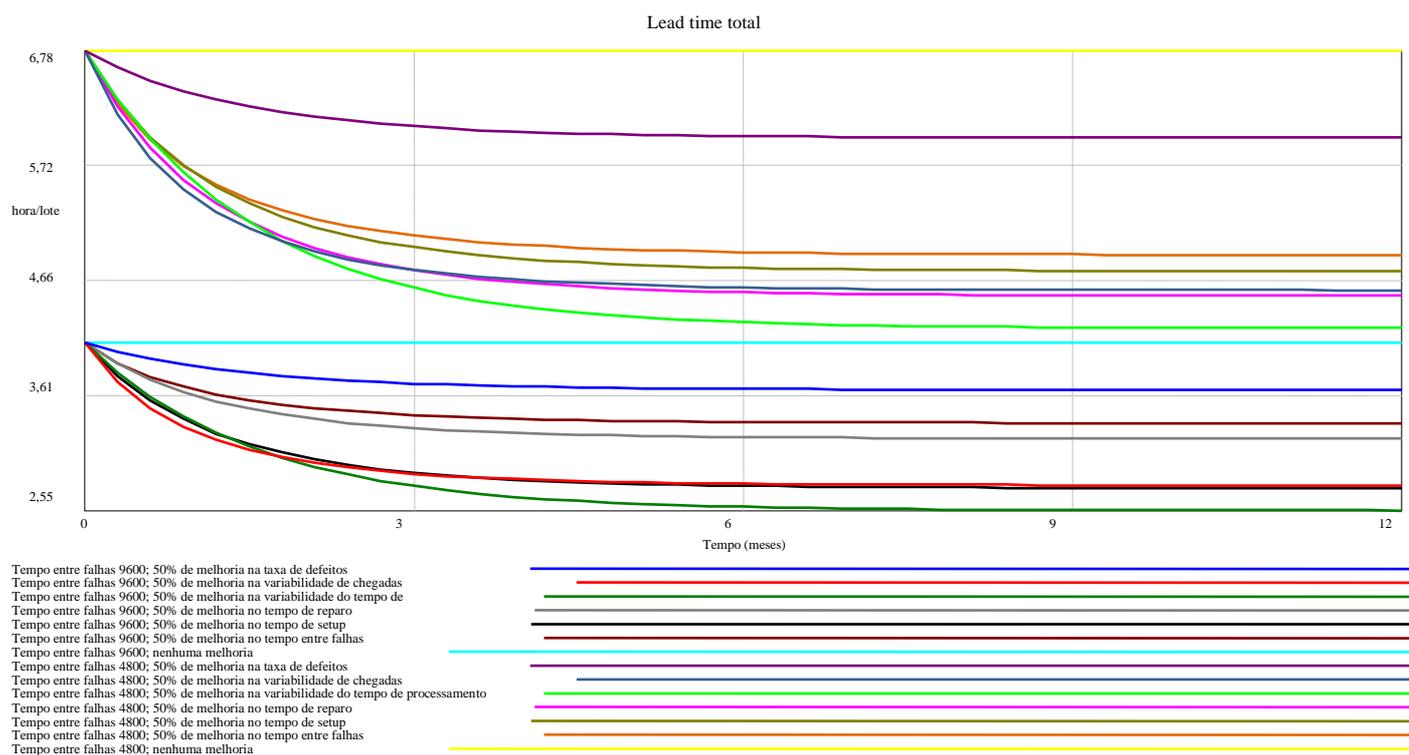


FIGURA 7.5: Efeito de ações de melhoria contínua no *lead time* para os tempos entre falhas de 4800 e 9600 minutos.

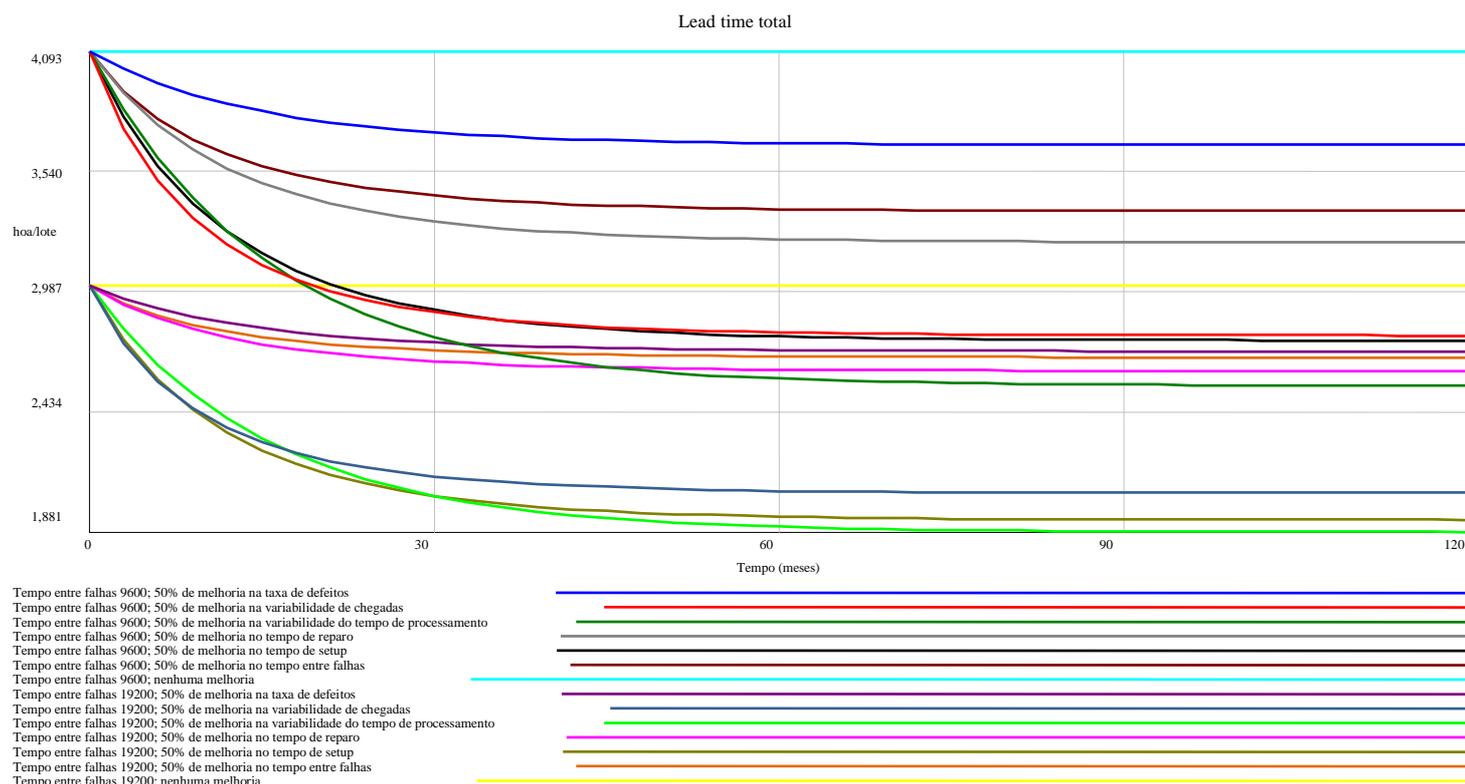


FIGURA 7.6: Efeito de ações de melhoria contínua no *lead time* para os tempos entre falhas de 9600 e 19200 minutos.

As figuras 7.5 e 7.6 mostram que:

- Quanto mais frequentes forem as falhas de máquinas, ou seja, quanto menor for o tempo entre falhas, maior é o *lead time* do processo;
- A redução do tempo entre falhas é uma política muito eficaz na diminuição do *lead time*, assim como acontece no sistema com apenas 1 estação de trabalho. Da mesma maneira que no capítulo anterior, essa importância pode ser observada na grande diferença entre os efeitos de diversas ações de melhoria contínua dependendo da frequência entre as falhas. Por exemplo, no sistema produtivo com tempo entre falhas de 9600 minutos e sem nenhuma melhoria implementada, o *lead time* apresentado é menor que todas as situações de melhoria para tempo entre falhas de 4800 minutos. Porém, para o sistema com tempo entre falhas de 9600 minutos, a ação de melhoria na variabilidade do tempo de processamento consegue atingir *lead time* menor que 3 ações de melhoria para o sistema produtivo com tempo entre falhas menor. Isso pode ser uma política alternativa a ser adotada quando o aumento da confiabilidade passa a ser difícil a partir de um determinado momento;

- A ordem do efeito das ações estudados para os 3 diferentes tempos entre falhas é bastante parecida entre si e quando comparado aos ambientes com apenas 1 estação do trabalho. Para um sistema produtivo com menor tempo entre falhas (4800 minutos), a ação que mais afeta na redução do *lead time* é o de 50% de melhoria na variabilidade do tempo de processamento, seguida pela de melhoria no tempo de reparo, variabilidade de chegadas, tempo de *setup*, tempo entre falhas e taxa de defeitos. No sistema produtivo com tempo entre falhas de 9600, a ação que mais afeta na redução do *lead time* também é a de melhoria na variabilidade do tempo de processamento, seguida pela melhoria no tempo de *setup*, tempo de reparo, tempo entre falhas e taxa de defeitos. No sistema com maior tempo entre falhas (19200 minutos), o comportamento das ações de melhoria contínua segue o mesmo comportamento do sistema produtivo com 9600 minutos.

Os resultados das figuras 7.5 e 7.6 mostram que o sistema com 5 estações apresenta algumas semelhanças com o ambiente com 1 estação. Entre essas semelhanças está o fato da grande importância das ações de melhoria no tempo entre falhas e no tempo de reparo em sistemas com maior frequência nas falhas, como já era esperado. Outra semelhança é que mesmo em um sistema com baixo tempo entre falhas, algumas ações têm mais potencial na redução do *lead time* do que a melhoria nessa própria variável. É o caso das ações de melhoria na variabilidade do tempo de processamento, tempo de reparo, variabilidade na taxa de chegadas e tempo de *setup*. A ordem das ações de melhoria contínua também é bastante parecida nas duas situações. Também, a política de investir em programas de zero falhas, continua (de acordo com as simulações) se mostrando pouco eficaz na redução do *lead time*, já que a maioria das ações apresentam comportamento estável a partir de um certo ponto;

7.2.4 CENÁRIO 10: O efeito das ações de melhoria contínua no *lead time* para sistemas com diferentes tempos de reparo.

Nessa seção, 3 sistemas produtivos com diferentes valores de tempos de reparo (960, 480 e 240 minutos) são simulados. Os resultados das ações de melhoria contínua na redução do *lead time* para esses 3 sistemas são mostrados nas figuras 7.7 e 7.8.

Lead time total

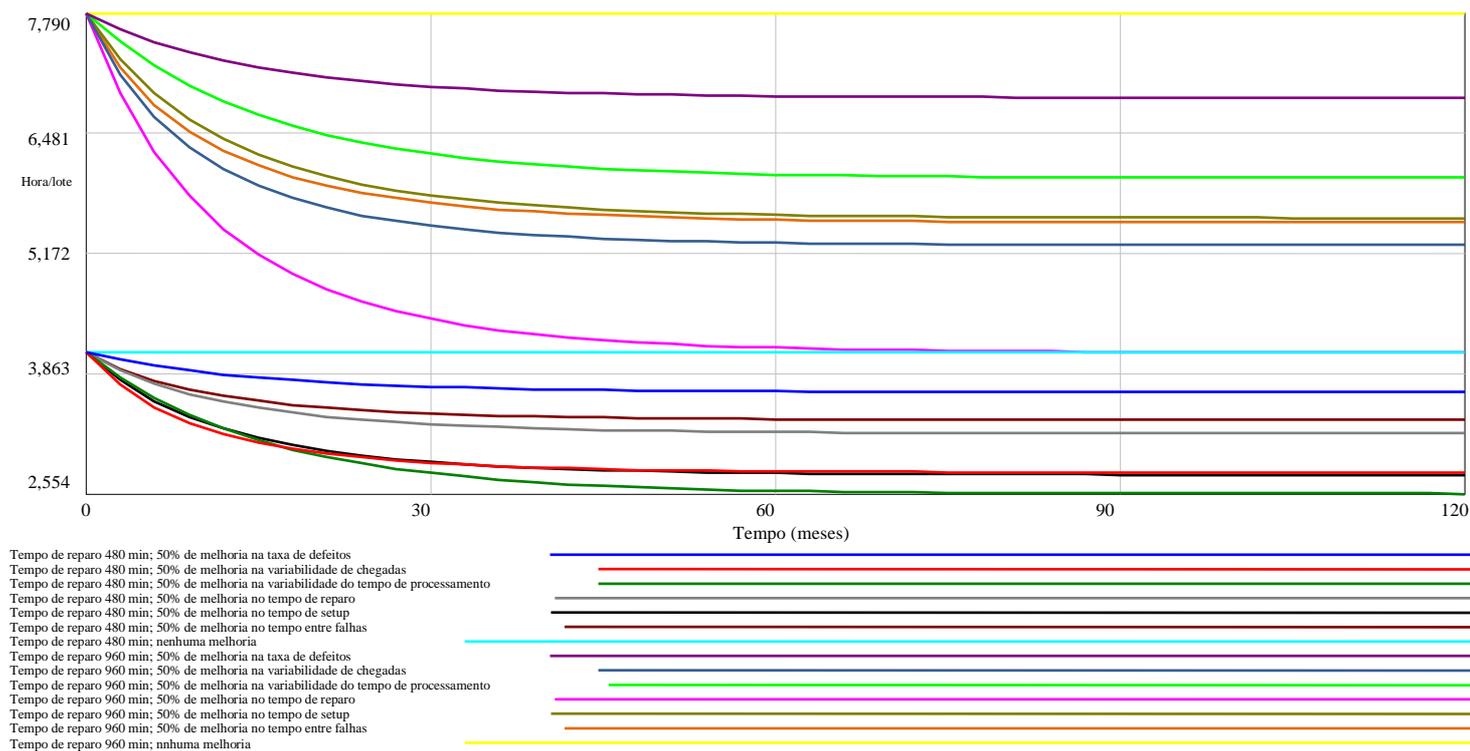


FIGURA 7.7: Efeito de ações de melhoria contínua no lead time para os tempos de reparo de 960 e 480 minutos.

Lead time total

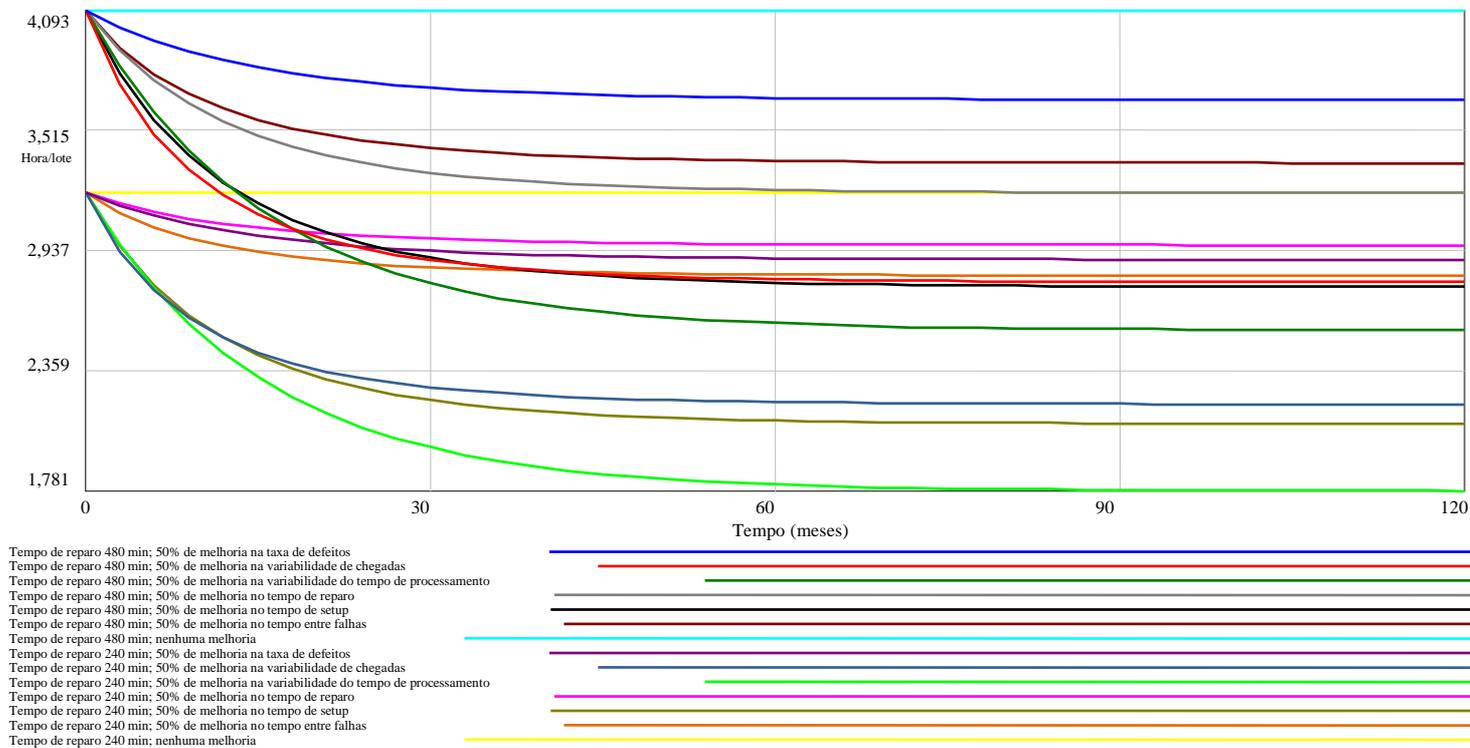


FIGURA 7.8 Efeito de ações de melhoria contínua no lead time para os tempos de reparo de 480 e 240 minutos.

As figuras 7.7 e 7.8 mostram que:

- Quanto menor o tempo de reparo, menor é o *lead time* do processo;
- Assim como para uma estação de trabalho, a redução do tempo de reparo no ambiente com mais estações é uma medida eficaz na diminuição do *lead time*. Essa importância pode ser observada através da grande diferença entre o resultado das ações de melhoria na redução *lead time* dependendo do tempo de reparo do sistema produtivo. Por exemplo, o sistema com tempo de reparo de 480 minutos e sem nenhuma melhoria apresenta *lead time* menor do que todos os sistemas com melhoria e tempo de reparo de 960 minutos. Porém quando o sistema com tempo de reparo de 240 minutos é comparado ao sistema com tempo de 480 minutos, as ações de melhoria na variabilidade do tempo de processamento, no tempo de *setup* e na variabilidade de chegadas para o sistema com tempo de 480 minutos conseguem reduzir o *lead time* mais do que algumas ações de melhoria para o tempo de reparo de 240 minutos. Essas ações podem ser alternativas para reduzir o *lead time* quando não é mais possível ou muito difícil reduzir o tempo de reparo;
- A ordem de importância das ações de melhoria nesse cenário é parecida com a ordem encontrada no cenário equivalente para 1 estação de trabalho. A ação que mais efeito tem na redução do *lead time* para o sistema com tempo de reparo de 960 minutos é a de 50% de melhoria no próprio tempo de reparo, seguida pela melhoria na variabilidade de chegadas, tempo entre falhas, tempo de *setup*, variabilidade do tempo de processamento e por fim, taxa de defeitos. Para o sistema com tempo de reparo de 480 minutos, a ação que mais reduz o *lead time* é a de melhoria na variabilidade do tempo de processamento, seguida pela melhoria no tempo de *setup*, variabilidade de chegadas, tempo de reparo, tempo entre falhas e taxa de defeitos. Para o tempo de reparo de 240 minutos, a ordem de importância das ações é quase idêntica ao sistema produtivo com tempo de 480 minutos, com exceção da ação no tempo de reparo, que passa de quarto para último em importância na redução do *lead time*.

Os resultados das figuras 7.7 e 7.8 mostram que a ordem de importância das ações de melhoria é bastante parecida quando se compara os ambientes com 5 estações e 1 estação de trabalho.

7.2.5 CENÁRIO 11: O efeito das ações de melhoria contínua no *lead time* para sistemas com diferentes variabilidades do tempo de processamento.

São simulados sistemas com 3 diferentes coeficientes de variabilidade das (1,5; 1 e 0,5) do tempo de processamento. Os resultados das ações de melhoria contínua na redução do *lead time* para esses 3 sistemas são mostrados nas figuras 7.9 e 7.10.

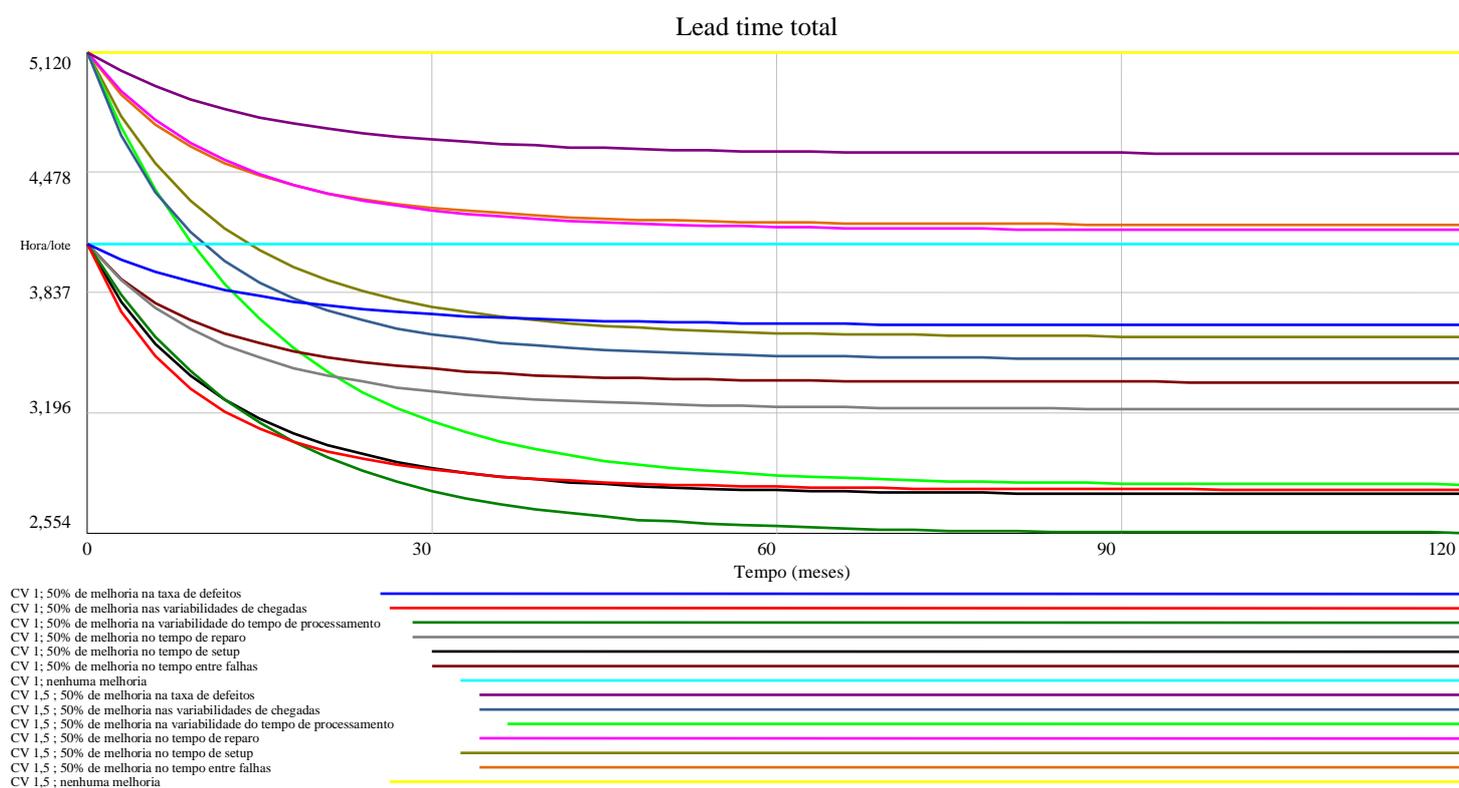


FIGURA 7.9: Efeito de ações de melhoria contínua no *lead time* para os coeficientes de variabilidade do tempo de processamento de 1,5 e 1

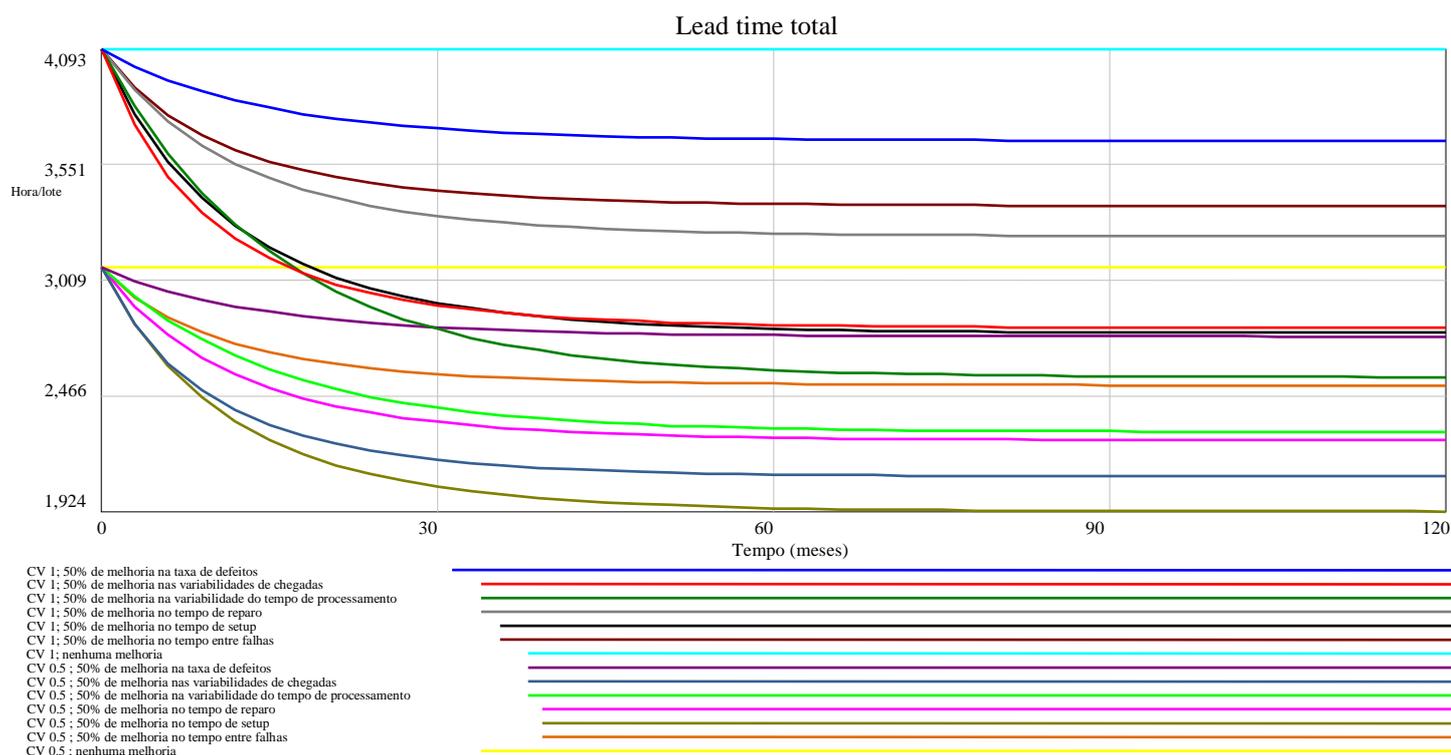


FIGURA 7.10: Efeito de ações de melhoria contínua no *lead time* para os coeficientes de variabilidade do tempo de processamento de 1e 0,5.

As figuras 7.9 e 7.10 mostram que:

- Quanto menor o valor da variabilidade do tempo de processamento, menor é o *lead time* do processo;
- Assim como no ambiente com apenas 1 estação, a variabilidade no tempo de processamento é importante na redução do *lead time*, pois o efeito das ações de melhoria contínua é atingido pelo valor do coeficiente de variação do tempo de processamento. Por exemplo, para CV 0,5 todas as ações de melhoria contínua conseguem reduzir o *lead time* mais que todas as ações para o sistema com CV 1;
- A ordem de importância do efeito das ações no *lead time* para esse cenário é bem parecida com a ordem do cenário com apenas 1 estação de trabalho. No sistema com CV de 1,5 a ação que mais impacta na redução do *lead time* é a ação de 50% de melhoria na própria variabilidade do tempo de processamento, seguida pela melhoria na variabilidade de chegadas, tempo de *setup*, tempo de reparo, tempo entre falhas e taxa de defeitos. No sistema com variabilidade moderada (CV 1) as ações seguem quase a mesma ordem, com exceção da ação de variabilidade de chegadas que passa a de segundo a terceiro em ordem de importância. No sistema com baixa variabilidade

(CV 0,5) a ação que mais contribui para a redução do *lead time* é o de melhoria no tempo de *setup*, seguido pelo de melhoria na variabilidade de chegadas, tempo de reparo, variabilidade do tempo de processamento, tempo entre falhas e por fim, taxa de defeitos.

Os resultados das figuras 7.9 e 7.10 mostram que as ações de melhoria apresentam quase a mesma ordem de importância nas duas situações estudadas.

7.2.6 CENÁRIO 12: O efeito das ações de melhoria contínua no *lead time* para sistemas com diferentes variabilidades de chegadas.

São simulados sistemas produtivos para 3 diferentes valores de variabilidades de chegadas (CV 1,5, 1 e 0,5). Para essa situação a variabilidade de chegadas foi alterada de uma maneira diferente das outras variáveis estudadas nos cenários anteriores. Essa mudança foi necessária, pois a partir da segunda estação a variabilidade de chegadas é determinada pelo cv de partidas da estação anterior, a qual depende de outras variáveis do sistema (conforme mostra a equação 5.23) e assim, não pode ter seu valor simplesmente modificado como foi feito para as cinco variáveis estudadas nesse trabalho.

Portanto, para que todas as cinco estações pudessem ver a alteração do CV de chegadas, foram feitos os seguintes passos:

1. Primeiro, observou-se o valor dos CVs de chegadas de todas as estações para o sistema produtivo com coeficiente de variabilidade 1 (situação inicial);
2. Em seguida, retirou-se a influência do CV de partidas da estação anterior e determinou-se como CV de chegadas de cada estação o valor obtido no passo 1 multiplicado pelo fator 0,5 (para obter-se o sistema produtivo com CV 0,5) ou pelo fator 1,5 (para obter-se o sistema com CV 1,5). Por exemplo, para determinar o cv de chegadas de todas as estações no sistema com CV de chegadas de 0.5, se pega os valores obtidos no passo 1 e multiplica-se por 0.5.

Os valores dos CVs de chegadas das 5 estações para todos os 3 sistemas estão mostrados na tabela 7.1.

	Sistema com CV 1	Sistema com CV 0,5	Sistema com CV 1,5
1º estação	1	0,5	1,5
2º estação	2,69526	1,34763(= 2,69526* 0,5)	4,04289
3º estação	3,15119	1,575595	4,726785
4º estação	3,32635	1,663175	4,989525
5 ºestação	3,39816	1,69908	5,09724

TABELA 7.1: Coeficiente de variabilidade de chegadas de todas as estações de trabalho para os 3 sistemas produtivos do cenário 12.

As figuras 7.11 e 7.12 apresentam os resultados obtidos do impacto de ações de melhoria contínua na redução do *lead time*.

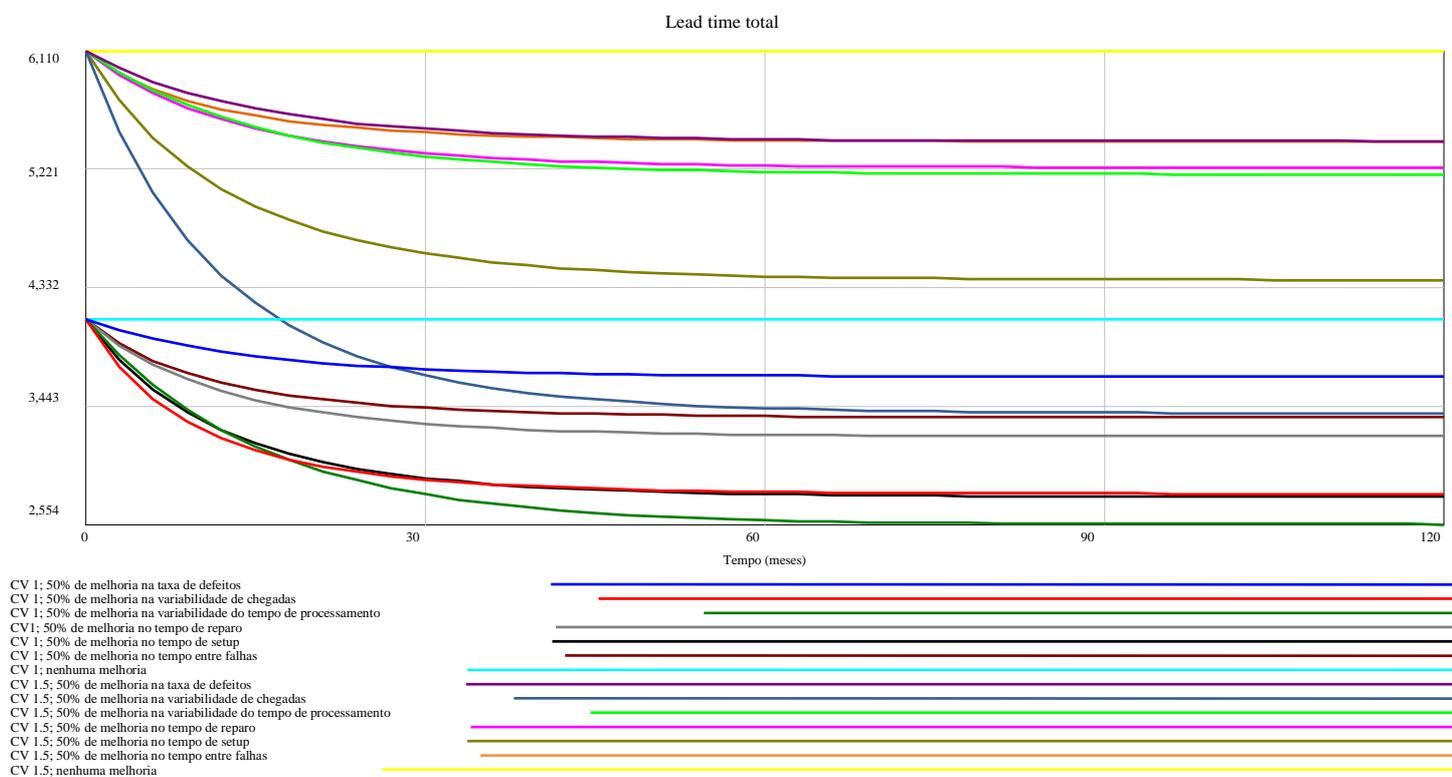


FIGURA 7.11: Efeito de ações de melhoria contínua no *lead time* para os coeficientes de variação de chegadas 1,5 e 1.

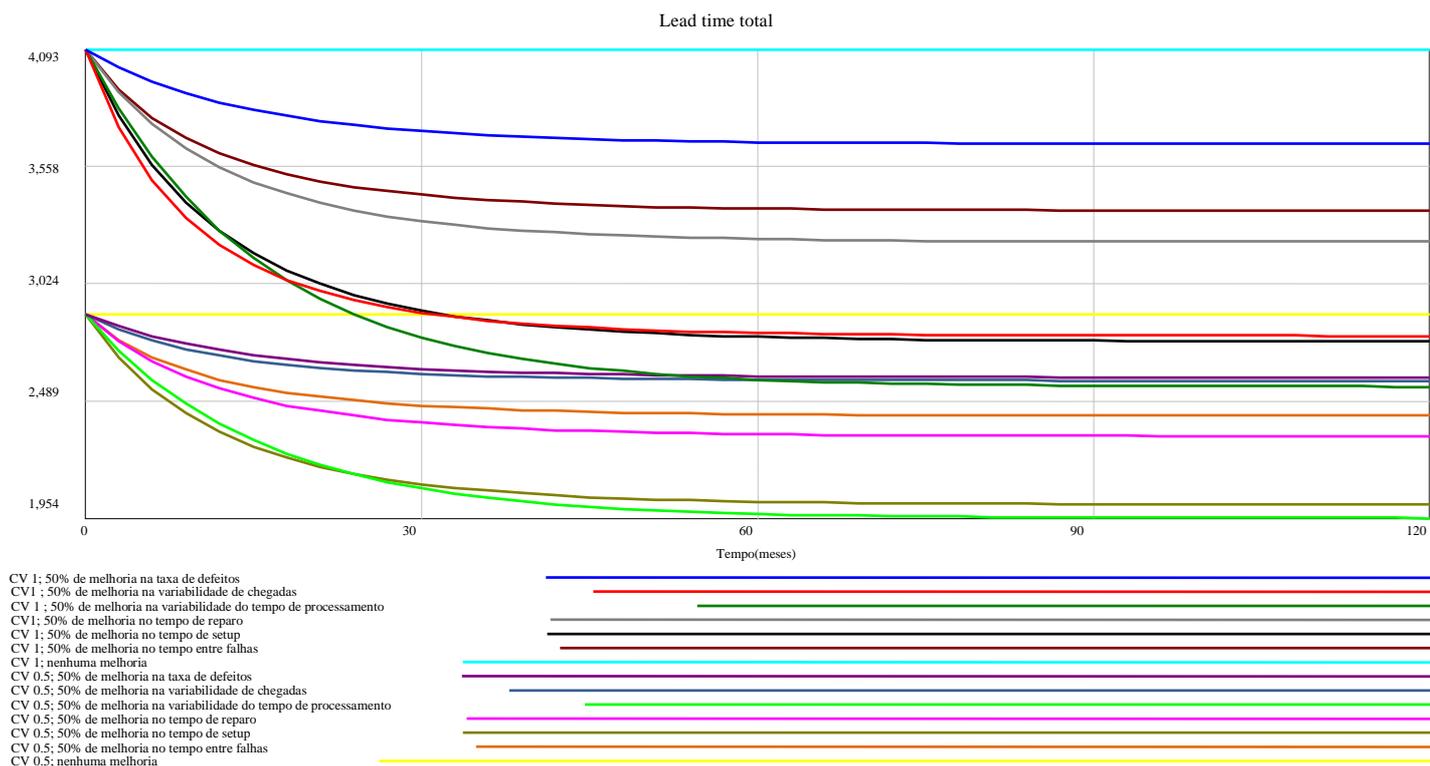


FIGURA 7. 12: Efeito de ações de melhoria contínua no lead time para os coeficientes de variação de chegadas de 1 e 0,5.

As figuras 7.11 e 7.12 mostram que:

- Quanto menor a variabilidade de chegadas, menor é o *lead time* do processo;
- A redução da variabilidade de chegadas é uma política muito eficaz na diminuição do *lead time*, pois o efeito das diferentes ações de melhoria apresenta grande diferença dependendo do valor dessa variável. Por exemplo, todas as ações de melhoria no sistema com variabilidade moderada ($CV=1$) apresentam *lead time* menores do que todas as ações de melhoria para o sistema com CV de chegadas de 1,5, com exceção da ação de melhoria na própria variabilidade de chegadas. Esse fato não acontece no cenário para apenas 1 estação de trabalho, onde as ações de melhoria não sofrem grande influência com a mudança da variabilidade de chegadas;
- A ordem de importância das ações de melhoria para o cenário com 5 estações tem algumas semelhanças com do cenário para 1 estação de trabalho. No sistema com CV de 1,5 a ação que mais efeito tem na redução do *lead time* é a de melhoria na própria variabilidade de chegadas seguida pelo de melhoria no tempo de *setup*, variabilidade do tempo de processamento, tempo de reparo, taxa de defeitos, e por fim, tempo entre falhas. Para o CV de chegadas de 1, a ação mais importante para reduzir o *lead time* é também a de melhoria na variabilidade de chegadas, seguida pela melhoria no tempo

de *setup*, variabilidade do tempo de processamento, tempo de reparo, tempo entre falhas e finalmente, taxa de defeitos. Para o sistema com CV de 0,5 a ação que mais impacta no *lead time* é a de melhoria na variabilidade do tempo de processamento, tempo de *setup*, tempo de reparo, tempo entre falhas e finalmente, a de melhoria na variabilidade de chegadas.

Os resultados mostrados nas figuras 7.11 e 7.12 permitem o esboço da seguinte conclusão:

- a) Esse cenário com 5 estações de trabalho apresenta diferenças com relação aos resultados encontrados com o cenário 6 do capítulo anterior, para apenas 1 estação de trabalho. As diferenças encontradas são:
 - i. para 5 estações a redução da variabilidade de chegadas exerce grande impacto na redução do *lead time*, pois o efeito das diferentes ações de melhoria apresentam grande diferença dependendo do valor dessa variável. Isso não acontece para o cenário com 1 estação, uma vez que algumas ações de melhoria para o sistema com maior variabilidade de chegadas apresentam melhor desempenho que outros com variabilidade menor;
 - ii. a ordem de importância das ações de melhoria sofre modificações devido a mudança de comportamento das ações de melhoria nas variáveis para o cenário com 5 estações;

7.2.7 Sumário das conclusões obtidas com a investigação da questão de pesquisa 1

Esse capítulo teve como objetivo responder a questão de pesquisa 1 (No que os resultados obtidos por Godinho Filho e Uzsoy (2008a, 2008b, 2009) se alteram para cenários com diferentes características do sistema produtivo?) deste trabalho para o ambiente *flow shop* (nesse caso 5 estações), além de comparar os resultados obtidos para esse ambiente com fluxo produtivo e o ambiente com máquina única, apresentado no capítulo 6.

Os sistemas produtivos simulados no capítulo 7 se mantiveram coerentes com os resultados encontrados por Godinho Filho e Uzsoy (2009), pois as ações de melhoria ocuparam essas posições de importância na maioria das situações simuladas. Para o sistema com 5 estações de trabalho dos 18 sistemas produtivos simulados, foram obtidos os seguintes números:

- A melhoria na variabilidade do tempo de processamento foi a ação de melhoria de maior efeito na redução do *lead time* em 13 dos 18 sistemas produtivos (72%) simulados nesse capítulo;
- A melhoria no tempo de *setup* foi a segunda ação de maior efeito na redução do *lead time* em 11 dos 18 sistemas produtivos (61%) simulados nesse capítulo.
- A melhoria no tempo de reparo foi a terceira ação de maior efeito na redução do *lead time* em 3 dos 18 sistemas produtivos (17%) simulados nesse capítulo.
- A melhoria no tempo entre falhas foi a quarta ação de maior efeito na redução do *lead time* em 3 dos 18 sistemas produtivos (17%) simulados nesse capítulo.
- A melhoria na taxa de defeitos foi a quinta ação de maior efeito na redução do *lead time* em 4 dos 18 sistemas produtivos (22%) simulados nesse capítulo.
- A melhoria na variabilidade de chegadas não foi a última ação a afetar na redução do *lead time* em nenhum dos casos. Ela se apresentou como terceira ação de maior efeito na redução do *lead time* em 9 dos 18 (50%) sistemas simulados.

A grande diferença nos resultados encontrados é explicado pelo aumento da influência da ação de melhoria na variabilidade de chegadas para 5 estações de trabalho. Essa ação ocupa na maioria das situações a posição de terceira em ordem de importância na redução do *lead time* ao invés de último lugar, como ocorria para os cenários com 1 estação de trabalho. Com essa modificação a ordem das outras ações de melhoria também é afetada e para a maioria das situações simuladas a ordem das ações se apresenta da seguinte maneira:

- 1) Variabilidade do tempo de processamento (72% dos sistemas simulados);
- 2) Tempo de *setup* (61% dos sistemas simulados);
- 3) Variabilidade de chegadas (50 % dos sistemas simulados);
- 4) Tempo entre falhas (67% dos sistemas simulados);
- 5) Taxa de defeitos (67% dos sistemas simulados).

Os quadros 7.1 a 7.6 sumarizam a importância de cada uma das ações de melhoria para cada um desses sistemas simulados.

SETUP <i>(minutos)</i>		45	180	240
Ações de melhoria contínua que mais afetam o lead time	1°	Variabilidade do tempo de processamento	Variabilidade do tempo de processamento	Tempo de <i>setup</i>
	2°	Variabilidade de chegadas	Tempo de <i>setup</i>	Variabilidade de chegadas
	3°	Tempo de reparo	Variabilidade de chegadas	Variabilidade do tempo de processamento
	4°	Tempo entre falhas	Tempo de reparo	Tempo de reparo
	5°	Taxa de defeitos	Tempo entre falhas	Tempo entre falhas
	6°	Tempo de <i>setup</i>	Taxa de defeitos	Taxa de defeitos

QUADRO 7.1: Sumário da ordem de impacto de cada ação na redução do *lead time* para diferentes valores de tempo de *setup*.

TAXA DE DEFEITOS		1%	5%	10%
Ações de melhoria contínua que mais afetam o lead time	1°	Variabilidade do tempo de processamento	Variabilidade do tempo de processamento	Variabilidade do tempo de processamento
	2°	Variabilidade de chegadas	Tempo de <i>setup</i>	Tempo de <i>setup</i>
	3°	Tempo de <i>setup</i>	Variabilidade de chegadas	Variabilidade de chegadas
	4°	Tempo de reparo	Tempo de reparo	Tempo de reparo
	5°	Tempo entre falhas	Tempo entre falhas	Taxa de defeitos
	6°	Taxa de defeitos	Taxa de defeitos	Tempo entre falhas

QUADRO 7.2: Sumário da ordem de impacto de cada ação na redução do *lead time* para diferentes valores de taxa de defeitos

TEMPO ENTRE FALHAS (minutos)		4800	9600	19200
Ações de melhoria contínua que mais afetam o <i>lead time</i>	1º	Variabilidade do tempo de processamento	Variabilidade do tempo de processamento	Variabilidade do tempo de processamento
	2º	Tempo de reparo	Tempo de <i>setup</i>	Tempo de <i>setup</i>
	3º	Variabilidade de chegadas	Variabilidade de chegadas	Variabilidade de chegadas
	4º	Tempo de <i>setup</i>	Tempo de reparo	Tempo de reparo
	5º	Tempo entre falhas	Tempo entre falhas	Tempo entre falhas
	6º	Taxa de defeitos	Taxa de defeitos	Taxa de defeitos

QUADRO 7.3: Sumário da ordem de impacto de cada ação na redução do *lead time* para diferentes valores de tempos entre falhas.

TEMPO DE REPARO (minutos)		240	480	960
Ações de melhoria contínua que mais afetam o <i>lead time</i>	1º	Variabilidade do tempo de processamento	Variabilidade do tempo de processamento	Tempo de reparo
	2º	Tempo de <i>setup</i>	Tempo de <i>setup</i>	Variabilidade de chegadas
	3º	Variabilidade de chegadas	Variabilidade de chegadas	Tempo entre falhas
	4º	Tempo entre falhas	Tempo de reparo	Tempo de <i>setup</i>
	5º	Taxa de defeitos	Tempo entre falhas	Variabilidade do tempo de processamento
	6º	Tempo de reparo	Taxa de defeitos	Taxa de defeitos

QUADRO 7.4: Sumário da ordem de impacto de cada ação na redução do *lead time* para diferentes valores de tempo de reparo.

Variabilidade do tempo de processamento (CV)		0,5	1	1,5
Ações de melhoria contínua que mais afetam o <i>lead time</i>	1°	Tempo de <i>setup</i>	Variabilidade do tempo de processamento	Variabilidade do tempo de processamento
	2°	Variabilidade de chegadas	Tempo de <i>setup</i>	Variabilidade de chegadas
	3°	Tempo de reparo	Variabilidade de chegadas	Tempo de <i>setup</i>
	4°	Variabilidade do tempo de processamento	Tempo de reparo	Tempo de reparo
	5°	Tempo entre falhas	Tempo entre falhas	Tempo entre falhas
	6°	Taxa de defeitos	Taxa de defeitos	Taxa de defeitos

QUADRO 7.5: Sumário da ordem de impacto de cada ação na redução do *lead time* para diferentes valores da variabilidade do tempo de processamento.

Variabilidades de chegadas (CV)		0,5	1	1,5
Ações de melhoria contínua que mais afetam o <i>lead time</i>	1°	Variabilidade do tempo de processamento	Variabilidade de chegadas	Variabilidade de chegadas
	2°	Tempo de <i>setup</i>	Tempo de <i>setup</i>	Tempo de <i>setup</i>
	3°	Tempo de reparo	Variabilidade do tempo de processamento	Variabilidade do tempo de processamento
	4°	Tempo entre falhas	Tempo de reparo	Tempo de reparo
	5°	Taxa de defeitos	Tempo entre falhas	Taxa de defeitos
	6°	Variabilidade de chegadas	Taxa de defeitos	Tempo entre falhas

QUADRO 7.6: Sumário da ordem de impacto de cada ação na redução do *lead time* para diferentes valores de variabilidade de chegadas.

7.3 INVESTIGANDO A QUESTÃO DE PESQUISA 2.

A investigação da questão de pesquisa 2 para o ambiente *flow shop* foi feita utilizando-se a técnica de projeto de experimentos, por meio do *software* Statistica, da mesma maneira que foi realizada para o ambiente de máquina única.

Primeiramente, para cada uma das 6 variáveis do chão de fábrica foram escolhidos os valores máximos e mínimos utilizados nesse trabalho, por exemplo, para o tempo de *setup* foram escolhidos os valores 45 e 240 minutos, para o CV de chegadas, os valores de 0,5 e 1,5, e assim por diante. E com cada um desses valores das variáveis do chão de fábrica, foi simulado diferentes cenários, o que resultou em 64 cenários (2^6) e observado o valor do *lead time* para cada um desses cenários, da mesma maneira que foi feito para o ambiente com máquina única

Em seguida, os dados obtidos para o ambiente *flow shop* foram normalizados, ou seja, o menor valor utilizado para cada uma das variáveis foi colocado como -1 e o maior valor como +1 e depois disso foram colocados no *software* Estatística e as interações entre as variáveis foram analisadas 2 a 2 com um grau de significância (α) de 5%.

Os dados geraram a tabela 7.2, a qual mostra em destaque as interações entre as variáveis estudadas mais significantes, isto é, as que afetam o valor do *lead time* e também as interações 2 a 2 mais importantes. É importante ressaltar que todas as seis variáveis estudadas nesse trabalho, apresentaram, individualmente, significância estatística com relação ao *lead time*, diferente do ambiente de máquina única, no qual a variável variabilidade de chegadas não apresentou significância estatística.

Interação	Significância
<i>Setup</i> e taxa de defeitos	0.001227
<i>Setup</i> e tempo de reparo	0.000474
<i>Setup</i> e tempo entre falhas	0.000758
<i>Setup</i> e CV do tempo de processamento	0.156635
<i>Setup</i> e CV de chegadas	0.99336
Taxa de defeitos e tempo de reparo	0.001653
Taxa de defeitos e tempo entre falhas	0.002458
Taxa de defeitos e CV do tempo de processamento	0.357213
Taxa de defeitos e CV de chegadas	0.99299
Tempo de reparo e tempo entre falhas	0,00
Tempo de reparo e CV do tempo de processamento	0.037251
Tempo de reparo e CV de chegadas	0.992626
Tempo entre falhas e CV do tempo de processamento	0.087032
Tempo entre falhas e CV de chegadas	0.964455
CV do tempo de processamento e CV de chegadas	0.983501

TABELA 7.2: Interações mais significantes no ambiente *flow shop* para $\alpha= 5\%$

Como se pode ver na tabela 7.2, as interações mais significantes foram 7 : tempo de reparo e tempo entre falhas ($\alpha=0,00000$); tempo de *setup* e tempo de reparo($\alpha=0,000474$); tempo de *setup* e tempo entre falhas($\alpha=0,000758$); taxa de defeitos e tempo de *setup* ($\alpha=0,001227$); taxa de defeitos e tempo de reparo ($\alpha=0,001653$); taxa de defeitos e tempo entre falhas($\alpha=0,002458$) e tempo de reparo e cv do tempo de processamento ($\alpha=0,0037251$).

Ainda buscando investigar a questão de pesquisa 2, as interações 2 a 2 mais importantes foram gerados gráficos, os quais mostram o relacionamento dessas variáveis para os dois valores simulados nesse experimento. Os gráficos 7.13 a 7.19 apresentam esses relacionamentos.

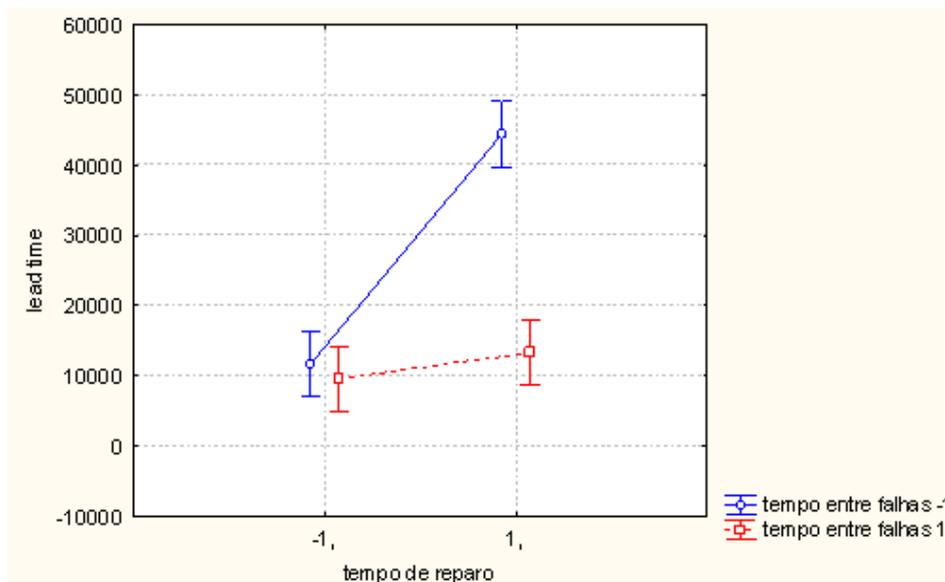


FIGURA 7.13: Interação entre tempo de reparo e tempo entre falhas.

A figura 7.13 mostra a interação entre as variáveis tempo de reparo e tempo entre falhas. Dessa forma, pode-se concluir que em termos absolutos, existe diferença estatisticamente significativa (com relação ao efeito positivo no *lead time*) entre implantar uma ação de melhoria contínua no tempo entre falhas em um sistema com tempo de reparo alto (nesse estudo, 960 minutos) e implantar essa mesma ação em um sistema com tempo de reparo baixo (nesse estudo, 240 minutos). Na verdade, o efeito positivo no *lead time* de uma ação para melhoria no tempo entre falhas é bem maior para o tempo de reparo de 960 minutos. De maneira análoga, também, em virtude dessa interação, pode concluir que existem diferença estatisticamente significativa entre implementar uma ação para melhoria do tempo de reparo em um sistema alta frequência de falhas (nesse estudo, 4800 minutos) e implementar essa mesma melhoria em um sistema com menor frequência de falhas (nesse estudo, 19200 minutos). Nesse caso, também o efeito positivo no *lead time* de uma melhoria no tempo de reparo é bem maior para o tempo entre falhas de 4800 minutos.

Em outras palavras, pode-se afirmar (com significância estatística) que o efeito positivo no *lead time* da implantação de uma ação para melhoria no tempo entre falhas é sensível a sistemas com diferentes tempos de reparo. Da mesma forma, também o efeito positivo no *lead time* da implantação de uma ação de melhoria no tempo de reparo é sensível a sistemas com diferentes tempos entre falhas. Essa conclusão é a mesma para interação tempo de reparo e tempo entre falhas no ambiente de máquina única.

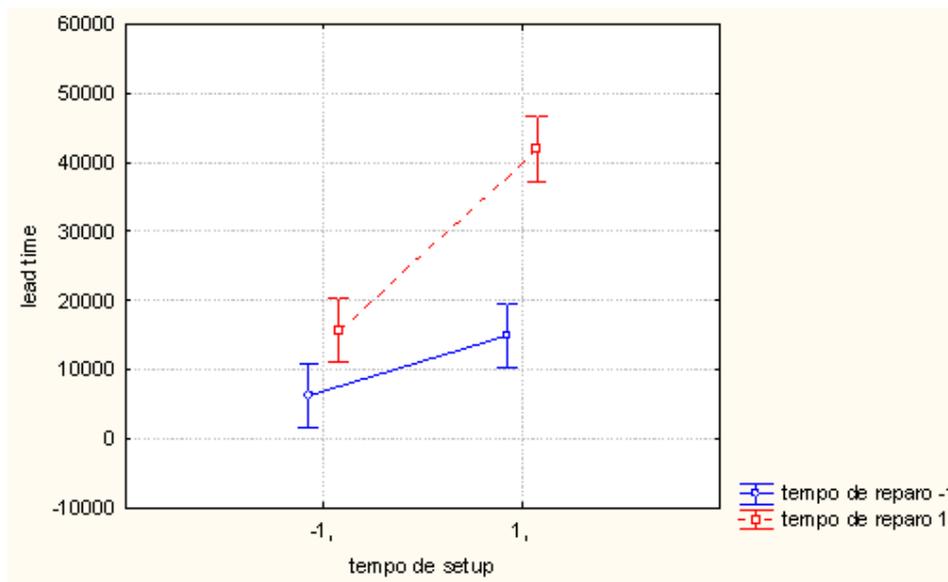


FIGURA 7.14: Interação entre tempo de *setup* e tempo de reparo.

A figura 7.14 mostra a interação entre as variáveis tempo de *setup* e tempo de reparo. Dessa forma, pode-se concluir que em termos absolutos, existe diferença estatisticamente significativa (com relação ao efeito positivo no *lead time*) entre implantar uma ação de melhoria contínua no tempo de reparo em um sistema com tempo de *setup* alto (nesse estudo, 240 minutos) e implantar essa mesma ação em um sistema com tempo de *setup* baixo (nesse estudo, 45 minutos). Na verdade, o efeito positivo no *lead time* de uma ação para melhoria no tempo de reparo é bem maior para o tempo de *setup* de 240 minutos. De maneira análoga, também, em virtude dessa interação, pode concluir que existem diferença estatisticamente significativa entre implementar uma ação para melhoria do tempo de *setup* em um sistema com alto tempo de reparo (nesse estudo, 960 minutos) e implementar essa mesma melhoria em um sistema produtivo com tempo de reparo baixo (nesse estudo, 240 minutos). Nesse caso, também o efeito positivo no *lead time* de uma melhoria no *setup* é bem maior para o tempo de reparo de 960 minutos.

Em outras palavras, pode-se afirmar (com significância estatística) que o efeito positivo no *lead time* da implantação de uma ação para melhoria no tempo de reparo é sensível a sistemas com diferentes tempos de *setup*. Da mesma forma, também o efeito positivo no *lead time* da implantação de uma ação de melhoria no tempo de *setup* é sensível ao sistema com diferentes tempos de reparo. Essa conclusão é a mesma para interação tempo de *setup* e tempo de reparo no ambiente de máquina única.

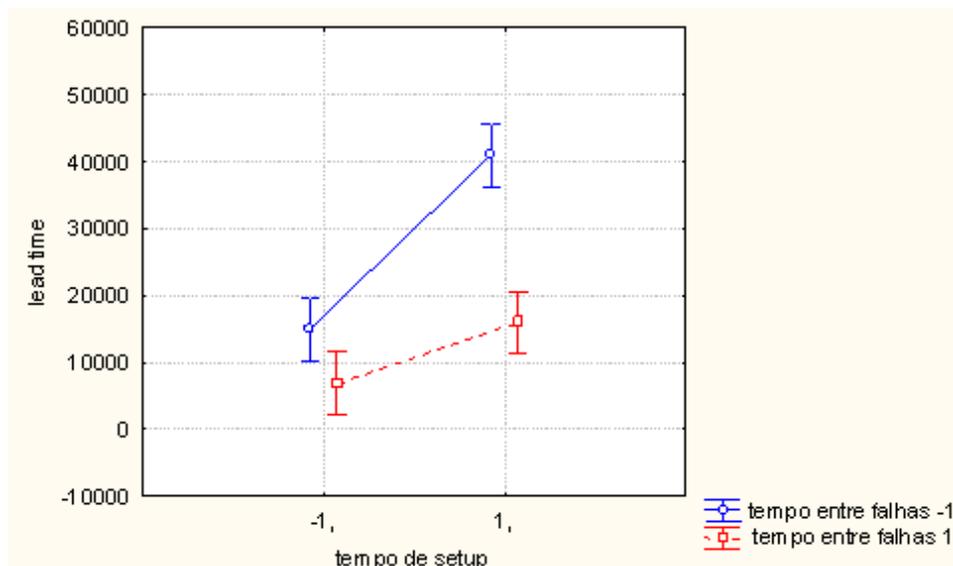


FIGURA 7.15: Interação entre tempo de *setup* e tempo entre falhas.

A figura 7.15 mostra a interação entre as variáveis tempo de *setup* e tempo entre falhas. Dessa forma, pode-se concluir que em termos absolutos, existe diferença estatisticamente significativa (com relação ao efeito positivo no *lead time*) entre implantar uma ação de melhoria contínua no tempo entre falhas em um sistema com tempo de *setup* alto (nesse estudo, 240 minutos) e implantar essa mesma ação em um sistema com tempo de *setup* baixo (nesse estudo, 45 minutos). Na verdade, o efeito positivo no *lead time* de uma ação para melhoria no tempo entre falhas é bem maior para o tempo de *setup* de 240 minutos. De maneira análoga, também, em virtude dessa interação, pode concluir que existem diferença estatisticamente significativa entre implementar uma ação para melhoria do tempo de *setup* em um sistema com alta frequência de falhas (nesse estudo, 4800 minutos) e implementar essa mesma melhoria em um sistema produtivo com baixa frequência de falhas (nesse estudo, 19200 minutos). Nesse caso, também o efeito positivo no *lead time* de uma melhoria no *setup* é bem maior para um tempo entre falhas de 4800 minutos.

Em outras palavras, pode-se afirmar (com significância estatística) que o efeito positivo no *lead time* da implantação de uma ação para melhoria no tempo entre falhas é sensível a sistemas com diferentes tempos de *setup*. Da mesma forma, também o efeito positivo no *lead time* da implantação de uma ação de melhoria no tempo de *setup* é sensível a sistemas com diferentes tempos de reparo. Essa conclusão é a mesma para interação tempo de *setup* e tempo entre falhas no ambiente de máquina única.

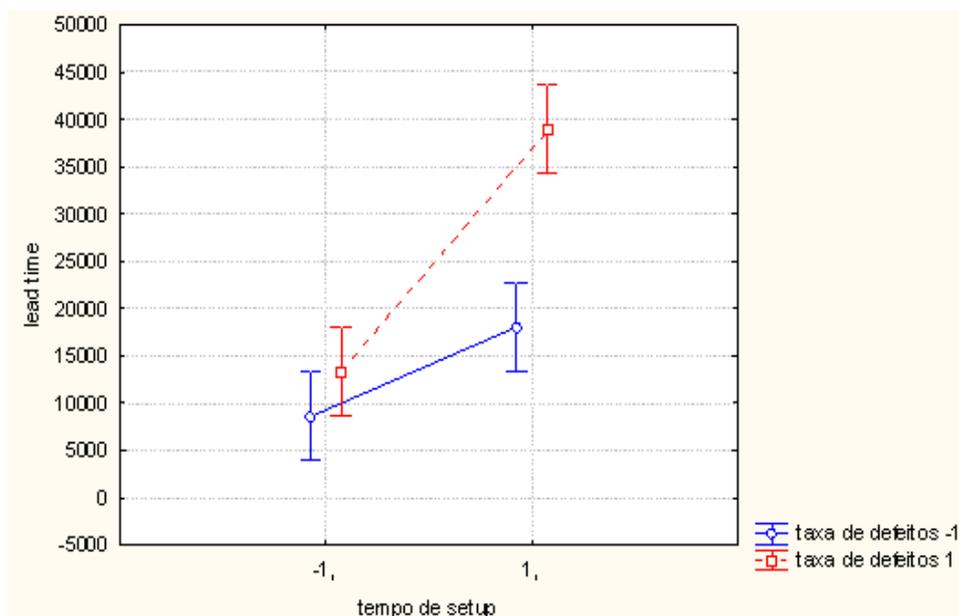


FIGURA 7.16:Interação entre tempo de *setup* e taxa de defeitos.

A figura 7.16 mostra a interação entre o tempo de *setup* e a taxa de defeitos. Dessa forma, pode-se concluir que em termos absolutos, existe diferença estatisticamente significativa (com relação ao efeito positivo no *lead time*) entre implantar uma ação de melhoria contínua no tempo de *setup* em um sistema produtivo com taxa de defeitos alta (nesse estudo, 10%) e implantar essa mesma ação em um sistema com taxa de defeitos baixa (nesse estudo, 1%). Na verdade, o efeito positivo no *lead time* de uma ação para melhoria no tempo de *setup* é bem maior para taxa de defeitos de 10%. De maneira análoga, também, em virtude dessa interação, pode concluir que existem diferença estatisticamente significativa entre implementar uma ação para melhoria na taxa de defeitos em um sistema produtivo com alto tempo de *setup* (nesse estudo, 240 minutos) e implementar essa mesma melhoria em um sistema com tempo de reparo baixo (nesse estudo, 45 minutos). Nesse caso, também o efeito positivo no *lead time* de uma melhoria na taxa de defeitos é bem maior para o tempo de *setup* de 240 minutos.

Em outras palavras, pode-se afirmar (com significância estatística) que o efeito positivo no *lead time* da implantação de uma ação para melhoria no tempo de *setup* é sensível a sistemas produtivos com diferentes taxas de defeitos. Da mesma forma, também o efeito positivo no *lead time* da implantação de uma ação de melhoria no tempo de *setup* é sensível a sistemas com diferentes taxas de defeitos. Essa interação entre o tempo de *setup* e a taxa de defeitos não apresentava forte significância para o ambiente de máquina única.

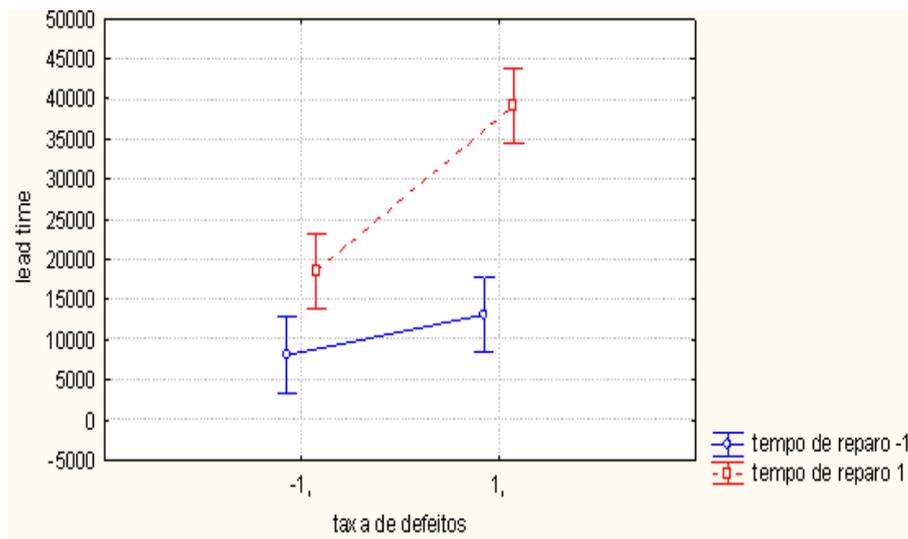


FIGURA 7.17: Interação entre taxa de defeitos e tempo de reparo.

A figura 7.17 mostra a interação entre as variáveis taxas de defeitos e tempo de reparo. Dessa forma, pode-se concluir que em termos absolutos, existe diferença estatisticamente significativa (com relação ao efeito positivo no *lead time*) entre implantar uma ação de melhoria contínua no tempo de reparo em um sistema com taxa de defeitos alta (nesse estudo, 10%) e implantar essa mesma ação em um sistema com taxa de defeitos baixa (nesse estudo, 1%). Na verdade, o efeito positivo no *lead time* de uma ação para melhoria no tempo de reparo é bem maior para taxa de defeitos de 10%. De maneira análoga, também, em virtude dessa interação, pode concluir que existem diferença estatisticamente significativa entre implementar uma ação para melhoria na taxa de defeitos em um sistema produtivo com alto tempo de reparo (nesse estudo, 960 minutos) e implementar essa mesma melhoria em um sistema com tempo de reparo baixo (nesse estudo, 240 minutos). Nesse caso, também o efeito positivo no *lead time* de uma melhoria na taxa de defeitos é bem maior para o tempo de reparo de 960 minutos.

Em outras palavras, pode-se afirmar (com significância estatística) que o efeito positivo no *lead time* da implantação de uma ação para melhoria no tempo de reparo é sensível a sistemas com diferentes taxas de defeitos. Da mesma forma, também o efeito positivo no *lead time* da implantação de uma ação de melhoria na taxa de defeitos é sensível a sistemas com diferentes tempos de reparo. Essa conclusão é a mesma para interação tempo de *setup* e taxa de defeitos no ambiente de máquina única.

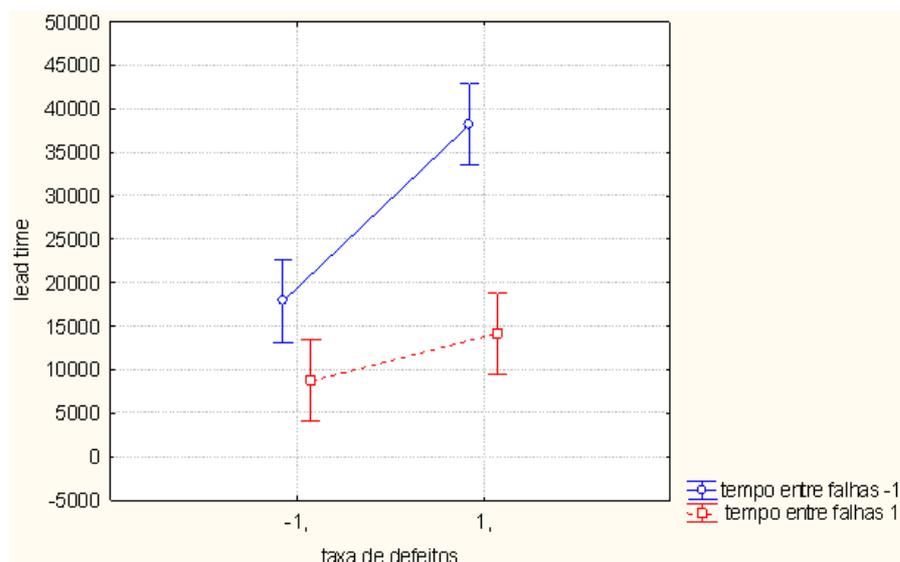


FIGURA 7.18: Interação entre taxa de defeitos e tempo entre falhas.

A figura 7.18 mostra a interação entre as variáveis taxa de defeitos e tempo entre falhas. Dessa forma, pode-se concluir que em termos absolutos, existe diferença estatisticamente significativa (com relação ao efeito positivo no *lead time*) entre implantar uma ação de melhoria contínua no tempo entre falhas em um sistema produtivo com taxa de defeitos alta (nesse estudo, 10%) e implantar essa mesma ação em um sistema com taxa de defeitos baixa (nesse estudo, 1%). Na verdade, o efeito positivo no *lead time* de uma ação para melhoria no tempo entre falhas é bem maior em um sistema produtivo com taxa de defeitos de 10%. De maneira análoga, também, em virtude dessa interação, pode concluir que existem diferença estatisticamente significativa entre implementar uma ação para melhoria na taxa de defeitos em um sistema produtivo com falhas mais freqüentes (nesse estudo, 4800 minutos) e implementar essa mesma melhoria em um sistema com falhas menos freqüentes (nesse estudo, 19200 minutos). Nesse caso, também o efeito positivo no *lead time* de uma melhoria na taxa de defeitos é bem maior para o tempo entre falhas de 19200 minutos

Em outras palavras, pode-se afirmar (com significância estatística) que o efeito positivo no *lead time* da implantação de uma ação para melhoria no tempo entre falhas é sensível a sistemas com diferentes taxas de defeitos. Da mesma forma, também o efeito positivo no *lead time* da implantação de uma ação de melhoria na taxa de defeitos é sensível a sistemas com diferentes tempos entre falhas. Essa conclusão é a mesma para interação taxa de defeitos e tempo entre falhas no ambiente de máquina única.

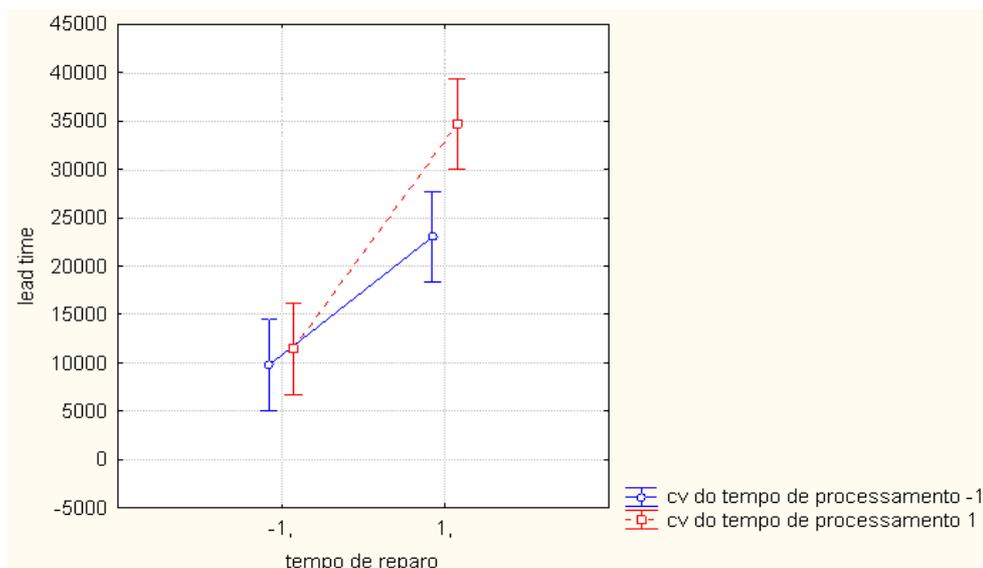


FIGURA 7.19 Interação entre tempo de reparo e cv do tempo de processamento.

A figura 7.19 mostra a interação entre as variáveis tempo de reparo e variabilidade do tempo de processamento. Dessa forma, pode-se concluir que em termos absolutos, existe pouca diferença estatística (com relação ao efeito positivo no *lead time*) entre implantar uma ação de melhoria contínua na variabilidade do tempo de processamento em um sistema com tempo de reparo alto (nesse estudo, 960 minutos) e implantar essa mesma ação em um sistema com tempo de reparo baixo (nesse estudo, 240 minutos). Na verdade, o efeito positivo no *lead time* de uma ação para melhoria na variabilidade do tempo de processamento é um pouco maior para o tempo de reparo de 960 minutos. De maneira análoga, também, em virtude dessa interação, pode concluir que existe pouca diferença estatística entre implementar uma ação para melhoria do tempo de reparo em um sistema com alta variabilidade de processamento (nesse estudo, CV=1.5) e implementar essa mesma melhoria em um sistema produtivo com variabilidade de processamento baixa (nesse estudo, CV=0.5). Nesse caso, também o efeito positivo no *lead time* de uma melhoria no tempo de reparo é um pouco maior para a variabilidade do tempo de processamento alta.

Em outras palavras, pode-se afirmar (com significância estatística) que o efeito positivo no *lead time* da implantação de uma ação para melhoria na variabilidade do tempo de processamento é sensível a sistemas com diferentes tempos de reparo. Da mesma forma, também o efeito positivo no *lead time* da implantação de uma ação de melhoria no tempo de reparo é sensível a sistemas com diferentes variabilidades do tempo de processamento.

7.3.1 Sumário das conclusões obtidas com a investigação da questão de pesquisa 2

A partir da análise dos relacionamentos significantes entre as variáveis do chão de fábrica estudadas nesse trabalho, para ambiente *flow shop*, pode-se perceber que existiram interações em determinados sistemas e determinadas ações de melhoria. Foram identificadas sete interações a um nível de significância de 5%. Essas interações identificadas podem ser divididas em 3 grupos, conforme seus níveis de significância. Esses grupos são:

As interações mais significantes: Estas foram encontradas nos relacionamentos do tempo de reparo e tempo entre falhas ($\alpha=0,0$); tempo de *setup* e tempo de reparo($\alpha=0,000474$); tempo de *setup* e tempo entre falhas($\alpha=0,000758$); tempo de *setup* e taxa de defeitos ($\alpha=0,001227$), taxa de defeitos e tempo de reparo($\alpha=0,001653$) e taxa de defeitos e tempo entre falhas($\alpha=0,002458$). Essas interações têm um nível de significância entre 0 e 0,25%.

Outras interações estaticamente significantes: São relacionamentos que se mostraram estatisticamente significantes, mas em uma escala de importância de menor importância. Para o ambiente *flow shop* isso acontece na interação tempo de reparo e variabilidade do tempo de processamento, a qual possui nível de significância de 3%($\alpha=0,037251$).

Interações estatisticamente não significantes: Oito interações não se mostraram estatisticamente significante. São elas: tempo de *setup* e variabilidade do tempo de processamento, tempo de *setup* e variabilidade de chegadas; taxa de defeitos e variabilidade do tempo de processamento; taxa de defeitos e variabilidade de chegadas; tempo de reparo e variabilidade de chegadas; tempo entre falhas e variabilidade do tempo de processamento, tempo entre falhas e variabilidade de chegadas e variabilidade do tempo de processamento e variabilidade de chegadas. Essas interações têm um nível de significância entre 8,7% e 99%. Isso significa que, por exemplo, o efeito positivo no *lead time* da implementação de uma ação de melhoria no *setup* é o mesmo independente da variabilidade do tempo de processamento. O raciocínio é o mesmo para as outras interações citadas acima.

O quadro 7.7 sumariza para cada sistema as ações de melhoria contínua em cada uma das variáveis do chão de fábrica estudadas e as características do sistema produtivo que exercem ou não influência no efeito positivo no *lead time* dessa ação.

Características do sistema estudado	Ações de melhoria que se mostraram sensíveis a característica do sistema estudado	Ações de melhoria que não apresentaram interação significativa para o sistema estudado
Diferentes tempos de <i>setup</i>	Tempo de reparo, tempo entre falhas e taxa de defeitos	Variabilidade do tempo de processamento e variabilidade de chegadas
Diferentes tempos de reparo	Tempo entre falhas, tempo de <i>setup</i> , taxa de defeitos e variabilidade do tempo de processamento	Variabilidade de chegadas
Diferentes tempo entre falhas	Tempo de reparo, tempo de <i>setup</i> e taxa de defeitos	Variabilidade do tempo de processamento e variabilidade de chegadas
Diferentes taxas de defeitos	Tempo de <i>setup</i> , tempo de reparo e tempo entre falhas	Variabilidade do tempo de processamento, variabilidade de chegadas
Diferentes variabilidades do tempo de processamento	Tempo de reparo	Taxa de defeitos, tempo de <i>setup</i> , tempo entre falhas e variabilidade de chegadas
Diferentes variabilidade de chegadas	Nenhum	Todos

QUADRO 7.7: Síntese das influências de características do sistema produtivo no efeito das ações de melhoria estudadas para ambiente flow shop.

Pode-se constatar por meio do quadro 7.7 que as ações de melhoria no tempo de reparo, no tempo entre falhas e na taxa de defeitos são as que mais possuem interações significativas (quatro para tempo de reparo e três para tempo entre falhas e taxa de defeitos). Por exemplo, uma ação de melhoria no tempo de reparo é influenciada pelo tempo de *setup*, tempo entre falhas, taxa de defeitos e variabilidade do tempo de processamento. Já uma ação de melhoria no tempo entre falhas é influenciada pelo tempo de *setup*, tempo de reparo e taxa de defeitos. E uma ação de melhoria na taxa de defeitos é influenciada pelo tempo de *setup*, tempo entre falhas e tempo de reparo.

Portanto, ações de melhoria nessas três variáveis (tempo de reparo, tempo entre falhas e taxa de defeitos) são as que se mostraram como melhores alternativas em sistemas com certas características negativas como, por exemplo, altos tempos de *setup* e altas, nos quais essa característica não pode ser alterada por restrições do processo. Outras alternativas a

determinadas características do sistema que não podem ser modificadas podem ser vistas com base nos resultados mostrados no quadro 7.7.

Em contrapartida, uma ação de melhoria contínua na variabilidade de chegadas não possui influência e nem influencia nenhuma outra característica do sistema produtivo para o ambiente *flow shop*. Da mesma maneira que acontece no ambiente de máquina única do capítulo 6. A grande diferença é que no ambiente *flow shop*, uma ação de melhoria nessa variável tem seu efeito positivo muito maior no *lead time* do que no ambiente de máquina única. Portanto, uma ação de melhoria na variabilidade de chegadas, em um ambiente *flow shop* torna-se uma alternativa muito interessante para redução do *lead time* para sistemas de produção com diferentes características, pois além do seu efeito positivo na redução do *lead time* ser grande, esse efeito permanece inalterado sob diversas condições do sistema produtivo, por exemplo, pode-se perceber que a variável é insensível a diferentes valores do tempo de *setup*, taxa de defeitos, variabilidade do tempo de processamento, tempo de reparo e tempo entre falhas.

CAPÍTULO 8: CONCLUSÕES

Esse capítulo tem como objetivo explicitar as conclusões obtidas nesse trabalho através das simulações realizadas para os ambientes produtivos de máquina única e *flow shop*, apresentadas nos capítulos 6 e 7, respectivamente. Essas conclusões obtidas ajudam a responder as questões de pesquisa apresentadas nesse trabalho e alcançar os objetivos específicos mostrados no capítulo 1. A seção 8.1 apresenta uma avaliação das questões de pesquisa e dos objetivos específicos do presente trabalho. A seção 8.2 mostra as principais contribuições desse trabalho e a seção 8.3 apresenta propostas para trabalhos futuros.

8.1 AVALIAÇÃO DAS QUESTÕES DE PESQUISA E DOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

Para os dois ambientes produtivos estudados nesse trabalho (ambiente de máquina única e ambiente *flow shop*) por meio do aprimoramento do modelo desenvolvido por Godinho Filho e Uzsoy (2008a, 2008b, 2009), foram apresentadas duas questões de pesquisa. Essas questões e as conclusões obtidas a partir das simulações realizadas são apresentadas a seguir.

8.1.1 Questão de pesquisa 1: No que os resultados obtidos por Godinho Filho e Uzsoy (2008a, 2008b, 2009) se alteram para cenários com diferentes características do sistema produtivo?

Por meio das simulações realizadas para os ambientes de máquina única e *flow shop*, conseguiu-se verificar no que os resultados obtidos por Godinho Filho e Uzsoy (2008a, 2008b, 2009) são robustos e não se alteram para maioria dos cenários simulados nesse trabalho. Para o ambiente de máquina única, foram obtidos os seguintes resultados: A melhoria na variabilidade do tempo de processamento foi a ação de maior efeito na redução do *lead time* em 9 dos 12 sistemas (75%) simulados; A melhoria no tempo de *setup* foi a segunda ação de maior efeito na redução do *lead time* em 7 dos 12 sistemas (58%) simulados; A melhoria no tempo de reparo foi a terceira ação de maior efeito na redução do *lead time* em 7 dos 12 sistemas (58%) simulados; A melhoria no tempo entre falhas foi a quarta ação de maior efeito na redução do *lead time* em 8 dos 12 sistemas (67%) simulados; A melhoria na taxa de defeitos foi a quinta ação de maior efeito na redução do *lead time* em 7 dos 12

sistemas (58%) simulados; A melhoria na variabilidade de chegadas foi a última ação a afetar na redução do *lead time* em 9 dos 12 sistemas (75%) simulados. Para o ambiente *flow shop*, por meio das simulações dos diferentes cenários, obteve-se os seguintes resultados: A melhoria na variabilidade do tempo de processamento foi a ação de melhoria de maior efeito na redução do *lead time* em 13 dos 18 (72%) sistemas produtivos simulados; A melhoria no tempo de *setup* foi a segunda ação de maior efeito na redução do *lead time* em 11 dos 18 sistemas produtivos (61%); A melhoria no tempo de reparo foi a terceira ação de maior efeito na redução do *lead time* em 3 dos 18 sistemas produtivos (17%); A melhoria no tempo entre falhas foi a quarta ação de maior efeito na redução do *lead time* em 3 dos 18 sistemas produtivos (17%); A melhoria na taxa de defeitos foi a quinta ação de maior efeito na redução do *lead time* em 4 dos 18 sistemas produtivos (22%); A melhoria na variabilidade de chegadas não foi a última ação a afetar na redução do *lead time* em nenhum dos casos. Ela se apresentou como terceira ação de maior efeito na redução do *lead time* em 9 dos 18 (50%) sistemas simulados. Para o ambiente *flow shop* a ordem de importância das ações de melhoria contínua na redução do *lead time* difere da ordem encontrada nos resultados obtidos por Godinho Filho e Uzsoy (2008a, 2008b, 2009). Isso acontece devido ao aumento da importância da variabilidade de chegadas quando existe um fluxo produtivo, no caso no ambiente *flow shop*. Uma ação de melhoria na variabilidade de chegadas se torna a terceira ação mais importante para reduzir o *lead time* nos cenários simulados, o que acarreta uma pequena alteração na ordem de importância das ações estudadas. Porém os outros programas seguem a mesma ordem de importância, o que mostra a robustez dos resultados encontrados anteriormente por Godinho Filho e Uzsoy (2008a, 2008b, 2009).

8.1.2 Questão de pesquisa 2: O efeito positivo no *lead time* de uma ação de melhoria contínua nas variáveis do chão de fábrica estudadas nesse trabalho é sensível a características do sistema produtivo? Se sim, como é esse relacionamento entre a ação de melhoria e sistema produtivo?

Através do projeto de experimentos utilizando o *software* Estatística foi possível responder a questão de pesquisa 2. Por meio dessa ferramenta estatística identificaram-se, para os ambientes de máquina única e ambiente *flow shop*, quais interações entre variáveis são mais significativas estatisticamente e a partir disso analisou-se se essas interações são sensíveis a características do ambiente produtivo e como funciona o relacionamento entre a ação de melhoria e o ambiente produtivo.

O quadro 8.1 mostra as interações 2 a 2 mais significantes ($\alpha= 5\%$) para os ambiente com máquina única e *flow shop* separados por um intervalo no grau de significância.

Intervalo do grau de significância	Interações significantes para ambiente de máquina única	Interações significantes para ambiente <i>flow shop</i>
0 a 0,25%	Tempo de reparo e tempo entre falhas Tempo de reparo e CV do tempo de processamento Tempo de reparo e tempo de <i>setup</i>	Tempo de reparo e tempo entre falhas Tempo de <i>setup</i> e tempo entre falhas Tempo de reparo e tempo de <i>setup</i> Tempo de <i>setup</i> e taxa de defeitos Taxa de defeitos e tempo de reparo Taxa de defeitos e tempo entre falhas
0,9 a 3%	Taxa de defeitos e tempo entre falhas Tempo de <i>setup</i> e tempo entre falhas Tempo de <i>setup</i> e CV do tempo de processamento Tempo entre falhas e CV do tempo de processamento Taxa de defeitos e tempo de reparo	Tempo de reparo e CV do tempo de processamento

QUADRO 8.1: Interações 2 a 2 mais significantes para ambiente de máquina única e *flow shop*.

As interações significantes para os ambientes de máquina única e *flow shop* são quase as mesmas. A principal diferença mostrada no quadro 8.1 são os intervalos de grau de significância para algumas interações nos ambientes de máquina única e *flow shop*.

A interação entre as variáveis tempo de reparo e CV do tempo de processamento que é uma das mais significantes no ambiente de máquina única, apesar de continuar significativa diminui esse grau para o ambiente *flow shop*.

Já outras interações (taxa de defeitos e tempo entre falhas, tempo de *setup* e tempo entre falhas, taxa de defeitos e tempo de reparo) que apesar de terem significância estatística, não são as mais significantes no ambiente de máquina única apresentaram, para o ambiente *flow shop*, um aumento de significância nas suas interações.

Outra diferença ocorre entre as interações tempo de *setup* e variabilidade do tempo de processamento e tempo entre falhas e CV do tempo de processamento, as quais apresentam significância estatística no ambiente de máquina única e não apresentam no ambiente *flow shop*.

A partir dessas interações mais significantes verificou-se o efeito positivo no *lead time* de uma ação de melhoria é sensível a características do sistema produtivo e como é esse relacionamento entre a ação de melhoria e o sistema produtivo.

As seções 6.3.1 e 7.3.1 analisaram a sensibilidade do efeito positivo no *lead time* de uma ação de melhoria e como é esse relacionamento para os ambientes de máquina única e *flow shop* respectivamente.

O quadro 8.2 resume, para os ambientes de máquina única e *flow shop*, as ações de melhoria contínua em cada uma das variáveis do chão de fábrica estudadas e as características do ambiente que exercem ou não influência no efeito positivo no *lead time* dessa ação.

Característica do ambiente estudado	Ações de melhoria que se mostraram sensíveis a característica do sistema produtivo estudado para o ambiente de máquina única	Ações de melhoria que se mostram sensíveis a característica do sistema produtivo estudado para o ambiente <i>flow shop</i>
Diferentes tempos de <i>setup</i>	Tempo de reparo, tempo entre falhas e variabilidade do tempo de processamento	Tempo de reparo, tempo entre falhas e taxa de defeitos
Diferentes tempos de reparo	Tempo entre falhas, variabilidade do tempo de processamento, tempo de <i>setup</i> e taxa de defeitos	Tempo entre falhas, tempo de <i>setup</i> , taxa de defeitos e variabilidade do tempo de processamento
Diferentes tempos entre falhas	Tempo de reparo, taxa de defeitos, tempo de <i>setup</i> , variabilidade do tempo de processamento	Tempo de reparo, tempo de <i>setup</i> e taxa de defeitos
Diferentes taxas de defeitos	Tempo entre falhas, tempo de reparo	Tempo de <i>setup</i> , tempo de reparo e tempo entre falhas
Diferentes variabilidades do tempo de processamento	Tempo de reparo, tempo de <i>setup</i> , tempo entre falhas	Tempo de reparo
Diferentes variabilidades de chegadas	Nenhum	Nenhum

QUADRO 8.2: Síntese das influências de características de sistema produtivo no efeito das ações de melhoria estudadas para ambientes de máquina única e *flow shop*.

Com base no quadro 8.2 pode-se observar que:

Para sistemas com diferentes tempos de *setup*, as ações de melhoria que se mostram sensíveis às características do sistema são quase as mesmas para os ambientes de máquina única e *flow shop* (tempo de reparo, tempo entre falhas). A única diferença é que ações de melhoria na variabilidade do tempo de processamento se mostram sensíveis a

diferentes tempos de *setup* no ambiente de máquina única. Isso não ocorre no ambiente *flow shop*. Para esse ambiente, ações para melhoria na taxa de defeitos é que se mostra sensível a diferentes tempos de *setup*, o que também não ocorria no ambiente de máquina única.

Para sistemas com diferentes tempos de reparo, as ações de melhoria que se mostram sensíveis às características do sistema são as mesmas para ambiente com máquina única e *flow shop* (Tempo entre falhas, variabilidade do tempo de processamento, tempo de *setup* e taxa de defeitos). Apenas a ordem de significância é modificada para os dois ambientes;

Para ação de melhoria no tempo entre falhas, as ações de melhoria que se mostram sensíveis às características do sistema são quase iguais para ambiente com máquina única e *flow shop* (Tempo de reparo, taxa de defeitos, tempo de *setup*, variabilidade do tempo de processamento). A diferença é que ações de melhoria na variabilidade do tempo de processamento se mostram sensíveis a diferentes tempos entre falhas, no ambiente de máquina única, o que não ocorre em ambientes *flow shop*.

Para sistemas com diferentes taxas de defeitos, as ações de melhoria que se mostram sensíveis às características do sistema são quase iguais para ambiente com máquina única e *flow shop* (Tempo de reparo, tempo entre falhas). A diferença é que o tempo de *setup* se mostra sensível a diferentes valores da taxa de defeitos em ambientes *flow shop*, o que não acontece no ambiente de máquina única.

Para sistemas com diferentes variabilidades do tempo de processamento, ações de melhoria no tempo de reparo se mostram sensíveis a diferentes valores da variabilidade do tempo de processamento, tanto no ambiente de máquina única como no *flow shop*. Além dessa ação, no ambiente de máquina única, ações de melhoria no tempo de *setup* e no tempo entre falhas são sensíveis a diferentes valores da variabilidade do tempo de processamento, o que não ocorre no ambiente *flow shop*.

Para diferentes variabilidades de chegadas, nenhuma ação de melhoria nas variáveis estudadas nesse trabalho influencia no efeito positivo do *lead time*, logo a variabilidade de chegadas não é sensível a características do sistema produtivo tanto para máquina única como para *flow shop*.

8.1.3 Considerações finais

Ações de melhoria na variabilidade do tempo de processamento e do tempo de *setup* são as melhores ações para redução do *lead time* na grande maioria dos cenários testados nesse trabalho para os ambientes de máquina única e *flow shop*. Ações de melhoria na variabilidade de chegadas têm seu efeito positivo no *lead time* aumentado consideravelmente em um ambiente *flow shop*. Já ações na taxas de defeitos apresentam um efeito positivo no *lead time* pequeno para todas as situações testadas.

Já as ações de melhoria no tempo de reparo e tempo entre falhas são as ações que se mostraram como melhores alternativas em ambientes com certas características negativas tanto no ambiente de máquina única quanto no ambiente *flow shop*. Ações de melhoria na variabilidade no tempo de processamento e na variabilidade de chegadas não se mostraram sensíveis a alterações das características dos sistemas de produção para ambientes *flow shop*, com exceção de ações de melhoria na variabilidade do tempo de processamento em ambientes com diferentes tempos de reparo. Isso, juntamente com a importância de ações de melhoria nessas variáveis no efeito positivo de redução do *lead time*, faz com que estas se tornem alternativas interessantes para sistemas com as mais diferentes características.

8.1.4 Avaliação dos objetivos específicos do trabalho

Os objetivos específicos do presente trabalho foram conseguidos por meio das simulações e análises realizadas. Esses objetivos foram apresentados no capítulo 1 e são reapresentados a seguir para uma avaliação geral dos resultados alcançados.

- **Objetivo Específico 1:** Verificar se os resultados encontrados por Godinho Filho e Uzsoy (2008a, 2008b, 2009) são os mesmos para cenários com diferentes características do sistema produtivo. Esse objetivo foi alcançado por meio da resposta da questão 1.
- **Objetivo específico 2:** Determinar se o efeito positivo no *lead time* de uma ação de melhoria nas variáveis do chão de fábrica estudadas é sensível a características do sistema produtivo e se sim, como é o relacionamento entre a ação de melhoria e o sistema em questão. Esse objetivo foi alcançado por meio da resposta da questão 2.

- **Objetivo específico 3:** Comparar os resultados com relação aos dois objetivos anteriores para os casos de máquina única e *flow shop* (com 5 estações de trabalho): Esse objetivo foi alcançado nessa seção onde as respostas das duas questões de pesquisa levantadas nesse trabalho foram comparadas para os dois ambientes produtivos estudados.

8.2 CONTRIBUIÇÕES ESPERADAS

Além de responder diretamente às questões de pesquisa levantadas e alcançar os objetivos específicos, o presente trabalho alcançou o objetivo geral de avaliar o efeito de ações de melhoria contínua na redução do *lead time* para dois ambientes produtivos com diferentes características, por meio dos diversos cenários apresentados e análises feitas.

As conclusões obtidas e *insights* fornecidos são de extrema importância para compreensão do funcionamento de um chão de fábrica, de como as variáveis do chão de fábrica se relacionam e interagem entre si, de como o efeito positivo no *lead time* de uma ação de melhoria é sensível a características do sistema produtivo.

Os resultados obtidos nesse estudo têm como base os valores das variáveis apresentados nos capítulos anteriores e alguns desses resultados podem variar a depender da característica do sistema produtivo simulado.

8.3 PROPOSTAS PARA ESTUDOS FUTUROS

A partir do presente trabalho, surgem algumas propostas de trabalhos futuros:

- Utilização de dados reais como entrada do modelo;
- Investigação de outras questões de pesquisa, considerando o relacionamento entre outras variáveis e parâmetros do chão de fábrica;
- Identificar ponto, no qual mais investimento na melhoria de determinada variável passa a contribuir pouco para a redução do *lead time*

CAPÍTULO 9: REFERÊNCIAS

ABDEL-HAMID, T.K. A multiproject perspective of single-project dynamics. **Journal of Systems & Softwares**, [S.I.], v.22, n.3, p.151-165,1993.

ADAMIDES, E.D.;VOUTSINA, M. The double-helix model of manufacturing and marketing strategies. **International Journal of Production Economics**, [S.I.], v.104, n.1, p.3-18, 2006.

ADAMS, M. et. al. Simulation as a tool for continuous process improvement. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, n.31, 1999, Phoenix. **Proceedings...** Nova Iorque: ACM, 1999, p.766-783.

AHUJA,I.P.S.; KHAMBA,J.S. Assessment of contributions of successful TPM initiatives towards competitive manufacturing. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, [S.I.], v.14, n.4, p.356-375, 2008.

AKKERMANS, H. Emergent Supply Networks: System Dynamics Simulation of Adaptive Supply Agents. In: HAWAII INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM SCIENCES, 34, 2001, Maui. **Anais...**Washington:IEEE Computer Society, 2001, 11.p.

AKKERMANS,H.;VAN OORSCHOT,K.E. Relevance assumed: A case study of balanced scorecard development using system dynamics. **Journal Operational Research Society**, [S.I.], v.56, n.8, p.931-941, 2005.

ALSTRUP, L.Coaching continuous improvement in small enterprises. **Integrated Manufacturing Systems**, v.11, n.3, p. 165-170, 2000.

AMARATUNGA, D. et. al. Quantitative and qualitative research in the built environment: application of "mixed" research approach. **Work Study**, [S.I.], v.51, n.1, p.17-31, 2002.

AMARI, V.S. Bounds on MTBF of systems subjected to periodic maintenance. **IEEE Transactions on reliability**, [S.I.], v.55, n.3, p.469-474, set 2006.

ANDRADE, A.L. Pensamento Sistêmico: Um roteiro básico para perceber as estruturas da realidade organizacional. **REAd-Revista eletrônica de administração**, Porto Alegre, v.3,n.1,30p., jun. 1997. Disponível em: http://read.adm.ufrgs.br/edicoes/pdf/artigo_200.pdf > Acesso em: 12 out.2009.

ASHAYERI, J.; LEMMES, L. Economic value added of supply chain demand planning: A system dynamics simulation. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, [S.I.], v.22, n.5-6, p.550-556, 2006.

BAINES, T.S.; HARRISON, D.K. An opportunity for system dynamics in manufacturing system modeling. **Production Planning and Control**, [S.I.], v. 10, n.6, p. 542-552, 1999.

BASTOS, A.A.P. **A dinâmica de sistemas e a compreensão da estrutura de negócios**. 2003.132f. Dissertação (Mestrado em Administração)- Departamento de Administração, USP. São Paulo. 2003.

BERENDS, P.; ROMME, G. Simulation as a research tool in management studies. **European Management Journal**, [S.I.], v.17, n.6, p.576-583, 1999.

BERTRAND, J.W.M.; FRANSOO, J.,C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, [S.I.], v.22, n.2, p.241-264, 2002.

BESSANT, J.; CAFFYN, S.; GALLAGHER, M. An evolutionary model of continuous improvement behaviour. **Technovation**, [S.I.], v.21, n.2, p.67-77, fev. 2001.

BESTERFIELD, D.H. **Quality control**. 2^a ed. Englewood Cliffs: Prentice-hall, 1986. 358 p.

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

BILLINGTON, P.J. Holding cost reduction in the EOQ model. **Journal of American Academy of Business**, [S.I.], v. 3, n.1-2, p.409-415. 2003.

BRYMAN, A. **Research methods and organization studies**. Londres: Unwin Hyman, 1989. 300 p.

BYRNE, S.J.; ROBERTS, L. Efficient parts supply: influence of information flows. In: INTERNATIONAL SYSTEM DYNAMICS CONFERENCE, 12. , 1994, Stirling. **Anais...** [S.I.: S.I.], 1994, p.11-19.

BYRNES, J.M. Conceptual vehicle synthesis by a system dynamics simulation approach. In: AIR SYSTEMS TECHNOLOGY CONFERENCE AND BALLOON SYSTEMS

CONFERENCE, 16, 2005, Arlington. **Anais...**[S.I]:American Inst. Aeronautics and Astronautics Inc., 2005,p.62-68.

CAGLIANO, R.; SPINA, G. How improvement programmes of manufacturing are selected:The role of strategic priorities and past experience. **International Journal of Operations & Production Management**, [S.I], v.20, n.7, p.772-791, 2000.

CAKMAKCI, M.; KARASU, M.K. Set-up time reduction process and integrated predetermined system MTM-UAS: A study of application in a large size company of automobile industry. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Londres, v. 33, n.3-4, p.334-344, jun 2007.

CALARGE, F.A.; DAVANSO, J.C. Conceito de dispositivos à prova de zero erros utilizados na meta do zero defeito em processos de manufatura. **Revista de Ciência & Tecnologia**, Piracicaba, v.11, n.21, p.7-18, abril 2004.

CARVALHO, M.C.M. de. A construção do saber científico: algumas posições. In: _____ **Construindo o saber**. 2. ed. Campinas: Papirus, 1995. p. 63-86.

CAVANA, R.Y. ;MAANI, K.E.A Methodological Framework for Systems Thinking and Modelling (ST &M) Interventions. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS THINKING IN MANAGEMENT, 1, 2000, Geolong, **Anais..** Geolong: CEURS-WS, 2000, p.136-141.

CHASE, R.B.; JACOBS, F. R.; AQUILANO, N.J. **Administração da Produção para a Vantagem Competitiva**. 10^a Ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006, 725p.

CHELBI, A., REZG, N. Analysis of production/ inventory system with randomly failing production unit subjected to a minimum required availability level. **International Journal of Production Economics**, [S.I], v.99, n.1-2, p.131-143, 2006.

CHEN, M.-C., TSENG, H.-Y. An approach to design of maintenance float systems. **Integrated Manufacturing Systems**, [S.I], v.14, n.5, 2003 p.458-467.

COOKE, F.L. Implementing TPM in plant maintenance: some organisational barriers. **International Journal of Quality & Reliability Management**, [S.I], v.17, n.9, p.1003-1016, 2000.

CULLEY, S.J. et al. Sustaining changeover improvement. **Journal of Engineering Manufacture**, [S.I], v.217, n.10, p.1455-1470, out.2003.

D'AVINO, G.;vet. al. Reducing ambiguity and uncertainty during new product development: A system dynamics based approach. In: PORTLAND INTERNATIONAL CONFERENCE ON MANAGEMENT OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY, 5, 2005, Portland. **Anais...**Portland:Portland State University, 2005, p.538-549.

DEMO, P. Reconstruir conhecimento. In: _____**Metodologia científica em ciências sociais**. 3ª ed, São Paulo: Atlas, 1995. p.161-185.

DIABY, M. Integrated batch size and setup reduction decisions in multi-product, dynamic manufacturing environments. **International Journal of Production Economics**, [S.I], v.67, n.3, p.219-233, out.2000.

ECKES, G. **A revolução Seis Sigma: O método que levou a GE e outras empresas a transformar processos em lucro**. 3ªed. Rio de Janeiro: Campus, 2001.270p.

ENDRENYI, J. et. al. The present status of maintenance strategies and the impact of maintenance on reliability. **IEEE Transactions on Power Systems**, [S.I], v.16, n.4, p.638-646, nov 2001.

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

FENTON, N. E. A critique of software defect prediction models. **IEEE Transactions on software engineering**, v.25, n.5, p.675-689, set.-out. 1999.

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.

FERNANDES, F.C.F.; GODINHO FILHO, M. Sistemas de Coordenação de Ordens: revisão, classificação, funcionamento e aplicabilidade. **Gestão e Produção**, São Carlos, v. 14, n.2, p. 337-352, maio-ago. 2007.

FORD, D.N.; STERMAN, J.D. Dynamic modeling of product development processes. **System Dynamics Review**, [S.I.], v. 14, n. 1, p. 31-68, 1998.

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

FOSTER, R.O. **The Dynamics of Blood Sugar Regulation**. 1970. Dissertação (Mestrado em ciências). Departamento de ciências, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 1970.

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

GERCHAK, Y. On the allocation of uncertainty-reduction effort to minimize total variability. **IIE Transactions**, [S.I.], v.32, n.5, p.403-407, maio 2000.

GHARBI, A.; KENNE, J.P. Production rate control and design problem in a failure prone manufacturing system. In: INDUSTRIAL ENGINEERING RESEARCH CONFERENCE, 6, 1997, Miami. **Anais...[S.I.]**:IEE, 1997, p. 813-818.

GHARBI, A.; KENNE, J.P. Production and preventive maintenance rates control for a manufacturing system: An experimental design approach. **International Journal of Production Economics**, [S.I.], v.65, n.3, p.275-287, maio 2000.

GIESKES, J.; BOER, H.; BAUDET, F.C.M. CI and performance: a CUTE approach. **International Journal of Production & Operations Management**, [S.I.], v.19, n.11, p.1120-1137, 1999.

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; 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.

GROSSLER, A. A dynamic view on strategic resources and capabilities applied to an example from the manufacturing strategy literature. **Journal of Manufacturing Technology Management**, [S.I.], v.18, n.3, p.250-266, 2007.

GRUNBERG, T. Performance improvement: Towards a method for finding and prioritizing potential performance improvement areas in manufacturing operations. **International Journal of Productivity and Performance Management**, [S.I.], v.53, n.1, p.52-71, 2004.

HELAL, M.; RABELO, L. Interactions of the three management levels in the manufacturing enterprise. In: ANNUAL CONFERENCE AND EXPOSITION, 2006. Orlando. **Anais...**[S.I.]:IEE, 2006, 6p.

HIRAKI, S. Comparative analysis of ordering models for international co-operative global complementary production system. **International Journal of Production Economics**, v.44, n.1-2, p.105-117, 1996.

HOOP, W. J.; SPEARMAN, M.L. **Factory Physics: Foundations of Manufacturing Management**. 1^a.ed. Nova Iorque: Irwin, 1996, 698p.

HOOP, W. J.; SPEARMAN, M.L. **Factory Physics: Foundations of Manufacturing Management**. 3^a ed. Nova York: McGraw Hill Higher Education, 2008.720p.

HUANG, M. et al. Simulation study using system dynamics for a CONWIP-controlled lamp supply chain. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v.32, n.1-2, p.184-193, 2007.

HWANG, H.; KIM, D.B.; KIM, Y.D. Multiproduct economic lot size models with investment costs for *set up* reduction and quality improvement. **International Journal of Production Research**, [S.I.], v.31, n.3, p.691-703, 1993.

JESSEN, S.A. A project management simulation model: how to the motivation of project managers can be studied by model simulation based on the principle of system dynamics. **Norwegian School of Management Research Report**, Oslo, 1991.

JIA, G.Z.; CHENG, Y. Reengineering method of production system based on theory of constraint and system dynamics. **Computer Integrated Manufacturing Systems**, [S.I.], v.13, n.4, p.683-691, 2007.

KARIM, M.A. et al. A comparative study of manufacturing practices and performance variables. **International Journal of Production Economics**, [S.I.], v.112, n.2, p.841-859, abril 2008.

KERRIN, M. Continuous Improvement Capability: Assessment Within One Case Study Organisation. **International Journal of Operations & Production Management**, [S.I.], v.19, n.11, p.1154-1167, 1999.

KLINE, W.A. A course in manufacturing systems with simulation. In: ASEE ANNUAL CONFERENCE AND EXPOSITION, jun.2005, **Proceedings...**[S.I.]: American Society for Engineering Education, 2005, p.2359-2368.

KUMAR, S.; YAMAOKA, T. System dynamics study of the Japanese automotive industry closed loop supply chain. **Journal of Manufacturing Technology Management**, [S.I.], v.18, n.2, p.115-138, 2007.

LAI, C.L.; LEE, W.B.; IP, W.H. A study of system dynamics in just-in-time logistics. **Journal of Material Processing Technology**, [S.I.], v.138, n1-3, p.265-269, 2003.

LAKATOS, E.M.; MARCONI, M.A. **Metodologia do trabalho científico**: procedimentos básicos, pesquisa bibliográfica, projeto e relatório, publicações e trabalhos científicos. 6^a ed. São Paulo: Atlas, 2001. 219p.

LEAL, F. et. al. O uso do projeto de experimentos simulados para análise do efeito interativo de falhas em processos: um caso hipotético. **Sistemas & Gestão**, v.2, n.3, p.285-302, 2007.

LEE, H.H. The investment model in preventive maintenance in multi-level production systems. **International Journal of Production Economics**, v.112, n.2, p.816-828, 2008.

LEEDE, J.; LOOISE, J.K. Continuous Improvement And The Mini-Company Concept. **International Journal of Operations & Production Management**, [S.I.], vol. 19, n.11, p.1188-1202, 1999.

LI et al. Applied factory physics study on semiconductor assembly and test manufacturing. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SEMICONDUCTOR MANUFACTURING CONFERENCE, 2005, **Proceedings...**[S.I.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 4p.

LIN, C. et. al. A generic methodology that aids the application of system dynamics to manufacturing system modeling. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SIMULATION, 1998, York. **Anais...**York: IEE, 1998 p.344-349.

LUO, C. et. al. Dynamics of technology projects management in aviation manufacturing. **Journal of System Simulation**, [S.I.], v.19, n.24, p.5715-5721, 2007.

LUZZI, A.R.; SUSSMAN, J.M. **A systems dynamics model of the U.S. railroad industry.** 1976, Dissertação (Mestrado em engenharia civil), Departamento de engenharia civil, Massachusetts Institute of Technology., Massachusetts, 1976.

MADACHY, R.J. System dynamics modeling of an inspection-based process. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOFTWARE ENGINEERING, 18, 1996, Berlin. **Anais...**Washington: IEEE Computer Society, 1996, p. 376 – 386.

MAIER, F.H.; MILLING, P.M.; HASENPUSCH, J. Total productive maintenance: An international analysis of implementation and performance. **Seminário da indústria da Universidade de Mannheim**, Mannheim, 11p, 1998

MANDAL, P.; LOVE, P.E.D.; GUNASEKARAN, A. Towards a system dynamics modeling framework for quality in manufacturing. **International Journal of Manufacturing Technology and Management**, [S.I.], v.4, n.3-4, p.333-343, 2002.

MAPES, J.; SZWEJCZEWSKI, M.; NEW, C. Process variability and its effect on plant performance. **International Journal of Operations & Production Management**. [S.I.], v.20, n.7, p.792-808, 2000.

MARQUEZ, A.C.; BLANCHARD, C. The procurement of strategic parts. Analysis of a portfolio of contracts with suppliers using a system dynamics simulation model. **International Journal of Production Economics**, [S.I.], v.88, n.1, p.29-49, 2004.

MARTIN, L.A. **Beginner Modeling Exercises**. MIT- Massachusetts Institute of Technology. SDEP- System Dynamics in Education Project. 82 p. 5 set. 1997a.

MARTIN, L.A. **The First Step**. MIT- Massachusetts Institute of Technology. SDEP- System Dynamics in Education Project. 24 jul. 1997b, 59 p Disponível em :< <http://sysdyn.clexchange.org/road-maps/rm-toc.html>> Acesso em: 01 maio. 2009.

MATTHEWS, R.B.; HUNT, L.A. GUMCAS: a model describing the growth of cassava (*Manihot esculenta L. Crantz*). **Field Crops Research**, Amsterdam, v.36, p.69-84, 1994.

McKONE, K.E.; SCHROEDER, R.G.;CUA.K.O. The impact of total productive maintenance practices on manufacturing performance. **Journal of Operations Management**, [S.I], v.19, n.1, p.39-58, jan. 2001.

MINEGISHI, S.; THIEL, D. System dynamics modeling and simulation of a particular food supply chain. **Simulation-Practice and Theory**, [S.I.],v.8, n.5, p. 321-339, 2000.

MONTGOMERY, D.C.; RUNGER,G.R. **Estatística aplicada a probabilidade para engenheiros**. Rio de Janeiro: LTC-Livros técnicos e científicos Editora S.A, 2003,463p.

MOXHAM, C.; GRATBANKS, R. Prerequisites for the implementation of the SMED methodology: A study in a textile processing environment. **International Journal of Quality & Reliability Management**, [S.I], v.18, n.4, p.404-414, 2001.

NAKAJIMA, S. **Introduction to TPM: total productive maintenance**. Cambridge:Productivity Press, 1988.129p.

NOGUEIRA, M.A. **FMEA: implantação e resultados na manutenção preventiva em maquina de abatedouro de frangos**. 1998. 143f. Dissertação (Mestrado em Gestão da Produção). Departamento de engenharia de produção, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1998.

PANDE, P.S.; NEUMAN, R.P.; CAVANAGH, R. R. **The six sigma way**. Nova York: McGraw-Hill, 2000.422p.

PENTTILLÃ, M.J. **Reducing variability in a semiconductor manufacturing environment**. 2005.76p. Dissertação de mestrado (mestrado em engenharia elétrica e ciência de computação). Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology, 2005.

PFAHL, D.; AL-EMRAN, A.; RUHE, G. A system dynamics simulation model for analyzing the stability of software release plans. **Software Process Improvement and Practice**, [S.I.], v.12, n.5, p.475-490, 2007.

PIDD, M. **Computer simulation in management science**. Chichester,England, New York: John Wiley.5ª ed, 2004, 279p.

RADZICKI, 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: 10 maio, 2009.

RAVISHANKAR, G. Role of System Dynamics in Semiconductor Fabrication. In: IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference, 4. , 1993, Piscataway. **Anais...** Piscataway: IEEE Computer Society, 1993, p.40-44.

REID, R.A.; KOLJONEN, E.L. Validating a manufacturing paradigm: a system dynamics modeling approach. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 31, Phoenix. **Anais...** New York: ACM, 1999, p. 759-765.

REIS, M. **Conceitos de estatística**. Disponível em:
< <http://www.inf.ufsc.br/~marcelo/intro.html> > Acesso em: 20 de maio de 2010.

ROBERTS, N. **Introduction to Computer Simulation: A System Dynamics Dynamics Modeling Approach**. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, nov.2001, 20p. System Dynamics in Education Project. São Paulo: Atlas, 2000.

SACHAN, A.; SAHAY, B.S.; MOHAN, R. Assessing benefits of supply chain integration using system dynamics methodology. **International Journal of Services Technology and Management**, [S.I.], v.7, n.5-6, p.582-601, 2006.

SANTOS, A.B. **Modelo de referência para estruturar o programa de qualidade seis sigma: proposta e avaliação**. 2006.312f. Teses (Doutorado em engenharia de produção). Departamento de engenharia de produção, UFSCAR. São Carlos, 2006.

SCHOLZ-REITER, B.; FREITAG, M.; DE BEER, C.; JAGALSKI, T. Modelling Dynamics of Autonomous Logistic Processes: Discrete-event versus Continuous Approaches. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON MANUFACTURING SYSTEMS, 38. 2005, Florianópolis. **Anais...** [S.I.]: Hallwag Publishing Ltd, 2005, p. 413-416.

SCHONBERGER, R.J. **Técnicas industriais japonesas: nove lições ocultas sobre a simplicidade**. Oswaldo Chiquetto (Trad.). Sao Paulo: Pioneira, 1984. 309p.

SCHWANINGER, M.; VRHOVEC, P. Supply system dynamics: Distributed control in supply chains and networks. **Cybernetics and Systems**, [S.I.], v.37, n.5, p.375-415, 2006.

SENGE, P.M. **A quinta disciplina: arte e pratica da organização de aprendizagem**. OP Traduções (Trad.). 2ª ed. São Paulo: Best Seller, 1998. 443p.

SHERIF, J.S. Repair times for systems that have high early failures. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, [S.I], v.9, n.3, p.279-283, 2003.

SHINGO, S. **Zero quality control**: source inspection and the Poka-yoke system. Andrew P. Dillon (Trad.). Cambridge: Productivity Press, 1986. 303 p.

SHINGO, S. **O Sistema Toyota de Produção do ponto de vista da Engenharia de Produção**. Porto Alegre: Bookman, 1996.292p.

SHINGO, S. **Sistema de troca rápida de ferramenta**: uma revolução nos sistemas produtivos. José Antônio Valle Antunes Júnior (Sup.). Eduardo Schaan (Trad.); Cristina Schumacher (Trad.). Porto Alegre: Bookman, 2003. 327p.

SILVA,C.M.I., CABRITA,C.M.P., MATIAS, J.C. O. Proactive reliability maintenance: a case study concerning maintenance service costs. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, [S.I], v.14, n.4, p.343-355, 2008.

SILVA, H.A.;SILVA,M.B. Aplicação de um projeto de experimentos na soldagem de tubos zircaloy-4.**Revista Eletrônica Produção & Engenharia**, v.1, n.1, p.41-52. set/dez.2008.

SING, B.G. Keeping the wheels turning (total productive maintenance). **Manufacturing Engineer**, [S.I], v.85, n.1, p.32-35, março 2006.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da produção**. Maria Teresa Corrêa de Oliveira (Trad.); Fábio Alher (Trad.). 2ª ed. São Paulo: Atlas, 2002. 747 p.

SNEE, R.D.; HOERL, R.W. **Six sigma beyond the factory floor**: deployment strategies for financial services, health care, and the rest of the real economy. Upper Saddle River: Pearson/Prentice Hall, 2005. 326p.

SPELLER, T.; RABELO, L.;JONES,A. Value chain modeling using system dynamics. **International Journal of Manufacturing Technology and Management**, [S.I],v.11, n.2, p.135-156,2007.

STAMBOULIS,Y.; ADAMIDES,E.; MALAKIS,T. A system-dynamics study of resource-based approach to process development strategy. In: IEEE INTERNATIONAL ENGINEERING MANAGEMENT CONFERENCE, 2002, Cambridge. **Anais...**[S.I.]:IEEE Computer Society,2002,p.419-424.

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

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

STORCK,J.; LINDBERG, B. Assessment of best scheduling practice in continuous casting and hot rolling of stainless steel strip by system dynamics simulation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF SHEET METAL, 12, 2007, [S.I.]. **Anais...**[S.I.]:Trans Tech Publications Ltd., 2007, p.897-904.

SUN,B.F. et.al. Application of arena and system dynamics in the field of supply chain simulation. **Journal of Jilin University**, Jilin,v.36,n.5,p.829-834,2006.

SUN, C.; SHUAI,B. System dynamics model on the relation between Chinas's logistics industry and its exterior service circumstance. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SERVICE SYSTEMS AND SERVICE MANAGEMENT, 2007, Troyes. **Anais...**[S.I.]: IEEE Computer Society, 2007,p.526-529.

SURI, R. **Quick Response Manufacturing: A companywide approach to reducing lead times.** Portland: Productivity Press, 1998.545p.

SWANSON, L. Linking maintenance strategies to performance. **International Journal of Production Economics**, [S.I], v.70, n.3, p.237-244, abril 2001.

SYCAMORE, D.M.; COLLOFELO, J.S. Using system dynamics modeling to manage projects. In: INTERNATIONAL COMPUTER SOFTWARE AND APPLICATIONS CONFERENCE, 23, 1999, Phoenix. **Anais...** Washington: IEEE Computer Society, 1999, p.213-217.

TAHARA, S. **Planejamento de experimentos (DOE).** Disponível em: <<http://www.portaldeconhecimentos.org.br/index.php/por/content/view/full/9417>>Acesso em: 20 de maio de 2010.

TAKAHASHI, K.; NAKAMURA, N. Agile control in JIT ordering systems. **International Journal of Agile Management Systems**. [S.I], v.2, n.3, p.242-252, 2000.

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: 29 de outubro de 2009.

TESFAMARIAN, D.; LINDEBERG.B. Aggregate analysis of manufacturing systems using system dynamics and ANP. **Computers & Industrial Engineering**, [S.I.], v. 49, n.1, p. 98-117, 2005.

TODINOV, M.T. Reliability analysis based on the losses from failures. **Risk analysis**, v.26, n.2, p.311-335, 2006.

TOWILL, D.R., Supply Chain Dynamics: the change engineering challenge of the mid 1990s. In: INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING, 1, 1992, Chicago. **Anais...** [S.I.: s.n], 1992, p. 233-245.

TOWILL, D.R.; DEL VECCHIO, A. The application of filter theory to the study of supply chain dynamics. **Production Planning & Control**, [S.I.], v. 5, n.1, p.82-96, 1994.

TREVILLE, S.D., SHPIRO, R.D., HAMERIA, A. From supply chain to demand chain: the role of lead time reduction in improving demand chain performance. **Journal of Operations Management**, [S.I.], v.21, p.613-627, 2004.

TRIVEDI, K.S. **Probability and Statistics with reliability queuing and computer science applications**. 2^aed. [SI]: Jonh Wiley & Sons, 2006, 830p.

TUCCI, C.L. et. al. A simulator of the manufacturing of induction motors.In: IEEE INDUSTRY APPLICATION SOCIETY ANNUAL MEETING, 1991, Dearborn. **Anais...**,[S.I.]:IEEE,1991 p.1353-1359.

UPTON, D.M.; KIM, B. Alternative methods of learning and process improvement in manufacturing. **Journal of Operations Management**, [S.I.], v.16, n.1, p.1-20, jan. 1998.

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

VILELA, P.R.C. **Introdução à dinâmica de sistemas**. Juiz de Fora: Departamento de engenharia de produção da Universidade Federal de Juiz de Fora, 2005, 66p. Apostila.

VISWANADHAM, N.; DESAI, V.; GAONKAR, R. Bullwhip effect in integrated manufacturing and service networks. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, 2005, Barcelona. **Anais...**[S.I.]:IEEE Computer Society,2005, p.2994-2999.

VLACHOS, D.; GEORGIADIS, P.; IAKOVOU,E. A system dynamics model for dynamic capacity planning of remanufacturing in closed-loop supply chains. **Computers and Operations Research**, [S.I.], v.34, n.2, p.367-394, 2007.

WANKADE, L.; DABADE, B.M. TQM with quality perception: A system dynamics approach, **TQM Magazine**, [S.I.], v.18, n.4, p.341-357,2006.

WATKINS, B.; KURZ, M.E. An application of factory physics tools in a complex manufacturing environment. In: IIE ANNUAL CONFERENCE AND EXHIBITION, mai.2004,**Proceedings...**[S.I.]:: Institute of Industrial Engineers, 2004.

WIKNER, J.; TOWILL, D.R.; NAIM, M. Smoothing supply chain dynamics. **International Journal of Production Economics**, [S.I.], v.22, n.3, p.231-248, 1991.

WILLIFORD, J.; CHANG, A. Modeling FedEx's IT division: A system dynamics approach to strategic IT planning. **Journal of Systems and Software**, v. 46, n.2, p. 203–211, 1999.

WOLSTENHOLME, E. System dynamics in the elevator, email, system-dynamics@world.std.com, 1997 apud CAVANA, R.Y. ;MAANI, K.E.A Methodological Framework for Systems Thinking and Modelling (ST &M) Interventions. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS THINKING IN MANAGEMENT, 1, 2000, Geolong, **Anais..** Geolong: CEURS-WS, 2000, p.136-141.

WOLSTENHOLME, E. Qualitative v. Quantitative Modelling: The Evolving Balance. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE SYSTEM DYNAMICS SOCIETY, 16, 1998 , Quebec. **Proceedings...** [S.I.:S.I], 1998, 11p.

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

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

YU, Y.; DU, W. Green supply chain management of manufacturing based on system dynamics. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRANSPORTATION ENGINEERING, 2007, Chengdu. **Anais...**[S.I.]: American Society of Civil Engineers, 2007, p.2500-2505.

ZAMBOM, A.C. **Análise de fundos de pensão: uma abordagem de system dynamics**. Rio de Janeiro: FUNENSEG, 2000. 128p.

ZHANG, L.B. et. al System dynamics in plant capacity enlargement. **Journal of System Simulation**, [S.I.], v.18, n.5, p.1327-1330, 2006.

ZHENG et al. Cycle time reduction in assembly and test manufacturing factories: A KPI driven methodology. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ENGINEERING AND ENGINEERING MANAGEMENT, 2008, **Proceedings...** [S.I.]: Inst. of Elec. and Elec. Eng. Computer Society, 2008, p.1234-1238.

ZHOU, J.; LI, Q.; BROWNE, J.; WANG, Q.; FOLAN, P.; XIAO, T. Performance-based Bayesian learning for resource collaboration optimization in manufacturing grid. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADAPTIVE AND NATURAL COMPUTING ALGORITHMS, 8, 2007, Warsaw. **Anais...**[S.I.]: Springer Verlag, 2007, p.498-507.