

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

**MARCEL HEIMAR RIBEIRO UTIYAMA**

**COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE  
MELHORIA VISANDO À REDUÇÃO DO *LEAD TIME***

**SÃO CARLOS  
2016**

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

**MARCEL HEIMAR RIBEIRO UTIYAMA**

**COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE  
MELHORIA VISANDO À REDUÇÃO DO *LEAD TIME***

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

***Orientador: Prof. Dr. Moacir Godinho Filho***

**SÃO CARLOS  
2016**

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

U89c Utiyama, Marcel Heimar Ribeiro  
Comparação entre diferentes estratégias de  
melhoria visando à redução do lead time / Marcel  
Heimar Ribeiro Utiyama. -- São Carlos : UFSCar, 2016.  
155 p.

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

1. Lead time. 2. Melhoria contínua. 3. Média. 4.  
Variabilidade. 5. Pior caso. I. Título.

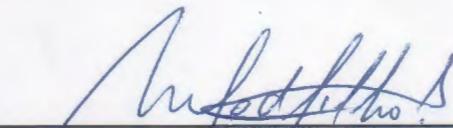


UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

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

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Tese de Doutorado do candidato Marcel Heimar Ribeiro Utiyama, realizada em 18/02/2016:



---

Prof. Dr. Moacir Godinho Filho  
UFSCar



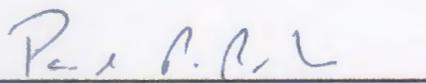
---

Prof. Dr. Fábio Muller Guerrini  
USP



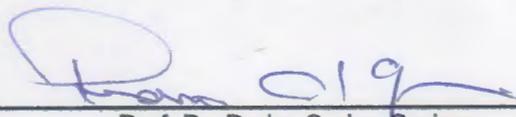
---

Prof. Dr. Kleber Francisco Esposto  
USP



---

Prof. Dr. Paulo Rogerio Politano  
UFSCar



---

Prof. Dr. Pedro Carlos Dprime  
UFSCar

Dedico esse trabalho a minha família e a Deus

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Moacir Godinho Filho pelos ensinamentos que foram fundamentais na realização deste trabalho.

Agradeço aos professores Drs. Fábio Guerrini, Kleber Esposto, Paulo Politano e Pedro Oprime, por suas valiosas contribuições e sugestões.

Agradeço ao professor Benedito Benze por todo o auxílio com as ferramentas estatísticas.

Agradeço aos funcionários do programa de pós-graduação em Engenharia de Produção da UFSCar, pela ajuda prestada.

Agradeço a CAPES por financiar esta pesquisa.

Agradeço aos meus pais, Mário Tetsunori Utiyama e Diva Ribeiro da Silva Utiyama e meus irmãos Douglas Patrick Ribeiro Utiyama, Reinier Alexsander Ribeiro Utiyama e Francine Elisa Aparecida Ribeiro Utiyama. Eles constituem o meu exemplo de família unida e que luta por seus objetivos.

Agradeço a todos os meus amigos que treinam e jogam Xadrez comigo, por me ajudarem a descarregar o estresse do dia-a-dia praticando meu esporte preferido.

Agradeço aos amigos e alunos da Unifran pelo excelente convívio.

Agradeço a todos os meus amigos que contribuíram indiretamente para a realização deste trabalho e a todas as pessoas que me ajudaram ao longo de minha trajetória e a chegar até aqui.

*Slide away...*  
Oasis

## RESUMO

O foco no tempo constitui o aspecto fundamental de modernas estratégias de gestão da manufatura. Dentre elas merece destaque a competição baseada no tempo (*time-based competition-TBC*) e a manufatura de resposta rápida (*Quick Response Manufacturing-QRM*). A redução do *lead time* implica em ganhos significativos e é obtida por meio de programas de melhorias em variáveis do chão de fábrica. Para a realização de melhorias nessas variáveis, um gerente de produção, precisa escolher a melhor maneira de investir os seus recursos financeiros limitados. O presente trabalho investiga qual a melhor estratégia no que se refere à melhoria no tempo de reparo, tempo entre falhas e tempo de *setup*: Realizar melhorias na média, na variabilidade ou eliminar os piores casos. O foco principal deste trabalho é a estratégia de melhoria no pior caso, ou seja, identificar as situações nas quais a mesma produz um efeito no *lead time* superior ou semelhante às estratégias de melhoria na *média* e na *variabilidade*. Para isso foi realizada uma modelagem/simulação e as três variáveis abordadas nesse trabalho foram modeladas utilizando as distribuições de probabilidade normal e lognormal. Os resultados encontrados na presente tese mostram que para situações com variabilidades moderadas e altas a estratégia focada no pior caso é a melhor opção de melhoria considerando as três variáveis investigadas neste estudo. Ou seja, a estratégia de melhoria focada nos piores casos pode trazer benefícios mais facilmente e a um menor custo. Adicionalmente, para baixa variabilidade a estratégia de melhoria na média é a melhor opção. No entanto, foi observado que para o tempo de reparo e tempo de *setup* a estratégia de melhoria no pior caso é uma boa alternativa para as situações nas quais não seja possível efetuar uma melhoria na média dessas variáveis. Já para o tempo entre falhas, essa constatação não se sustenta, pois nesse caso a única alternativa que apresenta benefícios significativos é a estratégia de melhoria focada na média.

**Palavras-chave:** *Lead time*; Melhoria Contínua; Média; Variabilidade, Pior caso

## **ABSTRACT**

*The focus in time is the cornerstone of modern manufacturing management approaches; among them the Time Based Competition (TBC) and the Quick Response Manufacturing (QRM). Lead time reduction brings significant gains which are obtained by means of improvements in the shop floor variables. To make improvements in these variables, managers need to choose the best way to invest his limited financial resources. This work look for the best strategy regarding the improvement in time to repair, time between failures and setup time: To perform improvements focused on mean, variability or eliminate the worst cases. The main focus of this work is the worst case strategy, it means, to find the situations in which this strategy is the best option. To perform this comparison a modeling/simulation was conducted and the three variables addressed in this work were modeled using the normal and lognormal probability distributions. Results show that for situations with moderate and high variability the worst case strategy is the best improvement option. We believe this strategy can bring significant benefits and it is probably less costly and easier to implement. For low variability situations we find that the mean strategy is the best option. In addition for this case, for two variables (time to repair and setup time) the worst case strategy is a good alternative for situations which it is not possible to reduce the mean of these variables. For the time to failure, the only good option remains the mean strategy*

**Keywords:** *Lead time; Continuous Improvement; Mean; Variability, Worst-case*

## Lista de ilustrações

Figura 1.1 Exemplo do efeito das três estratégias de melhoria: tempo de reparo .....	17
Figura 1.2 Roteiro estruturado da pesquisa .....	29
Figura 1.3 Estrutura da tese .....	32
Figura 2.1 Relacionamento entre abordagens de gestão, estratégias de melhoria e <i>lead time</i> ..	34
Figura 2.2 Organização das células na CFP Corporation .....	51
Figura 2.3 Fluxo do cartão do POLCA para uma determinada ordem de produção na CFP Corporation.....	53
Figura 3.1 Exemplo do efeito das três estratégias de melhoria: tempo de reparo .....	75
Figura 3.2 Ilustração do modelo desenvolvido neste trabalho utilizando o <i>software</i> Maple ...	82
Figura 3.3 Teste de igualdade de variâncias para amostra 1 .....	86
Figura 3.4 Teste de normalidade para a amostra 1 .....	87
Figura 3.5 ANOVA para amostra 1 .....	87
Figura 3.6 Resumo dos resultados encontrados para tempo de reparo (tarefas simples).....	99
Figura 3.7 Resumo dos resultados encontrados para tempo de reparo (tarefas complexas) ..	102
Figura 4.1 Exemplo do efeito das três estratégias de melhoria: tempo entre falhas.....	107
Figura 4.2 Resumo dos resultados para tempo entre falhas (tarefas simples).....	120
Figura 4.3 Resumo dos resultados para tempo entre falhas (tarefas complexas).....	121
Figura 5.1 Exemplo do efeito das três estratégias de melhoria: tempo de <i>setup</i> .....	124
Figura 5.2 Resumo dos resultados para tempo de <i>setup</i> (tarefas simples).....	139
Figura 5.3 Resumo dos resultados para tempo de <i>setup</i> (tarefas complexas) .....	141
Quadro 1.1 Distribuições de probabilidade utilizadas para modelar variáveis de chão de fábrica.....	25
Quadro 1.2 Síntese das escolhas do método de pesquisa.....	29
Quadro 2.1 Funções e regras de utilização do <i>Kanban</i> .....	43
Quadro 2.2 Síntese dos principais trabalhos analisados sobre redução de <i>lead time</i> .....	65

## Lista de tabelas

Tabela 3.1 Parâmetros utilizados para simulação de melhoria no tempo médio de reparo.....	81
Tabela 3.2 Valores de <i>lead time</i> para a amostra 1 .....	85
Tabela 3.3 Análises para tempo médio de reparo de 1 hora.....	88
Tabela 3.4 Análises para tempo médio de reparo de 2 horas .....	90
Tabela 3.5 Análises para tempo médio de reparo de 4 horas .....	91
Tabela 3.6 Análises para tempo médio de reparo de 1 hora.....	93
Tabela 3.7 Análises para tempo médio de reparo de 2 horas .....	95
Tabela 3.8 Análises para tempo médio de reparo de 4 horas .....	96
Tabela 4.1 Parâmetros utilizados para simulação de melhoria no tempo entre falhas .....	108
Tabela 4.2 Análises para tempo entre falhas de 80 horas.....	109
Tabela 4.3 Análises para tempo entre falhas de 100 horas.....	110
Tabela 4.4 Análises para tempo entre falhas de 120 horas .....	112
Tabela 4.5 Análises para tempo entre falhas de 80 horas.....	114
Tabela 4.6 Análises para tempo entre falhas de 100 horas.....	115
Tabela 4.7 Análises para tempo entre falhas de 120 horas.....	117
Tabela 5.1 Parâmetros utilizados para simulação de melhoria no tempo de <i>setup</i> .....	127
Tabela 5.2 Análises para tempo de <i>setup</i> de 1 hora .....	129
Tabela 5.3 Análises para tempo de <i>setup</i> de 1,5 horas .....	130
Tabela 5.4 Análises para tempo de <i>setup</i> de 2 horas.....	132
Tabela 5.5 Análises para tempo de <i>setup</i> de 1 hora .....	133
Tabela 5.6 Análises para tempo de <i>setup</i> de 1,5 horas .....	135
Tabela 5.7 Análises para tempo de <i>setup</i> de 2 horas .....	136

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1 MOTIVAÇÃO E <i>GAP</i> DE PESQUISA .....	15
1.2 QUESTÕES E OBJETIVOS DE PESQUISA.....	20
1.3 MÉTODO DE PESQUISA.....	21
1.3.1 Estratégia de pesquisa.....	21
1.3.2 Procedimento e método de pesquisa.....	22
1.3.3 Técnica de pesquisa.....	23
1.3.3.2 Técnicas estatísticas para análise dos dados.....	27
1.3.4 Aspectos metodológicos aplicados ao presente trabalho .....	28
1.4 CONTRIBUIÇÕES PRETENDIDAS .....	31
1.5 ESTRUTURA DA TESE .....	32
<b>CAPÍTULO 2 BASE TEÓRICA .....</b>	<b>34</b>
2.1 INTRODUÇÃO.....	34
2.2 ABORDAGENS QUE TRABALHAM COM REDUÇÃO DO <i>LEAD TIME</i> : O <i>LEAN MANUFACTURING</i> E O <i>QUICK RESPONSE MANUFACTURING</i> .....	34
2.2.1 <i>Lean Manufacturing</i> .....	35
2.2.1.1 Histórico .....	35
2.2.1.2 Princípios gerais da Manufatura Enxuta .....	36
2.2.1.3 Principais conceitos, técnicas e ferramentas da estratégia Manufatura Enxuta .....	38
2.2.1.4 Redução do desperdício ( <i>Muda</i> ).....	39
2.2.1.5 <i>Just-in-Time</i> e <i>Kanban</i> .....	40
2.2.1.6 Autonomia.....	43
2.2.1.7 Mapeamento do fluxo de valor (MFV).....	44
2.2.1.8 Nivelamento da produção ( <i>heijunka</i> ) e troca rápida de ferramentas.....	45
2.2.2 <i>Quick Response Manufacturing</i> .....	45
2.2.2.1 Princípios gerais e implantação .....	46
2.2.2.2 Principais ferramentas .....	47
2.2.2.2.1 <i>Manufacturing critical path time</i> (MCT).....	47
2.2.2.2.2 Manufatura celular no contexto do QRM .....	48
2.2.2.2.3 <i>Paired-cell Overlapping Loops of Cards with Authorization</i> (POLCA) .....	51
2.3 VARIÁVEIS DO CHÃO DE FÁBRICA QUE TEM EFEITO NA REDUÇÃO DO <i>LEAD TIME</i> .....	54
2.4 O EFEITO DE PROGRAMAS DE MELHORIA EM VARIÁVEIS DO CHÃO DE FÁBRICA NA REDUÇÃO DE <i>LEAD TIME</i> .....	57
2.4.1 Resumo dos principais trabalhos analisados sobre a redução do <i>lead time</i> .....	57
2.5 AS TRÊS ESTRATÉGIAS PARA MELHORIA ESTUDADAS NO PRESENTE TRABALHO .....	67
2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO .....	73
<b>CAPÍTULO 3 COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE MELHORIA NO TEMPO DE REPARO .....</b>	<b>74</b>
3.1. INTRODUÇÃO.....	74
3.2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	75
3.3 MODELAGEM E EXPERIMENTOS .....	77

3.4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA TEMPO DE REPARO: COM DISTRIBUIÇÃO NORMAL ...	84
3.4.1 Tempo de reparo baixo .....	84
3.4.2 Tempo de reparo médio .....	89
3.4.3 Tempo de reparo alto .....	90
3.5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA TEMPO DE REPARO COM DISTRIBUIÇÃO LOGNORMAL	92
3.5.1 Tempo de reparo baixo .....	92
3.5.2 Tempo de reparo médio .....	94
3.5.3 Tempo de reparo alto .....	96
3.6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E RECOMENDAÇÕES PARA GERENTES NA PRÁTICA .....	98
3.6.1 Tarefas simples (distribuição normal) .....	98
3.6.2 Tarefas complexas (distribuição lognormal) .....	101
3.6.3 Considerações finais .....	103
<b>CAPÍTULO 4 COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE MELHORIA NO TEMPO ENTRE FALHAS.....</b>	<b>104</b>
4.1 INTRODUÇÃO.....	104
4.2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	105
4.3 MODELAGEM E EXPERIMENTOS .....	106
4.4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA TEMPO ENTRE FALHAS COM DISTRIBUIÇÃO NORMAL	109
4.4.1 Tempo entre falhas baixo .....	109
4.4.2 Tempo entre falhas médio .....	110
4.4.3 Tempo entre falhas alto .....	111
4.5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA TEMPO ENTRE FALHAS COM DISTRIBUIÇÃO LOGNORMAL .....	113
4.5.1 Tempo entre falhas baixo .....	113
4.5.2 Tempo entre falhas médio .....	115
4.5.3 Tempo entre falhas alto .....	116
4.6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E RECOMENDAÇÕES PARA GERENTES NA PRÁTICA .....	118
4.6.1 Tarefas simples (distribuição normal) .....	118
4.6.2 Tarefas complexas (distribuição lognormal) .....	120
4.6.3 Considerações finais .....	122
<b>CAPÍTULO 5 COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE MELHORIA NO TEMPO DE <i>SETUP</i>.....</b>	<b>123</b>
5.1 INTRODUÇÃO.....	123
5.2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	125
5.3 MODELAGEM E EXPERIMENTOS .....	127
5.4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA TEMPO DE <i>SETUP</i> COM DISTRIBUIÇÃO NORMAL .....	128
5.4.1 Tempo de <i>setup</i> baixo.....	128
5.4.2 Tempo de <i>setup</i> médio.....	130
5.4.3 Tempo de <i>setup</i> alto.....	131

5.5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA TEMPO DE <i>SETUP</i> COM DISTRIBUIÇÃO LOGNORMAL	133
5.5.1 Tempo de <i>setup</i> baixo.....	133
5.5.2 Tempo de <i>setup</i> médio.....	134
5.5.3 Tempo de <i>setup</i> alto.....	136
5.6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E RECOMENDAÇÕES PARA GERENTES NA PRÁTICA.....	138
5.6.1 Tarefas simples (distribuição normal) .....	138
5.6.2 Tarefas complexas (distribuição lognormal) .....	140
5.6.3 Considerações finais .....	143
<b>CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>144</b>
<b>CAPÍTULO 7 REFERÊNCIAS .....</b>	<b>147</b>

# CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

---

## 1.1 MOTIVAÇÃO E GAP DE PESQUISA

O mercado consumidor demanda produtos com qualidade excelente e em grande variedade; não obstante há a necessidade de se produzir a baixo custo e entregar os produtos em um intervalo de tempo cada vez mais curto. Neste cenário, é primordial que as empresas busquem realizar melhorias constantes no seu processo produtivo. Para isso são utilizadas as melhores técnicas de gestão da produção, visando atender clientes cada vez mais exigentes. Slack et al. (2009) explica que há cinco objetivos de desempenho: custo, qualidade, confiabilidade, flexibilidade e velocidade. Esses objetivos se aplicam a todos os tipos de operações produtivas. O foco no tempo (velocidade) constitui o aspecto fundamental de modernas estratégias de gestão da manufatura, dentre elas merece destaque a competição baseada no tempo (*Time-based Competition-TBC*) e a manufatura de resposta rápida (*Quick Response Manufacturing-QRM*). Suri (1998) destaca que no paradigma da Manufatura Responsiva a principal medida de desempenho é a redução do *lead time*. Desta forma, a redução do *lead time* passa a ser um aspecto de fundamental importância para as empresas que queiram obter êxito no atual cenário do mercado, especialmente para aquelas com o foco na rapidez.

Nesse trabalho, *lead time* é a medida de desempenho utilizada e pode ser definida, segundo Ericksen et al. (2007), como o tempo típico (medido em dias corridos), desde que o cliente faz o pedido, passando pelo caminho crítico, até que pedido completo seja entregue ao cliente. O foco dado ao *lead time* se deve a importância crescente do tema nos últimos anos, ao potencial de alavancar as métricas fundamentais da empresa e aos benefícios que a redução do mesmo traz, conforme explicam Chhajed e Kim (1995), Porter (2003) e Mason-Jones e Towill (1999).

Dentre as diversas variáveis de chão de fábrica que afetam a redução do *lead time*, Hopp e Spearman (2008) destacam seis, a saber: tempo médio de *setup*, tempo médio de reparo, tempo médio entre falhas, taxa média de defeitos, variabilidade no tempo de processamento e variabilidade no tempo entre as chegadas de ordens. As variáveis tratadas nesse estudo são as três primeiras, as quais têm um forte efeito na disponibilidade dos equipamentos, sendo, portanto, fundamentais no gerenciamento dos sistemas produtivos.

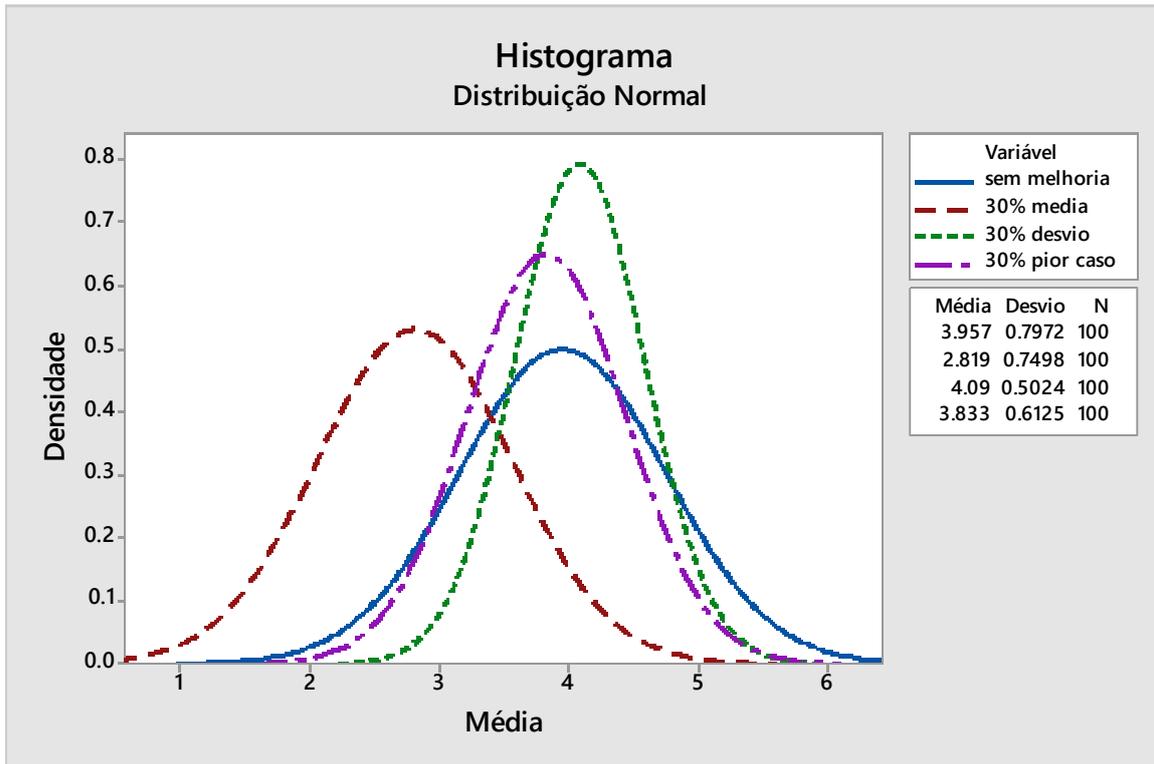
Hopp et al. (2007) explicam que as principais ações para reduzir o tempo de *setup* são: converter tarefas internas de *setup* em externas, melhoria nos equipamentos, melhorar o treinamento dos operadores, melhorar a motivação dos trabalhadores e padronizar os procedimentos de *setup*. Adicionalmente, os mesmos autores apontam que as principais ações para aumentar a disponibilidade das máquinas são: reduzir o tempo de reparo, diminuir a taxa de falhas, e converter ações de reparo internas em externas por meio da utilização de módulos de reparo.

Ao colocar estas ações em prática são melhorados a média, a variabilidade ou os piores casos das três variáveis de interesse deste trabalho. Para a realização de melhorias nessas variáveis, um gerente de produção precisa escolher a melhor maneira de investir os seus recursos financeiros limitados. Ou seja, é necessário definir qual a melhor estratégia de melhoria. Nesse trabalho são investigadas três estratégias:

- i. Melhoria na média: Neste caso o investimento realizado visa diminuir o valor da média da variável a ser investigada;
- ii. Melhoria na variabilidade: Neste caso a variabilidade da variável investigada é reduzida, tornando o desempenho mais previsível;
- iii. Melhoria no pior caso: Nesta estratégia o objetivo é a eliminação de casos extremos (piores casos), desta forma tanto a média quanto a variabilidade dos processos é alterada.

Na Figura 1.1 é apresentado um exemplo para uma das amostras utilizadas no capítulo 3 desta tese. Nesta figura é mostrada a forma como cada estratégia de melhoria é direcionada, considerando uma estação de trabalho com um tempo de reparo de 4 horas, coeficiente de variação de 0,2 e foi efetuada uma melhoria de 30% no tempo de reparo. Adicionalmente, na Figura 1.1 é apresentada a melhoria nas 3 estratégias, seguindo uma distribuição normal e é feita uma comparação entre as 3 estratégias e a situação sem melhoria.

Nota-se pela Figura 1.1 o comportamento da estratégia de melhoria na média, a qual move o gráfico para a esquerda, reduzindo a média de 4 horas para aproximadamente 2,8 horas. No caso da estratégia de melhoria na variabilidade, observa-se que a mesma não altera a média, mas altera o formato da curva, pois o desvio padrão é reduzido de 0,8 para aproximadamente 0,5. Dessa forma o processo torna-se mais estável. Por fim, é possível observar que a estratégia focada no pior caso, altera ambos, tanto a média quanto o desvio padrão do processo.



**Figura 1.1** Exemplo do efeito das três estratégias de melhoria: tempo de reparo.

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

Diversos estudos, entre eles Chaharsooghi e Heydari (2010), He et al. (2005), Gong et al. (2009), enfocam a melhoria na média e variabilidade de variáveis de chão de fábrica. É amplamente difundida na literatura a ideia de focar na melhoria da média ou eliminação da variabilidade. Apenas para ilustrar esse ponto foi feita uma revisão não exaustiva da literatura utilizando diversas bases de dados, entre elas, o COMPENDEX, Google Acadêmico e *Web Of Science*. As palavras-chave utilizadas foram: *mean*, *variability*, *worst cases*, *improvement*. Foram encontrados 13 trabalhos com foco na média e na variabilidade. No entanto, os piores casos são tratados como exceções e foi encontrado apenas um trabalho com o foco próximo a esse tema. A escassa pesquisa a respeito da estratégia de melhoria no pior caso constitui um *gap* na literatura a ser explorado, pois a mesma pode ser uma alternativa interessante a ser utilizada. É fundamental destacar que a melhoria no pior caso pode ser mais barata que a estratégia de melhoria na média ou na variabilidade. Desta forma, surgiu o interesse em investigar as situações nas quais a estratégia de melhoria focada no pior caso pode ser superior ou uma boa alternativa as estratégias de melhoria na média e na variabilidade.

É importante destacar que diversas abordagens e suas respectivas técnicas e ferramentas tem o foco explícito de melhoria na média e na variabilidade. No entanto,

algumas delas melhoram os piores casos, ainda que de forma não explícita. De maneira geral, o *Lean Manufacturing* tem um enfoque principalmente na variabilidade dos processos, no entanto melhora também a média dos processos. Um dos pontos principais da Manufatura Enxuta é a eliminação dos desperdícios. No extremo, sistemas produtivos que possuam alto nível de desperdício podem ser considerados piores casos, ou seja, a técnica de identificação e mitigação de desperdícios do *Lean Manufacturing* pode ser considerada inicialmente uma eliminação dos piores casos. Após a remoção dos desperdícios, os processos tendem a ficar mais estáveis (menor variabilidade) fazendo com que a média dos tempos de processamento e, conseqüentemente, o *lead time* diminua.

O *Lean Manufacturing* faz uso também da técnica chamada *Single Minute Exchange of Dies* (SMED), que tem como objetivo tornar o tempo de *setup* tão pequeno quanto possível. O objetivo dessa técnica é reduzir os longos tempos de *setup* de modo a torná-los simbolicamente um tempo de “um dígito de minuto” (SHINGO, 1985). Nota-se que essa técnica visa inicialmente reduzir a média e a variabilidade do tempo de reparo. Outra ferramenta do *Lean Manufacturing* é a Manutenção Produtiva Total (TPM) que pode ser definida, de acordo com Fernandes e Godinho Filho (2010) como uma ferramenta que visa eliminar a variabilidade do processo causada pelas quebras não planejadas de máquinas. Ao utilizar o TPM, a ideia básica é evitar que as máquinas quebrem, evitando que a variabilidade do processo aumente devido a essas paradas não planejadas. Percebe-se que o TPM visa diminuir a variabilidade do tempo entre falhas e de reparo. Uma efetiva implantação do TPM pode aumentar o tempo médio entre falhas e diminuir o tempo médio de reparo, além de possuir um efeito positivo na eliminação dos piores casos, tendo em vista que em máquinas nas quais é feita a manutenção correta, a chance de falhas graves é menor.

Outra importante abordagem de gestão é a Teoria das Restrições (GOLDRATT, 1984) que possui um foco no gerenciamento da restrição, que é aquele recurso que se não for cuidadosamente gerenciado limita o *throughput* da organização. Esse foco no recurso restrição pode ser entendido como um foco no pior caso, ou seja, aquela máquina ou processo, que se não tratado com atenção, compromete o desempenho de todo o sistema. O gerenciamento efetivo das restrições faz com que o congestionamento do sistema produtivo diminua, abaixando o tempo médio de fluxo e conseqüentemente o *lead time* médio.

Com o propósito de tornar ainda mais claro o que significa melhorar a média, variabilidade ou os piores casos, é possível citar um exemplo prático para o tempo de reparo. A máquina X de uma empresa hipotética sofre determinados tipos de quebra e é um recurso crítico e caro. As quebras podem ocorrer por diversos motivos, mas de maneira geral os

tempos de reparo dessa máquina têm uma média de 60 minutos e desvio padrão de 12 minutos, o que resulta em um coeficiente de variação (razão entre desvio padrão e média) de 0,2. Determinados tipos de quebra ocorrem com alta frequência e possui tempo de reparo próximo a média observada. Entretanto, também foi constatado que há alguns tipos de quebra que ocorrem com baixa frequência e tem um tempo de reparo de 2 dias.

Quando a quebra é simples, os técnicos de manutenção da própria empresa são capacitados para realizar o conserto da máquina. Melhorar a média nesse caso consistiria em realizar as operações de reparo mais rapidamente, o que pode ser obtido por meio de um programa de treinamento que capacite funcionários da manutenção a realizar a operação em um tempo menor e que elimine operações desnecessárias etc. Melhorar a variabilidade nesse exemplo pode significar um programa de treinamento de modo a padronizar as operações, fazendo com que o tempo de reparo tenha uma média mais previsível, ou seja, o tempo de reparo sofrerá os efeitos da variabilidade, no entanto, com uma taxa de desvio menor do que os 12 minutos.

Quando a quebra possui um nível de complexidade maior, é necessário solicitar um técnico especializado da empresa fornecedora do equipamento para realizar esse serviço. Nota-se que esta situação constitui um pior caso, pois o tempo de reparo passa a ser de 2 dias. Há poucas técnicas que focam diretamente no pior caso, sendo que geralmente a solução implantada é a eliminação dos mesmos. Uma possível forma de eliminar o pior caso para a situação descrita consiste na contratação de um técnico especializado ou a capacitação dos técnicos existentes. Nota-se que essa alternativa de melhoria tem baixo custo, principalmente no que se refere à capacitação dos técnicos da própria empresa. Dessa forma o tempo de reparo de 2 dias seria eliminado, fazendo com que o *lead time* deste processo seja menor.

Desta forma, o estudo analisou as melhorias nas três variáveis do chão de fábrica (tempo de reparo, tempo entre falhas e tempo de *setup*), direcionadas pelas três estratégias (média, variabilidade e pior caso), verificando o efeito que elas produzem no *lead time* em um ambiente de máquina única. Para se avaliar o efeito destas ações de melhoria contínua na redução do *lead time* foi criado um modelo no *software* Maple, o qual possui uma capacidade de modelagem e simulação matemática ideal para a realização deste trabalho. O novo modelo foi baseado no modelo híbrido *System Dynamics-Factory Physics* já utilizado em diversos trabalhos na literatura (GODINHO FILHO; UZSOY, 2008a, 2009, 2010, 2011)

Para realizar essa tese foram buscados na literatura os principais estudos referentes à redução do *lead time* (seção 2.4). Foi observado que alguns trabalhos visam apresentar a importância do *lead time* e da redução do mesmo, entre eles é possível citar Kuik

e Tielemans (1998) e Glock (2012) e Godinho Filho e Saes (2013). Há trabalhos que investigam a redução do *lead time* em cadeias de suprimentos, entre eles estão os artigos de Chaharsooghi e Heydari (2010) e Bertolini et al. (2007). Além disso, existem trabalhos com o foco em variáveis do chão de fábrica que possuem efeito no *lead time*, além de investigar os relacionamentos entre essas variáveis e o tamanho de lote e estoque em processo. Entre esses trabalhos é possível citar Godinho Filho (2008, 2012), Godinho Filho e Uzsoy (2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012), Godinho et al. (2013), Godinho Filho e Barco (2015) e Godinho Filho e Utiyama (2015).

Dentre os trabalhos analisados, poucos utilizam distribuições de probabilidade para modelar as variáveis do chão de fábrica. Dessa forma, a utilização de distribuições de probabilidade para representar as variáveis de chão de fábrica analisadas no presente estudo (tempo de reparo, tempo entre falhas e tempo de *setup*) e entender o efeito de melhorias nessas variáveis no *lead time* é outro *gap* a ser explorado na literatura de redução do *lead time*. Adicionalmente, não foram encontrados estudos que comparem a melhoria na média, desvio e pior caso no que se refere à redução do *lead time*.

Logo, esse trabalho se justifica pela importância de realização de melhorias no atual cenário competitivo, pela importância da redução do *lead time*, pela lacuna observada no conhecimento científico a respeito da estratégia de melhoria focada no pior caso e pelo potencial de utilização de distribuições de probabilidade para modelar as variáveis do chão de fábrica de modo a verificar o efeito das mesmas no *lead time*.

## 1.2 QUESTÕES E OBJETIVOS DE PESQUISA

Dentre as principais variáveis que afetam o *lead time*, três foram escolhidas para serem investigadas, constituindo as questões de pesquisa do presente trabalho:

**Questão de pesquisa 1:** No que se refere a melhoria no tempo de reparo, quais as situações nas quais a estratégia de melhoria no *pior caso* é uma boa alternativa às estratégias de melhoria na *média* e na *variabilidade*?

**Questão de pesquisa 2:** No que se refere a melhoria no tempo entre falhas, quais as situações nas quais a estratégia de melhoria no *pior caso* é uma boa alternativa as estratégias de melhoria na *média* e na *variabilidade*?

**Questão de pesquisa 3:** No que se refere a melhoria no tempo de *setup*, quais as situações nas quais a estratégia de melhoria no *pior caso* é uma boa alternativa as estratégias de melhoria na *média* e na *variabilidade*?

Dessa forma, o **objetivo** principal do presente trabalho é:

Identificar as situações nas quais a estratégia de melhoria no *pior caso* produz um efeito no *lead time* superior ou semelhante às estratégias de melhoria na *média* e na *variabilidade*

Do exposto, a presente tese visa atuar no *gap* observado, com o objetivo de encontrar as situações nas quais a estratégia de melhoria no pior caso é uma boa alternativa no que se refere à redução do *lead time*.

### 1.3 MÉTODO DE PESQUISA

Nesta seção são abordados tópicos referentes ao método de pesquisa, justificando as escolhas feitas e as posicionando no contexto deste trabalho.

#### 1.3.1 Estratégia de pesquisa

A abordagem de pesquisa, de acordo com Lakatos e Marconi (2001) é a conduta que orienta o processo de pesquisa, sendo uma forma de aproximar ou focalizar o fenômeno que se pretende estudar. Segundo Amaratunga et al. (2002), as abordagens de pesquisa podem ser: quantitativa, qualitativa ou uma combinação das duas.

Na abordagem quantitativa as principais preocupações são a mensurabilidade, a causalidade, a generalização e a replicação (BRYMAN, 1989). Martins (2010) destaca que a mensurabilidade é uma das principais preocupações da abordagem quantitativa por exercer um papel central no processo de realização da pesquisa..

Já as características da pesquisa qualitativa, de acordo com Bryman (1989), são: ênfase na interpretação subjetiva dos indivíduos, delineamento do contexto do ambiente da pesquisa, múltiplas fontes de evidências, importância da concepção da realidade organizacional e proximidade com o fenômeno estudado, abordagem menos estruturada (quando comparada a abordagem quantitativa) de modo a captar as perspectivas e as interpretações das pessoas envolvidas na pesquisa. Bryman (1989) ainda explica que a grande característica que distingue as duas abordagens é que na qualitativa existe uma ênfase na perspectiva do indivíduo que está sendo estudado.

A utilização da abordagem combinada, de acordo com Martins (2010) permite que a vantagem de uma amenize a desvantagem da outra, sendo possível fortalecer as abordagens combinando-as. Creswell e Clark (2006) destacam quatro situações nas quais o

uso da abordagem combinada é indicada: i) quando uma das abordagens, isoladamente, não é suficiente para responder à pergunta de pesquisa; ii) quando existe a necessidade de utilizar uma segunda fonte de dados; iii) quando é necessário explicar os resultados de uma pesquisa quantitativa; iv) quando é necessário previamente uma exploração qualitativa.

Do exposto, este trabalho utilizará a abordagem quantitativa, pois há controle sobre as variáveis por parte do pesquisador, havendo preocupação em mensurá-las e entender as relações de causa e efeito.

### **1.3.2 Procedimento e método de pesquisa**

Há diversos procedimentos de pesquisa adotados na área de gestão de operações, a saber: *survey*, estudo de caso, modelagem, simulação, estudo de campo, experimento e teórico-conceitual (FILIPPINI, 1997). Nesse tópico, é discutida a modelagem/simulação que é o procedimento de pesquisa escolhido para a realização do presente estudo. A escolha por esse método é justificada pela necessidade de se modelar um sistema de produção e entender os relacionamentos entre variáveis e o efeito que diferentes estratégias de melhoria produzem no *lead time*.

A modelagem/simulação é definida como o processo de criar e experimentar um sistema físico por meio de um modelo matemático computadorizado. Um sistema pode ser definido como um conjunto de componentes ou processos que interagem entre si e que recebem *inputs* e oferecem *outputs* para atingir algum objetivo definido. A simulação tem as seguintes vantagens principais: pode ocorrer em um curto período de tempo devido ao suporte computacional; facilidade na análise dos dados devido aos pacotes de *software* disponíveis; possibilidade de experimentação em níveis que não são permitidos nos experimentos físicos (CHUNG, 2004).

A respeito da modelagem/simulação Meredith et al. (1989) e Craighead e Meredith (2008) explicam que é importante compreender dois padrões principais: a fonte de dados da pesquisa para análise e a orientação do pesquisador.

A fonte de dados pode ser natural, ou seja, empírica, diretamente observada ou artificial, que é tipicamente uma reconstrução hipotética (MEREDITH et al., 1989; CRAIGHEAD; MEREDITH, 2008). O presente trabalho fará uso de uma simulação computacional que é uma reconstrução hipotética da realidade, podendo, portanto, ser classificada como artificial.

Quanto à orientação do pesquisador ela pode ser racional, ou seja, altamente dedutiva, axiomática ou existencial, isto é, indutiva, interpretativa (MEREDITH et al., 1989; CRAIGHEAD; MEREDITH, 2008). De acordo com Meredith et al. (1989) a pesquisa em gestão da produção e operações baseada em modelos quantitativos pode ser classificada como uma abordagem de geração de conhecimento racional. Apoiado nesta afirmação a presente simulação pode ser classificada como racional.

Ainda a respeito dos modelos quantitativos, há basicamente duas classes: empírica e axiomática (BERTRAND; FRANSOO, 2002). A pesquisa empírica é primariamente dirigida por descobertas e medidas empíricas, sendo que a preocupação principal do pesquisador é assegurar que exista adesão entre observações a ações na realidade e o modelo elaborado daquela realidade. Já a pesquisa axiomática é primariamente dirigida a modelos de problemas idealizados. Nessa classe, a preocupação do pesquisador é obter soluções para o modelo em questão e assegurar que tais soluções ajudem a esclarecer a estrutura do problema descrito no modelo. Ela ajuda a entender o comportamento de certas variáveis do modelo e fornece conhecimento sobre como manipular as mesmas (MARTINS, 2010). De acordo com estas definições, esta pesquisa pode ser classificada como axiomática, pois há uma preocupação em entender o efeito que diferentes estratégias de realização de melhoria produzem na medida de desempenho, o *lead time*.

A respeito da simulação, Berends e Romme (1999) distinguem dois tipos: física e matemática. A primeira envolve a realização de experimentos com objetos reais os quais são modelos de uma parte da realidade. Já para a simulação matemática os relacionamentos de um sistema são expressos em fórmulas matemáticas, o que pode ser feito de duas maneiras: analítica e numérica. Na simulação analítica o modelo busca uma solução ótima única. No que diz respeito à simulação numérica, o objetivo do modelo é lidar com o comportamento dos sistemas. Baseado nesta explicação, a simulação do presente estudo é classificada como matemática, pois os relacionamentos serão expressos por meio de modelos matemáticos, sem a experimentação com objetos reais. Dentro da simulação matemática, o trabalho pode ser classificado como numérico, pois o objetivo é entender o comportamento de diferentes programas de melhoria, não havendo interesse em buscar uma solução ótima única.

### **1.3.3 Técnica de pesquisa**

Neste tópico, são apresentados, aspectos centrais da técnica de pesquisa utilizada. O presente trabalho tem como objetivo comparar o efeito que três estratégias de

melhorias (média, variabilidade e piores casos) em 3 diferentes variáveis do chão de fábrica (tempo de *setup*, tempo de reparo e tempo de *setup*) produzem no *lead time*. Para alcançar os objetivos deste trabalho, faz-se necessário representar as três variáveis de interesse deste estudo por meio de uma distribuição de probabilidade (apresentado na seção 1.3.3.1). Adicionalmente, foi utilizada uma técnica de análise estatística para efetuar a comparação dos valores de *lead times* obtidos por cada uma das estratégias de melhoria investigadas neste estudo (apresentado na seção 1.3.3.2).

### 1.3.3.1 Distribuições de probabilidade utilizadas

É importante destacar a importância da utilização de distribuições de probabilidade para modelar as variáveis do chão de fábrica. Ao efetuar uma melhoria sem a utilização de uma distribuição de probabilidade, uma melhoria de 30% na média do tempo de reparo, conforme mostrada na Figura 1.1, levaria a média para 2,8. Nota-se que o valor atingido foi de aproximadamente 2,82. A variável foi modelada seguindo uma distribuição normal, ou seja, o comportamento da melhoria está sujeito a uma aleatoriedade, o que é mais próximo ao comportamento real de sistemas produtivos.

Desta forma, a fim de verificar as possíveis distribuições de probabilidade que se adequam a essas variáveis, recorreu-se a dois procedimentos: análise da literatura e entrevista com empresa especializada.

O primeiro procedimento consistiu na análise da literatura, a qual foi realizada utilizando diversas bases de dados, entre elas, o COMPENDEX, Portal de Periódicos da Capes, Google Acadêmico e *Web Of Science*. As palavras-chave utilizadas foram: *probability distribution, mean time to repair, mean time between failures, setup time*.

O Quadro 1.1 apresenta os trabalhos analisados, as variáveis investigadas e as distribuições de probabilidade que os autores utilizaram para representar as variáveis enfocadas nesses estudos. Nota-se pelo Quadro 1.1 que diversos artigos, entre eles Carlson (1987), Coit (1997), Diaby (2000), Affisco et al. (2002), Ouyang et al. (2002) Liu e Çetinkaya (2006), Ramirez-Marquez e Jiang (2006), Diaby et al. (2013), dão suporte para utilização das distribuições normal e lognormal para modelar as 3 variáveis do chão de fábrica estudadas nesta tese.

Foi observado que em relação ao tempo de reparo e tempo entre falhas a literatura analisada utiliza principalmente a distribuição exponencial e a lognormal. Dessa forma, nesse trabalho foi utilizada a distribuição lognormal para representar as variáveis de

interesse desse estudo. Hines et al. (2013) explicam que a distribuição lognormal é a distribuição de uma variável aleatória cujo logaritmo segue a distribuição normal.

### QUADRO 1.1 Distribuições de probabilidade utilizadas para modelar variáveis de chão de fábrica

Variáveis de interesse	Distribuição escolhida	Autores
Tempo entre falhas	Binomial	Willits et al. (1997)
Tempo entre falhas	Binomial e normal	Ramirez-Marquez e Jiang (2006)
Tempo entre falhas	Weibull	Liao et al. (2010)
Tempo entre falhas	Exponencial	Chen et al. (2012)
Tempo entre falhas	Exponencial	Ambani et al. (2010)
Tempo de reparo; tempo entre falhas	Exponencial	Silva et al. (2008)
Tempo de reparo; tempo entre falhas	Lognormal	Coit (1997)
Tempo de reparo; tempo entre falhas	Exponencial	Kampen et al. (2010)
Tempo de reparo	Exponencial	Gupta e Mumtaz (1996)
Tempo de reparo	Exponencial	Schultz (2004)
Melhoria da qualidade	Lognormal	Ouyang et al. (2007)
Melhoria da qualidade e redução do <i>setup</i>	Lognormal	Liu e Çetinkaya (2007)
Melhoria da qualidade e redução do <i>setup</i>	Lognormal	Affisco et al. (2002)
Melhoria da qualidade e redução do <i>setup</i>	Power law	Hwang et al. (1993)
Melhoria da qualidade e redução do <i>setup</i>	Lognormal	Diaby et al. (2013)
Melhoria da qualidade e redução do <i>setup</i>	Normal	Ouyang et al. (2002)
Redução de <i>setup</i>	Lognormal	Diaby (2000)
Redução de <i>setup</i>	Lognormal	Carlson (1987)
Tempo de processamento	Normal	Gong et al. (2009)
Variabilidade do tempo de processamento	Normal	Rajaram e Robotis (2004)
Variância no tempo de processamento e no tempo de partidas.	Uniforme	Betterton e Silver (2012)
Lead time	Exponencial	Ryu e Lee (2003)
Variabilidade do lead time	Exponencial	He et al. (2005)
Variabilidade do lead time	Exponencial	Paknejad et al. (1992)
Variabilidade na demanda	Normal	Glock (2012)

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

A distribuição lognormal tem sido aplicada em uma grande variedade de campos, incluindo as áreas de ciências da vida, sociais, física e engenharia. Nas aplicações em engenharia a distribuição lognormal tem sido utilizada para descrever o tempo de reparo e tempo de falha, respectivamente nas engenharias de manutenção e confiabilidade (HYNES et al., 2013). Fogliatto e Ribeiro (2009) explicam que o tempo entre falhas pode ser descrito pelas seguintes distribuições de probabilidade: exponencial, Weibull e lognormal. Em relação ao tempo de *setup* diversos trabalhos Diaby (2000), Carlson (1987), Ouyang et al. (2002) apontam a utilização da distribuição lognormal e normal como adequadas para o tempo de *setup*.

O segundo procedimento realizado para encontrar as distribuições de probabilidade mais adequadas para modelar o tempo de reparo e tempo entre falhas, foi a realização de uma entrevista não estruturada com uma empresa especializada na realização de soluções empresariais. A empresa consultada tem experiência na realização de melhorias no tempo de reparo e tempo entre falhas e explicou que a escolha da melhor distribuição para modelar variáveis do chão de fábrica depende da complexidade da tarefa e dividiu as mesmas em simples, complexas e desconhecidas. Em relação ao tempo de *setup*, a empresa em

questão não possuía dados práticos para auxiliar na escolha da melhor distribuição de probabilidade, desta forma para essa variável a escolha se baseou na análise da literatura.

No que se refere ao tempo de reparo, atividades simples, como trocar o óleo de um carro para um mecânico, tendem a ser semelhantes a uma distribuição normal. Já para tarefas mais complexas, como a substituição de uma bomba de minério de ferro dentro de uma estação de bombeamento, é mais provável que uma lognormal seja a melhor distribuição para modelar a duração da tarefa, devido a assimetria da mesma. Ou seja, durante a substituição da bomba, devido a complexidade da tarefa, algum imprevisto pode acontecer e fazer com que a duração da tarefa seja bem superior a média. Além disso, a empresa explicou que quando a tarefa de reparo é desconhecida para o executante, como um leigo desmontando um computador, a distribuição exponencial pode ser a mais adequada por ser mais imprevisível.

No que se diz respeito ao tempo entre falhas a empresa explicou que as distribuições de probabilidade mais adequadas são a exponencial, Weibull, e lognormal. Em relação a distribuição de Weibull a empresa orientou a escolha de diferentes valores do parâmetro  $\beta$ , inclusive com o valor 1, no qual a distribuição de Weibull se reduz a exponencial.

Após a realização da entrevista com a empresa especializada na realização de melhorias em variáveis do chão de fábrica e da análise da literatura, optou-se pelas distribuições normal e lognormal para todas as variáveis analisadas nesse estudo.

A distribuição lognormal é adequada para modelar as variáveis investigadas no presente estudo. Conforme observado nos estudos observados no Quadro 1.1 e de acordo com Hines et al. (2013) em aplicações na engenharia, a distribuição lognormal tem sido muito utilizada para descrever o tempo de reparo e tempo entre falhas.

A distribuição normal foi apontada como uma boa escolha pela empresa consultada e de acordo com diversos autores, a mesma é uma das mais relevantes distribuições de probabilidade. Montgomery (2009) afirma que a distribuição normal é provavelmente a mais importante, tanto na teoria quanto na prática. A distribuição normal é sob muitos aspectos a pedra angular da estatística (HINES et al., 2013). A distribuição normal indica que os dados são distribuídos normalmente e a aparência da mesma é a de uma curva simétrica, unimodal, em forma de sino (MONTGOMERY, 2009). Logo, pela consulta a empresa e pela relevância da distribuição normal, a mesma é uma escolha adequada para modelar as variáveis investigadas nesse trabalho.

Em relação a distribuição exponencial, apesar da mesma ter sido utilizada em diversos artigos e ter sido sugerida na entrevista, ela não poderia ser utilizada neste trabalho, pois os dois parâmetros, média e desvio padrão, são diretamente relacionados. Ou seja, ao efetuar uma melhoria na média, automaticamente o desvio padrão também seria melhorado. Isso inviabilizaria investigar as questões de pesquisa propostas nesse estudo.

Em relação a distribuição de Weibull, a empresa sugeriu inclusive a aproximação dela com a exponencial, o que novamente inviabilizaria a realização desse estudo, pois os parâmetros média e desvio padrão seriam diretamente relacionados. Já para valores do parâmetro  $\beta$  diferentes de um, seria possível modelar as variáveis desse estudo, e isso poderá ser feito em estudos futuros.

No tópico 1.3.3.2 são apresentadas as técnicas estatísticas utilizadas para comparar os resultados das três estratégias de melhoria

### **1.3.3.2 Técnicas estatísticas para análise dos dados**

Para verificar qual estratégia de melhoria obteve o melhor resultado de acordo com o nível de melhoria e com o coeficiente de variação, foi realizada uma análise estatística chamada ANOVA (análise de variância) utilizando o *software* Minitab. Nessa análise é feita a comparação entre as médias de 4 grupos. O primeiro grupo são os valores dos *lead times* obtidos na situação sem a realização de melhorias. Os grupos 2, 3 e 4 são compostos pelos *lead times* obtidos pelas situações de melhoria na média, na variabilidade (desvio padrão) e no pior caso, respectivamente. As comparações foram realizadas para os diferentes níveis (alto, médio e baixo) de tempo de reparo, tempo entre falhas e tempo de *setup* e considerando os 3 níveis de melhoria (10%, 20% e 30%). A hipótese a ser testada pela ANOVA é:

$H_0$ : as médias dos grupos são iguais,

$H_1$ : pelo menos duas das médias dos grupos são diferentes.

As condições para a validade da ANOVA são independência entre as observações dentro de cada conjunto de dados (isto é dentro de cada grupo), independência entre os grupos, homocedasticidade, isto é a igualdade entre as variâncias de cada grupo que está sendo comparado e a normalidade dos resíduos  $e_i$  (WERKEMA et al., 1996).

A independência entre as observações dentro de cada conjunto de dados e entre os grupos é uma condição verificada nesse trabalho. Em relação a homocedasticidade é necessário efetuar uma análise de variâncias. Para isso foi utilizado o teste de Levene, com um nível de significância de 5%, que testa duas hipóteses

$H_0$ : as variâncias dos grupos são iguais,

$H_1$ : pelo menos duas das variâncias dos grupos são diferentes.

Para interpretar os resultados desse teste é utilizado o valor de  $p$ , ou seja, valores de  $p$  maiores que 5% implicam na aceitação da hipótese  $H_0$  e as variâncias são iguais. Caso os valores de  $p$  sejam inferiores a 5% aceita-se a hipótese alternativa de que pelo menos duas das variâncias dos grupos são diferentes. No caso de aceitar a hipótese alternativa, é necessária a realização de uma transformação nos dados (Box-Cox) para estabilizar as variâncias e permitir a comparação pela ANOVA.

Outro requisito necessário para a realização da ANOVA é verificar a normalidade dos dados. O teste utilizado aqui foi o de Kolmogorov-Smirnov com um nível de significância de 5%, investigando duas hipóteses:

$H_0$ : os resíduos têm distribuição normal,

$H_1$ : os resíduos não têm distribuição normal.

A hipótese  $H_0$  é aceita se o valor de  $p$  for superior a 5%. Caso o valor de  $p$  seja inferior a 5% a hipótese  $H_0$  é rejeitada e é aceita a hipótese alternativa. Novamente aqui faz-se necessário utilizar a transformação de Box-Cox para normalizar os dados e permitir a comparação pela ANOVA.

Em caso da impossibilidade de utilização da ANOVA devido a não verificação das condições para a validade da mesma, foi realizado o Teste de Kruskal-Wallis no qual são testadas duas hipóteses:

$H_0$ : as médias dos grupos são iguais,

$H_1$ : pelo menos duas das médias dos grupos são diferentes.

Quando os valores de  $p$  obtidos nessa análise são maiores que 5% aceita-se a hipótese  $H_0$  de que as médias são iguais. Caso os valores de  $p$  sejam inferiores a 5% aceita-se a hipótese alternativa de que pelo menos duas das médias dos grupos são diferentes.

#### **1.3.4 Aspectos metodológicos aplicados ao presente trabalho**

Neste tópico são apresentados os aspectos metodológicos da maneira como foram utilizados no presente trabalho. O Quadro 1.2 sumariza as escolhas referentes ao método de pesquisa necessário para a realização dessa tese.

**QUADRO 1.2** Síntese da escolhas do método de pesquisa.

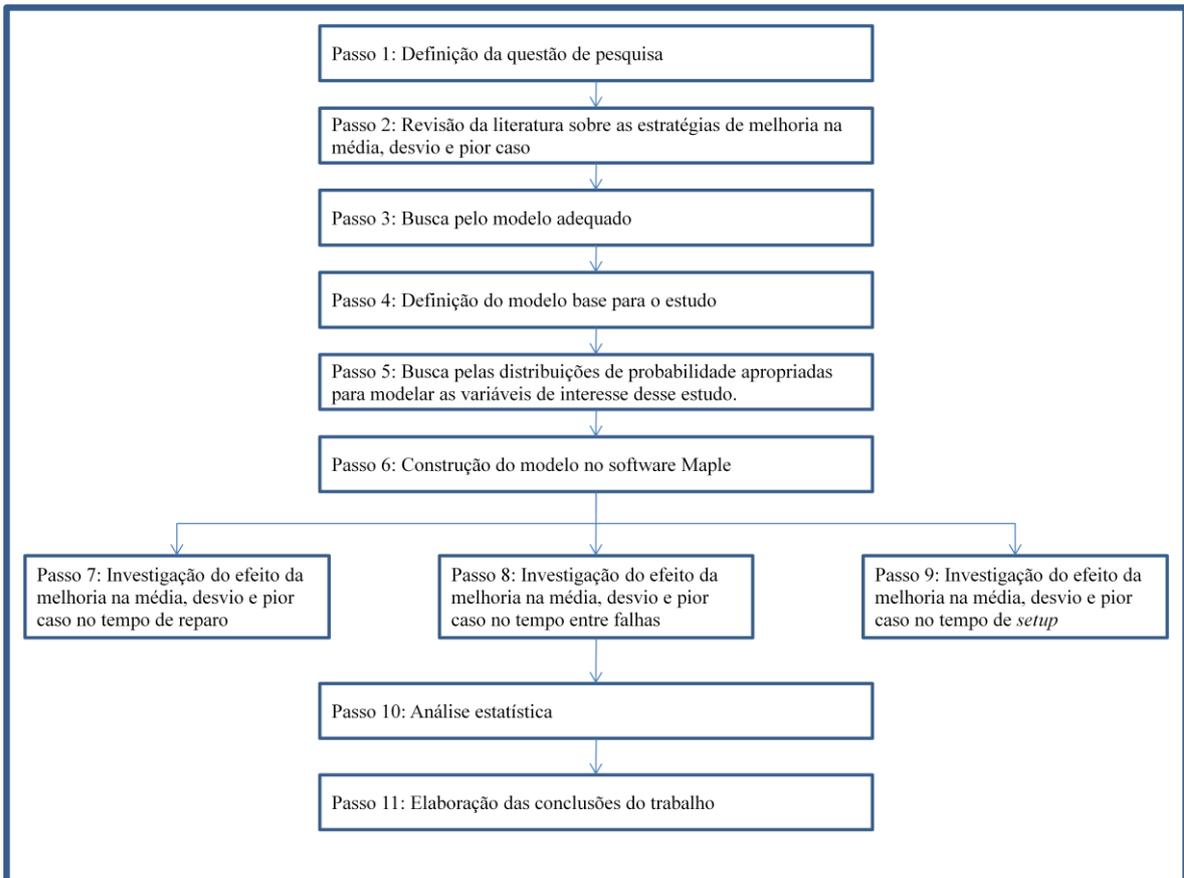
<b>Abordagem de pesquisa</b>	Quantitativa
<b>Métodos de pesquisa</b>	Simulação/Modelagem
<b>Classificação da modelagem</b>	Pesquisa axiomática
<b>Classificação da simulação</b>	Simulação matemática-numérica
<b>Técnica de análise de dados</b>	<i>Software Minitab – Anova;</i> <i>Teste de Kruskal-Wallis</i>

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Na Figura 1.2 é apresentado o roteiro estruturado com a lógica e os passos que nortearam esta pesquisa.

Passo 1 – Introdução: Neste passo foram definidas as questões de pesquisa da presente tese.

Passo 2 – Revisão da literatura sobre as estratégias de melhoria na média, desvio e pior caso: Neste passo foi realizada uma revisão da literatura buscando encontrar trabalhos que abordam as três estratégias de melhoria investigadas neste trabalho. O objetivo deste passo foi o de encontrar o estado da arte sobre esse tema com o fim de se aproximar dos propósitos a serem alcançados com as questões de pesquisa.

**Figura 1.2** Roteiro estruturado da pesquisa

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

Passo 3 – Busca pelo modelo adequado: Neste passo foi feita uma análise na literatura buscando identificar os possíveis modelos adequados para representar as estratégias de melhoria investigadas nas questões de pesquisa.

Passo 4 – Definição do modelo base para o estudo: Neste passo foi definido qual o modelo serviria como ponto de partida para modelar as estratégias de melhoria na média, desvio e pior caso. O modelo híbrido *System Dynamics- Factory Physics* (GODINHO FILHO; UZSOY, 2009) foi escolhido como base para a construção do modelo desta pesquisa.

Passo 5 – Busca pelas distribuições de probabilidade: Neste passo foi realizada uma busca na literatura e com uma empresa especializada visando identificar quais distribuições de probabilidade mais adequadas para modelar as melhorias no tempo de reparo, tempo entre falhas e tempo de *setup*. Foram selecionadas as distribuições de probabilidade normal e lognormal.

Passo 6 – Construção do modelo: Neste passo foi construído o modelo no *software* Maple, utilizando o modelo base definido no passo 4 e considerando as distribuições de probabilidade encontradas no passo 5. Importante destacar que no modelo base, o híbrido *System Dynamics-Factory Physics*, as melhorias realizadas eram determinísticas e o mesmo foi construído no *software* Vensim. Na presente tese houve o interesse em modelar das variáveis do chão de fábrica por meio de distribuições de probabilidade e, com este objetivo, foi necessária a utilização do *software* Maple o qual incorpora de maneira mais adequada essas distribuições.

Passo 7 – Comparação entre as estratégias de melhoria na média, desvio e pior caso no tempo de reparo: Neste passo foi utilizado o modelo construído no passo 6 e foram realizadas as simulações para identificar as situações nas quais a estratégia de melhoria no *pior caso* produz um efeito no *lead time* superior ou semelhante às estratégias de melhoria na *média* e na *variabilidade*.

.Passo 8 – Comparação entre as estratégias de melhoria na média, desvio e pior caso no tempo entre falhas: Assim como no passo 7, neste passo foi utilizado o modelo construído no passo 6. As simulações realizadas tiveram como objetivo identificar as situações nas quais a estratégia de melhoria no *pior caso* produz um efeito no *lead time* superior ou semelhante às estratégias de melhoria na *média* e na *variabilidade*.

Passo 9 – Comparação entre as estratégias de melhoria na média, desvio e pior caso no tempo de *setup*: Assim como nos passos 7 e 8, foi utilizado o modelo construído no passo 6. O objetivo deste passo é identificar as situações nas quais a estratégia de melhoria no

*pior caso* produz um efeito no *lead time* superior ou semelhante às estratégias de melhoria na *média* e na *variabilidade*

Passo 10 – Análise estatística: Neste passo foram realizadas as análises estatísticas nos dados provenientes dos passos 7, 8 e 9. O objetivo da análise é verificar as situações nas quais a estratégia de melhoria no *pior caso* produz um efeito no *lead time* superior ou semelhante às estratégias de melhoria na *média* e na *variabilidade*. Toda a análise foi executada utilizando o *software* Minitab.

Passo 11 – Elaboração das conclusões do trabalho: O último passo desta pesquisa consiste na análise, interpretação e elaboração das principais conclusões e contribuições deste trabalho.

Relacionando os métodos de pesquisa utilizados com os passos da pesquisa, nota-se que nos passos 2, 3, 4, 5 foi realizada uma revisão da literatura buscando identificar o estado da arte a respeito do tema central desta pesquisa, encontrar o modelo mais adequado para a realização da mesma e, além disso, encontrar as distribuições de probabilidade que melhor representam as variáveis de interesse deste estudo. Nos passos 6 a 9 foi utilizada a modelagem e simulação com o objetivo de estudar comparativamente as melhoras na *média*, desvio e *pior caso* no que se refere as três variáveis de interesse desse estudo e utilizando como medida de desempenho o *lead time*.

#### **1.4 CONTRIBUIÇÕES PRETENDIDAS**

Esta seção apresenta as principais contribuições pretendidas com a realização da presente tese.

A principal contribuição pretendida consiste na identificação das situações nas quais a estratégia de melhoria no *pior caso* produz um efeito no *lead time* superior ou semelhante às estratégias de melhoria na *média* e na *variabilidade*. Essa contribuição para a literatura visa atuar no *gap* observado e fazer com que a estratégia de melhoria no *pior caso* seja uma alternativa interessante de realização de melhorias em variáveis do chão de fábrica.

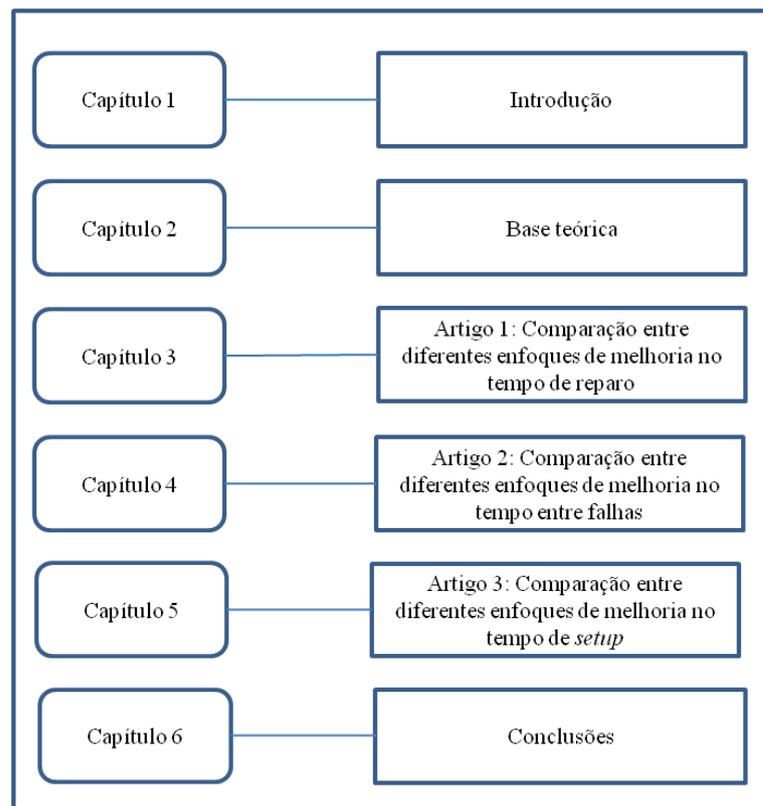
Outra contribuição pretendida é a apresentação e utilização das distribuições de probabilidade mais adequadas para modelar variáveis do chão de fábrica. Nota-se que foi constatado que isto pode ser mais bem explorado na literatura, pois a utilização de distribuições de probabilidade para modelar variáveis do chão de fábrica faz com que o trabalho seja menos real, pois na prática existe a presença de incerteza, o que é bem representada pelas mesmas.

Por fim, outra contribuição pretendida com a presente tese é a construção de um modelo de simulação que permita comparar as estratégias de melhoria na média, desvio e pior caso para variáveis de chão de fábrica modeladas de acordo com distribuições de probabilidade adequadas.

## 1.5 ESTRUTURA DA TESE

No que concerne a estrutura, a dissertação contém 6 capítulos. A Figura 1.3 ilustra a estrutura desta tese.

. Esse primeiro capítulo apresenta uma breve introdução, mostrando a motivação e importância do tema, as questões de pesquisa e objetivos específicos, bem como o método de pesquisa e as escolhas metodológicas devidamente justificadas.



**Figura 2.3** Estrutura da tese

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

O segundo capítulo mostra a base teórica utilizada neste trabalho, ou seja, são apresentadas duas estratégias atuais que trabalham com a redução do *lead time*: *Lean Manufacturing* e o *Quick Response Manufacturing*. Em seguida são apresentadas as variáveis

do chão de fábrica que tem efeito na redução do *lead time* e o efeito dos programas de melhoria em variáveis do chão de fábrica na redução do *lead time*. Ainda nesse capítulo, são apresentadas as três estratégias de melhoria estudadas neste trabalho. Por fim, são apresentadas as considerações finais a respeito do capítulo.

Os capítulos 3, 4 e 5 do presente trabalho são estruturados na forma de artigos, cada um com um propósito específico e que visa atingir ao objetivo geral desta tese. Desta forma, por utilizar essa estrutura de artigos, ressalta-se que alguns desses capítulos podem se tornar repetitivos.

Do exposto, o terceiro capítulo consiste no artigo 1 intitulado: “Comparação entre diferentes enfoques de melhoria no tempo de reparo”. Mais especificamente, são apresentadas as simulações realizadas para comparar as 3 estratégias de melhoria investigadas nesta tese para a variável tempo de reparo e as e recomendações práticas para os gerentes de produção.

O quarto capítulo consiste no artigo 2 com o título: “Comparação entre diferentes enfoques de melhoria no tempo entre falhas”. Ou seja, neste capítulo são apresentadas as simulações realizadas para comparar as 3 estratégias de melhoria investigadas nesta tese para a variável tempo entre falhas e as e recomendações práticas para os gerentes de produção.

O quinto capítulo no artigo 3 nomeado: “Comparação entre diferentes enfoques de melhoria no tempo de *setup*”. Ou seja, neste capítulo são apresentadas as simulações realizadas para comparar as 3 estratégias de melhoria investigadas nesta tese para a variável tempo de *setup* e as e recomendações práticas para os gerentes de produção.

O sexto capítulo apresenta as principais conclusões obtidas respondendo as questões de pesquisa e sugerindo futuras pesquisas. Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas.

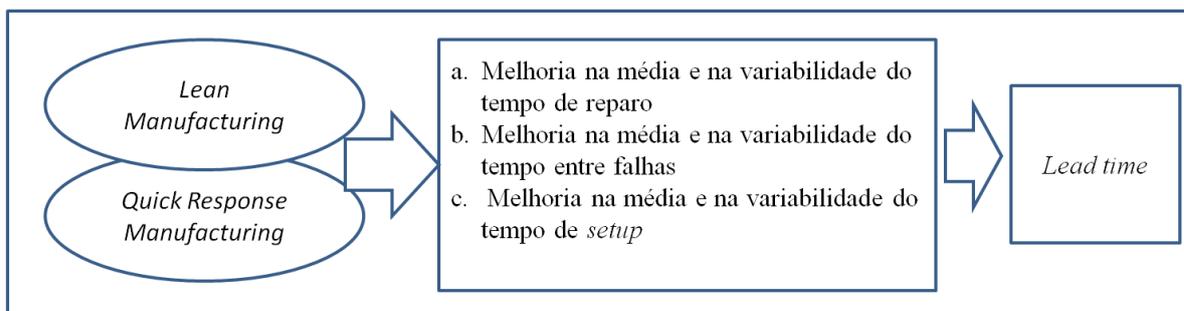
## CAPÍTULO 2 BASE TEÓRICA

### 2.1 INTRODUÇÃO

Para alcançar os objetivos propostos neste trabalho é fundamental apresentar os principais conceitos referentes à redução do *lead time*, bem como as variáveis que possuem efeito no mesmo. O capítulo está estruturado da seguinte forma: na seção 2.2 são apresentadas duas das principais abordagens que trabalham com redução do *lead time*, o *Lean Manufacturing* (MONDEN, 1986; WOMACK et al. 1992) e o *Quick Response Manufacturing* (SURI, 1998). Na seção 2.3 são apresentadas as variáveis do chão de fábrica que tem efeito na redução do *lead time*; na seção 2.4 são apresentados os principais trabalhos que estudam o efeito de programas de melhoria em variáveis do chão de fábrica na redução de *lead time*; na seção 2.5 são apresentados alguns dos trabalhos que discutem cada uma das três estratégias para melhoria estudadas no presente trabalho, por fim na seção 2.6 são apresentadas as considerações finais do capítulo.

### 2.2 ABORDAGENS QUE TRABALHAM COM REDUÇÃO DO LEAD TIME: O LEAN MANUFACTURING E O QUICK RESPONSE MANUFACTURING

Nesta seção são apresentadas duas abordagens atuais de gestão que trabalham com a redução do *lead time*: *Lean Manufacturing* e o *Quick Response Manufacturing*. A Figura 2.1 mostra a forma como ambas as abordagens se relacionam com as variáveis investigadas na presente tese e o efeito que as mesmas produzem no *lead time*. Pela Figura 2.1 é possível verificar o *gap* a ser explorado nessa pesquisa, tendo em vista que a estratégia de melhoria no pior caso parece ser pouco explorada na literatura.



**Figura 2.1** Relacionamento entre abordagens de gestão, estratégias de melhoria e lead time

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

### 2.2.1 *Lean Manufacturing*

O Sistema Toyota de Produção (STP), chamado no ocidente de Manufatura Enxuta (WOMACK et al., 1992) surgiu por volta de 1950, no Japão, na empresa Toyota (LIKER, 2005). Nesta seção são apresentados os conceitos e ferramentas desta abordagem.

Womack e Jones (1998) definem Manufatura Enxuta como sendo uma estratégia na qual existe uma forma melhor de organizar e gerenciar os relacionamentos de uma empresa com os clientes, cadeia de fornecedores, desenvolvimento de produtos e operações de produção. Ela é enxuta porque é uma forma de fazer cada vez mais com cada vez menos (menos esforço, equipamento, máquina, espaço etc.). De acordo com Shingo (1989) a Manufatura Enxuta pode ser definida como um sistema que visa à eliminação total das perdas obtendo redução de custos. Ohno (1997) explica que o principal objetivo do STP foi aumentar a variedade de produtos, produzindo muitos modelos em pequenas quantidades.

Nas próximas seções é apresentado o histórico dessa estratégia de gestão, bem como seus princípios gerais, elementos e ferramentas.

#### 2.2.1.1 Histórico

De acordo com Ohno (1997) o *Lean Manufacturing* surgiu devido à necessidade de descobrir um novo método de produção que eliminasse o desperdício e ajudasse a alcançar a produtividade das empresas norte-americanas.

A necessidade de um novo método de produção se deve ao fato de que o Fordismo não conseguia mais lidar com as necessidades impostas pelo mercado. Ohno (1997) afirma que a essência do Sistema Toyota de Produção consistiu em conceber um sistema de produção alternativo ao Fordismo que fosse capaz de produzir competitivamente uma série restrita de produtos diferenciados e variados.

Entretanto, após a Segunda Guerra Mundial o Japão estava devastado e enfrentando uma série de problemas. Womack et al. (1992) listam os principais problemas que fornecem um panorama do cenário japonês da época:

- i. O mercado doméstico era limitado e requeria uma variedade grande de veículos;
- ii. A força de trabalho nativa do Japão não aceitava mais ser tratada como custo variável ou peça intercambiável. Além disso, não existiam os

trabalhadores imigrantes nesse país, os quais constituíam o grosso da força de trabalho no ocidente;

- iii. A economia do país estava devastada pela guerra;
- iv. Havia a ameaça de entrada de grandes produtores mundiais no Japão.

Diante de tais dificuldades e da necessidade de alcançar os Estados Unidos, Taichi Ohno, então administrador da empresa Toyota, começou a construir o que ficaria conhecido por Sistema Toyota de Produção, e mais tarde foi popularizado pelo termo Manufatura Enxuta (LIKER, 2005).

### **2.2.1.2 Princípios gerais da Manufatura Enxuta**

Womack e Jones (1998) apresentam 5 princípios do pensamento enxuto, a saber: especificar o valor, identificar a cadeia de valor, fluxo, produção puxada e perfeição. A seguir será apresentado um pouco sobre cada um deles.

- i. Especificar o valor: O valor é o ponto de partida do pensamento enxuto. Ele deve primeiramente definir precisamente o que é valor em termos de produtos específicos feitos para clientes específicos com necessidades específicas a preços específicos. Ele só pode ser definido pelo cliente final. Especificar o valor com precisão é o primeiro passo essencial no pensamento enxuto;
- ii. Identificar a cadeia de valor: A cadeia de valor pode ser definida como o conjunto de todas as ações específicas necessárias para se levar um produto específico a passar por todas as tarefas gerenciais críticas de um negócio. A identificação da cadeia de valor quase sempre expõe quantidades enormes de *muda*, mostrando que existem três tipos de ação ao longo da mesma: (i) Etapas que certamente criam valor; (ii) muitas outras etapas não criam valor, mas são necessárias devido as atuais tecnologias e ativos de produção; (iii) etapas adicionais que não criam valor e devem ser eliminadas;
- iii. Fluxo: Neste passo é necessário fazer com que as etapas restantes, que criam valor, fluam. Isso requer uma mudança da mentalidade, passando do trabalho organizado em departamentos e em lotes para equipes de produção com o pensamento de fazer o valor fluir;

- iv. Produção puxada: Após ter implantado os princípios anteriores, a empresa possuirá a capacidade de projetar, programar e fabricar exatamente o que o cliente quer e quando ele quer. É possível então “jogar fora” a previsão de vendas e deixar simplesmente que o cliente puxe o produto, ao invés de empurrar para ele um produto muitas vezes indesejado;
- v. Perfeição: Após ter implantado os quatro princípios anteriores, a perfeição deve ser buscada de duas maneiras: melhorias contínuas (*Kaizen*) e melhorias radicais (*Kaikaku*).

Liker (2005) afirma que a base do STP está alicerçada em 14 princípios que constituem a cultura do STP, e não apenas em ferramentas e elementos do STP. Os 14 princípios deste autor são mais abrangentes e expandem os 5 princípios que Womack e Jones (1998) apresentam em seu livro. O autor divide os 14 princípios em 4 categorias amplas descritas a seguir:

- I. Filosofia de longo prazo:
  1. Princípio 1: Basear as decisões administrativas em uma filosofia de longo prazo, mesmo em detrimento de metas financeiras de curto prazo.
- II. O processo certo produzirá os resultados corretos:
  2. Princípio 2: Criar um fluxo de processo contínuo para trazer os problemas à tona,
  3. Princípio 3: Usar sistemas puxados para evitar a superprodução,
  4. Princípio 4: Nivelar a carga de trabalho (*Heijunka*),
  5. Construir uma cultura de parar e resolver os problemas, obtendo a qualidade na primeira tentativa,
  6. Tarefas padronizadas é a base para a melhoria contínua e a capacitação dos funcionários,
  7. Usar controle visual para que nenhum problema fique oculto,
  8. Usar somente tecnologia confiável e completamente testada que atenda aos funcionários e processos.
- III. Valorização da organização por meio do desenvolvimento de seus funcionários e parceiros:

9. Desenvolver líderes que compreendam completamente o trabalho, que vivam a filosofia e a ensinem aos outros,
  10. Desenvolver pessoas e equipes excepcionais que sigam a filosofia da empresa,
  11. Respeitar sua rede de parceiros e de fornecedores desafiando-os e ajudando-os a melhorar.
- IV. A solução contínua de problemas na origem estimula a aprendizagem organizacional:
12. Ver por si mesmo para compreender completamente a situação,
  13. Tomar decisões lentamente por consenso, considerando completamente todas as opções; implementá-las com rapidez,
  14. Tornar-se uma organização de aprendizagem através de reflexão incansável e da melhoria contínua.

### **2.2.1.3 Principais conceitos, técnicas e ferramentas da estratégia Manufatura Enxuta**

Nesta seção são apresentadas algumas das principais ferramentas da Manufatura Enxuta. Antunes (2008) destaca um conjunto de princípios e técnicas e ferramentas do *Lean Manufacturing*, entre eles:

- i. O sistema *Kanban* de sincronização e melhorias dos sistemas produtivos, desenvolvidos por Taichi Ohno a partir da lógica do supermercado americano;
- ii. A aplicação sistemática do princípio da autonomia, desenvolvido originalmente por Toyoda Sakichi e sistematizado por Taichi Ohno. Autonomia (também chamado de *Jidoka*) significa equipamento dotado de inteligência para desligar-se quando apresenta problema (LIKER, 2005).
- iii. A ideia de troca rápida de ferramentas (TRF), desenvolvida originalmente por Shigeo Shingo e que rompeu com a lógica de altos tempos de preparação/lotes grandes/ longos tempos de atravessamento, típica do paradigma anterior;
- iv. O controle de qualidade zero defeitos, estratégias de inspeção na fonte e *poka-yoke*, sistematizado por Shigeo Shingo;

- v. A operação padrão desenvolvida, a partir da noção de tempos e métodos, por Taichi Ohno;
- vi. A melhoria no *layout*, e mais especificamente, na chamada produção em fluxo unitário de peças;
- vii. A ideia ampla de melhoria contínua, com apoio de técnicas utilizadas em eventos do tipo *Kaizen*.
- viii. A utilização de técnicas americanas que foram e são intensivamente adotadas na Toyota, como é o caso da engenharia de valor/análise de valor.

Antunes (2008) afirma ainda que a articulação sistêmica é mais importante que todos esses princípios e técnicas e é isso que vai dar origem ao chamado Sistema Toyota de Produção. Dentre as ferramentas e técnicas apontadas, são discutidas a redução do desperdício, o mapeamento do fluxo de valor, a autonomia, o *Just-in-Time*, o *Kanban*, o *Heijunka* e a Troca Rápida de Ferramentas.

#### 2.2.1.4 Redução do desperdício (*Muda*)

Liker (2005) afirma que o coração do Sistema Toyota de Produção é a eliminação das perdas. A base do STP é a absoluta eliminação do desperdício, sendo os dois pilares necessários a sustentação deste sistema o *Just-in-time* e a autonomia (OHNO, 1997). Womack e Jones (1998) explicam que o desperdício/perda (conhecido por *muda* em japonês) pode ser entendido como qualquer atividade humana que absorve recursos, mas não cria valor, como por exemplo: produção de produtos defeituosos, produção de estoques, movimentação de funcionários e mercadorias etc.

Ohno (1997) e Liker (2005) explicam que a Toyota identificou 7 grandes tipos de desperdícios:

- i. **Superprodução:** Produção de itens para os quais não há demanda, gerando perda em excesso de pessoal e estoque, além de custos com transporte devido ao estoque em excesso;
- ii. **Tempo disponível (espera):** Funcionários que servem apenas para vigiar uma máquina enquanto a mesma está funcionando ou que ficam esperando por algum motivo (falta de material, atraso no processamento, falta de ferramenta, quebra de máquina, gargalos de capacidade etc.);

- iii. **Transporte:** Perdas com movimentação de estoque, materiais, peças ou produtos acabados para dentro ou fora do estoque ou entre processos.
- iv. **Processamento em si:** Etapas desnecessárias para processar peças, processamento ineficiente devido à má qualidade da ferramenta ou ao projeto do produto mal concebido. Além disso, há perdas quando se oferece produtos com qualidade superior a requerida pelo mercado;
- v. **Excesso de estoque:** Excesso de matéria prima, estoque em processo ou produtos acabados, causando longos *lead times*, obsolescência, produtos danificados, custos com transporte e armazenagem. O estoque em excesso oculta problemas, como o desbalanceamento da produção, entregas atrasadas, defeitos etc.;
- vi. **Movimento:** Qualquer movimento desnecessário que os funcionários executam, como por exemplo, procurar ferramentas, pegar ou empilhar peças, caminhar etc.;
- vii. **Produtos defeituosos:** Produção de peças defeituosas ou correção de defeitos. Consertar ou retrabalhar, descartar ou substituir a produção e inspecionar significam perdas de manuseio, tempo e esforço.

Liker (2005) acrescenta ainda um oitavo tipo chamado por ele de desperdício de criatividade dos funcionários, que é a perda de tempo, ideias, habilidades, melhorias e oportunidades de aprendizagem por não envolver os funcionários.

Ohno (1997) e Liker (2005) afirmam que dentre os 7 desperdícios listados o pior é a superprodução, pois é ela que gera a maioria dos outros tipos de perda.

#### **2.2.1.5 *Just-in-Time e Kanban***

Para Ohno (1997), *Just-in-time* significa que em um processo em fluxo, as partes corretas alcançam a linha de montagem no momento certo e somente na quantidade necessária. Quando uma empresa estabelece esse fluxo integralmente pode chegar ao estoque zero. Liker (2005) explica que JIT é um conjunto de princípios, técnicas e ferramentas que viabilizam a produção e entrega em pequenas quantidades, com *lead times* curtos para atender as necessidades dos clientes, ou seja, o JIT entrega os produtos na hora certa e na quantidade exata.

O JIT tem como objetivo principal a melhoria contínua do processo produtivo, por meio da redução de estoques, os quais tendem a camuflar os problemas. Existem três grandes grupos de problemas (CORREA; GIANESI, 1993):

- i. Problemas de qualidade: quando existem problemas relacionados a qualidade, gerando refugo e retrabalho, o estoque serve como garantia de que os trabalhos posteriores não sofrerão interrupções;
- ii. Problemas de quebra de máquina: quando por algum motivo a máquina quebra, o estoque serve para evitar que as estações posteriores, alimentadas pelo material processado por essa máquina, parem.
- iii. Problemas de preparação de máquina: devido à necessidade de se realizar preparações de máquina e ao custo das mesmas, há a tendência de se trabalhar com lotes grandes com o intuito de ratear o custo da preparação em um número grande de peças. Essa produção em grandes lotes gera estoques.

Para exemplificar como os estoques camuflam os problemas, uma analogia amplamente conhecida se refere a um barco navegando em um lago com profundidade irregular. À medida que o estoque em processo é reduzido (representado pelo nível da água) os problemas aparecem (as pedras). Tornando os problemas visíveis é possível atacá-los tornando o fluxo de produção mais suave, mesmo com níveis de estoques cada vez mais baixos (CORREA; GIANESI, 1993).

Uma prática comum nas empresas é adotar como medida de desempenho a utilização dos equipamentos. No JIT a ênfase da gerência está no fluxo de produção, ou seja, estabelecer um fluxo suave e contínuo (CORREA; GIANESI, 1993). O fluxo significa que o processo de obtenção da matéria prima é acionado quando o cliente executa o pedido. A matéria prima necessária para o atendimento deste pedido flui rapidamente pelo processo produtivo de forma a atender a demanda do cliente.

Ohno (1997) explica que o tamanho ideal do lote é unitário, o que contribuiria para o estabelecimento do fluxo. Entretanto, mesmo na Toyota esse ideal não é atingido, mas a ideia básica de redução do tamanho do lote deve ser buscada. Um exemplo de fluxo pode ser visto no processo de criação de carros da Toyota, em que a mesma leva menos de um ano para criar veículos, enquanto seus concorrentes levam mais de dois. A redução do tempo de fluxo elimina a superprodução e o estoque e implica em uma série de benefícios, entre eles

melhor qualidade, menor custo, melhor prazo de entrega, liberação de espaço, melhor flexibilidade, maior produtividade, aumento da motivação, dentre outros (LIKER, 2005).

Liker (2005) destaca que o *Lean Manufacturing* se preocupa com a criação de um verdadeiro sistema de fluxo unitário de peças que elimine as perdas. A ideia defendida pelo *Lean Manufacturing* é a de criar um fluxo de processo contínuo para trazer os problemas à tona. Para isso é necessário reunir operações que de outro modo estariam separadas. Os benefícios destacados pelo autor são: maior trabalho em equipe, *feedback* mais rápido no que se refere a problemas de qualidade, maior controle sobre os processos e maior pressão das pessoas para solucionar os problemas. Em essência, o maior benefício do fluxo unitário é que ele desafia as pessoas a pensar mais e a se aperfeiçoar.

Um importante conceito relacionado ao fluxo é o *takt-time*. Ele estabelece a pulsação do fluxo unitário de peças, ou em outras palavras, estabelece o ritmo da produção. O *takt-time* estabelece a razão de peças a serem produzidas por unidade de tempo de maneira a atender a demanda do cliente (LIKER, 2005).

Ohno (1997) explica que um engano comum das pessoas fora da Toyota é pensar que Sistema Toyota e o *Kanban* são a mesma coisa. *Kanban* significa sinal, um cartão que sinaliza que a linha de montagem utilizou as peças e precisa produzir mais (LIKER, 2005). O STP é o método de produção e o sistema *Kanban* é a forma como ele é administrado. O *Kanban* foi uma ideia de Ohno baseada nos supermercados americanos, sendo considerado o método de operação do STP, uma forma de atingir o JIT, sua finalidade é o JIT. Segundo Liker (2005) a operação completa da Toyota utilizando o *Kanban* é conhecida como “sistema *Kanban*” para administrar e garantir o fluxo e a produção de materiais em um sistema de produção que opera por meio do JIT (LIKER, 2005).

Entre os benefícios do *Kanban*, Ohno (1997) destaca que o mesmo evita a superprodução, pois impõe o JIT, evitando o aparecimento de estoques extra. Além disso, o *Kanban* enfatiza o objetivo de eliminar desperdício, pois deixa claro imediatamente o que é desperdício, tornando possível propor melhorias. O autor destaca uma série de funções e regras de utilização do *Kanban*, apresentados no Quadro 2.1.

A primeira regra do *Kanban* nasceu da ideia de olhar as coisas pelo avesso, ou seja, do fim do processo para o início. Para aplicar essa regra é necessária uma mudança no modo de pensar, revertendo o fluxo tradicional de produção, transferência e entrega. Isso implica na eliminação do programa de produção, tendo em vista que a mesma é controlada pelo *Kanban*, que se torna uma ordem de fabricação para cada processo. A respeito da segunda regra é imprescindível que os operadores e equipamentos de cada estágio produtivo

estejam preparados para produzir as quantidades corretas nos momentos exatos. O problema surge quando as retiradas de peças são feitas de maneira irregular em termos de tempo e quantidade. Para lidar com esse problema o STP utiliza o chamado nivelamento da produção, no qual os picos de demanda devem ser rebaixados e os vales devem ser elevados. Portanto, o *Kanban* serve como um pedido de retirada, transporte e como uma ordem de fabricação. A regra três proíbe que qualquer item seja retirado ou produzido sem um *Kanban*; a regra quatro exige que um *Kanban* seja afixado a cada mercadoria; a cinco exige produtos 100% livres de defeitos; finalmente a regra seis pede a redução do número de *Kanbans* (OHNO, 1997).

#### QUADRO 2.1 Funções e regras de utilização do *Kanban*

Funções do <i>Kanban</i>	Regras para utilização
1 Fornecer informação sobre apanhar ou transportar	O processo subsequente apanha o número de itens indicados pelo <i>Kanban</i> no processo precedente
2 Fornecer informação sobre a produção	O processo inicial produz itens na quantidade e sequencia indicada pelo <i>Kanban</i>
3 Impedir a superprodução	Nenhum item é produzido ou transportado sem um <i>Kanban</i>
4 Servir como uma ordem de fabricação afixada às mercadorias	Serve para afixar um <i>Kanban</i> às mercadorias
5 Impedir produtos defeituosos pela identificação do processo que os produz	Produtos defeituosos não são enviados para o processo seguinte. O resultado é mercadorias 100% livres de defeitos
6 Revelar problemas existentes e mantém o controle de estoques	Reduzir o número de <i>Kanbans</i> aumenta sua sensibilidade aos problemas

Fonte: Ohno (1997).

Liker (2005) ressalta que: o verdadeiro desafio de implementar o *Kanban* é desenvolver uma organização capaz de descobrir modos de reduzir o número de *Kanbans*, tendo em vista que cada *Kanban* significa uma quantidade determinada de estoque, ou seja, perda. Reduzir o número de *Kanbans* significa reduzir estoque.

##### 2.2.1.6 Autonomia

De acordo com Shingo (1996) a autonomia surgiu da evolução das ideias a respeito da separação do trabalhador da máquina. Essa separação ocorreu com o objetivo de promover maior eficiência no uso do recurso humano e de produção. Na Toyota os trabalhadores não estão vinculados a uma única máquina, sendo responsáveis por 5 máquinas ou mais, alimentando uma, enquanto as outras trabalham automaticamente.

Esse modo de organizar o trabalho requer a automação (automação com um toque humano), ou seja, são máquinas que param instantaneamente quando detectam um erro, evitando os custos da produção de uma grande quantidade de produtos defeituosos. Essa parada automática da máquina é conhecida por *baka-yoke* (OHNO, 1997). Liker (2005) afirma que a automação pode ser definida como um equipamento dotado de inteligência para desligar-se ao detectar um problema. Esse sistema impede que produtos defeituosos passem adiante, ou seja, reforça a ideia de fazer certo da primeira vez. Quando o equipamento para, um dispositivo de sinalização chamando *androm* (sinais luminosos e/ou sonoros) é acionado, indicando a necessidade de ajuda para solucionar o problema.

### **2.2.1.7 Mapeamento do fluxo de valor (MFV)**

O mapeamento do fluxo de valor é uma ferramenta da produção enxuta que ajuda a enxergar e entender o fluxo de material e informação à medida que o processo segue o fluxo de valor (ROTHER; SHOOK, 2003). Segundo Rentes (2000), o fluxo de valor pode ser entendido como o conjunto de todas as atividades necessárias desde a obtenção da matéria-prima até a entrega do produto ao consumidor final.

O método consiste em, após seguir o caminho percorrido pelo material desde o fornecedor até o cliente, representar visualmente cada processo no fluxo de material e de informação. A partir dessa representação visual é possível identificar os grandes focos de desperdícios. Para isso, são elaborados dois mapas: o MFV atual e o MFV futuro. O primeiro representa a realidade atual da empresa e o segundo aonde a empresa pretende chegar (ROTHER; SHOOK, 2003).

De acordo com Rother e Shook (2003) as principais vantagens do MFV são:

- i. Ajuda a ter uma visão sistêmica do fluxo de valor;
- ii. Ajuda a identificar as fontes de desperdício do fluxo;
- iii. Fornece uma só linguagem para se tratar processos de manufatura;
- iv. Tornam as decisões do fluxo visíveis, contemplando inclusive detalhes;
- v. Evita a implementação de técnicas isoladamente;
- vi. O mapa torna-se uma referência para o plano de implementação enxuta;
- vii. Mostra a relação entre o fluxo de informação e de materiais;
- viii. É uma ferramenta qualitativa, que descreve em detalhes como sua unidade produtiva deveria operar para criar este fluxo.

### 2.2.1.8 Nivelamento da produção (*heijunka*) e troca rápida de ferramentas

*Heijunka* significa nivelar a produção de modo que o volume total de pedidos seja distribuído igualmente (mesma quantidade e combinação) por cada dia de trabalho durante um período (LIKER, 2005). Liker (2005) apresenta um exemplo para esclarecer o que é o nivelamento da produção. Em uma fábrica que produz três tipos de motores (pequeno, médio e grande) uma maneira de atender a demanda semanal é produzir de forma desnivelada, por exemplo, todos os motores com maior demanda no início da semana, em seguida os de demanda intermediária e por fim os de menor demanda. O autor apresenta quatro problemas dessa produção desnivelada: (i) o cliente não compra produtos de modo previsível; (ii) há risco de não vender os produtos; (iii) o uso de recursos não é equilibrado; (iv) é colocada uma demanda desnivelada dos processos. Para enfrentar esses problemas o autor sugere uma programação nivelada executando o trabalho nesta sequência: médio, médio, pequeno, médio, médio, grande, pequeno. Desse modo, a fábrica alcança flexibilidade para atender o que e quando o cliente deseja, reduz o risco de não vender os produtos, utiliza de maneira balanceada os seus recursos e determina uma demanda uniformizada para os processos e para os fornecedores da planta.

É importante ressaltar a importância da redução do *setup* para implantar a produção nivelada. Entre os métodos para a redução do *setup*, Fernandes e Godinho Filho (2010) destacam a Troca Rápida de Ferramentas (TRF). De acordo com Shingo (1996) a TRF é a maneira mais eficaz de melhorar o *setup* obtendo reduções de até 95%.

### 2.2.2 Quick Response Manufacturing

A *Quick Response Manufacturing* (QRM) teve suas raízes no *Time Based Competition* (TBC) (STALK, 1988), o qual buscava aumentar a velocidade para ganhar vantagem competitiva. Empresas que usavam o TBC entregavam seus produtos ou serviços mais rápido que seus concorrentes. O TBC se prestava a qualquer tipo de empresas, enquanto o QRM se especializa em manufaturas (SURI, 1998).

O QRM tem como foco a redução do *lead time*. Sendo assim, é necessária uma forma diferenciada de medir o *lead time*, que seja mais apropriada a estratégia voltada para sua redução e também útil na medição de desempenho de processos. Segundo Suri (2010) o *lead time* é o tempo em dias contado a partir da hora em que o pedido é gerado até a hora em

que o pedido chega às mãos do cliente, considerando os caminhos críticos (maiores tempos em cada fase).

Nas próximas seções são apresentados os principais conceitos referentes ao QRM, suas técnicas e ferramentas.

### 2.2.2.1 Princípios gerais e implantação

Suri (1998) apresenta dez princípios do QRM, os quais têm o intuito de prover um melhor entendimento sobre o QRM. Estes princípios são elencados a seguir:

1. Achar novos caminhos para executar uma operação, com foco na diminuição de *lead time*;
2. Planejar para operar com 70-80% da capacidade dos recursos críticos;
3. Medir a redução de *lead time* e fazer desta a principal medida de desempenho;
4. Expor as medições e premiar redução de *lead time*;
5. Usar o MRP para planejar e coordenar os materiais, re-estruturar a organização da manufatura para células simples orientadas para produtos;
6. Incentivar fornecedores a implementar o QRM, resultando em pequenos lotes a baixo custo, qualidade superior e *lead time* curto;
7. Educar consumidores sobre QRM, negociando pequenos lotes a preços razoáveis;
8. Criar células, composta por pessoal com treinamento cruzado para uma família de produtos e com poder de decisão para suas necessidades;
9. Entender que o QRM leva a um futuro seguro para a empresa;
10. Combater a mentalidade da estratégia de baixo custo.

Para o sucesso da implantação do QRM deve haver um entendimento de toda a empresa sobre as bases do QRM, trabalhadores e gerentes devem entender o básico da dinâmica de sistemas e sistemas de manufatura, visto que o QRM deve ser implementado tanto no chão de fábrica como no escritório.

Outro conceito importante no QRM é o *Focused Target Market Segment* (FTMS), ou seja, um segmento de mercado específico que representa uma oportunidade de benefícios para a empresa por meio da redução de *lead time*. A busca de um FTMS começa

pelos *brainstorms* de um grupo multifuncional e é refinado por meio de um processo iterativo. Nessa busca deve-se identificar uma oportunidade de mercado ou uma necessidade de negócio conhecida como *Target Market Segment*.

Para uma bem sucedida implementação do QRM são indicados quinze passos que devem ser executados sequencialmente (SURI, 1998):

1. Obtenha o comprometimento da alta gerência;
2. Crie um Comitê de direcionamento e nomeie um líder;
3. Escolha uma família de produtos e defina um conjunto de objetivos grosseiramente;
4. Reúna um time de planejamento;
5. Invista na construção do time;
6. Colha medidas grosseiras do desempenho atual do sistema;
7. Refine o escopo e defina objetivos mais precisos;
8. Conduza uma detalhada aquisição e análise de dados;
9. Explore soluções de *brainstorm*, entre elas a definição do FTMS;
10. Apresente as recomendações;
11. Crie o time de implementação;
12. Construa e treine o time de implementação;
13. Implemente as recomendações;
14. Revise o progresso, apresente os resultados e reconheça os envolvidos;
15. Repita o processo para novos projetos de QRM.

#### **2.2.2.2 Principiais ferramentas**

O QRM possui algumas ferramentas fundamentais para o sucesso da estratégia. Nesta seção são apresentadas algumas das principais ferramentas do QRM.

##### **2.2.2.2.1 *Manufacturing critical path time* (MCT)**

Uma ferramenta de fundamental importância no QRM é o mapa MCT. Essa ferramenta de medição do *lead time* ajuda na identificação de oportunidades de melhoria no que se refere à redução do *lead time*. Esta é uma ferramenta relacionada ao *Value Stream Map* (VSM) e visa complementar a definição do QRM. O mapa MCT é mais simples de se entender do que o VSM, por exemplo, e sua criação não deve incluir os itens não críticos, a

matéria-prima não deve ser esquecida e é necessário utilizar o tempo de calendário em dias corridos (SURI, 2010).

De acordo com Suri (2010) os cálculos do MCT devem ter seu escopo limitado e basta que sejam de alto nível (aproximados). Todos os itens do inventário devem ser considerados e deve-se ater ao caminho mais longo (crítico). MCT busca nos piores *lead times* oportunidades de fazer melhorias e aplicar ações criativas.

#### **2.2.2.2.2 Manufatura celular no contexto do QRM**

Fernandes e Godinho Filho (2010) afirmam que é um contrassenso pensar em células de manufatura sem o uso de Tecnologia de Grupo (TG). Desta forma torna-se fundamental destacar os conceitos e idéias relacionados à TG ao tratar do assunto manufatura celular.

Segundo Fernandes e Godinho Filho (2010, p.223), TG “pode ser definida como uma estratégia de manufatura que busca obter em um ambiente de produção em lote as vantagens econômicas similares à da produção em massa”. De acordo com estes mesmos autores alguns princípios básicos que constituem a TG são: (i) formação de famílias de peças semelhantes em termos de projeto (forma, tamanho, tolerâncias, material) e/ou processo; (ii) formação de grupos de equipamentos, cada um dos quais, na medida do possível, fabricando uma família de peças.

Para Groover (2000), a TG é uma filosofia de manufatura, na qual peças similares são identificadas e agrupadas com o objetivo de tirar proveito das similaridades em projeto e produção. Esses agrupamentos de peças similares são chamados de família de peças.

O termo manufatura celular, propriamente dito, descreve um tipo de *layout* fabril. Fernandes e Godinho Filho (2010) definem este tipo de *layout* como sendo constituído da divisão de todos os componentes fabricados em famílias e todas as máquinas que compõem o processo de produção em grupos, obtendo-se a situação na qual todos os elementos de uma mesma família possam ser processados idealmente em um único grupo de máquinas.

Fernandes e Godinho Filho (2010) destacam que em uma célula de produção o conjunto de máquinas que a constitui possuem certas características, dentre elas:

- i. Devem estar agrupadas não pelas suas próprias similaridades, mas sim porque são capazes de realizar um conjunto de operações dissimilares necessárias para a fabricação de uma peça ou família de peças;

- ii. Mesmo que para a fabricação de uma família de peças sejam necessárias máquinas idênticas, quando agrupadas em conjunto para o processamento desta família de peças, estas constituirão uma célula;
- iii. O tamanho da célula pode variar muito, no geral de 1 a 25 máquinas, porém quanto menor o grupo de máquinas, melhor, pois facilita o controle e no geral quando da adoção da manufatura celular, há a necessidade de se investir em equipamentos.

Algumas vantagens relacionadas à manufatura celular ou *layout* em grupo, como também é conhecida, podem ser destacadas (BURBIDGE, 1975; GROOVER, 2000; FERNANDES; GODINHO FILHO, 2010):

- i. Redução no *lead time* – com o *layout* em grupo as máquinas ficam próximas umas das outras, o que possibilita a transferência contínua dos produtos (sobreposição de operações), reduzindo assim o *lead time*. As vantagens derivadas desta situação são: redução do ciclo do pedido e redução do estoque de produtos finais e em processo, aspectos que possibilitam que a produção responda mais rapidamente à demanda do mercado e reduza os investimentos relacionados a estoques;
- ii. Melhoria da qualidade – no *layout* em grupo as pessoas se envolvem mais, produzindo itens de melhor qualidade. Além disso, a satisfação do trabalhador e as relações de trabalho melhoram quando ocorre o trabalho em grupo dentro de uma célula;
- iii. Redução dos custos de manuseio – no *layout* em grupo, o manuseio dos materiais é menor, pois as peças são movidas dentro de uma célula ao invés de percorrer toda a fábrica;
- iv. Padronização e redução de tempos de *setup* – ferramentas, dispositivos e *setups* são padronizados pelo fato de estarem relacionados a uma família de peças similares;
- v. Simplificação dos processos de planejamento e programação da produção – principalmente em virtude da simplificação do padrão de fluxo de materiais;
- vi. Simplificação da burocracia do trabalho e redução de custos indiretos – com a adoção da manufatura celular, o número de papéis cai drasticamente (cartões de trabalho, requisições de ferramentas). Com

isso, os custos indiretos, por exemplo, com digitação, leitura, preenchimento de papéis, também cai;

- vii. Redução de investimentos – o *layout* em grupo requer menos espaço que um *layout* funcional, pois a capacidade da planta existente tende a ser maior com a utilização do primeiro. Além disso, com a diminuição dos estoques em processo, há uma diminuição do investimento em espaço para armazená-los.

A respeito das desvantagens, Fernandes e Godinho Filho (2010) afirmam que poucas críticas têm sido feitas contra a TG. Neste sentido, eles destacam o trabalho de Nahmias (2005), o qual aponta duas desvantagens principais da TG: (i) pode requerer duplicação de algumas máquinas, o que pode ser muito custoso; (ii) alta variabilidade de produtos inviabiliza a utilização da manufatura celular.

Com relação a estas duas desvantagens, há algumas alternativas para contorná-las, entre elas o compartilhamento de recursos e a formação de células virtuais. A manufatura celular tem importância fundamental para a consecução dos propósitos do QRM. De acordo com Suri (1998), há sete princípios-chave necessários para reestruturar uma empresa para os propósitos do QRM, e sem eles, uma empresa não é capaz de reduzir o *lead time* dos produtos existentes:

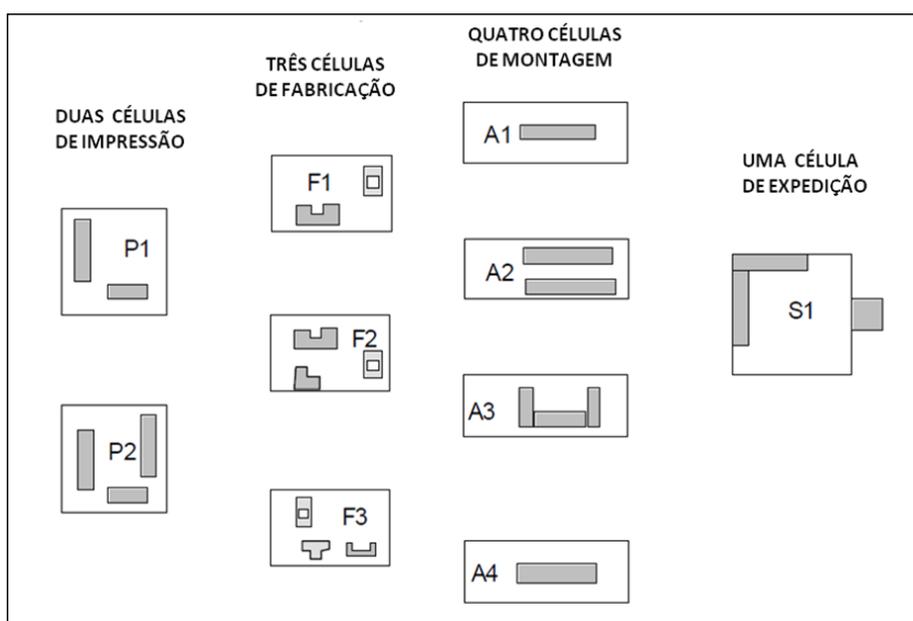
- i. Mudar a organização das tarefas, procedimentos e equipamentos de uma base funcional para uma orientada aos produtos. Todos os recursos necessários para produzir um produto devem ser localizados próximos uns dos outros;
- ii. Mudar a estrutura hierárquica da organização, com muitos níveis, para uma achatada, com muitos times;
- iii. Mudar o treinamento dos recursos humanos, ou seja, ao invés de trabalhadores especializados em poucas tarefas, devem-se utilizar recursos multifuncionais capazes de exercer diversas funções;
- iv. O gerenciamento dos processos deve mudar de um controle top-down de processos individuais de cada departamento para um processo de entrega de produtos sendo propriedade dos times;
- v. Com os princípios de 1 a 4 implantados, a programação centralizada e complexa e os sistemas de controle devem ser substituídos por procedimentos de planejamento e programação mais simples e locais;

- vi. Com as operações próximas umas das outras não é mais necessário processar um lote inteiro em cada operação antes de mover as peças, com esta configuração é possível mover peças de uma operação para outra tão logo ela for completada, ou em lotes de transferência que são bem menores que o lote de processamento;
- vii. Com a organização correta implantada, os times agora podem produzir em lotes cada vez menores enquanto ao mesmo tempo melhoram a qualidade e reduzem todos os tipos de desperdícios.

A partir destes sete princípios fica clara a importância da manufatura celular no contexto do QRM.

### 2.2.2.2.3 Paired-cell Overlapping Loops of Cards with Authorization (POLCA)

No que se refere ao Planejamento e Controle da Produção (PCP), o QRM propõe a utilização do *Paired-cell Overlapping Loops of Cards with Authorization* (POLCA). De acordo com Suri (1998), POLCA é uma estratégia híbrida que puxa e empurra a produção, combinando as melhores características dos sistemas MRP (empurrado) e *Kanban* (puxado). Para compreender melhor este sistema, será considerado um exemplo de uma empresa chamada *CFP Corporation*. Para atender seus mercados altamente variados, a empresa criou várias células como mostra a Figura 2.2.



**Figura 2.2** Organização das células na CFP Corporation.

**Fonte:** Adaptado de Suri (1998)

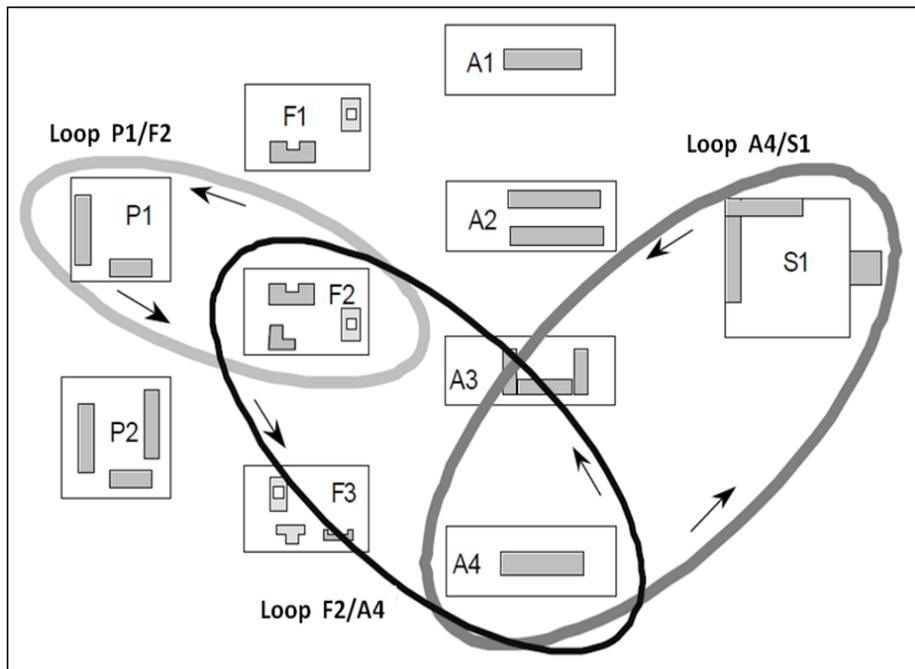
Primeiro, há duas células de impressão: P1 concentra-se em serigrafia e P2 em litografia. Em seguida, estão três células de fabricação, F1, F2 e F3, que convertem as folhas impressas em placas individuais com as características desejadas. Após as operações de fabricação, as placas seguem para uma das quatro células de montagem, A1 a A4, nas quais as operações de acabamento como rebarbar, montar os fechos e embalar são realizadas. Finalmente, todas as ordens seguem para a célula de expedição S1, onde as placas embaladas são alocadas em contêineres e depois carregadas nos caminhões.

Os pedidos dos clientes são atendidos utilizando a combinação apropriada das células necessárias para imprimir, fabricar e montar cada ordem de produção. A fim de atender seu nicho de mercado para placas personalizadas, a *CFP Corporation* tem três principais requisitos para o seu sistema de gestão de materiais: (1) a habilidade de planejar as rotas dos produtos através das diferentes combinações de células, conforme a necessidade de uma dada ordem, (2) dentro de uma célula, a capacidade dos produtos de utilizar as máquinas em diferentes sequências, e (3) flexibilidade em termos da necessidade de capacidade para cada operação em uma célula.

De acordo com as características descritas acima, o POLCA é um sistema de controle de material adequado ao ambiente da *CFP Corporation*. O funcionamento básico do POLCA é descrito a seguir, conforme Suri e Krishnamurthy (2003). Primeiramente, para cada ordem são geradas autorizações de produção por meio de um sistema denominado HL/MRP (*High-Level Material Requirements Planning*), que é muito parecido com os tradicionais MRP. O cartão utilizado para o controle da produção, chamado de cartão POLCA representa uma quantidade de capacidade disponível e acompanha o material em todas as etapas do processo, autorizando seu início. Nestes cartões são identificadas as células onde o processo vai ser iniciado, o processo e a próxima célula para onde deve se encaminhar o material relativo à próxima etapa. Para cada duas células são confeccionados cartões POLCA respectivos. O operador de uma máquina só inicia a produção se três condições forem atendidas: a produção foi autorizada pelo HL/MRP, existe matéria prima e existe um cartão POLCA.

Embora este procedimento possa parecer semelhante ao *Kanban*, existem algumas diferenças entre eles. Primeiro, os cartões são utilizados apenas para controlar o movimento entre as células, e não dentro das células. Segundo, os cartões POLCA, não são específicos de um produto como nos sistemas puxados, mas são atribuídos a pares de células, e se aplicam a todos os produtos que vão desde a primeira até a segunda célula do par.

A Figura 2.3 mostra os fluxos de um cartão POLCA para uma determinada ordem na CFP Corporation. O roteiro desta ordem se inicia de P1 para F2, segue para a montagem A4 e, posteriormente, para S1 para assim ser expedido. Esta ordem, portanto, prossegue através dos *loops* do cartão POLCA com os pares P1/F2, F2/A4 e A4/S1, como mostrado na Figura 2.3.



**Figura 2.3** Fluxo do cartão POLCA para uma determinada ordem de produção na CFP Corporation.

**Fonte:** Adaptado de SURI (1998)

Em terceiro lugar, e esta é uma diferença fundamental, ao passo que um cartão *Kanban* é um sinal de reposição de estoques, um cartão POLCA é um sinal de disponibilidade de capacidade. Especificamente, um cartão POLCA que retorna à primeira célula do par, isto é, célula à montante, assinala disponibilidade de capacidade para processar mais trabalho na segunda célula do par, isto é, na célula à jusante. Assim, quando um centro de trabalho revê sua lista de atividades, cujo início foi autorizado, só pode trabalhar sobre uma atividade se existe um cartão POLCA da célula de destino. Por exemplo, se a célula P1 tem um trabalho já autorizado que irá seguir para F3, então um cartão P1/F3 deve estar disponível em P1, para que possa começar o trabalho. Se um cartão P1/F3 não estiver disponível, significa que há um gargalo na F3 e que o trabalho sobre esta atividade não irá contribuir para o aumento de WIP em F3. Nesta situação, é preferível usar os recursos da célula P1, trabalhando, por exemplo, em ordens de produção que realmente sejam necessárias em outra célula que não está em atraso. Assim, a célula P1 ignora o trabalho P1/F3 neste momento, e olha para o próximo

trabalho autorizado para ver se um cartão está disponível para este trabalho, e assim por diante.

A quarta diferença em relação ao *Kanban* é que os cartões POLCA, para cada par de células, permanecem com uma atividade da sua jornada através de ambas as células do par antes que o loop retorne para a primeira célula do par. Por exemplo, um cartão P1/F2 deverá ser anexado a uma ordem como o trabalho ingressado na célula P1 e que seguirá para a célula F2. P1 deverá permanecer com este trabalho até que a célula F2 o tenha concluído e, enquanto o trabalho irá se movimentar para a sua próxima célula (A4), o cartão P1/ F2 deverá ser devolvido para a célula P1. Como a maioria das células irá pertencer a mais de um par de células, haverá vários *loops* de cartões que irão se sobrepor em cada célula, como pode ser visto na Figura 2.2.

### **2.3 VARIÁVEIS DO CHÃO DE FÁBRICA QUE TEM EFEITO NA REDUÇÃO DO LEAD TIME**

*Lead time* é definido de acordo com Ericksen et al. (2007), ou seja, é o tempo típico (medido em dias corridos), desde que o cliente faz o pedido, passando pelo caminho crítico, até que a primeira peça do pedido seja entregue ao cliente. Christopher (2013) afirma que longos *lead times* representam problemas no atendimento dos clientes, pois no atual contexto internacionalmente competitivo, os clientes demandam uma resposta rápida e as empresas com uma combinação de custos elevados e falta de receptividade carregam uma receita para o declínio e decadência. O foco dado ao *lead time* se deve a importância crescente do tema nos últimos anos, ao potencial de alavancar as métricas fundamentais da empresa e aos benefícios que a redução do mesmo traz, conforme explicam Chhajed e Kim (1995), Porter (2003) e Mason-Jones e Towill (1999).

Dentre as diversas variáveis que afetam a redução do *lead time*, Hopp e Spearman (2008) destacam seis, a saber: tempo médio de *setup*, tempo médio de reparo, tempo médio entre falhas, taxa média de defeitos, variabilidade no tempo de processamento e variabilidade no tempo entre as chegadas de ordens. Nesta seção será explicada sucintamente cada uma dessas variáveis.

A primeira variável, o tempo médio de *setup*, pode ser entendido como tempo médio que uma tarefa gasta esperando enquanto uma estação de trabalho é preparada para o processamento desta tarefa (HOPP; SPEARMAN, 2008)

Shingo (1996) explica que o *setup* pode ser dividido em dois tipos de operação:

i) *Setup* interno: são as operações que só podem ser realizadas com a máquina parada; ii) *Setup* externo: operações que podem, e devem, ser concluídas com a máquina em funcionamento.

Hopp e Spearman (2008) classificam os tempos de *setup* como sendo uma parada preemptiva, ou seja, inevitavelmente ocorrem, mas existe um tipo de controle sobre a mesma. Diaby (2000) destaca a importância desta variável ao afirmar que um tempo de *setup* curto é um pré-requisito básico para o sucesso de todas as tecnologias de manufatura. Um dos métodos mais utilizados para a redução de *setup* é a troca rápida de ferramentas (FERNANDES; GODINHO FILHO, 2010). Shingo (1996) afirma que a troca rápida de ferramentas é a maneira mais eficaz de melhorar tempo de *setup*.

O tempo médio de reparo, de acordo com Slack et al. (2002), pode ser entendido como o tempo necessário para consertar uma máquina, do momento em que ela falha até o momento em que está operando novamente. Sherif (2003) explica que dentro do tempo de reparo estão incluídos os tempos de preparação, diagnóstico, correção e checagem final e as melhorias nesta área implicam em ações para reduzir a frequência de falhas e aumentar a facilidade de reparo.

A redução do tempo de ciclo ou do *lead time* para obter vantagem competitiva é realidade nas empresas. Em muitos casos, paradas não planejadas de máquina afetam negativamente os tempos de ciclos das estações de trabalho. Quebras de máquinas podem causar uma explosão de estoque em processo (WIP) em uma estação de trabalho quando a taxa de chegadas é temporariamente maior que a taxa de processamento (SCHULTZ, 2004).

Schultz (2004) investiga como a média e a variância do reparo de máquina afeta o tempo de ciclo na estação de trabalho que sofre a quebra e nas estações a jusante. O autor sugere que a habilidade de uma empresa de ter *lead times* curtos, sem implicar em estoques excessivos, requer tempos de ciclos pequenos. Para isso uma alternativa interessante é manter um estoque de componentes sobressalentes de modo a diminuir o tempo médio de reparo, aumentando a disponibilidade da máquina e reduzindo o tempo de ciclo. O autor fornece um modelo que ajuda a prever e analisar o tempo de ciclo médio, variabilidade de partidas, e nível de estoque médio de modo a ajudar os gerentes a determinarem a melhor alocação de peças sobressalentes para uma linha produtiva.

Martins e Laugeni (2006) explicam que o tempo médio entre falhas é um parâmetro muito utilizado nos estudos de confiabilidade, que pode ser definida como a

probabilidade de quem um sistema (equipamento, componente, peça etc.) gere os resultados esperados, durante certo período de tempo e sob certas condições.

Segundo Fenton (1999), o significado mais comum do termo defeito é um desvio das especificações ou expectativas, as quais podem gerar falhas nas operações. Shingo (1986) classifica os defeitos em duas classes, os isolados são aqueles que ocorrem uma vez apenas e os em série, que ocorrem repetidamente.

Diversos autores destacam a importância dos defeitos e problemas de qualidade para a empresa. Ohno (1997) e Liker (2005) explicam que a produção de produtos defeituosos é um dos 7 grandes tipos de desperdícios apontados pelo Sistema Toyota de Produção. Já Hopp e Spearman (2013) destacam que problemas de qualidade aumentam a utilização das estações de trabalho, afetando a variabilidade e a capacidade podendo causar consequências operacionais graves. Lee (2008) afirma que a proporção de defeitos influencia os custos de manufatura e inventário e implica na perda da lucratividade.

O tempo de processamento é o tempo que as tarefas gastam sendo processadas na estação de trabalho e é uma das variáveis mais importantes do chão de fábrica (HOPP; SPEARMAN, 2008).

Hopp e Spearman (2013) explicam que as principais fontes de variabilidade são: a variabilidade natural (que inclui pequenas flutuações nos tempo de processamento causadas por diferenças de operadores, máquinas e materiais), paradas aleatórias, *setups*, disponibilidade de operadores e retrabalhos.

De acordo com Godinho Filho e Uzsoy (2009), o tempo de processamento é construído a partir do tempo natural e é composto por três efeitos: i) efeitos de paradas preemptivas (falhas de máquina); ii) efeitos de paradas não preemptivas (tempos de *setup*); iii) efeito de itens defeituosos. A variabilidade do tempo de processamento é composta pela variabilidade presente em cada um desses componentes.

A variabilidade de uma estação pode impactar no comportamento de outras estações de uma linha de produção por meio da variabilidade do fluxo. Os fluxos são referentes a trabalhos movimentados entre as estações. Se uma estação a montante tem uma variabilidade alta em seus tempos de processamento o fluxo que segue a jusante também terá variabilidade alta. O ponto de partida estudar os fluxos é entender a chegada dos trabalhos em uma estação. As saídas de uma estação de trabalho são na verdade as chegadas na estação seguinte. Ao entender a variabilidade das chegadas e o relacionamento com a variabilidade das saídas da mesma estação, a variabilidade do fluxo da linha toda é consequentemente identificado (HOPP; SPEARMAN, 2013).

O tempo médio entre chegadas representa o tempo médio entre chegadas de duas ordens consecutivas ao sistema de produção. O tempo médio entre chegadas é dado pelo inverso da taxa de chegadas. A variabilidade que está associada com esse tempo é a variabilidade do tempo entre chegadas (HOPP; SPEARMAN, 2013).

## **2.4 O EFEITO DE PROGRAMAS DE MELHORIA EM VARIÁVEIS DO CHÃO DE FÁBRICA NA REDUÇÃO DE *LEAD TIME***

A redução do *lead time* é um tema constantemente abordado na literatura de gestão e produção atual. O objetivo desta seção é apresentar os principais trabalhos encontrados nas bases de dados *Compendex*, *Web of Science* e *Google Scholar* e que falam a respeito de programas de melhoria em variáveis do chão de fábrica que contribuem para redução do *lead time*. No tópico 2.4.1 são apresentados os resumos dos trabalhos analisados em ordem cronológica de acordo com o ano de publicação do artigo e a análise realizada a respeito da redução do *lead time*.

### **2.4.1 Resumo dos principais trabalhos analisados sobre a redução do *lead time***

Kuik e Tieleman (1998) propõem expressões analíticas para encontrar tamanhos de lote ótimos de modo a minimizar o atraso de filas e o *lead time*. Os autores ressaltam a importância do *lead time* como uma arma competitiva, afirmando que tempos de *lead time* curtos ajudam a obter um tempo de resposta mais rápido de acordo com as mudanças nas necessidades do consumidor, previsões de demanda mais precisas e redução dos estoques de segurança e em processo, dentre outras.

Wadhwa et al. (2006) realizam uma simulação para entender o efeito de três tipo de flexibilidade (transformação, sequenciamento e produto) no *lead time* de um sistema de manufatura. De acordo com os autores, flexibilidade se refere à habilidade de responder a mudanças no ambiente de negócios. Os autores concluem que a flexibilidade de produto é a que possui a maior influencia no *lead time*, seguida pela flexibilidade de transformação e sequenciamento.

Bertolini et al. (2007) investigam métodos para redução do *lead time* da cadeia de suprimentos de calçados em indústrias italianas. O *lead time* da cadeia de suprimentos (CS) pode ser definido como o tempo gasto para realizar todas as operações, desde a matéria prima até o produto final, e entregar o produto ao consumidor. Os autores concluem que a adoção de ferramentas avançadas da Tecnologia de Informação podem reduzir o *lead time* da CS.

Godinho Filho (2008) realiza uma investigação a respeito do efeito do tamanho de lote na implantação de programas de melhoria utilizando como medida de desempenho o *lead time*. O autor conclui que o efeito positivo da implantação dos programas de melhoria no tempo de *setup*, variabilidade no tempo de processamento e taxa de defeitos no *lead time* é potencializada pela redução dos tamanhos de lote. Por outro lado, o efeito da implantação de programas de melhoria no tempo de reparo, tempo entre falhas e variabilidade na chegada das ordens no *lead time* não é potencializada pela redução dos tamanhos de lote. Os resultados deste trabalho indicam que mesmo empresas que possuem dificuldades em trabalhar com tamanhos de lote reduzidos podem se beneficiar com programa de melhoria contínua no tempo de *setup*, na variabilidade do processo e na taxa de defeitos.

Em Godinho Filho e Uzsoy (2008a, 2010, 2011) são estudados os efeitos de seis programas de melhoria (melhoria no tempo médio de *setup*, tempo de reparo, taxa de defeitos, tempo entre falhas, variabilidade entre chegadas de ordens e variabilidade no tempo de processamento) na curva que relaciona tamanho de lote de produção e *lead time*. As principais conclusões extraídas desses trabalhos foram:

- i. Dos seis programas de melhoria estudados, cinco deles (exceção feita ao programa de melhoria na variabilidade na chegada das ordens) trouxeram a curva tamanho de lote x *lead time* para baixo e para esquerda, fazendo com que o tamanho de lote ótimo com relação ao *lead time* possa ser menor;
- ii. O programa de melhoria na variabilidade da chegada das ordens teve um efeito muito pequeno com relação à curva tamanho de lote x *lead time*. Esse resultado mostra que esforços para redução da variabilidade na chegada das ordens de produção não apresenta grande efeito na redução do *lead time*; portanto é possível reduzir o *lead time* por meio da implantação de programas de melhoria contínua em outras variáveis do chão de fábrica mesmo em um ambiente caracterizado por alta variabilidade na chegada das ordens.
- iii. A relação convexa entre tamanho de lote e *lead time* mostra que simplesmente reduzir o tamanho de lote (sem se conhecer exatamente o formato da curva tamanho de lote x *lead time*) não garante a redução do *lead time*. Os resultados apresentados nestes artigos mostram que grandes reduções nos tamanhos de lote, mesmo acompanhados por melhorias (por exemplo, na variabilidade do processo, na qualidade e no tempo até a falha) podem ter efeito pior no *lead time* do que uma redução mais gradual no tamanho de lote. Em termos gerais, a

mensagem é que se deve conhecer a relação tamanho de lote x *lead time* antes de se decidir a respeito de reduções no tamanho de lote;

- iv. Se uma empresa trabalha com um tamanho de lote próximo ao tamanho de lote ótimo com relação a *lead time* (valor mínimo da curva tamanho de lote x *lead time*), a necessidade de programas de melhoria com relação à quebra de máquinas diminui; dessa forma, conforme menos se conhece e se utiliza a curva tamanho de lote x *lead time*, mais necessários se fazem os programas de melhorias nos tempos de reparo e tempo até a falha;
- v. O programa de redução nos tempos de *setup* atinge melhor resultado com relação ao *lead time* quando tamanhos de lote pequenos são utilizados. Na verdade, a melhoria no tempo de *setup* permite que o sistema produtivo trabalhe com tamanhos de lote bem menores do que aqueles que seriam utilizados caso nenhuma melhoria no tempo de *setup* tivesse sido implementada. Este resultado fornece suporte à literatura que defende a importância da utilização de métodos de redução de *setup*, como, por exemplo, o método SMED (*Single Minute Exchange of Die*) de Shingo (1986);
- vi. Ao comparar o efeito de uma melhoria focada (50%) em somente uma variável com o efeito de pequenas melhorias (variando de 5% a 20%) em múltiplas variáveis de forma simultânea, os autores concluíram que investir em pequenas melhorias em muitas variáveis de forma simultânea é uma política melhor (com relação à melhoria no *lead time* para um mesmo tamanho de lote utilizado) do que realizar uma grande melhoria (a qual, geralmente, pressupõe um investimento maior) em somente uma variável. Verificou-se, por exemplo, que o programa para 15% de melhoria simultânea em todas as variáveis apresenta melhor desempenho em relação à redução de *lead time* do que todos os outros programas para grandes (50%) melhorias em somente uma variável (com exceção do caso no qual um tamanho de lote de produção muito pequeno é utilizado; nesse caso específico, a melhoria de 50% no tempo de *setup* apresentou o melhor desempenho). Estes resultados fornecem suporte à literatura a respeito dos modelos gerenciais japoneses (como por exemplo, *Just in time* e Sistema Toyota de Produção), a qual defende a necessidade e importância da melhoria contínua e simultânea em todas as variáveis do sistema produtivo.

Godinho Filho e Uzsoy (2008b) utilizam a estratégia híbrida *System Dynamics-Factory Physics* para estudar o efeito dos mesmos seis programas de melhoria contínua em curvas de operação logística. Godinho Filho e Uzsoy (2012) ampliam esse trabalho para um ambiente *flow shop* com 5 estações de trabalho. Curvas de Operação Logística, também denominadas curvas características, relacionam dois indicadores de desempenho fundamentais de um sistema de manufatura: *lead time* e utilização. A partir dos experimentos realizados, Godinho Filho e Uzsoy (2008b; 2012) concluíram que:

- i. Tanto para o ambiente de máquina única quanto para o *flow shop*, concluiu-se que os programas para melhorias focada (50%) na variabilidade entre chegada de ordens, no tempo médio entre falhas, no tempo médio de reparo, na variabilidade do processo e no tempo médio de *setup* auxiliam a reduzir o *lead time* do sistema de produção em comparação ao caso base (sem a implementação de nenhuma melhoria), para um mesmo nível de utilização de máquina. O programa de 50% de melhoria de na taxa de defeitos somente apresenta melhor desempenho que o caso base para níveis mais altos de utilização (acima de 85%);
- ii. Referente ao ambiente de máquina única, com relação aos seis programas estudados, a maior redução no *lead time* foi alcançada pelo programa de 50% de melhoria na variabilidade do processo. Exceção a essa conclusão ocorre para níveis altos de utilização (acima de 90%), nos quais o programa de melhoria no *setup* alcança os melhores resultados. Outros programas de melhoria também obtiveram efeitos positivos na curva de operação logística. Para o ambiente de máquina única, o segundo melhor efeito foi dado pela melhoria no *setup*, seguido pela melhoria no tempo de reparo, tempo entre falhas, variabilidade de chegadas e taxa de defeitos. Para o ambiente *flow shop*, melhoria na variabilidade de chegadas é o segundo melhor programa, seguido pelo programa de melhoria no tempo de *setup*, reparo, falhas e taxa de defeitos;
- iii. Para ambos os ambientes estudados, mostrou-se que a eficácia dos programas de melhoria contínua depende do nível de utilização do sistema. Todos os programas estudados não apresentaram grandes benefícios quando o nível de utilização da máquina é muito baixo. Os resultados também mostraram que em níveis de utilização muito altos, a redução da utilização tem maior potencial em trazer melhorias referentes ao *lead time* do que todos os programas de melhoria estudados. Desses resultados pode-se concluir que, de uma forma

geral, os programas de melhoria contínua nas variáveis estudadas (com exceção do programa para melhoria na taxa de defeitos) tem maior potencial de trazer ganhos com relação ao *lead time* se forem implementados em sistemas com níveis médios de utilização (entre aproximadamente 65% e 85%). De acordo com Schonberger (1986), em geral, empresas japonesas que adotam práticas de Melhoria Contínua (CI) procuram manter níveis médios de utilização. Os resultados mostrados trabalho, portanto, ajudam a explicar o porquê as empresas japonesas são tão bem sucedidas em seus esforços relativos à implementação de programas de CI e também podem auxiliar as empresas na prática a trabalhar com níveis de utilização que favoreçam a implementação de programas de CI.

Godinho Filho e Uzsoy (2009) estudam o efeito dos programas de melhoria contínua nos níveis de estoque em processo (WIP) e na utilização para um ambiente de máquina única. Nesse trabalho, as principais conclusões dos autores foram:

- i. Para tamanhos de lote de produção grandes, a redução da variabilidade do processo contribui largamente para a redução do WIP. Conforme os tamanhos de lote de produção são reduzidos, a importância do programa para melhoria na variabilidade do processo diminui. Nesse contexto, o programa de melhoria no tempo de *setup* passa a ser o programa que mais contribui para a redução do WIP. Também é interessante notar que programas de melhoria de qualidade têm sua importância aumentada conforme os tamanhos de lote de produção utilizados são menores. De maneira oposta, programas de manutenção de máquinas que reduzam o tempo de reparo e aumentem o tempo médio entre falhas têm seu impacto no WIP reduzido conforme tamanhos de lote menores são utilizados. Programas de melhoria na variabilidade da chegada das ordens têm pouco impacto na redução do WIP.
- ii. Os autores observaram também que, referente à redução no WIP, é preferível investir em pequenas melhorias em um grande número de parâmetros do sistema de produção do que se investir na implantação de um grande programa para melhoria de somente um parâmetro do sistema. Esta conclusão independe do tamanho de lote de produção utilizado. Quando se utiliza grandes tamanhos de lote, programas para melhorias de 20% e 15% em todos os seis parâmetros estudados conjuntamente obtiveram melhores resultados com relação à

redução de WIP do que qualquer programa para 50% de melhoria em somente um parâmetro. Quando se utiliza pequenos tamanhos de lote, um programa para melhoria de 20% em todos os seis parâmetros estudados conjuntamente obteve quase que o mesmo resultado com relação à redução de WIP que um programa para 50% de melhoria nos tempos de *setup*.

- iii. Com relação ao efeito dos programas de melhoria contínua na utilização, este estudo mostrou que quando são utilizados lotes grandes, todos os programas de melhoria contínua avaliados apresentaram pouco ou nenhum efeito no nível médio de utilização do sistema. Esta conclusão também é válida para a implantação de pequenas melhorias em vários parâmetros ao mesmo tempo. Conforme tamanhos de lote menores são utilizados, programas de melhoria no *setup* apresentam o melhor resultado com relação à redução dos níveis médios de utilização do sistema;
- iv. Os resultados com relação à utilização também mostram, como esperado, que conforme os tamanhos de lote são reduzidos, a utilização média aumenta. Nestes casos, investimentos em programas de redução de *setup* se mostraram eficazes no sentido de manter os níveis de utilização baixos enquanto as reduções de tamanho de lote são efetuadas. Estes resultados, portanto, também fornecem suporte para toda a literatura que defende a importância e a necessidade de programas de redução de *setup*.

Chaharsooghi e Heydari (2010) realizam uma simulação para investigar comparativamente qual a melhor alternativa de realização de melhorias em se tratando de cadeias de suprimentos. Ou seja, qual estratégia de melhoria média ou variância produz traz os maiores benefícios. Os autores concluem que no geral o efeito da variância do *lead time* no desempenho da cadeia de suprimentos é maior que o efeito da média do *lead time*.

Glock (2012) afirma que o *lead time* tem um papel importante no gerenciamento da logística. Além disso, o autor explica que a redução do *lead time* é especialmente importante em situações nas quais a demanda do consumidor é incerta, uma vez que longos *lead times* colocam a companhia em grande risco de ficar sem estoque antes dos pedidos chegarem. O autor investiga métodos alternativos para redução do *lead time* e seu impacto no estoque de segurança e nos custos totais esperados de um sistema de revisão contínua de estoque. O trabalho mostra os benefícios da redução do *lead time* por meio de

exemplos numéricos e mostra que essa redução é especialmente benéfica em casos de alta incerteza na demanda.

Godinho Filho (2012) apresenta a mesma questão que Godinho Filho e Uzsoy (2008a) considerando desta vez um ambiente *flow shop* com 5 estações de trabalho. Os principais resultados observados foram que para a grande maioria dos cenários testados no artigo (tanto relativos à máquina única quanto ao *flow shop*), os programas de melhoria no tempo de *setup* e variabilidades (processamento e chegada) tiveram os maiores efeitos com relação à redução do WIP. Além disso, concluiu-se que o investimento combinado em vários programas de melhorias simultaneamente resulta em um WIP menor do que grandes melhorias em uma única variável. Outro ponto observado foi que a melhoria na variabilidade de chegadas e pequenas melhorias em todas as variáveis em conjunto auxiliam na estabilização da quantidade de WIP mesmo quando são utilizados lotes grandes. Por fim, foi observado que somente as reduções combinadas do tempo de *setup* e dos tamanhos de lote ou alternativamente, pequenas melhorias em todas as variáveis em conjunto com a redução do tamanho de lote conseguem reduções significativas na utilização das estações do trabalho no ambiente *flow shop*.

Godinho Filho e Uzsoy (2012) estudam o efeito no *lead time* dos programas de redução do *setup* e do reparo para um ambiente de máquina única sob condições de incerteza. Esses autores concluem que mesmo pequenas melhorias em ambas as variáveis de forma simultânea trazem mais benefícios para a redução do *lead time* do que grandes melhorias em somente um parâmetro. Essa conclusão se torna ainda mais verdadeira levando em consideração condições de incertezas a respeito da magnitude da melhoria a ser alcançada e da quantidade de tempo que se consegue manter a melhoria. Para modelar a incerteza, os autores utilizaram um simulador baseado em um modelo de Markov.

O trabalho de Godinho Filho e Saes (2013) ilustra a importância da redução do *lead time*. Os autores conduziram uma extensa revisão e investigaram 67 artigos com foco na redução do *lead time*. Os autores explicam que apesar de haver diversos trabalhos referentes a redução de *lead time*, falta uma discussão adequada de questões que envolvem a redução do *lead time* e uma análise estruturada que mostre o desenvolvimento do tema e status da prática e da pesquisa. Com este fim, os autores realizam uma revisão ampla dos principais artigos que estudam a redução do *lead time* no contexto dos paradigmas da competição baseada no tempo. Os autores fornecem conclusões a respeito da maneira como a literatura trata a redução do *lead time* e um dos *gaps* encontrados foi que dos trabalhos analisados, apenas 26,86%

utilizam uma estratégia quantitativa e os autores sugerem que a utilização de estratégia quantitativa é uma oportunidade nessa área de redução do *lead time*.

Godinho et al. (2013) investigam o efeito que seis programas de melhoria em variáveis do chão de fábrica produzem no *lead time*. Os autores constatarem que todos os programas de melhoria produzem contribuições significativas na redução do *lead time* em pelo menos um dos ambientes estudados, com exceção da melhoria na variabilidade de chegadas. Os resultados experimentais mostram que a melhoria no tempo entre falhas foi o programa que apresentou o maior efeito positivo na redução do *lead time*. Esse artigo também apresenta as seguintes implicações práticas: (1) os gerentes devem ter o conhecimento de que em situações nas quais é muito difícil realizar a melhoria em uma variável, também é possível obter uma redução no *lead time* por meio de uma melhoria em outra variável; (2) gerentes podem fazer uso do efeito positivo sinérgico que foi encontrado entre alguns dos programas de melhoria; (3) os gerentes devem se atentar ao fato de que antes de implementar um programa de melhoria em uma variável do chão de fábrica é fundamental conhecer as características do mesmo, pois mesmo programas de melhoria muito tradicionais perdem suas eficiência se utilizados em ambientes de produção não favoráveis aos mesmos.

Godinho Filho e Barco (2015) propõem um método para seleção de programas de melhoria com o foco na redução do *lead time*. Para atingir esse objetivo, foi realizado um estudo de caso e simulações utilizando um modelo criado a partir das estratégias *System Dynamics* e *Factory Physics*. Para o ambiente estudado, ou seja, uma máquina única gargalo de um processo de usinagem, o resultado da aplicação do método foi a potencial melhoria de 84,63% no *lead time*, que pode ser obtida com um projeto de melhoria de 1373% no tempo médio entre falhas, demandando um esforço de 5880 h.

Godinho Filho e Utiyama (2015) comparam duas estratégias para alocação de programas de melhoria em um ambiente *flow shop*, com foco na redução do *lead time*: (i) alocação de programas de melhoria focada no recurso restrição de capacidade (RRC) e (ii) alocação de programas de melhoria distribuídos ao longo da linha de produção. Os resultados mostram que quando a utilização do recurso restrição é alta e a diferença entre o tempo de processamento do RRC e os recursos não restrição é significativa (acima de 5%) a alocação de programas de melhoria focada no RRC é a melhor opção. A medida que a utilização do recurso restrição diminui e a diferença entre RRC e não RRCs diminuem, o programa de melhoria em vários pontos da linha começa a se comportar melhor. Os resultados do trabalho ainda mostram que uma terceira estratégia (estratégia híbrida) é uma boa alternativa para situações nas quais o RRC possui alta utilização e realizar um grande investimento focado no

RRC seja impraticável. Por fim, os autores apresentam um algoritmo que auxilia os gerentes de produção em situações práticas a selecionar a melhor estratégia de alocação de melhoria.

O Quadro 2.2 apresenta um resumo dos objetivos e conclusões obtidas pelos trabalhos analisados nessa seção. A análise do Quadro 2.2 permite identificar pontos de convergência dos estudos analisados e algumas lacunas que precisam ser mais bem exploradas na literatura.

### QUADRO 2.2 Síntese dos principais trabalhos analisados sobre redução de *lead time*

Foco do trabalho	Conclusão/Contribuição	Artigo
Fornecem expressões analíticas para afirmar que tempos de <i>lead time</i> curtos ajudam a obter um tempo de resposta encontrar tamanhos de lote ótimos mais rápido de acordo com as mudanças nas necessidades do consumidor, de modo a minimizar o atraso de previsões de demanda mais precisas e redução dos estoques de segurança e em filas e o <i>lead time</i>	Os autores ressaltam a importância do <i>lead time</i> como uma arma competitiva, processo, dentre outras.	Kuik e Tielemans (1998)
Estudam o efeito de três tipos de flexibilidade (transformação, sequenciamento e produto) no <i>lead time</i>	A flexibilidade de produto é a que possui a maior influência no <i>lead time</i> , seguida pela flexibilidade de transformação e sequenciamento	Wadhwa et al. (2006)
Investigam métodos para redução do <i>lead time</i> da cadeia de suprimentos em indústrias italianas	A adoção de ferramentas avançadas de Tecnologia de Informação podem reduzir o <i>lead time</i> da cadeia de suprimentos.	Bertolini et al. (2007)
Analisa o efeito do tamanho do lote na implantação de programas de melhoria utilizando como medida de desempenho o <i>lead time</i> .	O efeito positivo da implantação dos programas de melhoria no tempo de <i>setup</i> , redução dos tamanhos de lote.	Godinho Filho (2008)
Estudar o efeito de seis programas de melhoria (melhoria no tempo de <i>setup</i> , tempo reparo, taxa de defeitos, tempo entre falhas, melhor resultado de variabilidade entre chegadas de lotes utilizados; (iv) Ao comparar o efeito de uma melhoria focada em ordens, variabilidade no tempo de processamento) na curva de produção e <i>lead time</i> .	Foram obtidas as seguintes conclusões: (i) Dos seis programas de melhoria apenas a melhoria na variabilidade de chegadas teve um efeito pequeno com relação a curva tamanho de lote de produção/ <i>lead time</i> . Os outros 5 programas obtiveram bons resultados com relação a curva tamanho de lote/ <i>lead time</i> ; (ii) Se uma empresa trabalha com um tamanho de lote próximo ao tamanho de lote ótimo com relação a <i>lead time</i> , a necessidade de programas de melhoria com relação à quebra de máquinas diminui; (iii) O programa de redução nos tempos de <i>setup</i> atinge melhor resultado com relação ao <i>lead time</i> quando tamanhos de lote pequenos são utilizados; (iv) Ao comparar o efeito de uma melhoria focada em ordens, variabilidade no tempo de processamento) na curva de produção e <i>lead time</i> , os autores concluíram que investir em pequenas melhorias em muitas variáveis de forma simultânea é uma política melhor do que realizar uma grande melhoria em somente uma variável.	Godinho Filho e Uzsoy (2008a, 2010, 2011)
Estudam o efeito de seis programas de melhoria contínua em curvas de operação logística	De uma forma geral, os programas de melhoria contínua nas variáveis estudadas (com exceção do programa para melhoria na taxa de defeitos) tem maior potencial de trazer ganhos com relação ao <i>lead time</i> se forem implementados em sistemas com níveis médios de utilização (entre aproximadamente 65% e 85%).	Godinho Filho e Uzsoy (2008b, 2012)
Estudam o efeito dos programas de melhoria contínua nos níveis de estoque em processo (WIP) e utilização para um ambiente máquina única	Para tamanhos de lote de produção grandes, a redução da variabilidade do processo contribui largamente para a redução do WIP. Conforme os tamanhos de lote de produção são reduzidos, a importância do programa para melhoria na variabilidade do processo diminui. Nesse contexto, o programa de melhoria no tempo de <i>setup</i> passa a ser o programa que mais contribui para a redução do WIP. Também é interessante notar que programas de melhoria de qualidade têm sua importância aumentada conforme os tamanhos de lote de produção utilizados são de menores. De maneira oposta, programas de manutenção de máquinas que reduzam o tempo de reparo e aumentem o tempo médio entre falhas têm seu impacto no WIP reduzido conforme tamanhos de lote menores são utilizados. Programas de melhoria na variabilidade da chegada das ordens têm pouco impacto na redução do WIP.	Godinho Filho e Uzsoy (2009)

**QUADRO 2.2** Síntese dos principais trabalhos analisados sobre redução de *lead time* (continuação).

<b>Foco do trabalho</b>	<b>Conclusão/Contribuição</b>	<b>Artigo</b>
Investigam se é melhor realizar melhorias na média ou na variância do <i>lead time</i> em se tratando de cadeias de suprimentos	No geral o efeito da variância do <i>lead time</i> no desempenho da cadeia de suprimentos é maior que o efeito da média do <i>lead time</i>	Chaharsooghi e Heydari (2010)
O autor investiga métodos alternativos para redução do <i>lead time</i> e seu impacto no estoque de segurança e nos custos totais esperados de um sistema de revisão contínua de estoque.	O trabalho mostra os benefícios da redução do <i>lead time</i> por meio de exemplos numéricos e mostra que essa redução é especialmente benéfica em casos de alta incerteza na demanda.	Glock (2012)
Estudam o efeito de programas de melhoriano WIP e <i>lead time</i> .	Para a grande maioria dos cenários testados no artigo (tanto relativos à máquina única quanto flow shop), os programas de melhoria no tempo de <i>setup</i> e variabilidades (processamento e chegada) tiveram os maiores efeitos com relação à redução do WIP. Além disso, concluiu-se que investimento combinado em várias melhorias simultâneas fornecem menor WIP do que grandes melhorias em uma única variável.	Godinho Filho (2012)
Estudam o efeito no <i>lead time</i> dos programas de redução do <i>setup</i> e do reparo para um ambiente de máquina única sob condições de incerteza	Os autores concluem que mesmo pequenas melhorias em ambas as variáveis de forma simultânea trazem mais benefícios para a redução do <i>lead time</i> do que grandes melhorias em somente um parâmetro	Godinho Filho e Uzsoy (2012)
Fornecem uma análise estruturada a respeito da maneira como a redução do <i>lead time</i> é tratada na literatura.	Os autores fornecem conclusões a respeito da maneira como a literatura trata a redução do <i>lead time</i> e um dos <i>gaps</i> encontrados foi que dos trabalhos analisados, apenas 26,86% utilizam uma abordagem quantitativa e os autores sugerem que a utilização de abordagem quantitativa é uma oportunidade nessa área de redução do <i>lead time</i> .	Godinho Filho e Saes (2013)
Investigam o efeito que seis programas de melhoria em variáveis do chão de fábrica produzem no <i>lead time</i>	Os resultados experimentais mostram que a melhoria no tempo entre falhas foi o programa que apresentou o maior efeito positivo na redução do <i>lead time</i>	Guimarães <i>et al.</i> (2013)
Propõe um método para seleção de programas de melhoria com o foco na redução do <i>lead time</i> .	Para o ambiente estudado, ou seja, uma máquina única gargalo de um processo de usinagem, o resultado da aplicação do método foi a potencial melhoria de 84,63% no <i>lead time</i> , que pode ser obtida com um projeto de melhoria de 1373% no tempo médio entre falhas, demandando um esforço de 5880 h.	Godinho Filho e Barco (2015)
Comparam duas abordagens para alocação de programas de melhoria a melhor opção. A medida que a utilização do recurso restrição diminui e a alocação de programas de melhoria em um ambiente <i>flow shop</i> , com diferença entre RRC e não RRCs diminuem, o programa de melhoria em vários focos na redução do <i>lead time</i> : (i) pontos da linha começa a se comportar melhor. Os resultados do trabalho ainda alocação de programas de melhoria mostram que uma terceira estratégia (abordagem híbrida) é uma boa alternativa focada no recurso restrição de para situações nas quais o RRC possui alta utilização e realizar um grande capacidade (RRC) e (ii) alocação de investimento focado no RRC seja impraticável. Os autores apresentam um programas de melhoria distribuídos algoritmo que auxilia os gerentes de produção em situações práticas a selecionar a melhor abordagem de alocação de melhoria	Os resultados mostram que quando a utilização do recurso restrição é alta e a diferença entre o tempo de processamento do RRC e os recursos não restrição é significativa (acima de 5%) a alocação de programas de melhoria focada no RRC é a melhor opção. A medida que a utilização do recurso restrição diminui e a alocação de programas de melhoria em um ambiente <i>flow shop</i> , com diferença entre RRC e não RRCs diminuem, o programa de melhoria em vários focos na redução do <i>lead time</i> : (i) pontos da linha começa a se comportar melhor. Os resultados do trabalho ainda alocação de programas de melhoria mostram que uma terceira estratégia (abordagem híbrida) é uma boa alternativa focada no recurso restrição de para situações nas quais o RRC possui alta utilização e realizar um grande capacidade (RRC) e (ii) alocação de investimento focado no RRC seja impraticável. Os autores apresentam um programas de melhoria distribuídos algoritmo que auxilia os gerentes de produção em situações práticas a selecionar a melhor abordagem de alocação de melhoria	Godinho Filho e Utiyama (2015)

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Foi observado que alguns trabalhos visam apresentar a importância do *lead time* e da redução do mesmo, entre eles é possível citar Kuik e Tielemans (1998) e Glock (2012) e Godinho Filho e Saes (2013). Há trabalhos que investigam a redução do *lead time* em cadeias de suprimentos, entre eles estão os artigos de Chaharsooghi e Heydari (2010) e Bertolini *et al.* (2007). Além disso, existem trabalhos com o foco em variáveis do chão de fábrica que possuem efeito no *lead time*, além de investigar os relacionamentos entre essas variáveis e o tamanho de lote e estoque em processo, entre esses trabalhos é possível citar

Godinho Filho (2008, 2012), Godinho Filho e Uzsoy (2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012), Godinho et al. (2013), Godinho Filho e Barco (2015) e Godinho Filho e Utiyama (2015). Entre os trabalhos analisados, poucos utilizam distribuição de probabilidade para modelar as variáveis do chão de fábrica. Dessa forma, a utilização de distribuições de probabilidade para representar as variáveis de chão de fábrica analisadas no presente estudo (tempo de reparo, tempo entre falhas e tempo de setup) e entender o efeito de melhorias nessas variáveis no lead time é um gap a ser explorado na literatura de redução do lead time. Adicionalmente, não foram encontrados estudos que comparem a melhoria na média, desvio e pior caso no que se refere a redução do lead time. Essas três estratégias são exploradas na seção 2.5

## **2.5 AS TRÊS ESTRATÉGIAS PARA MELHORIA ESTUDADAS NO PRESENTE TRABALHO**

Nesta seção são apresentados os trabalhos que estudam as estratégias investigadas neste trabalho nas seções 2.5.1, 2.5.2 e 2.5.3 respectivamente para melhoria na média, na variabilidade e no pior caso.

### **2.5.1 Melhoria na média**

Chaharsooghi e Heydari (2010) realizam um estudo para comparar a estratégia de melhoria na variância e na média do *lead time* (LT) no gerenciamento de cadeias de suprimentos. Os autores explicam que uma média de LT baixa possibilita aos consumidores um rápido acesso aos produtos, enquanto uma variância baixa de LT torna o planejamento dos processos mais confiável e previsível. Os autores explicam que o *lead time* é um fator fundamental para toda cadeia de suprimentos e afirmam que é possível reduzir ambos, a média e variância do *lead time*, por meio da utilização de uma estratégia de investimento adequada. Portanto, torna-se de fundamental importância a escolha da estratégia de investimento mais adequada de modo a obter os melhores benefícios. Por outro lado, em alguns casos é possível ocorrer um *trade-off* entre média e variância do LT. Escolher uma alternativa em detrimento da outra implica na realização de um *trade-off*. A decisão nesse caso requer um entendimento dos efeitos do LT nas medidas desempenho da cadeia de suprimentos. Do exposto, o artigo tem como objetivo auxiliar na tomada de decisão a respeito da melhor estratégia de investimento de modo a priorizar a média ou variância do LT. Os

autores concluem que de maneira geral a redução na variância do LT tem um efeito maior no desempenho da cadeia de suprimentos do que a redução na média do LT.

He et al. (2005) buscam investigar o custo da variabilidade do *lead time* em um sistema de localização única de estoque. Os autores concluem que é a variância do LT e não a média que afeta a política de controle de estoque e os custos totais em um modelo estocástico de *lead time*. Outro ponto importante destacado pelos autores é que para atingir zero estoque em uma configuração de *lead time* estocástico, ambos, tanto o custo de *setup* quanto a variabilidade do *lead time* devem ser eliminados.

### 2.5.2 Melhoria na variabilidade

Hopp e Spearman (2013) explicam os efeitos devastadores da variabilidade a qual sempre reduzirá o desempenho de um sistema de produção. A variabilidade aumenta sempre que há uma redução na uniformidade. Por exemplo, quando os tempos de processamento tornam-se diferentes entre si, a uniformidade diminui, aumentando a variabilidade.

Hopp e Spearman (2013) são enfáticos ao afirmar que a redução da variabilidade é essencial para melhorar o desempenho. Na verdade, reconhecer a importância de se reduzir à variabilidade em conjunto com métodos de redução da mesma foi fundamental para o sucesso do *Just-in-time*. De acordo com esses autores em um sistema de produção, a variabilidade formará suas reservas de segurança a partir de alguma combinação de estoques, capacidade e tempos. Isto é um conceito importante, pois enumera as formas pelas quais a variabilidade pode impactar no desempenho de um sistema produtivo. Não há dúvidas de que a variabilidade degrade o desempenho do sistema produtivo e, desta forma, é possível escolher diferentes estratégias para lidar com a variabilidade e isso varia de acordo com as características de cada empresa.

Rajaram e Robotis (2004) explicam que de há um conjunto amplo de iniciativas para reduzir a variabilidade de saída dos processos. De maneira geral, essas iniciativas podem ser classificadas em duas classes: tecnológicas e operacionais. As iniciativas tecnológicas incluem novas tecnologias de processo e automação para controlar esses processos. As iniciativas operacionais incluem: (i) desenvolvimento de interface entre os operadores e os sistemas de controle do processo; (ii) operar os processos continuamente parando somente algumas vezes no ano para manutenções programadas; (iii) produção de produtos básicos e em grandes lotes para minimizar *switchovers* de produtos e; (iv) utilização

de técnicas estatísticas para controlar e remover causas de variabilidade do processo. Os autores buscam investigar como a variabilidade em estágios individuais é propagada no processo e qual o efeito na variabilidade de saída. Os autores propõem a existência de uma sequencia analítica que minimiza a variabilidade de saída.

Gong et al. (2009) afirma que a variabilidade é a verdadeira raiz de todos os problemas e, portanto, é essencial reduzi-la. A variabilidade pode ser reduzida por dois métodos: *buffering* e eliminação direta. O Sistema Toyota de Produção elimina a variabilidade diretamente por meio do gerenciamento da qualidade, manufatura celular e melhoria contínua. Os autores construíram um sistema com três elementos: trabalhos (*works*), conexões (*connections*) e caminhos (*pathways*) (WCP). A especificação correta dos três elementos leva aos dois pilares do Sistema Toyota de Produção: *Just in time* e autonomia. Os autores construíram modelos estocásticos que investigam a lógica de determinar com grande precisão o trabalho no contexto do JIT. Os modelos mostram que os trabalhos são determinados com grande precisão para reduzir a variabilidade, ao passo que conexões e caminhos bem definidos expõem a variabilidade nos trabalhos à medida que baixos estoques expõem os problemas escondidos em uma fábrica.

No que diz respeito a técnicas estatísticas para redução da variabilidade, uma estratégia fundamental é o Seis Sigma. Bendell (2006) explica que o Seis Sigma foca na redução e remoção da variabilidade por meio da aplicação de um conjunto extensivo de ferramentas estatísticas e computacionais. O foco do Seis Sigma na redução da variabilidade, implica em um potencial de ao mesmo tempo reduzir custo e aumentar a satisfação dos consumidores. O autor explica que o uma implementação de Seis Sigma é particularmente útil em empresas que possuem alta variabilidade. Maleyeff et al. (2012) afirmam que o Seis Sigma foca na redução da variabilidade de modo que a incidência de defeitos e erros são minimizados.

Coronado e Antony (2002) destacam que o Seis Sigma se tornou uma estratégia popular em muitas organizações e visa eliminar variabilidade e reduzir desperdícios nos processos utilizando técnicas estatísticas poderosas. Em termos estatísticos. Seis Sigma significa 3,4 defeitos por milhão de oportunidades, no qual o sigma representa a variação do processo.

Bunce et al. (2008) afirmam que o Seis Sigma é uma estratégia de negócios para redução na variação dos processos. É um método que as companhias devem incorporar a fim de eliminar variação e conseqüentemente melhorar a qualidade em áreas fundamentais para os consumidores.

Lynes e Miltenburg (1994) discutem os efeitos que ambas, a variabilidade no tempo de serviço e a variabilidade no tempo de chegadas, produzem no tempo de ciclo. Eles concluem que ambas as variabilidades tem um efeito significativo no tempo de ciclo quando uma estação de trabalho tem uma utilização próxima a máxima possível.

Kuik e Tielemans (1999) investigam a relação entre tamanhos de lotes e variabilidade do *lead time*, expressa pela variância. Os autores concluem que de modo geral, a minimização do tempo médio de fila no sistema não resulta em uma variância mínima de *lead time*. Os autores explicam que na prática, para altos níveis de utilização, minimizar o tempo médio de fila faz com que o tempo médio do sistema e a variância do *lead time* sejam minimizados. Contudo, para níveis de utilização baixos é necessária uma distinção entre minimizar a média do *lead time* e a minimização da variância do *lead time*. Dependendo da sensibilidade do ambiente de negócios para efetuar a distinção entre a média e variância é necessário que os gerentes entendam que a otimização desses critérios separadamente leva a objetivos conflitantes. Dessa forma, nessas situações é necessária atenção para criação de uma medida de desempenho que leve em conta tanto o tempo médio do sistema e o desvio padrão.

Thomas et al. (2002) explicam que o gerenciamento da variabilidade é uma dimensão importante da manufatura enxuta. A variabilidade de produtos é uma grande fonte de variabilidade de produção. A manufatura enxuta lida com isso dissipando essa variabilidade nas operações *lean*, ou seja, operações com baixos tempos de *setup*, produção *Just-in-time*, programação puxada, práticas de capacidade flexível e outras técnicas. O foco da manufatura enxuta está no fluxo de produtos e estratégias de capacidade flexível para gerenciar as dificuldades criadas pela variabilidade de produção.

Ryu e Lee (2003) explicam que a variabilidade no *lead time* entre estágios sucessivos da cadeia de suprimentos frequentemente possui um grande efeito na coordenação da cadeia. Os autores investigam a redução na média e variância do *lead time* em relacionamentos entre dois elos da cadeia de suprimentos com relacionamentos *dual-source*. Nesse estudo os autores assumem que a distribuição do *lead time* dos fornecedores é exponencial. Então, ao reduzir um dos dois parâmetros, média ou variância, o outro também é reduzido, pois na distribuição exponencial os dois são diretamente relacionados.

Li et al. (2009) afirma que a variabilidade é uma característica para avaliar o desempenho de um processo e uma pequena variabilidade em uma máquina gargalo pode resultar em uma alta variabilidade de produção.

Por fim, Kampen et al. (2010) investigam qual a melhor forma para lidar com incertezas na demanda e no suprimento, utilização de estoque de segurança ou *lead time* de

segurança. Os autores investigam as vantagens e desvantagens do estoque de segurança e *lead time* de segurança em um sistema com múltiplos produtos, com variação no suprimento e com falhas na informação de demanda. O principal benefício do estoque de segurança é a responsividade. Já o *lead time* de segurança aumenta a flexibilidade. Os autores concluem que o *lead time* de segurança é mais efetivo para lidar com variabilidade no suprimento. Por outro lado, o estoque de segurança é melhor para lidar com incertezas nas informações de demanda. Por fim, em situações com incerteza no suprimento e nas informações de demanda o *lead time* de segurança é mais eficiente.

### 2.5.3 Melhoria no pior caso

A melhoria no pior caso é um tema pouco abordado na literatura de gestão e produção. Um interessante trabalho que pode ser abordado neste tópico é o de Paté-Cornell et al. (2004) os quais explicam que se um sistema não é suficientemente robusto, uma das técnicas mais comuns é adicionar redundâncias. Os autores explicam que há uma crença de que a adição de um componente redundante reduz a probabilidade de falha pela metade. Isso é verdade somente nos casos em que as falhas dos componentes redundantes são eventos independentes, o que raramente é o caso. Os autores explicam que para a utilização de redundâncias, é necessário avaliar se os custos das mesmas são justificados pelo aumento na confiabilidade do sistema.

Se traçarmos um paralelo entre o trabalho de Paté-Cornell et al. (2004) e o presente trabalho, podemos interpretar que o componente redundante é um modo de lidar com os piores casos. No caso da manufatura, uma empresa pode ter uma máquina paralela para lidar com problemas de quebra mais sérios. Por exemplo, uma máquina gargalo, de acordo com a Teoria das Restrições (GOLDRATT, 1984), é aquele recurso que se não for cuidadosamente gerenciado limita o *throughput* da organização. Essa máquina deve ser cuidadosamente gerenciada, pois em caso de quebra vai limitar o *throughput* de todo o sistema produtivo. No momento da quebra, a empresa precisa agir rapidamente para não comprometer seu desempenho. A utilização de um recurso redundante poderia ser uma maneira de lidar com essa situação. Isso significa que em caso de quebras mais sérias do recurso gargalo, uma máquina sobressalente pode estar disponível para lidar com a carga de trabalho do recurso gargalo enquanto o mesmo é reparado.

Ao longo desta seção foram apresentados alguns trabalhos que tem o foco na realização de melhorias na média, variabilidade ou no pior caso. Foi observado que são

escassos os trabalhos que falam a respeito da estratégia de melhoria no pior caso. No entanto, ela pode ser uma alternativa interessante as estratégias de melhoria na média e na variabilidade, pois pode ser menos custosa e mais fácil de ser obtida do que as demais estratégias. Desta forma é de fundamental importância entender os casos nos quais a melhoria no pior caso deve ser utilizada.

Um exemplo que ilustra a importância da estratégia de melhoria no pior caso pode ser dado pela analogia com a fila de soldados proposta por Goldratt (2006) no livro “A meta na prática”. Goldratt (2006) explica que a primeira fileira de soldados pisa em um caminho novo, processando as matérias primas. Cada fileira de soldados continua o processo do material até a última fileira que libera os produtos acabados (o trecho de caminho pelo qual a tropa inteira passou marchando). A distância entre a primeira fileira de soldados e a última é o estoque em processo. Nessa analogia é possível ver com clareza que à medida que a tropa se movimenta, os soldados se dispersam e o oficial precisa parar a tropa e realinhá-los. Quando o exército se espalha, significa que o estoque em processo aumentou muito e a ação de parar a tropa representa perda de ganho.

A Teoria das Restrições defende que o mais importante para uma organização é fazer dinheiro por meio da exploração máxima do recurso restrição. Na analogia proposta, o recurso que limita a velocidade de deslocamento da tropa é o soldado mais lento. Para obter um melhor resultado, ou seja, diminuir o *lead time* do percurso, a atenção deve ser focada no soldado mais lento. No extremo, o soldado mais lento pode ser entendido como um pior caso, pois ao se deslocar mais lentamente que os demais, ele emperra o ritmo da tropa inteira. A estratégia proposta por Goldratt (2006) consiste em fazer com que todos os soldados caminhem no ritmo do mais lento e que os demais soldados o auxiliem carregando parte do conteúdo de sua mochila, de modo a fazer com que o mesmo se desloque mais rapidamente. Ou seja, o custo de fazer uma alteração desse tipo é pequeno comparado ao custo de efetuar uma melhoria no tempo de deslocamento médio da tropa toda ou de diminuir a variabilidade do deslocamento de cada soldado.

Na prática, esse recurso que limita a produção pode ser uma máquina mais lenta ou que possua alta utilização ou mesmo quebre com frequência muito alta. Uma maneira de lidar com esse recurso considerado o pior caso é fazer o gerenciamento adequado do mesmo, ou seja, diminuir o tempo de *setup* da mesma, evitar que essa máquina quebre ou, quando isso ocorrer repará-la rapidamente. Dessa forma, a disponibilidade desse equipamento é aumentada. Além disso, é possível diminuir a carga de produção alocada a essa máquina

destinando parte dos trabalhos a serem realizados nesse recurso para outras máquinas, aliviando ou mesmo eliminando o pior caso.

Desta forma acreditamos que a estratégia de melhoria no pior caso pode ser uma boa alternativa de melhoria e por isso deve ser mais bem explorada na literatura de gestão da produção e operações. Na seção 2.6 são apresentadas as considerações finais deste capítulo

## 2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentada a base teórica necessária para a realização deste trabalho. Inicialmente, na seção 2.2, foram apresentadas duas importantes estratégias de gestão e suas técnicas e ferramentas correlatas que realizam melhorias em variáveis do chão de fábrica e que tem relação com a redução do *lead time*. O conhecimento das principais abordagens de gestão focadas na redução do *lead time* é de importância primordial para a realização deste estudo. Em seguida na seção 2.3 foram apresentadas as variáveis que possuem efeito no *lead time* e que foram consideradas na modelagem/simulação realizada. A modelagem/simulação é apresentada nos capítulos 3, 4 e 5.

Na seção 2.4 foram apresentados os trabalhos com foco na redução do *lead time* e foram encontrados aspectos nos quais a literatura parece ser robusta, e pontos nos quais existe uma lacuna a ser explorada. Uma dessas lacunas observadas é modelar as variáveis que possuem efeito no *lead time* por meio de uma distribuição de probabilidade tornando o comportamento das variáveis mais próximo do que acontece na realidade. É exatamente esse um dos pontos chave deste trabalho.

Na seção 2.5 foram apresentados trabalhos que estudam a melhoria na média, variabilidade ou pior caso. No entanto, foi observado que nenhum estudo compara diretamente as três estratégias aqui investigadas. Além disso, ainda que de maneira indireta, apenas um trabalho aborda a estratégia de melhoria no pior caso. Desta forma, esse *gap* encontrado na análise da literatura deve ser mais bem explorado e, portanto, o aspecto central da presente tese consiste em entender as situações nas quais a melhoria no pior caso pode ser utilizada.

No capítulo 3, são apresentadas as simulações realizadas buscando investigar qual das três estratégias de melhoria obtém o melhor desempenho no que se refere ao tempo de reparo e, conseqüentemente, encontrar as situações nas quais a estratégia de melhoria no pior caso é uma boa alternativa no que se refere à redução do *lead time*.

## CAPÍTULO 3 COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE MELHORIA NO TEMPO DE REPARO

---

### 3.1. INTRODUÇÃO

O tempo médio de reparo pode ser entendido como o tempo necessário para consertar uma máquina, do momento em que ela falha até o momento em que está operando novamente (SLACK et al., 2002). O objetivo deste capítulo é estudar o efeito no *lead time* produzido por uma melhoria no tempo de reparo direcionada por três diferentes estratégias:

- i. Melhoria na média do tempo de reparo: Neste caso o investimento realizado visa diminuir o valor da média da variável a ser investigada;
- ii. Melhoria na variabilidade do tempo de reparo: Neste caso o foco da melhoria é reduzir variabilidade da variável investigada. No presente trabalho a realização de uma melhoria na variabilidade implica em reduzir o desvio padrão do tempo médio de reparo;
- iii. Melhoria no pior caso: Nesta estratégia o objetivo é a eliminação de casos extremos (piores casos), desta forma tanto a média quanto a variabilidade dos processos é alterada.

Mais especificamente, este capítulo atua no *gap* encontrado a respeito da estratégia de melhoria focada no pior caso, a qual é pouco abordada na literatura. Logo, esse capítulo investiga as situações nas quais a estratégia de melhoria focada no pior caso pode ser superior ou equivalente as estratégias de melhoria na média e na variabilidade.

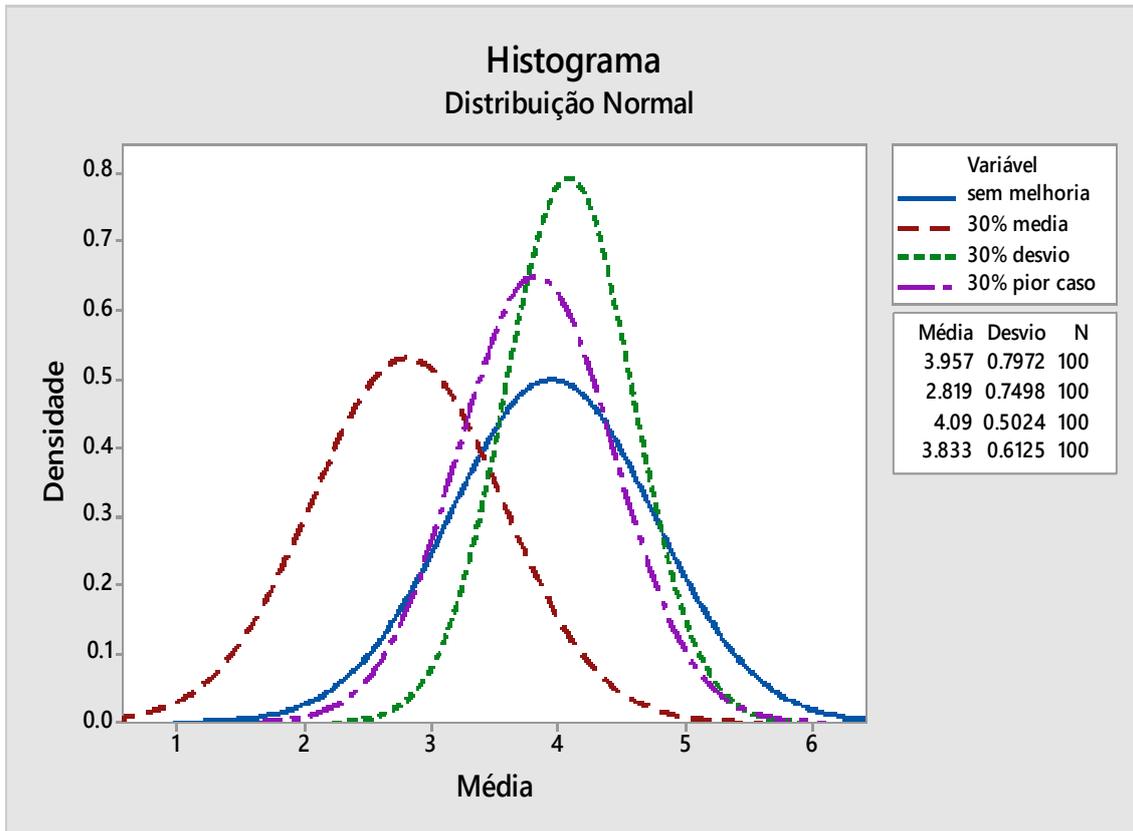
Na Figura 3.1 é apresentado um exemplo mostrando a forma como cada estratégia de melhoria é direcionada para uma das amostras analisadas neste capítulo, considerando uma estação de trabalho com um tempo de reparo de 4 horas e um coeficiente de variação de 0,2. Adicionalmente, na Figura 3.1 é apresentada a melhoria nas 3 estratégias, seguindo uma distribuição normal e é feita uma comparação entre as 3 estratégias e a situação sem melhoria.

De acordo com a Figura 3.1 é possível observar que:

- i. A estratégia focada na media move o gráfico para a esquerda, reduzindo a media de 4 horas para aproximadamente 2,8 horas.
- ii. A estratégia direcionada a melhoria na variabilidade não altera a media, mas altera o formato da curva, pois o desvio padrão é reduzido

de 0,8 para aproximadamente 0,5. Dessa forma o processo torna-se mais estável.

- iii. Por fim, é possível observar que a estratégia focada no pior caso, altera ambos, tanto a média quanto o desvio padrão do processo.



**Figura 3.1** Exemplo do efeito das três estratégias de melhoria: tempo de reparo.

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

Este capítulo é estruturado da seguinte forma: a seção 3.2 apresenta o referencial teórico deste capítulo; a seção 3.3 apresenta o modelo desenvolvido e os experimentos realizados; a seção 3.4 apresenta os resultados das simulações utilizando a distribuição normal e a seção 3.5 utilizando a distribuição lognormal; por fim, na seção 3.6 é apresentada a discussão dos resultados e são fornecidas recomendações práticas.

## 3.2 REFERENCIAL TEÓRICO

O *lead time* foi escolhido como a medida de desempenho deste estudo devido sua reconhecida importância em uma gestão efetiva da manufatura. Além disso, o *lead time* é

utilizado como medida de desempenho primária da *Time-based competition* (STALK; HOUT, 1990) e do *Quick Response Manufacturing* (SURI, 1998; SURI, 2010) e pode ser definido como o tempo típico (medido em dias corridos), desde que o cliente faz o pedido, passando pelo caminho crítico, até que pedido completo seja entregue ao cliente (ERICKSEN et al., 2007). As três estratégias investigadas neste estudo são relacionadas com a melhoria no tempo de reparo o que guarda estreita relação com modernos métodos de melhoria na manufatura como o *Total Preventive Maintenance* (FEIGENBAUN, 1986).

Entre as diversas variáveis que afetam a redução do *lead time*, Hopp e Spearman (2008) destacam seis: tempo de *setup*, tempo de reparo, tempo entre falhas, taxa de defeitos, variabilidade no tempo de processamento e variabilidade na taxa de chegadas. O foco deste capítulo é o tempo médio de reparo que é o tempo requerido para consertar o equipamento a partir do momento que ele falha até estar novamente em condições de operação.

As paradas não planejadas de máquinas são uma grande fonte de variabilidade em muitas operações na manufatura, particularmente em indústrias de alta tecnologia. Muitos estudos (HOPP; SPEARMAN, 2001; KAYTON et al., 1997) tem mostrado que a média e a variabilidade das quebras de máquinas tem um efeito significativo no desempenho. Desta forma, muitas filosofias de gestão, tais como o Seis Sigma (PANDE et al. 2000) e o *Lean Manufacturing* (MONDEN, 1986; WOMACK et al., 1992) fazem um esforço considerável no sentido de eliminar quebras não planejadas de máquinas.

Uma das abordagens mais reconhecidas direcionadas a falhas de máquinas é o *Total Productive Maintenance* (TPM), desenvolvida como uma parte do Sistema Toyota de Produção (NAKAJIMA, 1988; WILLMOTT, 1997). De acordo com Willmott (1997), o TPM é uma abordagem que abrange toda a organização com o objetivo de obter um desempenho padrão na manufatura em termos de eficiência geral dos equipamentos e processos. Muitos estudos têm focado no tempo de reparo e TPM, por exemplo, Brah e Chong (2004), Chan et al. (2005) e Moayed e Shell (2009). Nesta seção são apresentados estudos que discutem o efeito que o programa de melhoria no tempo de reparo produz no *lead time*

Schultz (2004) explica que as quebras de máquinas afetam negativamente os tempos de ciclos das estações de trabalho, pois podem causar uma explosão de estoque em processo (WIP) em uma estação de trabalho quando a taxa de chegadas é temporariamente maior que a taxa de processamento. A produção interrompida ou reduzida em uma estação de trabalho que sofre essas paradas pode resultar em falta de material para os estágios produtivos a jusante, o que pode impactar seriamente o *throughput* de uma organização. No momento

que a máquina retorna ao funcionamento normal, uma grande oscilação de *output* pode produzir uma explosão de WIP a jusante. Essa bolha de estoque em processo pode ser propagada ao longo da linha produtiva resultando em um tempo de ciclo com maiores médias e variabilidade.

Godinho Filho e Uzsoy (2009) afirmam que programas de manutenção que reduzem o tempo de reparo e aumentem o tempo médio entre falhas contribuem para a redução do *lead time* e do estoque em processo. De acordo com esses autores, este efeito é reforçado a medida que são utilizados lotes de processamento menores. Além disso, Godinho Filho e Uzsoy (2008b, 2012) explicam que em geral o programa de melhoria contínua no tempo de reparo tem um grande potencial de gerar ganhos, em relação à redução do *lead time*, se for implementado em sistemas com utilização média, ou seja, entre 65% a 85%.

Godinho Filho e Uzsoy (2012) estudam o efeito no *lead time* dos programas de redução do *setup* e do reparo para um ambiente de máquina única sob condições de incerteza. Esses autores concluem que mesmo pequenas melhorias em ambas as variáveis de forma simultânea trazem mais benefícios para a redução do *lead time* do que grandes melhorias em somente um parâmetro. Essa conclusão se torna ainda mais verdadeira levando em consideração condições de incertezas a respeito da magnitude da melhoria a ser alcançada e da quantidade de tempo que se consegue manter a melhoria.

Foi constatado que outros estudos mostram o efeito positivo que o programa de melhoria no tempo de reparo produz no *lead time* sujeito a diferentes condições, incluindo Godinho Filho e Uzsoy (2010, 2011), Godinho Filho (2012), Godinho Filho et al. (2013), Godinho Filho e Barco (2015) e Godinho Filho e Utiyama (2015).

Desta forma, a literatura mostra o efeito positivo no *lead time* quando o tempo de reparo é reduzido por meio das estratégias de melhoria na média e na variabilidade. Contudo, não há estudos direcionados a questão central deste capítulo que é analisar o efeito que as três estratégias de melhoria no tempo de reparo produzem no *lead time*. Adicionalmente, não foram encontrados trabalhos que investigam a estratégia de melhoria no pior caso, a qual é o foco deste estudo.

### **3.3 MODELAGEM E EXPERIMENTOS**

O modelo original *System Dynamics-Factory Physics* (GODINHO FILHO; UZSOY, 2009) representa um sistema de manufatura constituído por apenas uma máquina, isto é, um sistema modelado como um servidor com máquina única, a mesma situação do

presente trabalho. Nesse sistema representado no modelo, os tempos de chegada e de processamento são genéricos, o que na notação da Teoria das Filas, pode ser representado por uma fila do tipo G/G/1.

No presente trabalho foi utilizado como ambiente de simulação o *software* Maple, o qual é mais adequado para a realização das simulações pretendidas, tendo em vista seu maior potencial para modelagem matemática, bem como a possibilidade de inserção de distribuições de probabilidade para as variáveis aqui investigadas.

A seguir as equações matemáticas do modelo desenvolvido nesse trabalho são apresentadas. Essas equações são oriundas do *Factory Physics* (HOPP e SPEARMAN, 2008) e já foram utilizadas em diversos trabalhos atuais, entre eles Godinho Filho e Uzsoy (2012), Godinho Filho (2012) e Godinho Filho e Utiyama (2015). No modelo, o ambiente de chão de fábrica com uma estação de trabalho e máquina única, recebe tarefas a uma determinada taxa de chegadas ( $r_a$ ) e as processa na mesma taxa, denominada taxa de *throughput* (TH). As peças chegam à estação de trabalho em lotes com tamanho de L peças, em média, e com um tempo médio entre chegadas aqui denominado de  $t_a$ , cujo coeficiente de variabilidade é dado por  $c_a$ . A taxa média de chegadas ( $r_a$ ) é o inverso do tempo médio entre chegadas, de forma que  $r_a = 1/t_a$ . A taxa média de chegada de ordens na estação, considerando o sistema em equilíbrio, deve ser igual à demanda média para evitar a formação de filas de tarefas. Matematicamente, a taxa de chegadas,  $r_a$ , pode ser representada pela equação 3.1:

$$r_{a1} = \left( \frac{Dm}{H \cdot L} \right) \quad (3.1)$$

Dm é a demanda média anual; L é o tamanho de lote; H é o número de horas trabalhadas no ano.

A taxa de produção da estação de trabalho, Pr, advém de Hopp e Spearman (2008) e é expressa pela equação 3.2:

$$Pr = \left( \frac{1}{Te \cdot L} \right) \quad (3.2)$$

Te é o tempo de processamento efetivo global e é constituído, de acordo com Godinho Filho e Uzsoy (2008a), a partir do tempo de processamento, considerando três efeitos, a saber:

- a) efeito de paradas preemptivas (para o modelo, falha de máquinas);

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

O tempo efetivo médio global ( $T_e$ ) é calculado pela equação 3.3.

$$T_e = \left( \frac{T_{et}}{1 - tdm} \right) \quad (3.3)$$

$Tdm$  é a taxa de efeitos após a realização de melhorias em cima dessa variável. O  $T_{et}$  representa o tempo efetivo de processamento considerando paradas preemptivas e não preemptivas e é calculado pela equação 3.4.

$$T_{et} = \left( \frac{TP_1}{A} \right) + \left( \frac{tsf}{L} \right) \quad (3.4)$$

$TP$  representa o tempo de processamento,  $A$  representa a disponibilidade da estação de trabalho e é calculado pela expressão 3.5;  $tsf$  representa o tempo de *setup* após a realização de melhoria e  $L$  é o tamanho do lote de produção.

$$A = \left( \frac{mf}{mf + mr} \right) \quad (3.5)$$

A respeito da expressão 3.5, o tempo de reparo após a realização da melhoria é dado pela sigla  $mr$  e o tempo entre falhas após a realização de melhoria é dado por  $mf$ .

A utilização ( $U$ ) da estação de trabalho é dada pela razão entre taxa de chegadas ( $ra$ ) e taxa de processamento ( $Pr$ ) e é apresentada na expressão 3.6 conforme Hopp e Spearman (2013).

$$U = \frac{ra}{Pr} \quad (3.6)$$

O tempo de fila ( $TF$ ) é dado pela expressão 3.7

$$TF = \left( \frac{(T_e \cdot L \cdot UK_1 \cdot VK)}{2} \right) \quad (3.7)$$

Em que  $UK$  é o termo de utilização da equação de Kingman e é calculado pela expressão 3.8. E  $VK$  representa o termo de variabilidade da equação de Kingman e é calculado pela expressão 3.9.

$$UK = \left( \frac{U}{1-U} \right) \quad (3.8)$$

$$VK = (cvf \cdot cvf) + (cvt \cdot cvt) \quad (3.9)$$

Em que  $cvf$  representa o coeficiente de variação do tempo entre chegadas após a realização de melhorias;  $cvt$  representa o coeficiente da variação do tempo efetivo médio global e é calculado pela expressão 3.10.

$$cvt = \left( \sqrt{\frac{vteg}{(Te \cdot Te)}} \right) \quad (3.10)$$

Em que  $vteg$  é a variância do tempo efetivo médio global e é calculada pela expressão 3.11.

$$vteg = \left( \frac{vtepn}{(1 - tdm)} \right) + \left( \frac{(tdm \cdot Tet \cdot Tet)}{(1 - tdm) \cdot (1 - tdm)} \right) \quad (3.11)$$

Em que  $varsf$  é a variância no tempo de *setup* após a realização de melhoria e  $vtepn$  é a variância do tempo de processamento com paradas preemptivas e não preemptivas e é calculada pela expressão 3.12.

$$vtepn = \left( (vtesp) + \left( \frac{varsf}{(L)} \right) + \left( \left( \frac{(L-1)}{L^2} \right) \cdot (tsf \cdot tsf) \right) \right) \quad (3.12)$$

Em que  $vtesp$  é a variância do tempo efetivo considerando somente paradas preemptivas e é calculado pela expressão 3.13.

$$vtesp = \left( \left( \frac{varpf}{A \cdot A} \right) + \left( \frac{((mr \cdot mr) + (varrf)) \cdot (1 - A) \cdot (TP_1)}{(A \cdot mr)} \right) \right) \quad (3.13)$$

Em que  $varpf$  é a variância no tempo de processamento após a melhoria e  $varrf$  é a variância no tempo de reparo após a melhoria.

O *lead time* da estação de trabalho é calculado por meio da expressão 3.14.

$$LT = (TF + (Te \times L)) \quad (3.14)$$

O estoque em processo (WIP) é calculado por meio da expressão 3.15, conforme a lei de Little (LITTLE, 1961)

$$WIP = LT \cdot ra \cdot L \quad (3.15)$$

O *throughput* (taxa de saída) é calculado por meio da expressão 3.16.

$$TH = \frac{WIP}{LT \cdot L} \quad (3.16)$$

O coeficiente de variação de partidas (cvp) é calculado por meio da expressão 3.17.

$$cvp = \left( \sqrt{(U \cdot U \cdot cvt \cdot cvt + (1 - U \cdot U) \cdot cvf \cdot cvf)} \right) \quad (3.17)$$

O número de peças na fila (PF) é calculado por meio da expressão 3.18.

$$PF = (L \cdot ra) - (TH \cdot L) \quad (3.18)$$

A Figura 3.2 ilustra o modelo desenvolvido nesse trabalho. Na parte superior do modelo estão declaradas todas as variáveis e parâmetros utilizados. Os valores dos parâmetros e variáveis utilizados são apresentados na Tabela 3.1 e os mesmos advêm de estudos realizados em trabalhos anteriores, entre eles Godinho Filho e Uzsoy (2010, 2011, 2012) dentre outros, e que possuem relação com dados reais de melhorias realizadas em empresas nos Estados Unidos. Ainda na Figura 3.2 estão todas as equações oriundas do *Factory Physics* e explicadas ao longo dessa seção. Em negrito estão os comandos do programa *Maple*, utilizados na modelagem/simulação.

**TABELA 3.1** Parâmetros utilizados para simulação de melhorias no tempo médio de reparo.

<b>Variáveis e parâmetros</b>	<b>Valores</b>
Demanda média	11520 peças/ano
Tempo trabalhado	1920 horas/ano
Tempo médio entre falhas	80 horas
Tempo médio de reparo	1, 2 ou 4 horas
Tempo médio de setup	45 minutos
Taxa média de defeitos	10%
Tempo de processamento	6 minutos
Coeficiente de variação do tempo de setup	1,5
Coeficiente de variação do tempo de reparo	0,2; 0,8; 1,4
Coeficiente de variação do tempo de processamento	1,5
Coeficiente de variação de chegadas	1,5
Tamanho da amostra	100 unidades
Tamanho do lote	200 unidades
* O valor do coeficiente de variação do tempo de reparo pode ser 0,2; 0,8 ou 1,4; dependendo do nível de variabilidade investigado.	

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

```

RES := proc (si, TR, mtr, mdpr); local L, Dm, H, cc, vars, varp,
var, dpinicialreparo, mcheckmr, mvtr, mrSEMdist,
dpadpreparo, TFF, mfalhas, TS, TVTS, i, j, TMTS, TMC, TVTP,
TVTR, TMTR, TMF, TMQ, td, TP, mf, A, Tet, Pr, ra,
U, UK, Te, vtesp, vtepn, vteg, cvt, VK, TF, LT, cvp, WIP, TH,
taxp, PF, mts, tsf, mr, mp, tdm, cvc, cvf, varrf, mvtp, varpf,
mvts, varsf; L := 200; Dm := 11520; H := 1920; cc := 1.5;
vars := 1.26; varp := 0.0225; dpinicialreparo := 0.2;
TS := 0.75; TFF := 80; td := 0.1; TP := 0.1;

for j from 1 to si do;

mrSEMdist := mtr · TR; dpadpreparo := dpinicialreparo · mdpr; mr
:= Mean(Sample(Normal(mrSEMdist, dpadpreparo), 1));
mvtr := 1; varr := dpadpreparo · dpadpreparo; varrf := mvtr · varr;
mts := 1; tsf := mts · TS; mfalhas := 1; mf := TFF · mfalhas;

mp := 1; tdm := td · mp; A :=  $\left(\frac{mf}{mf + mr}\right)$ ; Tet :=  $\left(\frac{TP}{A}\right)$ 
+  $\left(\frac{tsf}{L}\right)$ ; Te :=  $\left(\frac{Tet}{1 - tdm}\right)$ ; Pr :=  $\left(\frac{1}{Te \cdot L}\right)$ ; ra
:=  $\left(\frac{Dm}{H \cdot L}\right)$ ;
U :=  $\frac{ra}{Pr}$ ; UK := ;  $\frac{U}{(1 - U)}$  mvts := 1; varsf := mvts · vars;
mvtp := 1; varpf := mvtp · varp;
vtesp :=  $\left(\frac{varpf}{A \cdot A}\right)$ 
+  $\left(\frac{((mr \cdot mr) + (varrf)) \cdot (1 - A) \cdot (TP)}{(A \cdot mr)}\right)$ ;
vtepn := (vtesp) +  $\left(\frac{varsf}{L}\right)$  +  $\left(\left(\frac{L - 1}{L^2}\right) \cdot (tsf \cdot tsf)\right)$ ;
vteg :=  $\left(\left(\frac{vtepn}{(1 - tdm)}\right) + \left(\frac{(tdm \cdot Tet \cdot Tet)}{(1 - tdm) \cdot (1 - tdm)}\right)\right)$ ; cvt
:=  $\left(\sqrt{\frac{vteg}{(Te \cdot Te)}}\right)$ ;
cvc := 1; cvf := cc · cvc; VK := (cvf · cvf) + (cvt · cvt); TF
:=  $\left(\frac{(Te \cdot L \cdot UK \cdot VK)}{2}\right)$ ;
LT := TF + (Te × L); cvp
:=  $\left(\sqrt{(U \cdot U \cdot cvt \cdot cvt + (1 - U \cdot U) \cdot cvf \cdot cvf)}\right)$ ; WIP
:= LT · ra · L;
TH :=  $\frac{WIP}{LT \cdot L}$ ; taxp := TH; PF := (L · ra) - (TH · L);
mcheckmr := evalf(mr · 1, 4); print(LT, mcheckmr);

end do ;end proc;

```

Figura 3.2 Ilustração do modelo desenvolvido neste trabalho utilizando o software Maple.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Neste capítulo os programas de melhoria focam no tempo de reparo. As melhorias realizadas podem ser de 10%, 20% ou 30% na média, variabilidade ou nos piores casos. Neste trabalho foram utilizadas as equações oriundas do *Factory Physics* e as mesmas foram modeladas no software *Maple* com o objetivo de tornar as melhorias sujeitas a uma distribuição de probabilidade. Há diversas distribuições utilizadas na literatura de gestão da produção (distribuição exponencial, normal, lognormal, Weibull etc.) e para a realização deste estudo foram escolhidas as distribuições normal e lognormal conforme explicado na seção 1.3.3.1.

Neste capítulo, foram construídos seis cenários, os quais são uma combinação dos seguintes fatores:

- i. Nível de tempo de reparo: Definido pelo nível médio do tempo de reparo. Neste capítulo foram considerados 3 níveis: baixo (1 hora), médio (2 horas) e alto (4 horas).
- ii. Nível de variabilidade do tempo de reparo: Definido pelo coeficiente de variação (CV). Foram considerados três níveis: baixo ( $CV = 0,2$ ), moderado ( $CV = 0,8$ ) e alto ( $CV = 1,4$ ).
- iii. Nível de melhoria: Definido pelo nível de melhoria aplicado na média, variabilidade ou no pior caso. Neste capítulo foram considerados três níveis de melhoria: baixo (10%), médio (20%) e alto (30%).
- iv. Distribuição de probabilidade: Definida pela distribuição de probabilidade utilizada para modelar a melhoria no tempo de reparo. Foram usadas duas distribuições: normal e lognormal.

Para efeitos de comparação entre as 3 estratégias de melhoria foi estabelecida a suposição de que o investimento para realizar uma melhoria na média, na variabilidade ou no pior caso é equivalente, ou seja, o investimento para realizar uma melhoria de 10% na média é o mesmo que para realizar tanto uma melhoria na variabilidade quanto no pior caso.

Foram realizadas 3 retiradas de amostras, com tamanho 100 para cada nível de tempo de reparo e para cada nível de coeficiente de variação (0,2; 0,8; 1,4), de modo a minimizar os riscos de tomada de decisão baseada em apenas 1 amostra. Para determinar o tamanho da amostra foram realizados testes com diferentes tamanhos (1000, 500, 100, 50, 30). Foi observado que um valor condizente com a prática seria 100, tendo em vista que valores acima disso seriam irrealistas, principalmente no que se refere a obter valores de tempo de reparo ou tempo entre falhas de uma máquina específica. Além disso, valores menores que

100 aumentam o risco de dados extremos (*outliers*) prejudicarem a análise e dessa forma o tamanho de amostra 100 foi o escolhido para a realização desta tese.

Todas as simulações foram realizadas utilizando um computador com as seguintes especificações técnicas: Intel Core i3 Duo CPU com 4GB de memória RAM. Na seção 3.4 são apresentados os resultados experimentais utilizando a distribuição normal e as comparações realizadas utilizando as técnicas estatísticas apresentadas na seção 1.3.3.2.

### **3.4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA TEMPO DE REPARO: COM DISTRIBUIÇÃO NORMAL**

Nesta seção são apresentados os resultados experimentais das simulações realizadas com o objetivo de identificar qual das três alternativas de melhoria obtêm os melhores resultados de acordo com cada nível de tempo médio de reparo e coeficiente de variação. São apresentados aqui os resultados relativos a distribuição normal e na seção 3.5 resultados para a distribuição lognormal. Esta seção é organizada em 3 subtópicos de acordo com cada cenário: no subtópico 3.4.1 é apresentado o cenário 3.1, que consiste em um tempo de reparo baixo (1 hora); o cenário 3.2, tempo de reparo médio (2 horas) é apresentado em 3.4.2; por fim o cenário 3.3, tempo de reparo alto (4 horas) é apresentado no subtópico 3.4.3.

#### **3.4.1 Tempo de reparo baixo**

No cenário 3.1 foi considerado um tempo de reparo baixo (1 hora). Para verificar qual opção de melhoria obteve o melhor resultado de acordo com o nível de melhoria e com o coeficiente de variação, foi utilizada a ANOVA, conforme explicado na seção 1.4.3.2. Nessa análise é feita a comparação entre as médias das 3 estratégias visando identificar qual obtém a maior redução no *lead time*. Além disso, a situação sem nenhuma melhoria foi comparada com as 3 estratégias para cada nível de melhoria investigado. Nesta seção é apresentado detalhadamente a técnica estatística para comparação entre melhoria de 10% na média, no desvio e no pior caso para uma das 3 amostras. Para as demais análises é apresentado apenas o resultado da comparação. A Tabela 3.2 apresenta os dados de *lead time* da primeira amostra obtidos para as 3 alternativas de melhoria e para a situação na qual não houve nenhuma melhoria realizada.

Foi utilizada a técnica ANOVA para comparação dos 4 grupos, mas antes de utilizar os resultados dessa técnica é necessário verificar se as condições para utilização da

mesma foram atendidas. É apresentada aqui a análise estatística para a amostra 1, com coeficiente de variação 0,2 e 10% de nível de melhoria.

**TABELA 3.2** Valores de *lead time* para a amostra 1

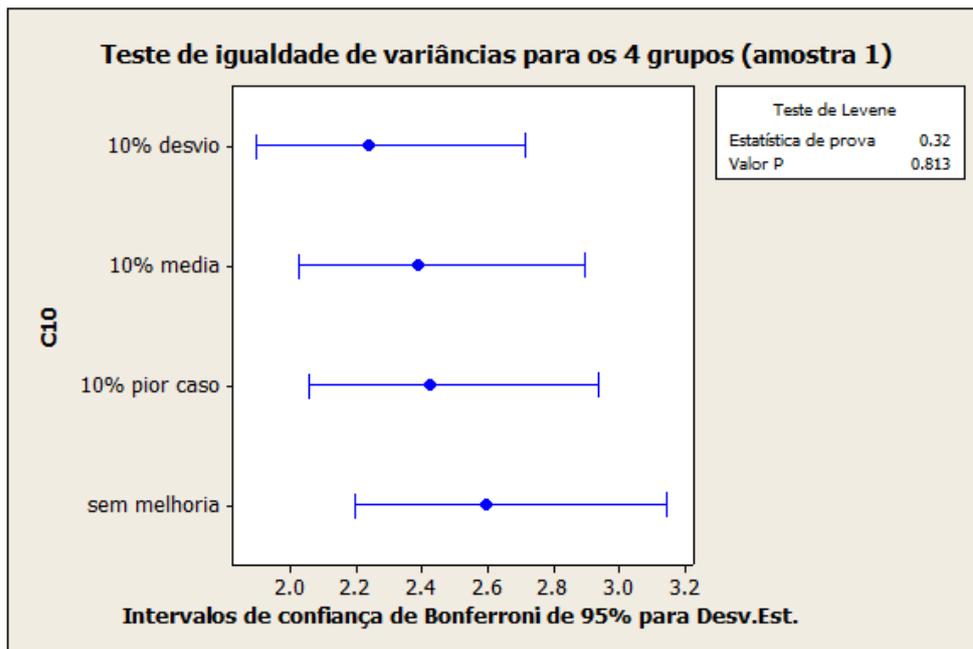
Lead time (em horas)									
Retirada	Sem melhoria	Media	Desvio	Pior caso	Retirada	Sem melhoria	Media	Desvio	Pior caso
1	160,67	163,11	165,49	162	51	162,57	161,24	162,88	163,21
2	161,9	165,66	163,21	168,05	52	163,43	156,94	165,53	160,02
3	160,92	160,59	160,09	161,98	53	163,1	164,4	160,88	160,67
4	160,88	161,8	161,34	164,82	54	158,74	159,28	161,35	163,43
5	158,44	163,22	161,63	168,05	55	157,41	161,8	163,94	162,56
6	159,13	160,06	164,02	160,51	56	161,37	158,15	159,44	163,72
7	159,56	158,88	162,59	163,63	57	162,99	157,9	164,15	166,78
8	159,92	158,95	162,08	159,21	58	165,62	160,04	156,53	159,65
9	163,08	154,87	160,77	162,7	59	162,78	161,55	160,88	160,79
10	161,78	161,37	163,64	163,02	60	159,5	161,49	158,35	163,83
11	163,93	158,69	162,76	160,25	61	161,58	160,32	162,25	164,17
12	165,08	165,41	162,13	162,89	62	158,87	160,61	158,85	159,75
13	157,16	157,84	161,94	159,77	63	158,7	160,51	157,66	159,38
14	163,78	162	162,34	163,54	64	157,68	159,3	160,68	165,06
15	164,41	160,11	164,28	159,57	65	158,87	160,92	160,95	157,93
16	163,12	163,84	165,65	162,59	66	159,23	158,93	162,27	159,22
17	162,78	160,98	157,82	160,92	67	166,57	159,95	159,29	161,59
18	161,26	159,87	160,18	160,24	68	166,82	158,07	158,74	158,42
19	160,77	161,35	163,51	161,48	69	163,62	158,85	162,04	156,95
20	164,27	158,33	162,18	165,06	70	160,79	160,79	162,23	165,19
21	161,16	163,98	162,55	161,98	71	160,57	155,45	158,72	160,99
22	158	161,98	159,83	160,24	72	162,58	159,56	165,25	161,77
23	162,98	158,61	158,41	162,61	73	167,63	159,05	162,15	162,35
24	162,78	160,91	160,4	161,56	74	160,38	157,98	160,28	162,97
25	161,8	159,69	163,86	159,13	75	163,12	157,57	158,67	161,49
26	159,57	161,98	165,98	159,38	76	161,65	158,36	162,12	163,12
27	161,37	160,62	159,54	162,7	77	159,83	155,85	163,92	159,58
28	161,67	160,99	162,9	160,71	78	163,62	161,48	159,75	163,21
29	157,99	161,76	159,48	159,58	79	162,28	161,45	158,05	165,16
30	162,27	161,18	165,72	163,23	80	160,59	162,82	160,78	162,61
31	161,1	163,44	159,13	157,94	81	164,4	158,07	164,58	162,51
32	161,37	158,44	161,67	162	82	160,52	163,66	166,9	159,95
33	163,62	159,66	158,91	160,53	83	167,74	160,88	160,96	167,55
34	163	165,31	158,76	161,45	84	162,35	162,5	161,78	164,19
35	162,9	153,98	161,14	160,4	85	161,19	161,97	165,93	159,76
36	163,2	159,41	162,13	159,76	86	161,06	159,77	160,51	161,24
37	161,06	158,42	159,65	162,27	87	159,37	159,57	162,16	164,82
38	159,02	159,57	165,64	159,4	88	159,57	157,68	162,66	165,09
39	161,55	161,27	164,79	161,87	89	165,04	162,61	161,78	160,23
40	162,39	163,62	159,65	157,84	90	164,82	158,95	160,3	160,49
41	165,52	158,52	159,91	158,85	91	162,04	164,04	159,92	157,92
42	162,39	162,06	161,87	164,84	92	158,95	157,92	157,82	167,08
43	162,59	157,43	160,68	160,89	93	158,26	166,33	160,79	160,59
44	158,62	158,68	161,17	162,68	94	166,45	158,74	159,81	159,85
45	169,23	160,49	159,53	157,12	95	156,4	158,37	164,04	161,76
46	161,88	158,87	159,36	159,77	96	159,46	157,92	158,74	159,87
47	156,55	158,44	161,88	157,17	97	164,49	157,35	163,19	160,03
48	161,58	160,81	159,04	163,86	98	161,16	157,18	161,77	165,06
49	159,12	160,4	160,6	161,18	99	160,92	157,24	162,75	159,2
50	156,94	156,56	158,58	162,25	100	165,74	162,92	162,49	162,09

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

O primeiro teste consiste em verificar se há homocedasticidade entre as variâncias, ou seja, se existe igualdade entre as variâncias. A Figura 3.3 ilustra o teste de homocedasticidade utilizando o índice de Levene, com um nível de significância de 5%, que testa duas hipóteses

$H_0$ : as variâncias dos grupos são iguais;

$H_1$ : pelo menos duas das variâncias dos grupos são diferentes.



**Figura 3.3** Teste de igualdade de variâncias para a amostra 1

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

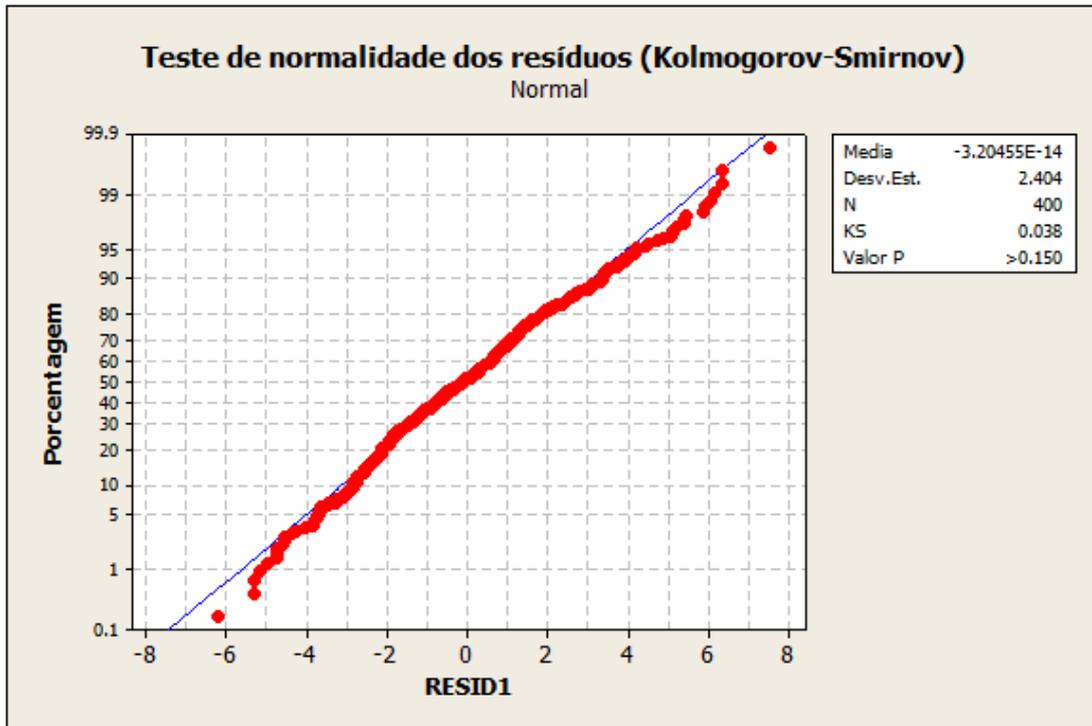
Pelo valor de de p encontrado ( $p = 0,813$ ) que é maior que 0,05 aceita-se a hipótese  $H_0$  de que as variâncias dos grupos são iguais. A próxima condição a ser atendida é a de normalidade dos resíduos. O teste utilizado aqui foi o de Kolmogorov-Smirnov, Figura 3.4, com um nível de significância de 5%, investigando duas hipóteses:

$H_0$ : os resíduos têm distribuição normal;

$H_1$ : os resíduos não têm distribuição normal.

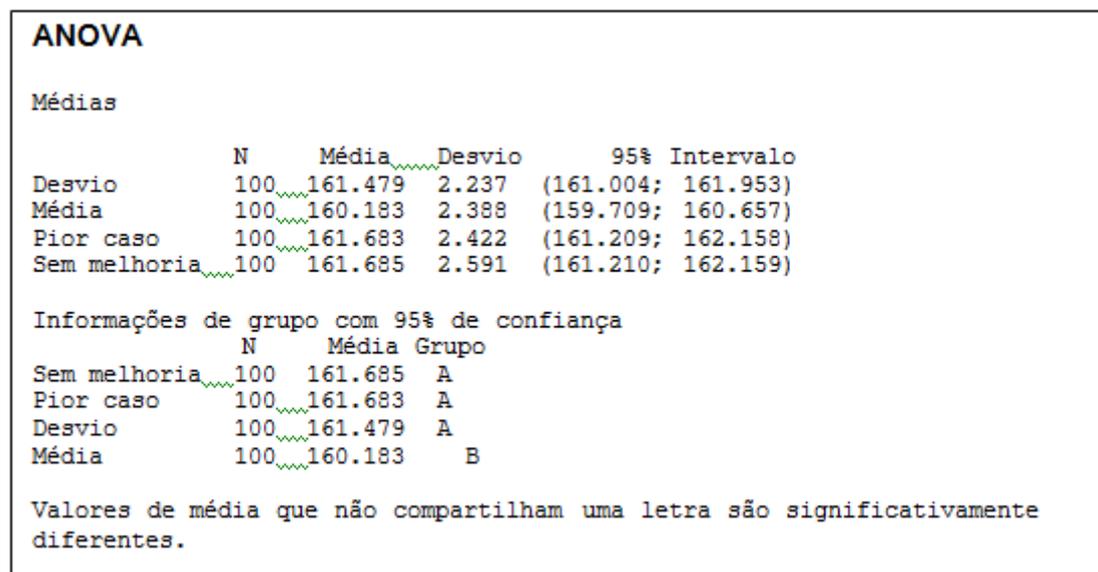
Pelo teste de normalidade de Kolmorov-Smirnov o valor de p observado foi maior que 0,15, o que é maior que 0,05, ou seja, aceita-se a hipótese  $H_0$  de que os resíduos tem distribuição normal.

Como as condições para a validade da ANOVA foram atendidas é possível analisar os dados de saída da mesma na Figura 3.5.



**Figura 3.4** Teste de Normalidade para a amostra 1

Fonte: Elaborada pelo autor.



**Figura 3.5** ANOVA para a amostra 1

Fonte: Elaborada pelo autor.

Por meio da análise ANOVA mostrada na Figura 3.5 é possível concluir:

- i. A hipótese  $H_0$  deve ser rejeitada, pois o valor de  $p$  encontrado foi 0,000, valor inferior a 0,05. Isso significa que existe diferença entre alguma das médias dos 4 grupos (média, desvio, pior caso e sem melhoria).

- ii. Ao comparar média com as outras opções de melhoria, foi encontrado que a média é melhor que o desvio, pior caso e a alternativa sem melhoria. Ao comparar as outras opções não foi encontrada evidência estatística de diferença entre as 3 estratégias.

Essa mesma análise estatística foi conduzida para todas as amostras ao longo e todo trabalho. A Tabela 3.3 apresenta os valores, em horas, de *lead time* médios obtidos para o cenário 3.1 em conjunto com o parecer estatístico e a conclusão para cada nível de melhoria.

**TABELA 3.3** Análises para tempo médio de reparo de 1 hora

Nível de coeficiente de variação	Nível de melhoria (%)	Amostras	Programa de melhoria ( <i>lead time</i> médio em horas)				Parecer estatístico	Conclusão
			Sem melhoria	Média	Desvio	Pior caso		
0,2	10	AM1	161,7	160,2	161,5	161,7	média melhor que todos	média melhor
		AM2	161,4	160,6	161,7	161,8	média melhor que desvio e pior caso	
		AM3	161,6	160,8	162,0	161,7	média melhor que desvio e sem melhoria	
	20	AM1	161,7	159,4	161,6	161,5	média melhor que todos	média melhor
		AM2	161,4	159,1	161,7	161,3	média melhor que todos	
		AM3	161,6	159,6	161,7	161,6	média melhor que todos	
	30	AM1	161,7	158,4	162,0	161,4	média melhor que todos	média melhor
		AM2	161,4	158,7	161,9	161,5	média melhor que todos	
		AM3	161,6	158,2	161,1	161,9	média melhor que todos	
0,8	10	AM1	164,8	164,3	165,8	164,6	sem diferença	sem diferença
		AM2	164,5	163,0	163,7	164,2	sem diferença	
		AM3	166,7	164,9	164,6	165,9	sem diferença	
	20	AM1	164,8	162,9	163,6	164,7	sem diferença	sem diferença
		AM2	164,5	164,7	164,7	165,1	sem diferença	
		AM3	164,9	160,9	164,3	163,5	sem diferença	
	30	AM1	164,8	162,9	163,9	164,2	sem diferença	sem diferença
		AM2	164,5	163,1	163,0	163,4	sem diferença	
		AM3	165,7	160,9	163,7	164,7	média melhor que todos	
1,4	10	AM1	172,1	172,3	172,7	171,1	sem diferença	sem diferença
		AM2	165,9	164,3	169,2	165,9	sem diferença	
		AM3	174,0	173,8	169,4	174,3	sem diferença	
	20	AM1	172,1	170,3	171,1	172,0	sem diferença	sem diferença
		AM2	165,9	166,1	163,8	167,0	apenas desvio supera o pior caso	
		AM3	169,9	164,9	165,9	167,5	sem diferença	
	30	AM1	172,1	167,3	166,7	171,0	sem diferença	sem diferença
		AM2	171,4	169,8	168,3	170,0	sem diferença	
		AM3	174,0	169,2	168,9	172,4	sem diferença	

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

As seguintes conclusões foram obtidas analisando a Tabela 3.3.

- i. No caso de uma variabilidade baixa ( $CV = 0,2$ ):
- a. Para as melhorias de 10%, 20% e 30%, a melhoria na média se sobressaiu sobre as demais. Comparando as alternativas de melhoria no desvio e pior caso não foi encontrada evidência estatística de que uma se sobressai sobre a outra.
- ii. No caso de uma variabilidade moderada ( $CV = 0,8$ ):

- a. Não houve evidência estatística de diferenças significativas para os 3 níveis de melhoria entre as 3 estratégias de melhoria e o caso sem melhoria. Apenas na amostra 3, nível de melhoria de 30%, a estratégia de melhoria na média foi superior as demais.
- iii. No caso de uma variabilidade alta ( $CV = 1,4$ ):
  - a. Não houve evidência estatística de diferenças significativas para os 3 níveis de melhoria entre as 3 estratégias de melhoria e o caso sem melhoria. Apenas na amostra 2, nível de melhoria de 20%, a estratégia de melhoria no desvio foi superior ao pior caso.

Os resultados do cenário 3.1 mostram que para situações com baixa variabilidade, investir na média é a melhor opção. A medida que a variabilidade aumenta ( $CV = 0,8$  e  $CV = 1,4$ ) o investimento na média não é necessariamente a melhor opção.

### 3.4.2 Tempo de reparo médio

No cenário 3.2 foi utilizado um tempo de reparo médio (2 horas). A Tabela 3.4 apresenta os valores, em horas, de *lead time* médios obtidos para o cenário 3.2 em conjunto com o parecer estatístico e a conclusão para cada nível de melhoria.

As seguintes conclusões foram obtidas analisando a Tabela 3.4

- i. No caso de uma variabilidade baixa ( $CV = 0,2$ ):
  - a. Para todos os níveis de melhorias testados, a melhoria na média se sobressaiu sobre as demais. Comparando as alternativas de melhoria no desvio e pior caso não foi encontrada evidência estatística de que uma se sobressai sobre a outra.
- ii. No caso de uma variabilidade moderada ( $CV = 0,8$ ):
  - a. Não houve evidência estatística de diferenças significativas para os 3 níveis de melhoria entre as 3 estratégias de melhoria e o caso sem melhoria. Apenas na amostra 3, nível de melhoria de 30%, a estratégia de melhoria na média foi superior a alternativa sem melhoria.
- iii. No caso de uma variabilidade alta ( $CV = 1,4$ ):
  - a. Para as melhorias de 10% e 20% não foi encontrada evidência estatística de diferença entre as 3 estratégias.

- b. Para a melhoria de 30%, na primeira amostra não houve diferença significativa entre as estratégias. No entanto, na amostra 3 a média e desvio superam a alternativa de melhoria no pior caso. Além disso, na amostra 2 a estratégia de melhoria no desvio superou a melhoria na média. Ou seja, para a melhoria de 30% parece haver a tendência da melhoria no desvio ser a melhor opção.

**TABELA 3.4** Análises para tempo médio de reparo de 2 horas

Nível de coeficiente de variação	Nível de melhoria (%)	Amostras	Programa de melhoria ( <i>lead time</i> médio em horas)				Parecer estatístico	Conclusão
			Sem melhoria	Média	Desvio	Pior caso		
0,2	10	AM1	178,3	174,3	178,2	177,9	média melhor que todos	média melhor
		AM2	179,1	173,6	179,2	177,6	média melhor que todos	
		AM3	178,4	174,1	178,7	178,6	média melhor que todos	
	20	AM1	178,3	170,1	178,8	177,6	média melhor que todos	média melhor
		AM2	179,1	171,2	178,8	177,9	média melhor que todos	
		AM3	178,4	171,4	177,2	177,1	média melhor que todos	
	30	AM1	178,3	168,1	177,5	176,5	média melhor que todos	média melhor
		AM2	179,1	167,3	177,7	175,8	média melhor que todos	
		AM3	178,4	168,4	177,6	176,4	média melhor que todos	
0,8	10	AM1	191,5	190,1	191,7	190,3	sem diferença	sem diferença
		AM2	190,5	189,3	189,0	189,3	sem diferença	
		AM3	194,5	192,5	191,4	195,3	sem diferença	
	20	AM1	191,5	185,5	184,8	191,3	sem diferença	sem diferença
		AM2	190,5	192,0	185,5	192,4	sem diferença	
		AM3	194,5	189,9	191,5	188,7	sem diferença	
	30	AM1	191,5	179,4	184,4	189,5	sem diferença	sem diferença
		AM2	190,5	183,0	187,0	187,4	sem diferença	
		AM3	194,5	182,1	186,6	191,5	apenas média melhor que sem melhoria	
1,4	10	AM1	223,2	212,9	226,8	218,5	sem diferença	sem diferença
		AM2	220,6	224,4	210,7	217,1	sem diferença	
		AM3	229,8	221,6	217,0	231,3	sem diferença	
	20	AM1	223,2	220,6	206,7	223,7	sem diferença	sem diferença
		AM2	220,6	213,8	212,5	224,0	sem diferença	
		AM3	229,8	226,8	216,0	217,3	sem diferença	
	30	AM1	223,2	218,7	202,9	219,1	sem diferença	desvio melhor
		AM2	220,6	222,8	200,0	216,7	apenas desvio melhor que média	
		AM3	229,8	211,2	203,2	224,9	média e desvio melhores que pior caso	

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

Os resultados do cenário 3.2 mostram que para situações com baixa variabilidade, investir na média continua sendo a melhor opção. A medida que a variabilidade aumenta (CV 0,8 e 1,4) o investimento na média não é necessariamente a melhor opção e para esse cenário, parece haver a tendência da melhoria no desvio passar a ser a melhor opção.

### 3.4.3 Tempo de reparo alto

O cenário 3.3 consiste em um tempo de reparo alto (4 horas). A Tabela 3.5 apresenta os valores, em horas, de *lead time* médios para este cenário em conjunto com o parecer estatístico e a conclusão para cada nível de melhoria.

**TABELA 3.5** Análises para tempo médio de reparo de 4 horas

Nível de coeficiente de variação	Nível de melhoria (%)	Amostras	Programa de melhoria ( <i>lead time</i> médio em horas)				Parecer estatístico	Conclusão
			Sem melhoria	Média	Desvio	Pior caso		
0,2	10	AM1	248,3	231,7	243,4	247,5	média melhor que todos	média melhor
		AM2	232,3	221,2	232,6	231,8	média melhor que todos	
		AM3	235,9	221,7	235,0	232,4	média melhor que todos	
	20	AM1	232,7	209,6	231,4	231,7	média melhor que todos	média melhor
		AM2	232,3	206,7	232,5	233,0	média melhor que todos	
		AM3	234,8	204,6	231,2	232,1	média melhor que todos	
	30	AM1	232,7	199,1	234,8	227,5	média melhor que todos	média melhor
		AM2	232,3	202,4	234,7	225,0	média melhor que todos	
		AM3	234,8	200,9	229,8	227,2	média melhor que todos	
0,8	10	AM1	296,3	292,1	274,9	289,8	sem diferença	sem diferença
		AM2	253,8	238,3	248,2	253,5	sem diferença	
		AM3	276,6	233,4	257,4	264,5	sem diferença	
	20	AM1	296,3	272,8	272,2	295,3	sem diferença	sem diferença
		AM2	292,2	300,6	286,5	298,7	sem diferença	
		AM3	308,3	292,5	285,3	284,5	sem diferença	
	30	AM1	296,3	265,0	262,2	287,4	sem diferença	sem diferença
		AM2	292,2	260,3	260,9	280,5	sem diferença	
		AM3	308,3	267,7	257,4	297,0	apenas média melhor que sem melhoria	
1,4	10	AM1	447,6	459,6	376,2	426,9	sem diferença	sem diferença
		AM2	439,4	422,5	389,0	414,7	sem diferença	
		AM3	476,4	504,0	480,8	493,3	sem diferença	
	20	AM1	430,9	439,7	413,1	503,1	apenas desvio melhor que pior caso	desvio melhor que pior caso e sem melhoria
		AM2	439,4	397,2	404,4	448,1	apenas desvio melhor que pior caso	
		AM3	476,4	428,9	405,2	419,6	apenas desvio melhor que sem melhoria	
	30	AM1	447,6	408,6	330,7	427,6	desvio melhor que todos	desvio melhor
		AM2	439,4	408,0	329,2	421,5	desvio melhor que todos	
		AM3	476,4	425,1	325,5	457,3	desvio melhor que todos	

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

As seguintes conclusões foram obtidas analisando a Tabela 3.5.

- i. No caso de uma variabilidade baixa ( $CV = 0,2$ ):
  - a. Para todos os níveis de melhoria analisados a estratégia de melhoria na média foi superior as demais.
- ii. No caso de uma variabilidade moderada ( $CV = 0,8$ ):
  - a. Não houve evidência estatística de diferenças significativas entre as 3 estratégias de melhoria.
- iii. No caso de uma variabilidade alta ( $CV = 1,4$ ):
  - a. Para a melhoria de 10%, não foi encontrada evidência estatística de diferença entre as 3 estratégias.
  - b. Para a melhoria de 20%, a melhoria no desvio foi superior a melhoria no pior caso nas amostras 1 e 2 e superior a alternativa sem melhoria na amostra 3.
  - c. Para a melhoria de 30% a alternativa focada no desvio foi superior as demais.

Os resultados do cenário 3.3 indicam que para situações com baixa variabilidade, investir na média continua sendo a melhor opção. A medida que a variabilidade aumenta ( $CV = 0,8$ ) não foram encontradas evidências estatísticas de diferenças entre as 3

estratégias. Já para a variabilidade alta ( $CV = 1,4$ ) parece haver a tendência da melhoria no desvio passar a ser a melhor opção.

Por fim, é possível resumir os resultados desta seção, utilizando a distribuição normal, os quais mostram que para todos os níveis de tempo de reparo (baixo, alto e médio), investir na média continua sendo a melhor opção para situações com baixa variabilidade ( $CV = 0,2$ ). No entanto, a medida que o tempo de reparo e o nível de variabilidade aumentam, parece ocorrer um reforço na tendência observada ao longo desta seção de que a melhoria no desvio passar a ser a melhor opção.

### **3.5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA TEMPO DE REPARO COM DISTRIBUIÇÃO LOGNORMAL**

Nesta seção são apresentados os resultados experimentais das simulações utilizando a distribuição lognormal. Os resultados são apresentados em 3 subtópicos de acordo com cada cenário: no subtópico 3.5.1 é apresentado o cenário 3.4, que consiste em um tempo de reparo baixo (1 hora); o cenário 3.5, tempo de reparo médio (2 horas) é apresentado em 3.5.2; por fim o cenário 3.6, tempo de reparo alto (4 horas) é apresentado no subtópico 3.5.3.

Foram realizadas 3 retiradas de amostras com tamanho 100 para cada nível de tempo de reparo e para cada nível de coeficiente de variação (0,2; 0,8; 1,4) assim como realizado na seção 3.3. Cada uma das amostras foi submetida as análises estatísticas apresentadas na seção 1.4.3.2.

#### **3.5.1 Tempo de reparo baixo**

O cenário 3.4 consiste em um tempo de reparo baixo (1 hora). A Tabela 3.6 apresenta os valores, em horas, de *lead time* médios em conjunto com o parecer estatístico e a conclusão para cada nível de melhoria.

As seguintes conclusões foram obtidas analisando a Tabela 3.6.

- i. No caso de uma variabilidade baixa ( $CV = 0,2$ ):
  - a. Para as melhorias de 10%, 20% e 30%, a melhoria na média se sobressaiu sobre as demais. Comparando as alternativas de melhoria no desvio e pior caso não foi encontrada evidência estatística de que uma se sobressai sobre a outra.
- ii. No caso de uma variabilidade moderada ( $CV = 0,8$ ):

- a. Para a melhoria de 10% não foi encontrada evidência estatística de diferença entre as 3 estratégias.
- b. Para a melhoria de 20% não foi encontrada evidência estatística de diferença entre as 3 estratégias para a amostra 1. Já para as amostras 2 e 3 a melhoria na média supera a no desvio. A estratégia de melhoria no pior caso foi única estratégia na qual não foi encontrada evidência estatística de que a média seja superior.
- c. Para a melhoria de 30% a melhoria na média superou as demais.
- iii. No caso de uma variabilidade alta ( $CV = 1,4$ ):
- a. Para todos os níveis de melhoria não foi encontrada evidência estatística de quem uma estratégia supere as demais. Apenas para o nível de melhoria de 30% e amostra 3, a melhoria na média foi superior ao caso sem melhoria.

**TABELA 3.6** – Análises para tempo médio de reparo de 1 hora

Nível de coeficiente de variação	Nível de melhoria (%)	Amostras	Programa de melhoria ( <i>lead time</i> médio em horas)				Parecer estatístico	Conclusão
			Sem melhoria	Média	Desvio	Pior caso		
0,2	10	AM1	161,8	160,6	162,1	161,6	média melhor que todos	média melhor
		AM2	162,1	160,3	161,2	160,7	média melhor que todos	
		AM3	161,8	160,7	161,7	161,7	média melhor que todos	
	20	AM1	161,8	159,4	161,8	161,8	média melhor que todos	média melhor
		AM2	162,1	159,7	161,6	162,0	média melhor que todos	
		AM3	161,8	159,6	161,8	161,8	média melhor que todos	
	30	AM1	161,8	158,2	161,5	161,8	média melhor que todos	média melhor
		AM2	162,1	158,3	161,6	161,6	média melhor que todos	
		AM3	161,8	158,2	161,9	161,8	média melhor que todos	
0,8	10	AM1	167,3	165,5	163,4	165,2	sem diferença	sem diferença
		AM2	163,9	162,1	162,5	163,9	sem diferença	
		AM3	165,7	163,4	163,0	163,1	sem diferença	
	20	AM1	167,3	161,6	163,3	163,6	sem diferença	média melhor
		AM2	163,9	161,4	163,9	164,5	média melhor que desvio	
		AM3	161,3	159,4	160,5	159,6	média melhor que desvio e sem melhoria	
	30	AM1	167,3	159,2	163,6	165,2	média melhor que todos	média melhor
		AM2	163,9	159,4	162,7	166,1	média melhor que todos	
		AM3	161,3	158,0	161,1	160,9	média melhor que todos	
1,4	10	AM1	172,1	172,3	171,7	171,1	sem diferença	sem diferença
		AM2	171,4	170,1	170,4	170,7	sem diferença	
		AM3	169,9	164,0	168,6	167,5	sem diferença	
	20	AM1	172,1	170,3	167,2	172,0	sem diferença	sem diferença
		AM2	165,9	166,1	164,1	167,0	sem diferença	
		AM3	174,0	173,3	171,4	170,5	sem diferença	
	30	AM1	172,1	171,0	166,8	171,0	sem diferença	sem diferença
		AM2	171,4	172,0	168,4	170,0	sem diferença	
		AM3	174,0	168,1	168,2	172,4	média melhor que sem melhoria	

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados do cenário 3.4 indicam que para situações com baixa variabilidade ( $CV = 0,2$ ), investir na média é a melhor opção, assim como observado na seção 3.3. A medida que a variabilidade aumenta ( $CV = 0,8$ ) o investimento na média continua sendo a melhor opção, entretanto aparecem alguns casos nos quais não há diferença significativa entre as 3 estratégias. Já para a variabilidade alta, não há diferença significativa entre as 3 estratégias.

### 3.5.2 Tempo de reparo médio

O cenário 3.5 consiste em um tempo de reparo médio (2 horas). A Tabela 3.7 apresenta os valores, em horas, de *lead time* médios em conjunto com o parecer estatístico e a conclusão para cada nível de melhoria.

Por meio da análise das Tabela 3.7 é possível concluir que:

- i. No caso de uma variabilidade baixa ( $CV = 0,2$ ):
  - a. Para as melhorias de 10%, 20% e 30%, a melhoria na média se sobressaiu sobre as demais. Comparando as alternativas de melhoria no desvio e pior caso não foi encontrada evidência estatística de que uma se sobressai sobre a outra para os níveis de melhoria de 10% e 20%. No entanto, para a melhoria de 30%, a alternativa de melhoria no pior caso foi melhor que a melhoria no desvio.
- ii. No caso de uma variabilidade moderada ( $CV = 0,8$ ):
  - a. Para a melhoria de 10% não foi encontrada evidência estatística de que uma das alternativas se sobressaia sobre a outra.
  - b. Para a melhoria de 20% a melhoria na média foi superior as demais em 2 das 3 amostras. Apenas na amostra 3 não foi encontrada diferença significativa entre as 3 estratégias.
  - c. Para a melhoria de 30% a estratégia de melhoria na média foi superior as demais.
- iii. No caso de uma variabilidade alta ( $CV = 1,4$ ):
  - a. Para a melhoria de 10% e 20%, não foi encontrada evidência estatística de que uma das alternativas se sobressaia sobre a outra, com exceção do nível de melhoria 20%, amostra 3, na qual a melhoria na média foi superior a melhoria no desvio.

- b. Para a melhoria de 30% não foi encontrada evidência estatística de diferença entre as estratégias em 2 das 3 amostras. No entanto, em uma das amostras a melhoria na média foi superior as demais.

**TABELA 3.7 – Análises para tempo médio de reparo de 2 horas**

Nível de coeficiente de variação	Nível de melhoria (%)	Amostras	Programa de melhoria ( <i>lead time</i> médio em horas)				Parecer estatístico	Conclusão
			Sem melhoria	Média	Desvio	Pior caso		
0,2	10	AM1	178,0	174,1	178,2	178,0	média melhor que todos	média melhor
		AM2	178,2	175,6	178,9	178,2	média melhor que todos	
		AM3	177,4	174,3	178,3	177,4	média melhor que todos	
	20	AM1	178,0	171,1	178,2	171,4	média melhor que todos	média melhor
		AM2	178,2	171,4	178,2	176,8	média melhor que todos	
		AM3	177,9	170,1	177,2	176,7	média melhor que todos	
	30	AM1	178,0	163,0	177,7	170,6	média melhor que todos, pior caso melhor que desvio e sem melhoria	média melhor que todas as abordagens; pior caso melhor que desvio e sem melhoria
		AM2	178,2	162,5	177,6	170,7	média melhor que todos, pior caso melhor que desvio e sem melhoria	
		AM3	177,4	163,1	177,5	170,8	média melhor que todos, pior caso melhor que desvio e sem melhoria	
0,8	10	AM1	198,2	180,6	181,2	178,2	sem diferença	sem diferença
		AM2	182,9	180,5	184,6	186,9	sem diferença	
		AM3	189,0	182,9	179,7	183,3	sem diferença	
	20	AM1	198,2	171,6	194,5	186,1	média melhor que todos	média melhor
		AM2	182,9	172,7	182,1	184,8	média melhor que todos	
		AM3	189,0	188,0	184,0	186,6	sem diferença	
	30	AM1	198,2	169,9	182,5	189,2	média melhor que todos	média melhor
		AM2	182,9	175,9	184,2	182,8	média melhor que todos	
		AM3	189,0	178,7	183,6	186,7	média melhor que todos	
1,4	10	AM1	222,1	207,5	262,5	192,6	sem diferença	sem diferença
		AM2	224,5	187,2	190,3	210,9	sem diferença	
		AM3	204,9	186,4	182,9	180,9	sem diferença	
	20	AM1	195,3	199,1	189,4	417,0	sem diferença	sem diferença
		AM2	222,1	185,2	232,3	296,0	sem diferença	
		AM3	164,6	161,8	166,8	165,0	média melhor que desvio	
	30	AM1	195,3	174,2	185,0	192,9	sem diferença	média melhor
		AM2	224,5	174,9	185,2	201,0	sem diferença	
		AM3	204,9	169,1	187,3	189,5	média melhor que todos	

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

Os resultados do cenário 3.5 mostram que para situações com baixa variabilidade, investir na média é a melhor opção, assim como observado na seção anterior. A medida que a variabilidade aumenta ( $CV = 0,8$  e  $CV = 1,4$ ) o investimento na média continua sendo a melhor opção, no entanto aparecem mais casos nos quais não há diferença significativa entre as 3 estratégias.

### 3.5.3 Tempo de reparo alto

O cenário 3.6 consiste em um tempo de reparo alto (4 horas). A Tabela 3.8 apresenta os valores, em horas, de *lead time* médios em conjunto com o parecer estatístico e a conclusão para cada nível de melhoria.

**TABELA 3.8** – Análises para tempo médio de reparo de 4 horas

Nível de coeficiente de variação	Nível de melhoria (%)	Amostras	Programa de melhoria ( <i>lead time</i> médio em horas)				Parecer estatístico	Conclusão
			Sem melhoria	Média	Desvio	Pior caso		
0,2	10	AM1	232,9	217,6	231,9	230,5	média melhor que todos	média melhor
		AM2	235,6	217,2	236,7	229,4	média melhor que todos	
		AM3	232,9	219,4	234,8	234,2	média melhor que todos	
	20	AM1	232,9	203,9	228,9	230,5	média melhor que todos	média melhor
		AM2	235,6	206,8	230,9	231,5	média melhor que todos	
		AM3	232,9	207,0	232,2	228,2	média melhor que todos	
	30	AM1	232,9	196,2	229,7	228,0	média melhor que todos	média melhor
		AM2	229,0	192,2	226,7	219,8	média melhor que todos	
		AM3	232,9	197,2	230,5	228,8	média melhor que todos	
0,8	10	AM1	262,5	240,2	261,8	269,7	sem diferença	sem diferença
		AM2	285,5	251,8	273,4	321,3	sem diferença	
		AM3	290,5	232,2	266,6	302,6	sem diferença	
	20	AM1	366,8	219,6	240,7	260,3	média melhor que todos	média melhor
		AM2	290,5	230,9	281,5	286,6	média melhor que desvio e pior caso	
		AM3	267,3	220,2	250,9	268,7	média melhor que desvio	
	30	AM1	262,5	239,1	241,9	260,2	média melhor que desvio	média melhor
		AM2	366,8	206,7	268,6	284,0	média melhor que todos e desvio melhor que pior caso	
		AM3	285,5	220,2	279,1	289,1	média melhor que todos	
1,4	10	AM1	247,3	600,0	539,0	508,0	sem diferença	sem diferença
		AM2	266,0	256,4	504,0	322,0	sem diferença	
		AM3	485,0	240,0	221,0	390,0	sem diferença	
	20	AM1	247,3	359,0	277,8	361,1	sem diferença	sem diferença
		AM2	266,0	239,8	344,8	446,0	média melhor que desvio	
		AM3	485,0	360,1	285,0	382,5	sem diferença	
	30	AM1	247,3	244,2	270,1	261,1	média melhor que desvio	média melhor
		AM2	266,0	206,2	264,3	293,2	média melhor que todos	
		AM3	485,0	216,4	467,0	295,2	média melhor que todos	

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

Por meio da análise da Tabela 3.8 é possível concluir que:

- i. No caso de uma variabilidade baixa ( $CV = 0,2$ ):
  - a. Para as melhorias de 10%, 20% e 30%, a melhoria na média se sobressaiu sobre as demais. Comparando as alternativas de melhoria no desvio e pior caso não foi encontrada evidência estatística de que uma se sobressai sobre a outra.
- ii. No caso de uma variabilidade moderada ( $CV = 0,8$ ):
  - a. Para a melhoria de 10% não foi encontrada evidência estatística de que uma das alternativas se sobressaia sobre a outra.

- b. Para a melhoria de 20% a melhoria na média foi superior a todas as outras estratégias.
  - c. Para a melhoria de 30% a melhoria na média foi superior a todas as outras estratégias nas amostras 2 e 3. Na amostra 1 a média superou apenas o desvio. Já na amostra 2 a estratégia focada no desvio superou a focada no pior caso.
- iii. No caso de uma variabilidade alta ( $CV = 1,4$ ):
- a. Para a melhoria de 10% não foi encontrada evidência estatística de que uma das alternativas se sobressaia sobre a outra
  - b. Para a melhoria de 20% não foi encontrada evidência estatística de que uma das alternativas se sobressaia sobre a outra, com exceção da amostra 2, na qual a média superou a melhoria no desvio.
  - c. Para a melhoria de 30%, foi encontrada evidência estatística de que a melhoria na média se sobressai sobre as demais para as amostras 2 e 3. Para a amostra 1 a melhoria na média foi superior apenas a melhoria no desvio.

Os resultados do cenário 3.6 indicam que para situações com baixa variabilidade, investir na média ainda é a melhor opção. A medida que a variabilidade aumenta ( $CV = 0,8$  e  $CV = 1,4$ ) o investimento na média continua sendo a melhor opção, no entanto continuam havendo casos nos quais não há diferença significativa entre as 3 estratégias.

Por fim, é possível resumir os resultados desta seção, utilizando a distribuição lognormal, os quais mostram que para todos os níveis de tempo de reparo (baixo, alto e médio), investir na média continua sendo a melhor opção para situações com baixa variabilidade ( $CV = 0,2$ ). A medida que a variabilidade aumenta ( $CV = 0,8$  e  $CV = 1,4$ ) o investimento na média continua sendo a melhor opção, entretanto aparecem alguns casos nos quais não há diferença significativa entre as 3 estratégias, principalmente para os casos com variabilidade alta ( $CV = 1,4$ ).

Na seção 3.6 é apresentada a discussão dos resultados e são fornecidas recomendações práticas.

### **3.6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E RECOMENDAÇÕES PARA GERENTES NA PRÁTICA**

Nesta seção são discutidos os principais resultados encontrados no presente capítulo, a fim de fornecer recomendações práticas que possam ser utilizadas em decisões do dia-a-dia de gerentes de produção que precisem escolher a melhor estratégia de realização de melhorias em variáveis do chão de fábrica.

O foco do presente capítulo é entender os casos nos quais a realização de melhoria no pior caso é uma boa opção. Para isso, além da análise estatística realizada nas seções 3.4 e 3.5, nesta seção foram calculadas as diferenças entre a melhoria na média e pior caso (média - pior caso) e desvio e pior caso (desvio - pior caso) para os dados referentes às tabelas 3.3, 3.4 e 3.5 apresentadas na seção 3.4. O objetivo dessa análise é identificar as situações nas quais a melhoria no pior caso possa ser uma estratégia interessante e alternativa às outras duas estratégias, pois em algumas situações pode ser impraticável realizar uma melhoria na média ou no desvio.

Conforme explicado na seção 1.3.3.1, tarefas simples de reparo tendem a ser semelhantes a uma distribuição normal. Já para tarefas mais complexas é mais provável que a distribuição lognormal seja a melhor distribuição para modelar a duração da tarefa. Dessa forma, a discussão e as recomendações práticas são divididas entre tarefas simples na seção 3.6.1 e tarefas complexas na seção 3.6.2. Por fim, são apresentadas as considerações finais deste capítulo na seção 3.6.3.

#### **3.6.1 Tarefas simples (distribuição normal)**

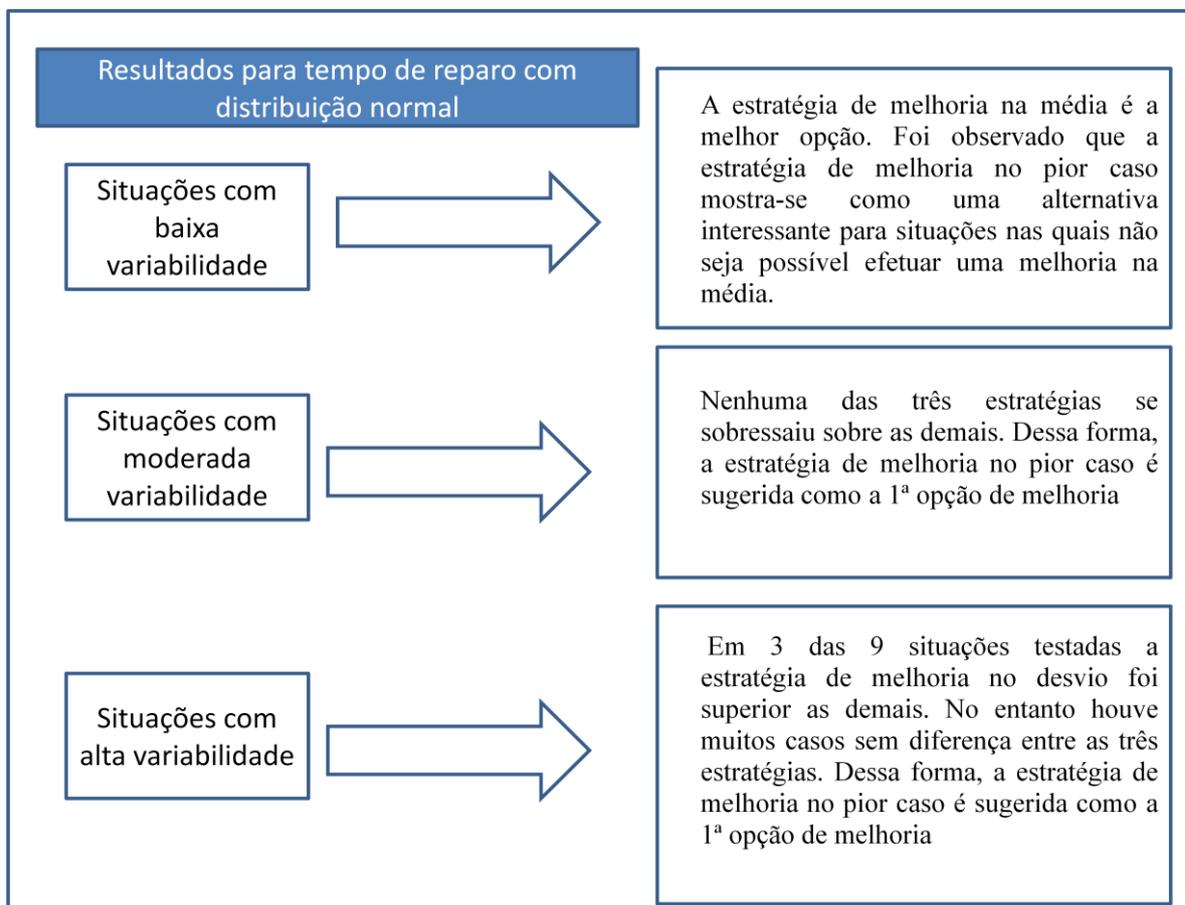
Com o objetivo de fornecer recomendações práticas aos gerentes de produção, um foco do presente trabalho é entender as situações nas quais a realização de melhoria no pior caso passa a ser uma boa opção. Dessa forma, foram efetuados os cálculos das diferenças entre a melhoria na média e pior caso (média - pior caso) e desvio e pior caso (desvio - pior caso) para os dados referentes às Tabelas 3.3, 3.4 e 3.5 apresentadas na seção 3.4. As seguintes tendências foram encontradas:

- i. No caso de uma variabilidade baixa ( $CV = 0,2$ ) a melhoria no pior caso parece ser uma alternativa interessante em situações nas quais não seja possível efetuar uma melhoria na média, pois em 21 das 27 amostras analisadas, a mesma teve um resultado superior a melhoria no desvio,

ainda que não estatisticamente significativo, isso pode indicar uma tendência.

- ii. Para uma variabilidade alta ( $CV = 1,4$ ) e tempo médio de reparo baixo (1 hora) e baixo nível de melhoria (10%) parece haver uma tendência da melhoria no pior caso ser superior a melhoria no desvio, pois em 2 das 3 amostras analisadas, a melhoria no pior caso teve um resultado superior a melhoria no desvio.

A Figura 3.6 resume os principais resultados para tarefas simples que foram modeladas utilizando a distribuição normal.



**Figura 3.6** Resumo dos resultados encontrados para tempo de reparo (tarefas simples)

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

De acordo com o a Figura 3.6 é foi constatado que na presença de baixa variabilidade, para todos os níveis de tempo de reparo, a melhor estratégia é a realização de melhoria na média. Esse resultado já era esperado, tendo em vista que valores de coeficiente de variação baixo mostram que o processo é estável. Desta forma, efetuar uma melhoria no

desvio, que já possui um valor baixo, pode ser muito difícil, custoso e não resultar em uma redução significativa no *lead time*. Por outro lado, efetuar melhorias na média do tempo de reparo aumenta a disponibilidade das máquinas o que resulta em reduções significativas de *lead time*. Adicionalmente, para esta situação, a melhoria no pior caso é sugerida como uma boa alternativa para situações nas quais não seja possível efetuar uma melhoria na média devido a ser muito difícil ou custosa. Desta forma a estratégia de melhoria no pior caso pode trazer bons resultados, pois pode reduzir tanto a média quanto a variabilidade do tempo de reparo, o que aumenta a disponibilidade das máquinas.

Por outro lado, em situações com alta variabilidade, em 3 das 9 situações testadas a estratégia de melhoria no desvio foi superior as demais. Esse é um resultado intuitivo, pois na presença de altos níveis de variabilidade, o sistema está claramente fora de controle, sendo necessário inicialmente estabilizá-lo por meio da redução da variabilidade. O resultado aqui indica a tendência da melhoria no desvio ser a melhor opção. No entanto, em 6 das 9 situações testadas não foi encontrada diferença significativa entre as estratégias. Isto pode ser explicado pela utilização de distribuições de probabilidade para modelar as variáveis, aumentando a incerteza e aproximando as simulações com a realidade. Desta forma, um bom critério para escolha da melhor estratégia a é analisar a facilidade e o custo de implantação da mesma.

Conforme explicado ao longo deste trabalho, as estratégias de melhoria na média e na variabilidade são amplamente discutidas na literatura e a focada no pior caso vem sendo negligenciada. Além disso, em importantes abordagens de gestão como o *Lean Manufacturing*, *Quick Response Manufacturing* e Teoria das Restrições focam inicialmente nos piores casos, ainda que não citem isso explicitamente. A constatação aqui é que essas modernas abordagens fazem uso da remoção ou eliminação dos piores casos para em seguida atuar na média e variabilidade dos processos. Como, por exemplo, a técnica de eliminação dos desperdícios do *Lean Manufacturing*, o *Focused Target Market Segment* do QRM ou o foco no recurso gargalo da Teoria das Restrições. Logo, a estratégia de melhoria focada no pior caso é sugerida como a 1ª opção de melhoria para todas as situações nas quais não foi encontrada diferença significativa entre as três estratégias, pois é em muitos casos simples de ser implantada e pouco custosa.

Em situações de variabilidade moderada, para todos os níveis de tempo de reparo, não há diferença entre as três estratégias. Ou seja, efetuar uma melhoria em qualquer uma das três estratégias resultou em um efeito semelhante no *lead time*. Desta forma, novamente para todas as situações nas quais não tenha sido encontrada uma diferença

significativa entre as três estratégias, a utilização da estratégia de melhoria no pior caso é sugerida como a 1ª opção de melhoria. Na seção 3.6.2 são apresentadas as discussões dos resultados para tarefas complexas.

### **3.6.2 Tarefas complexas (distribuição lognormal)**

Novamente, com o objetivo de fornecer recomendações práticas aos gerentes de produção, foram investigadas algumas tendências nas quais a melhoria no pior caso pode ser uma estratégia interessante e alternativa, pois em algumas situações pode ser impraticável realizar uma melhoria na média ou no desvio. Para isso foram calculadas as diferenças entre a melhoria na média e pior caso (média - pior caso) e desvio e pior caso (desvio - pior caso) para os dados referentes às tabelas 3.6, 3.7 e 3.8 apresentadas na seção 3.5.

Analisando as Tabelas 3.6, 3.7 e 3.8 apresentadas anteriormente na seção 3.5 é possível identificar as seguintes tendências:

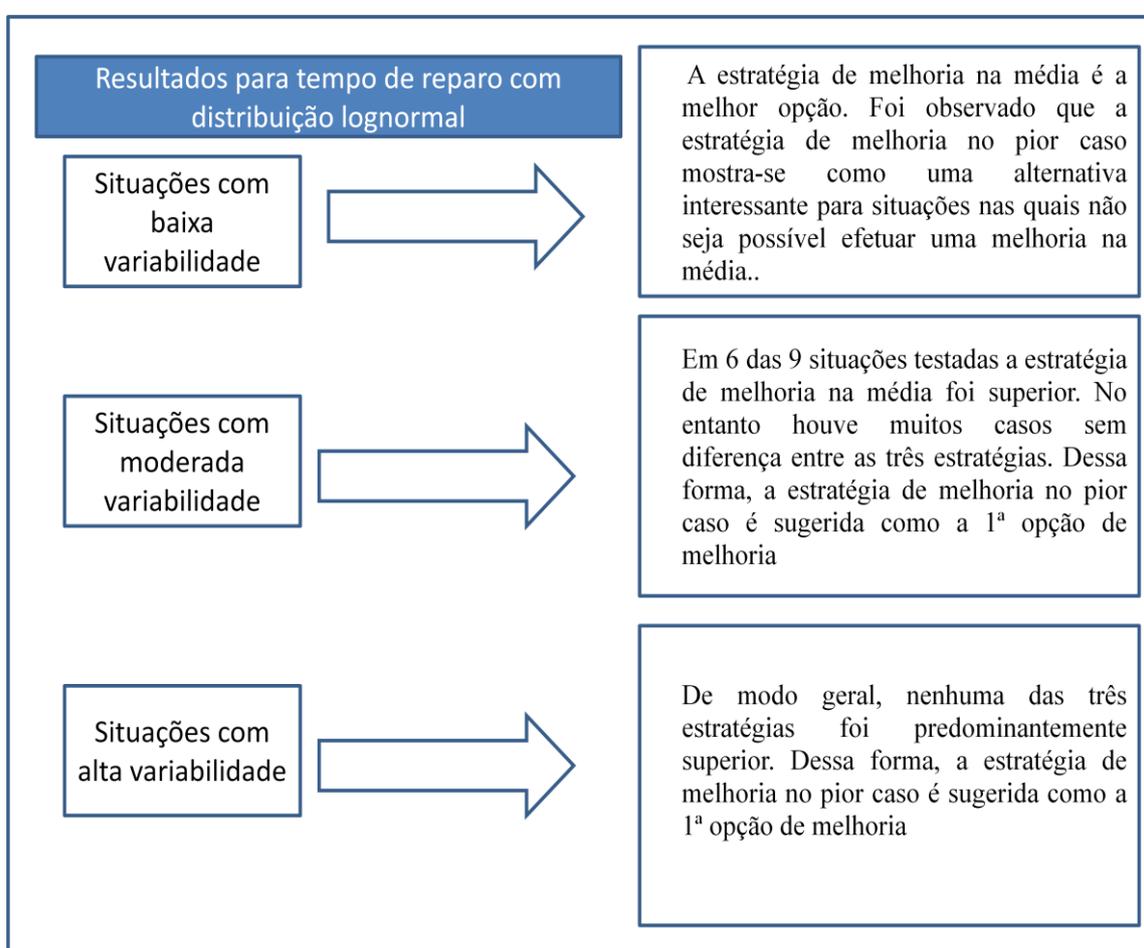
- i. No caso de uma variabilidade baixa ( $CV = 0,2$ ) a melhoria no pior caso parece ser uma alternativa interessante em situações nas quais não seja possível efetuar uma melhoria na média, pois em 20 das 27 amostras analisadas, a melhoria no pior caso teve um resultado superior a melhoria no desvio, ainda que não estatisticamente significativo, isso pode indicar uma tendência.
- ii. Para uma variabilidade alta ( $CV = 1,4$ ) e baixo nível de melhoria (10%) parece haver uma tendência da melhoria no pior caso ser superior a melhoria no desvio, pois em 6 das 9 amostras a primeira foi superior a segunda. Além disso, para melhoria de 30% e tempo médio de reparo alto (4 horas) parece haver a tendência da melhoria no pior caso ser uma boa opção, tendo em vista que em 2 das 3 amostras a mesma superou a melhoria no desvio.

A Figura 3.7 resume os principais resultados para tarefas complexas, as quais foram modeladas utilizando a distribuição lognormal.

De acordo com a Figura 3.7 é possível concluir que na presença de baixa variabilidade e, para todos os níveis de tempo de reparo, a melhor estratégia é a realização de melhoria na média. Conforme explicado na seção 3.6.1 esse é um resultado esperado e novamente a melhoria no pior caso é sugerida como uma boa alternativa para situações nas

quais não seja possível efetuar uma melhoria na média, pois foi encontrada a tendência dessa estratégia ser superior a melhoria no desvio.

Por outro lado, na presença variabilidade moderada em 6 das 9 situações testadas a estratégia de melhoria na média foi superior as demais. Desta forma em 3 situações testadas, não houve diferença entre as três estratégias. Esse resultado mostra que para tarefas complexas a estratégia de melhoria na média é a melhor opção. Já para situações nas quais não seja possível utilizá-la uma boa alternativa é a estratégia focada nos piores casos. Além disso, a estratégia focada no pior caso é sugerida como a 1ª opção de melhoria para todas as situações nas quais não foi encontrada diferença significativa entre as três estratégias, pois é em muitos casos simples de ser implantada e pouco custosa.



**Figura 3.7** Resumo dos resultados encontrados para tempo de reparo (tarefas complexas)

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

Por fim, para situações que possuam variabilidade alta, para todos os níveis de tempo de reparo, não há diferença significativa entre as três estratégias. Logo, novamente a estratégia focada no pior caso é sugerida como a 1ª opção de melhoria

### 3.6.3 Considerações finais

De modo geral, independentemente da complexidade da tarefa de reparo, para situações com alto nível de variabilidade ( $CV = 1,4$ ), o esperado era que a estratégia de melhoria no desvio fosse a melhor opção, pois a mesma atua diretamente na redução da alta variabilidade. Por outro lado, para situações com baixo nível de variabilidade ( $CV = 0,2$ ), o esperado era que a estratégia de melhoria na média fosse a melhor opção, pois a mesma não atua no sentido de reduzir a baixa variabilidade e sim busca reduzir a média do tempo de reparo. Ao longo deste capítulo foi constatado que na presença de baixa variabilidade de fato a melhoria na média é a melhor opção. Conforme a variabilidade aumenta, a estratégia de melhoria no desvio não foi a melhor opção e foi observado que a utilização de qualquer uma das três estratégias resultou em uma redução semelhante no *lead time* na maioria das situações testadas.

Uma constatação importante a respeito da estratégia focada na média é que a mesma se sobressai em 9 das 27 situações testadas para tarefas simples e em 17 das 27 amostras para tarefas complexas. Isso mostra que essa estratégia é mais indicada conforme a complexidade da tarefa aumenta.

A contribuição principal encontrada neste capítulo foi que a estratégia de melhoria no pior caso pode ser uma boa opção de realização de melhorias. Acredita-se que o foco no pior caso seja utilizado por importantes abordagens de gestão como o *Lean Manufacturing*, *Quick Response Manufacturing* e Teoria das Restrições ainda que não seja de maneira explícita. Além disso, a estratégia focada no pior caso pode ser mais fácil de ser implantada e a um menor custo.

Desta forma, ao realizar melhorias no tempo de reparo uma boa estratégia de melhoria é a focada nos piores casos, os quais muitas vezes são negligenciados e tratados como exceções. Neste capítulo é sugerido que, independentemente da complexidade da tarefa de reparo, essa estratégia deve ser utilizada como primeira opção de melhoria principalmente para situações com variabilidade moderada e alta. Já para situações com baixa variabilidade, ela pode ser utilizada como uma alternativa para situações nas quais não seja possível efetuar uma melhoria na média, a qual é a melhor opção.

No capítulo 4 é apresentado o estudo realizado para a melhoria no tempo entre falhas.

## CAPÍTULO 4 COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE MELHORIA NO TEMPO ENTRE FALHAS

---

### 4.1 INTRODUÇÃO

Chelbi e Rezg (2006) afirmam que as falhas das máquinas são uma das piores interrupções em sistemas produtivos, pois cada falha baixa a capacidade do sistema e gera altos custos operacionais. Além disso, Martins e Laugeni (2006) explicam que o tempo médio entre falhas é um parâmetro muito utilizado nos estudos de confiabilidade, que pode ser definida como a probabilidade de que um sistema (equipamento, componente, peça etc.) gere os resultados esperados, durante certo período de tempo e sob certas condições. Por essas definições, nota-se a importância do tempo médio entre falhas.

Muitas filosofias de gestão, tais como o Seis Sigma (PANDE et al. 2000) e o *Lean Manufacturing* (MONDEN, 1986; WOMACK et al., 1992) tem uma preocupação com o tempo entre falhas e buscam de eliminar quebras não planejadas de máquinas. Uma das principais formas de melhorar o tempo entre falhas é por meio de manutenção. Uma das abordagens mais reconhecidas voltadas a manutenção é o *Total Productive Maintenance* (TPM) (NAKAJIMA, 1988; WILLMOTT, 1997).

Waeyenbergh e Pintelon (2002; 2004) afirmam que o custo das operações de manutenção é o indicativo que mostra se um negócio terá sucesso ou não, especialmente com as demandas cada vez mais crescentes por produtividade, disponibilidade, qualidade, segurança, preocupações ambientais e com a diminuição das margens de lucro. A manutenção contribui significativamente para atingir os objetivos da organização, pois contribui positivamente para o desempenho geral da companhia.

Nesse contexto, o objetivo deste capítulo é estudar o efeito no *lead time* quando é realizada uma melhoria no tempo entre falhas por meio de uma das três estratégias investigadas nesse trabalho: melhoria na média, melhoria na variabilidade e melhoria nos piores casos.

Este capítulo está estruturado da seguinte forma: a seção 4.2 apresenta o referencial teórico deste capítulo; a seção 4.3 apresenta o modelo desenvolvido e os experimentos realizados; a seção 4.4 apresenta os resultados das simulações utilizando a distribuição normal e na seção 4.5 utilizando a distribuição lognormal; por fim, na seção 4.6 é apresentada a discussão dos resultados e são fornecidas recomendações práticas.

## 4.2 REFERENCIAL TEÓRICO

A confiabilidade de um sistema e sua manutenção tem uma importância crescente nas manufaturas eletrônicas e sistemas industriais em geral (SINGH et al., 2013). Para que um sistema ou dispositivo seja capaz de desempenhar suas funções sem interrupção devido a alguma falha, diversos tipos de estratégias de manutenção têm sido utilizados na engenharia da confiabilidade. As trocas planejadas são geralmente preferíveis as não programadas, pois reduzem os custos que são inerentes das falhas inesperadas (ASHA; NAIR, 2010).

Hopp e Spearman (2013) afirmam que paradas não planejadas podem inflar a média e a variabilidade dos tempos de processamento e explicam que, em muitos casos, essa é a maior causa de variabilidade. Schultz (2004) explica que as quebras de máquinas afetam negativamente os tempos de ciclo das estações de trabalho, pois podem causar uma explosão de estoque em processo (WIP) em uma estação de trabalho quando a taxa de chegadas é temporariamente maior que a taxa de processamento.

A variável de interesse deste capítulo é uma das seis variáveis principais apontadas por Hopp e Spearman (2008) e que tem efeito no *lead time*. É importante destacar a relação direta (dada pela Equação 4.1) entre o tempo médio entre falhas (mf) e o tempo médio de reparo (mr), pois eles medem a disponibilidade dos equipamentos (HOPP; SPEARMAN, 2008).

$$A = \left( \frac{mf}{mf + mr} \right) \quad (4.1)$$

Uma das abordagens mais reconhecidas direcionadas a prevenir falhas de máquinas é o *Total Productive Maintenance* (TPM), desenvolvida como uma parte do Sistema Toyota de Produção (NAKAJIMA, 1988; WILLMOTT, 1997). De acordo com Willmott (1997), o TPM é uma abordagem que abrange toda a organização com o objetivo de obter um desempenho padrão na manufatura em termos de eficiência geral dos equipamentos e processos. Muitos estudos têm focado no tempo entre falhas, por exemplo, Waeyenbergh e Pintelon (2002, 2004), Sherif (2003), Schutz (2004) e Braglia et al. (2012). Nesta seção são apresentados estudos que estudam programa de melhoria no tempo entre falhas.

Sherif (2003) explica que a manutenção consiste em todas as atividades realizadas para fazer com que o sistema retorne ao estado de operação normal. Essas atividades podem ser divididas em manutenção preventiva e corretiva. A manutenção

preventiva consiste na redução da probabilidade de falhas, já a manutenção corretiva tem como objetivo fazer com que o sistema volte a operar normalmente. Pela definição de Sherif (2003) é possível ver a relação estreita entre o tempo médio entre falhas e o tempo médio de reparo, tendo em vista que a manutenção preventiva e corretiva visa à melhoria nessas duas variáveis. Ainda a respeito da manutenção, Braglia et al. (2012) ressaltam que a avaliação da influência das condições de trabalho e/ou dos fatores ambientais no tempo médio entre falhas é um pré-requisito para o desenvolvimento de um plano de manutenção preventiva que seja efetivo.

Godinho Filho e Uzsoy (2009) explicam que programas de manutenção que reduzam o tempo de reparo e aumentam o tempo médio entre falhas contribuem para a redução do *lead time* e do estoque em processo. De acordo com esses autores, este efeito é reforçado à medida que são utilizados lotes de menores de processamento.

Por fim, Godinho et al. (2013) analisam o efeito que seis programas de melhoria em variáveis do chão de fábrica produzem no *lead time*. Os autores constataram que todos os programas de melhoria possuem efeito positivo no desempenho, no entanto, a melhoria no tempo entre falhas foi o programa que apresentou o maior efeito positivo na redução do *lead time*. Os autores explicam que o efeito positivo dos programas de melhoria depende das características específicas de cada empresa.

Na seção 4.3 é apresentada a modelagem e os experimentos realizados para atingir o objetivo deste capítulo.

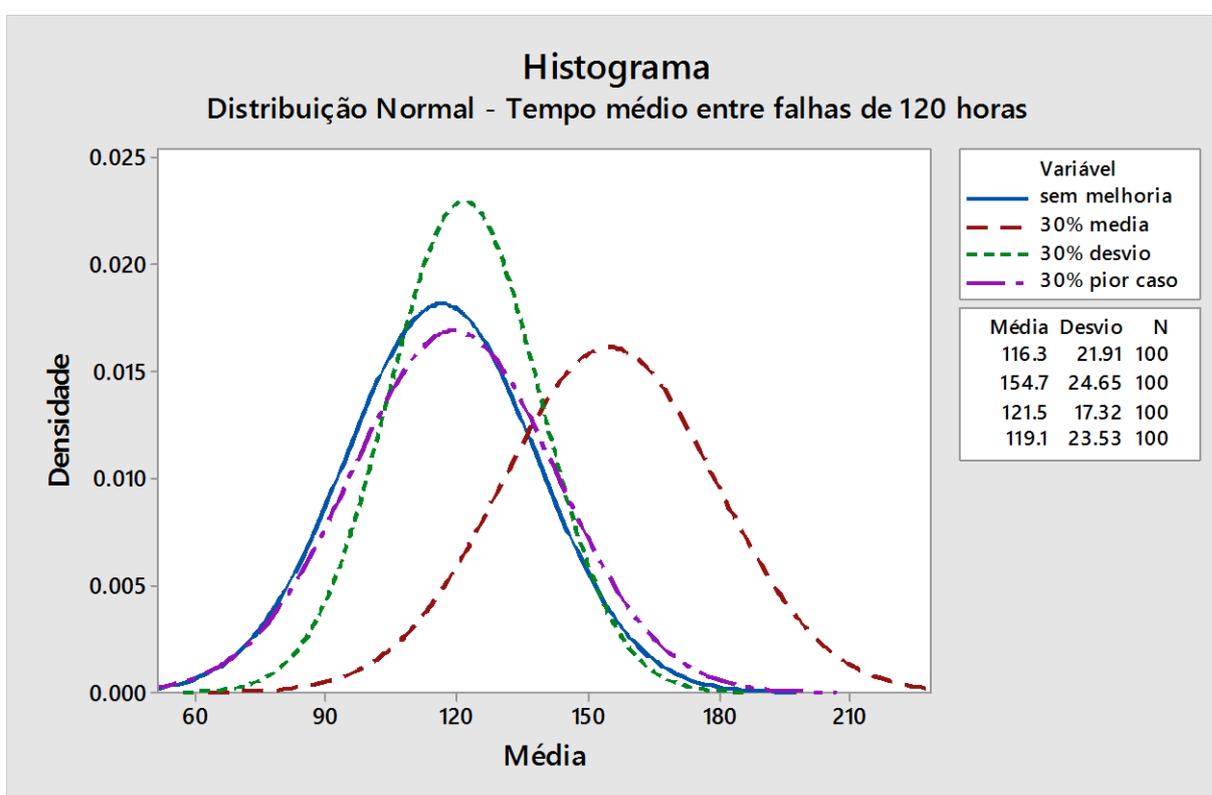
### **4.3 MODELAGEM E EXPERIMENTOS**

Neste capítulo, foram testados seis cenários, os quais são uma combinação dos seguintes fatores:

- i. Nível de tempo entre falhas: Definido pelo nível médio do tempo entre falhas. Neste capítulo foram considerados 3 níveis: baixo (80 horas), médio (100 horas) e alto (120 horas).
- ii. Nível de variabilidade do tempo entre falhas: Definido pelo coeficiente de variação (CV). Foram considerados três níveis: baixo (CV = 0,2), moderado (CV = 0,8) e alto (CV = 1,4)
- iii. Nível de melhoria: Definido pelo nível de melhoria aplicado na média, variabilidade ou no pior caso. Neste capítulo foram considerados três níveis de melhoria: baixo (10%), médio (20%) e alto (30%).

- iv. Distribuição de probabilidade: Definida pela distribuição de probabilidade utilizada para modelar a melhoria no tempo entre falhas. Foram usadas duas distribuições: normal e lognormal.

Na Figura 4.1 é apresentado um exemplo, para uma das amostras utilizadas neste capítulo, mostrando a forma como cada estratégia de melhoria é direcionada, considerando uma estação de trabalho com tempo médio entre falhas de 120 horas e um coeficiente de variação de 0,2. Adicionalmente, na Figura 4.1 é apresentada a melhoria nas 3 estratégias investigadas, seguindo uma distribuição normal e é feita uma comparação entre as 3 estratégias e a situação sem melhoria.



**Figura 4.1** Exemplo do efeito das três estratégias de melhoria: tempo entre falhas.

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

De acordo com a Figura 4.1 é possível observar que:

- i. A estratégia focada na media move o gráfico para a direita, aumentando o tempo médio entre falhas de 120 horas para aproximadamente 155 horas.

- ii. A estratégia direcionada a melhoria na variabilidade não altera a média, mas altera o formato da curva, pois o desvio padrão é reduzido de 24 para aproximadamente 17. Dessa forma o processo torna-se mais estável.
- iii. A estratégia focada no pior caso altera ambos, tanto a média quanto o desvio padrão do processo.

Os valores dos parâmetros e variáveis utilizados são apresentados na Tabela 4.1 e os mesmos advêm de estudos realizados em trabalhos anteriores, entre eles Godinho Filho e Uzsoy (2011, 2012), Godinho et al. (2013) dentre outros, e que possuem relação com dados reais de melhorias realizadas em empresas nos Estados Unidos.

**TABELA 4.1** Parâmetros utilizados para melhorias no tempo entre falhas

Variáveis e parâmetros	Valores
Demanda média	11520 peças/ano
Tempo trabalhado	1920 horas/ano
Tempo médio entre falhas	80, 100 ou 120 horas
Tempo médio de reparo	1 hora
Tempo médio de setup	45 minutos
Taxa média de defeitos	10%
Tempo de processamento	6 minutos
Coeficiente de variação do tempo de reparo	1,5
Coeficiente de variação do tempo de setup	1,5
Coeficiente de variação do tempo entre falhas	0,2; 0,8; 1,4
Coeficiente de variação do tempo de processamento	1,5
Coeficiente de variação de chegadas	1,5
Tamanho da amostra	100 unidades
Tamanho do lote	200 unidades
* O valor do coeficiente de variação do tempo entre falhas pode ser 0,2; 0,8 ou 1,4; dependendo do nível de variabilidade investigado.	

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

Todas as simulações foram realizadas utilizando um computador com as seguintes especificações técnicas: Intel Core i3 Duo CPU com 4GB de memória RAM. Na seção 4.4 são apresentados os resultados experimentais utilizando a distribuição normal e na 4.5 são apresentados os resultados utilizando a distribuição lognormal.

#### 4.4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA TEMPO ENTRE FALHAS COM DISTRIBUIÇÃO NORMAL

Nesta seção são apresentados os resultados experimentais das simulações realizadas com o objetivo de identificar qual das três alternativas de melhoria obtêm os melhores resultados de acordo com cada nível de tempo médio entre falhas e coeficiente de variação. Os resultados são apresentados em 3 subtópicos de acordo com cada cenário: no subtópico 4.4.1 é apresentado o cenário 4.1, que consiste em um tempo médio entre falhas baixo (80 horas); o cenário 4.2, tempo entre falhas médio (100 horas) é apresentado no subtópico 4.4.2; por fim o cenário 4.3, tempo entre falhas alto (120 horas) é apresentado no subtópico 4.4.3.

##### 4.4.1 Tempo entre falhas baixo

O cenário 4.1 consistiu em um tempo médio entre falhas de 80 horas. A Tabela 4.2 apresenta os valores, em horas, de *lead time* obtidos para este cenário em conjunto com o parecer estatístico e a conclusão para cada nível de melhoria.

**TABELA 4.2** Análises para tempo médio entre falhas de 80 horas.

Nível de coeficiente de variação	Nível de melhoria (%)	Amostras	Programa de melhoria ( <i>lead time</i> médio em horas)				Parecer estatístico	Conclusão
			Sem melhoria	Média	Desvio	Pior caso		
0,2	10	AM1	168,4	167,4	168,7	168,4	média melhor que todos	média melhor
		AM2	168,7	166,9	168,4	168,7	média melhor que todos	
		AM3	168,3	167,0	168,4	168,3	média melhor que todos	
	20	AM1	168,4	165,4	168,0	168,6	média melhor que todos	média melhor
		AM2	168,7	165,6	168,2	168,3	média melhor que todos	
		AM3	168,3	165,7	167,9	168,6	média melhor que todos	
	30	AM1	168,4	164,6	168,0	168,6	média melhor que todos	média melhor
		AM2	168,7	164,4	168,4	168,6	média melhor que todos	
		AM3	168,3	164,4	168,2	168,9	média melhor que todos	
0,8	10	AM1	324,4	320,8	370,6	273,3	sem diferença	sem diferença
		AM2	303,3	286,0	313,2	271,6	sem diferença	
		AM3	426,1	279,6	322,6	327,4	sem diferença	
	20	AM1	324,4	320,8	292,9	301,1	sem diferença	sem diferença
		AM2	303,3	286,0	293,1	296,0	sem diferença	
		AM3	426,1	279,6	264,7	305,2	sem diferença	
	30	AM1	324,4	226,2	276,1	229,5	sem diferença	média melhor que pior caso
		AM2	303,3	245,8	213,3	254,4	sem diferença	
		AM3	426,1	215,2	218,7	257,1	sem diferença	
1,4	10	AM1	461,5	521,9	560,4	491,9	sem diferença	sem diferença
		AM2	556,0	433,0	495,1	430,8	sem diferença	
		AM3	529,2	609,2	541,3	488,1	sem diferença	
	20	AM1	461,5	440,8	492,0	370,2	sem diferença	sem diferença
		AM2	555,9	443,0	424,0	391,0	sem diferença	
		AM3	529,2	465,5	497,3	414,7	sem diferença	
	30	AM1	461,5	434,1	431,8	315,8	sem diferença	sem diferença
		AM2	555,9	389,4	398,3	356,5	sem diferença	
		AM3	529,2	464,9	399,8	345,1	sem diferença	

Fonte: Elaborada pelo autor.

As seguintes conclusões foram obtidas analisando a Tabela 4.2.

- i. No caso de uma variabilidade baixa ( $CV = 0,2$ ):
  - a. Para as melhorias de 10%, 20% e 30%, a melhoria na média se sobressaiu sobre as demais. Comparando as alternativas de melhoria no desvio e pior caso não foi encontrada evidência estatística de que uma se sobressai sobre a outra.
- ii. No caso de variabilidade moderada ( $CV = 0,8$ ) e alta ( $CV = 1,4$ ):
  - a. Não houve evidência estatística de diferenças significativas para os 3 níveis de melhoria entre as 3 estratégias de melhoria.

Os resultados do cenário 4.1 mostram que para situações com baixa variabilidade, investir na média é a melhor opção. A medida que a variabilidade aumenta ( $CV = 0,8$  e  $CV = 1,4$ ) não foi encontrada evidência estatística de diferença significativa entre as 3 estratégias de melhoria.

#### 4.4.2 Tempo entre falhas médio

O cenário 4.2 consistiu em um tempo entre falhas de 100 horas. A Tabela 4.3 apresenta os valores, em horas, de *lead time* médios obtidos neste primeiro cenário em conjunto com o parecer estatístico e a conclusão para cada nível de melhoria.

**TABELA 4.3** Análises para tempo médio entre falhas de 100 horas.

Nível de coeficiente de variação	Nível de melhoria (%)	Amostras	Programa de melhoria ( <i>lead time</i> médio em horas)				Parecer estatístico	Conclusão
			Sem melhoria	Média	Desvio	Pior caso		
0,2	10	AM1	165,6	163,9	165,4	165,1	média melhor que todos	média melhor
		AM2	165,1	163,7	165,0	165,3	média melhor que todos	
		AM3	167,2	164,9	166,0	166,5	média melhor que todos	
	20	AM1	165,6	162,8	165,3	165,2	média melhor que todos	média melhor
		AM2	165,1	162,8	165,0	165,2	média melhor que todos	
		AM3	165,4	162,7	165,0	165,5	média melhor que todos	
	30	AM1	165,6	161,9	165,0	165,6	média melhor que todos	média melhor
		AM2	165,1	162,0	164,9	165,1	média melhor que todos	
		AM3	165,4	162,0	164,8	165,4	média melhor que todos	
0,8	10	AM1	375,9	316,2	363,8	325,2	sem diferença	sem diferença
		AM2	360,2	282,7	306,5	320,4	sem diferença	
		AM3	360,8	274,1	317,6	327,9	sem diferença	
	20	AM1	375,9	298,3	261,3	247,8	sem diferença	sem diferença
		AM2	360,2	239,1	253,1	246,4	sem diferença	
		AM3	266,7	306,3	261,6	247,5	sem diferença	
	30	AM1	375,9	218,9	285,9	276,8	média melhor que pior caso	sem diferença
		AM2	360,2	241,5	214,4	247,4	sem diferença	
		AM3	360,8	211,2	302,8	274,0	sem diferença	
1,4	10	AM1	451,2	479,4	461,1	487,9	sem diferença	sem diferença
		AM2	550,9	543,7	469,4	426,7	sem diferença	
		AM3	523,7	480,9	429,3	486,0	sem diferença	
	20	AM1	451,2	447,8	417,6	367,7	sem diferença	sem diferença
		AM2	550,9	403,5	485,2	384,5	sem diferença	
		AM3	523,7	482,6	405,8	408,9	sem diferença	
	30	AM1	451,2	331,3	420,8	308,6	média melhor que desvio	sem diferença
		AM2	550,9	401,4	406,1	351,5	sem diferença	
		AM3	523,7	431,1	345,5	339,6	sem diferença	

Fonte: Elaborada pelo autor.

As seguintes conclusões foram obtidas analisando a Tabela 4.3

- i. No caso de uma variabilidade baixa ( $CV = 0,2$ ):
  - a. Novamente a melhoria na média foi superior para todos os níveis de melhoria. Comparando as alternativas de melhoria no desvio e pior caso não foi encontrada evidência estatística de que uma se sobressai sobre a outra.
- ii. No caso de uma variabilidade moderada ( $CV = 0,8$ ):
  - a. Não houve evidência estatística de diferenças significativas para os 3 níveis de melhoria entre as 3 estratégias de melhoria. Apenas na amostra 1, nível de melhoria de 30%, a estratégia de melhoria na média foi superior a estratégia de melhoria no pior caso.
- iii. No caso de uma variabilidade alta ( $CV = 1,4$ ):
  - a. Não houve evidência estatística de diferenças significativas para os 3 níveis de melhoria entre as 3 estratégias de melhoria. Apenas na amostra 1, nível de melhoria de 30%, a estratégia de melhoria na média foi superior a estratégia de melhoria no desvio.

Os resultados do cenário 4.2 sugerem que para situações com baixa variabilidade, investir na média continua sendo a melhor opção. A medida que a variabilidade aumenta ( $CV 0,8$  e  $1,4$ ) não há diferença significativa entre as 3 estratégias de melhoria.

#### **4.4.3 Tempo entre falhas alto**

O cenário 4.3 consistiu em um tempo entre falhas de 120 horas. A Tabela 4.4 apresenta os valores, em horas, de *lead time* médios obtidos este primeiro cenário em conjunto com o parecer estatístico e a conclusão para cada nível de melhoria.

As seguintes conclusões foram obtidas analisando a tabela 4.4.

- i. No caso de uma variabilidade baixa ( $CV = 0,2$ ):
  - a. A estratégia de melhoria na média foi superior para todos os níveis de melhoria. Comparando as alternativas de melhoria no desvio e pior caso não foi encontrada evidência estatística de que uma se sobressai sobre a outra.

- ii. No caso de uma variabilidade moderada ( $CV = 0,8$ ):
- Para as melhorias de 10% e 20% não houve evidência estatística de diferenças significativas entre as 3 estratégias de melhoria, com exceção da amostra 2 e nível de melhoria de 20% na qual a estratégia de melhoria na média superou as demais.
  - Para a melhoria de 30% em 2 das 3 amostras as estratégias de melhoria no desvio e no pior caso superaram a melhoria na média. Na amostra 3 foi observado o contrário, a melhoria na média superou as demais.
- iii. No caso de uma variabilidade alta ( $CV = 1,4$ ):
- Não houve evidência estatística de diferenças significativas entre as 3 estratégias de melhoria para todos os níveis de melhoria.

**TABELA 4.4** Análises para tempo médio entre falhas de 120 horas.

Nível de coeficiente de variação	Nível de melhoria (%)	Amostras	Programa de melhoria ( <i>lead time</i> médio em horas)				Parecer estatístico	Conclusão
			Sem melhoria	Média	Desvio	Pior caso		
0,2	10	AM1	163,3	162,2	162,9	162,9	média melhor que pior caso	média melhor
		AM2	163,0	161,9	162,8	163,1	média melhor que todos	
		AM3	162,9	161,9	163,1	162,8	média melhor que desvio	
	20	AM1	163,3	160,9	163,0	163,0	média melhor que todos	média melhor
		AM2	163,0	161,1	162,8	162,8	média melhor que todos	
		AM3	162,9	161,1	162,8	163,0	média melhor que todos	
	30	AM1	163,3	160,4	162,6	163,0	média melhor que todos	média melhor
		AM2	163,0	160,3	162,7	163,0	média melhor que todos	
		AM3	162,9	160,2	162,5	163,2	média melhor que todos	
0,8	10	AM1	383,6	305,5	302,1	245,0	sem diferença	sem diferença
		AM2	319,3	317,0	271,5	267,8	sem diferença	
		AM3	376,7	328,4	284,7	284,9	sem diferença	
	20	AM1	383,6	266,7	395,5	289,1	sem diferença	sem diferença
		AM2	319,3	224,0	270,9	282,7	média melhor que todos	
		AM3	376,7	280,1	284,4	289,5	sem diferença	
	30	AM1	383,6	251,9	231,3	231,1	desvio e pior caso melhores que média	desvio e pior caso melhores que média
		AM2	319,3	242,3	227,3	230,0	desvio e pior caso melhores que média	
		AM3	376,7	208,4	226,5	264,7	média melhor que todos	
1,4	10	AM1	522,5	494,0	482,6	482,5	sem diferença	sem diferença
		AM2	599,8	417,5	475,0	424,1	sem diferença	
		AM3	635,4	432,7	487,6	484,6	sem diferença	
	20	AM1	522,5	464,6	435,9	366,1	sem diferença	sem diferença
		AM2	599,8	472,8	389,3	380,9	sem diferença	
		AM3	635,4	383,4	465,8	405,6	sem diferença	
	30	AM1	522,5	405,0	327,2	304,3	sem diferença	sem diferença
		AM2	599,8	464,6	388,4	348,6	sem diferença	
		AM3	635,4	401,2	377,5	336,3	sem diferença	

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

Os resultados do cenário 4.3 mostram que para situações com baixa variabilidade, investir na média continua sendo a melhor opção. A medida que a variabilidade aumenta ( $CV = 0,8$ ) não foram encontradas evidências estatísticas de diferenças entre as 3 estratégias, com exceção do nível de melhoria de 30%, no qual a melhoria na média parece

ser a opção menos indicada. Já para a variabilidade alta ( $CV = 1,4$ ) não foram encontradas evidências estatísticas de diferenças entre as 3 estratégias.

Por fim, é possível resumir os resultados desta seção, utilizando a distribuição normal, os quais sugerem que para todos os níveis de tempo entre falhas (baixo, alto e médio), investir na média é a melhor opção para situações com baixa variabilidade ( $CV = 0,2$ ). No entanto, à medida que o tempo entre falhas e o nível de variabilidade aumentam, foi observado que investir em qualquer uma das três estratégias é estatisticamente equivalente.

#### **4.5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA TEMPO ENTRE FALHAS COM DISTRIBUIÇÃO LOGNORMAL**

Nesta seção são apresentados os resultados experimentais das simulações para o tempo entre falhas utilizando a distribuição lognormal. Os resultados são apresentados em 3 subtópicos de acordo com cada cenário: no subtópico 4.5.1 é apresentado o cenário 4.4, que consiste em um tempo entre falhas baixo (80 horas); o cenário 4.5, tempo entre falhas médio (100 horas) é apresentado em 4.5.2; por fim o cenário 4.6, tempo entre falhas alto (120 horas) é apresentado no subtópico 4.5.3.

##### **4.5.1 Tempo entre falhas baixo**

O cenário 4.4 consiste em um tempo entre falhas baixo (80 horas). A Tabela 4.5 apresenta os valores, em horas, de *lead time* em conjunto com o parecer estatístico e a conclusão para cada nível de melhoria.

As seguintes conclusões foram obtidas analisando a Tabela 4.5.

- i. No caso de uma variabilidade baixa ( $CV = 0,2$ ):
  - a. A estratégia de melhoria na média foi superior para todos os níveis de melhoria. Comparando as alternativas de melhoria no desvio e pior caso não foi encontrada evidência estatística de que uma se sobressai sobre a outra.
- ii. No caso de uma variabilidade moderada ( $CV = 0,8$ ):
  - a. Não foi encontrada evidência estatística de diferença entre as 3 estratégias para os níveis de melhoria de 10% e 20%. Já para a melhoria de 30% a estratégia de melhoria na média foi superior a melhoria no pior caso.

- iii. No caso de uma variabilidade alta ( $CV = 1,4$ ):
- a. Para todos os níveis de melhoria não foi encontrada evidência estatística de que uma estratégia supere as demais. A única exceção foi a amostra 3 e nível de melhoria de 30%, na qual a estratégia de melhoria na média superou a melhoria no pior caso.

**TABELA 4.5** – Análises para tempo entre falhas de 80 horas

Nível de coeficiente de variação	Nível de melhoria (%)	Amostras	Programa de melhoria ( <i>lead time</i> médio em horas)				Parecer estatístico	Conclusão
			Sem melhoria	Média	Desvio	Pior caso		
0,2	10	AM1	167,6	167,0	168,3	168,6	média melhor que todos	média melhor
		AM2	168,9	166,9	168,3	168,6	média melhor que todos	
		AM3	168,4	167,1	168,4	168,2	média melhor que todos	
	20	AM1	167,6	165,7	168,3	168,5	média melhor que todos	média melhor
		AM2	168,9	165,8	168,3	168,2	média melhor que todos	
		AM3	168,4	165,1	168,3	168,7	média melhor que todos	
	30	AM1	167,6	164,8	168,4	168,7	média melhor que todos	média melhor
		AM2	168,9	164,3	167,9	168,5	média melhor que todos	
		AM3	168,4	164,8	168,4	168,5	média melhor que todos	
0,8	10	AM1	177,8	176,4	176,6	181,5	sem diferença	sem diferença
		AM2	179,0	176,8	178,0	181,1	sem diferença	
		AM3	183,1	176,0	178,1	180,4	sem diferença	
	20	AM1	177,8	173,3	176,7	179,6	sem diferença	sem diferença
		AM2	179,0	174,5	177,5	178,0	sem diferença	
		AM3	183,1	174,8	173,2	177,5	sem diferença	
	30	AM1	177,8	175,6	174,0	179,1	sem diferença	média melhor que pior caso
		AM2	179,0	171,0	171,8	177,4	média melhor que pior caso	
		AM3	183,1	169,6	173,7	179,8	média melhor que pior caso	
1,4	10	AM1	210,1	226,7	185,5	210,4	sem diferença	sem diferença
		AM2	198,3	203,3	193,6	205,9	sem diferença	
		AM3	215,0	217,4	201,6	219,4	sem diferença	
	20	AM1	210,1	190,1	191,7	226,7	sem diferença	sem diferença
		AM2	198,3	199,4	185,2	209,7	sem diferença	
		AM3	215,0	195,4	200,4	248,0	sem diferença	
	30	AM1	210,1	195,5	182,1	217,8	sem diferença	sem diferença
		AM2	198,3	189,7	202,2	199,1	sem diferença	
		AM3	215,0	181,4	184,5	230,5	média melhor que pior caso	

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

Os resultados do cenário 4.4 mostram que para situações com baixa variabilidade ( $CV = 0,2$ ), investir na média é a melhor opção, assim como observado na seção. A medida que a variabilidade aumenta ( $CV = 0,8$ ) não há diferença significativa entre as três estratégias com exceção do nível de melhoria de 30% no qual o investimento na média superou a melhoria no pior caso. Já para a variabilidade alta, não há diferenças significativas entre as três estratégias.

#### 4.5.2 Tempo entre falhas médio

O cenário 4.5 consiste em um tempo entre falhas médio (100 horas). A Tabela 4.6 apresenta os valores, em horas, de *lead time* médios em conjunto com o parecer estatístico e a conclusão para cada nível de melhoria.

**TABELA 4.6** – Análises para tempo entre falhas de 100 horas

Nível de coeficiente de variação	Nível de melhoria (%)	Amostras	Programa de melhoria ( <i>lead time</i> médio em horas)				Parecer estatístico	Conclusão
			Sem melhoria	Média	Desvio	Pior caso		
0,2	10	AM1	165,3	164,4	165,0	165,1	sem diferença	média melhor
		AM2	165,1	163,9	165,1	165,3	média melhor que todos	
		AM3	165,0	163,8	165,0	165,0	média melhor que todos	
	20	AM1	165,3	163,1	164,9	165,1	média melhor que todos	média melhor
		AM2	165,1	162,9	164,7	165,0	média melhor que todos	
		AM3	165,0	163,2	164,8	165,1	média melhor que todos	
	30	AM1	165,3	162,1	165,1	165,1	média melhor que todos	média melhor
		AM2	165,1	162,4	165,0	165,0	média melhor que todos	
		AM3	165,0	162,0	164,8	165,3	média melhor que todos	
0,8	10	AM1	171,6	171,0	171,3	172,1	sem diferença	sem diferença
		AM2	176,5	170,9	174,3	173,5	sem diferença	
		AM3	173,0	171,3	171,8	171,9	sem diferença	
	20	AM1	171,6	169,8	167,1	173,2	desvio melhor que pior caso	sem diferença
		AM2	176,5	169,2	170,1	171,8	sem diferença	
		AM3	173,0	170,5	170,4	174,2	sem diferença	
	30	AM1	171,6	167,2	168,3	173,2	média melhor que pior caso	média melhor que pior caso
		AM2	176,5	166,5	169,5	173,3	média melhor que todos	
		AM3	173,0	171,7	168,8	174,7	sem diferença	
1,4	10	AM1	202,5	222,9	184,9	183,2	sem diferença	sem diferença
		AM2	189,0	188,8	194,2	184,0	sem diferença	
		AM3	200,1	189,6	177,8	179,7	sem diferença	
	20	AM1	202,5	185,6	188,6	204,1	sem diferença	sem diferença
		AM2	189,0	175,8	178,4	190,3	sem diferença	
		AM3	200,1	183,3	183,4	205,5	sem diferença	
	30	AM1	202,5	186,7	183,2	195,7	sem diferença	sem diferença
		AM2	189,0	177,7	184,0	192,4	média melhor que pior caso	
		AM3	200,1	224,5	179,7	197,7	sem diferença	

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

Por meio da análise das Tabela 4.6 é possível concluir que:

- i. No caso de uma variabilidade baixa ( $CV = 0,2$ ):
  - a. A estratégia de melhoria na média foi superior para todos os níveis de melhoria. Comparando as alternativas de melhoria no desvio e pior caso não foi encontrada evidência estatística de que uma se sobressai sobre a outra.
- ii. No caso de uma variabilidade moderada ( $CV = 0,8$ ):
  - a. Para a melhoria de 10% não foi encontrada evidência estatística de que uma das alternativas se sobressaia sobre a outra.
  - b. Para as melhorias de 20% não foi encontrada evidência estatística de que uma das alternativas se sobressaia sobre a

outra em 2 das 3 amostras. Em uma das amostras a melhoria no desvio superou a melhoria no pior caso.

- c. Para a melhoria de 30% a melhoria na média foi superior a melhoria no pior caso em 2 das 3 amostras.
- iii. No caso de uma variabilidade alta ( $CV = 1,4$ ):
  - b. Para todos os níveis de melhoria não foi encontrada evidência estatística de que uma das alternativas se sobressaia sobre a outra. A única exceção foi a amostra 2 e nível de melhoria de 20%, na qual a estratégia de melhoria na média superou a melhoria no pior caso.

Os resultados do cenário 4.5 indicam que para situações com baixa variabilidade, investir na média é a melhor opção. A medida que a variabilidade aumenta ( $CV = 0,8$  e  $CV = 1,4$ ) não há diferença significativa entre as três estratégias de melhoria.

#### 4.5.3 Tempo entre falhas alto

O cenário 4.6 consiste em um tempo entre falhas alto (120 horas). A Tabela 4.7 apresenta os valores, em horas, de *lead time* médios em conjunto com o parecer estatístico e a conclusão para cada nível de melhoria.

Por meio da análise da Tabela 4.7 é possível concluir que:

- i. No caso de uma variabilidade baixa ( $CV = 0,2$ ):
  - a. A estratégia de melhoria na média foi superior para todos os níveis de melhoria. Comparando as alternativas de melhoria no desvio e pior caso não foi encontrada evidência estatística de que uma se sobressai sobre a outra.
- ii. No caso de uma variabilidade moderada ( $CV = 0,8$ ):
  - a. Para a melhoria de 10% não foi encontrada evidência estatística de que uma das alternativas se sobressaia sobre a outra.
  - b. Para a melhoria de 20% não foi encontrada evidência estatística de que uma das alternativas se sobressaia sobre a outra em 2 das 3 amostras, no entanto em uma amostra a melhoria na média foi superior as demais estratégias.

- c. Para as melhoria de 30% não foi encontrada evidência estatística de que uma das alternativas se sobressaia sobre a outra, com exceção de 1 das 3 amostras, na qual a melhoria na média superou a estratégia focada nos piores casos.
- iii. No caso de uma variabilidade alta (CV = 1,4):
- a. Para a melhoria de 10% e 20% não foi encontrada evidência estatística de que uma das alternativas se sobressaia sobre a outra
- b. Para as melhoria de 30% em 2 das 3 amostras a melhoria no desvio foi superior a estratégia focada nos piores casos, além disso em uma das amostras a melhoria na média também superou a melhoria no pior caso.

**TABELA 4.7** – Análises para tempo entre falhas de 120 horas

Nível de coeficiente de variação	Nível de melhoria (%)	Amostras	Programa de melhoria ( <i>lead time</i> médio em horas)				Parecer estatístico	Conclusão
			Sem melhoria	Média	Desvio	Pior caso		
0,2	10	AM1	162,9	162,1	162,7	162,9	média melhor que pior caso	média melhor que pior caso
		AM2	162,9	161,7	162,7	162,8	média melhor que todos	
		AM3	162,8	162,1	162,7	162,9	sem diferença	
	20	AM1	162,9	161,0	162,8	163,0	média melhor que todos	média melhor
		AM2	162,9	161,3	162,4	162,9	média melhor que todos	
		AM3	167,8	161,2	162,6	163,1	média melhor que todos	
	30	AM1	162,9	160,3	162,9	163,1	média melhor que todos	média melhor
		AM2	162,9	160,2	162,8	162,8	média melhor que todos	
		AM3	168,5	164,4	166,9	166,8	média melhor que todos	
0,8	10	AM1	168,3	167,7	168,1	168,6	sem diferença	sem diferença
		AM2	172,8	167,6	170,9	169,8	sem diferença	
		AM3	168,2	166,8	168,7	168,5	sem diferença	
	20	AM1	168,3	166,1	166,2	169,5	sem diferença	sem diferença
		AM2	172,8	168,3	166,5	168,4	sem diferença	
		AM3	168,2	164,7	168,2	170,3	média melhor que todos	
	30	AM1	168,3	166,4	164,5	169,5	sem diferença	sem diferença
		AM2	172,8	165,0	165,9	169,6	média melhor que pior caso	
		AM3	168,2	167,1	165,8	170,5	sem diferença	
1,4	10	AM1	187,1	186,1	182,9	182,9	sem diferença	sem diferença
		AM2	176,1	185,0	191,2	186,9	sem diferença	
		AM3	191,5	187,0	176,3	181,7	sem diferença	
	20	AM1	187,1	190,3	179,6	184,7	sem diferença	sem diferença
		AM2	176,1	178,1	178,1	188,3	sem diferença	
		AM3	191,5	177,5	173,7	196,9	sem diferença	
	30	AM1	187,1	173,7	170,7	188,5	média e desvio melhores que pior caso	desvio melhor que pior caso
		AM2	176,1	179,1	173,4	193,7	desvio melhor que pior caso	
		AM3	191,5	179,4	172,9	190,3	sem diferença	

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

Os resultados do cenário 4.6 sugerem que para situações com baixa variabilidade, investir na média ainda é a melhor opção. À medida que a variabilidade aumenta (CV = 0,8 e CV = 1,4) não há diferença significativa entre as três estratégias de melhoria.

Por fim, é possível resumir os resultados desta seção, utilizando a distribuição lognormal, os quais mostram que para todos os níveis de tempo entre falhas (baixo, alto e médio), investir na média é a melhor opção para situações com baixa variabilidade ( $CV = 0,2$ ). A medida que a variabilidade aumenta ( $CV = 0,8$  e  $CV = 1,4$ ) não há diferença significativa entre as três estratégias de melhoria.

Na seção 4.6 é apresentada uma síntese dos resultados utilizando as duas distribuições de probabilidade, normal e lognormal, e são sugeridas algumas recomendações práticas para os gerentes de produção.

## **4.6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E RECOMENDAÇÕES PARA GERENTES NA PRÁTICA**

Os principais resultados encontrados no presente capítulo foram sintetizados a fim de recomendar práticas que possam ser utilizadas em decisões do dia-a-dia de gerentes de produção que precisem escolher a melhor maneira de realizar melhorias em variáveis do chão de fábrica no que se refere ao tempo entre falhas. O foco do presente capítulo é entender os casos nos quais a estratégia de realização de melhoria no pior caso é uma boa opção. Para isso, além da análise estatística realizada nas seções 4.4 e 4.5, nesta seção foram calculadas as diferenças entre a melhoria na média e pior caso (média - pior caso) e desvio e pior caso (desvio - pior caso) para os dados referentes às tabelas 4.2, 4.3 e 4.4 apresentadas na seção 4.4. O objetivo dessa análise é encontrar indícios de que a melhoria no pior caso possa ser uma estratégia interessante e alternativa as outras duas estratégias, pois em algumas situações pode ser impraticável realizar uma melhoria na média ou no desvio.

Esta seção é organizada da seguinte forma: no tópico 4.6.1 é feita a discussão para tarefas simples; na seção 4.6.2 é apresentada a discussão para tarefas complexas; na seção 4.6.3 são apresentadas as considerações finais deste capítulo. Além disso, inicialmente são mostrados os cálculos das tendências e em seguida é apresentada uma síntese com os resultados encontrados ao longo deste capítulo.

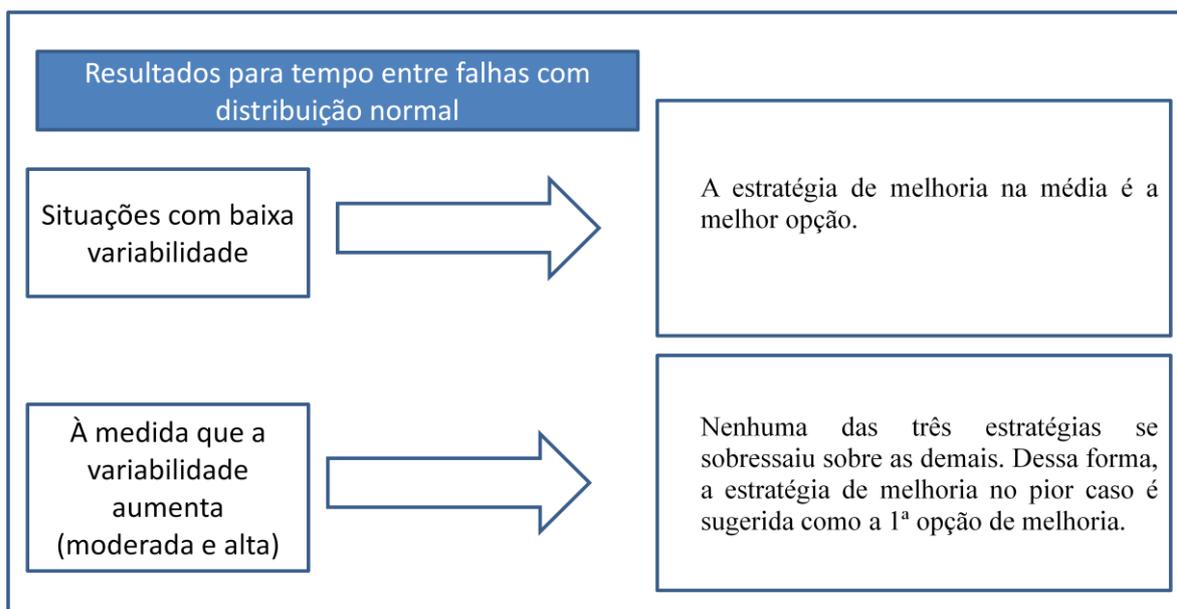
### **4.6.1 Tarefas simples (distribuição normal)**

O cálculo das diferenças entre a melhoria na média e pior caso (média - pior caso) e desvio e pior caso (desvio - pior caso) para os dados referentes às Tabelas 4.2, 4.3 e 4.4 apresentadas na seção 4.4 mostra as seguintes tendências:

- i. No caso de uma variabilidade moderada ( $CV = 0,8$ ):
  - a. Para tempo entre falhas baixo (80 horas) e nível de melhoria de 10% a melhoria no pior caso pode ser uma alternativa interessante, tendo em vista que a mesma foi superior as estratégias de melhoria na média e desvio em 2 das 3 amostras.
  - b. Para tempo entre falhas médio (100 horas) e nível de melhoria de 20% a melhoria no pior caso também pode ser uma alternativa interessante, pois a mesma foi superior a estratégia de melhoria no desvio nas 3 amostras analisadas e superou a estratégia de melhoria na média em 2 das 3 amostras. Além disso para um nível de melhoria de 30% e tempo entre falhas de 100 horas a melhoria no pior caso superou a melhoria no desvio em 2 das 3 amostras.
  - c. Para tempo entre falhas alto (120 horas) e nível de melhoria de 10% a melhoria no pior caso parece ser uma alternativa interessante, pois a mesma foi superior a estratégia de melhoria na média nas 3 amostras analisadas e superou a estratégia de melhoria no desvio em 2 das 3 amostras.
- ii. No caso de uma variabilidade alta ( $CV = 1,4$ ) a melhoria no pior caso parece ser uma alternativa interessante, tendo em vista que em 20 das 27 amostras analisadas ela teve um resultado superior as melhorias na média e no desvio, ainda que não estatisticamente significativo, isso pode indicar uma tendência.

A Figura 4.2 resume os principais resultados para tarefas simples, as quais foram modeladas utilizando a distribuição normal.

De acordo com o a Figura 4.2 é possível observar que na presença de baixa variabilidade, para todos os níveis de tempo entre falhas, a melhor estratégia é a realização de melhoria na média. Esse resultado já era esperado, tendo em vista que para um sistema no qual a máquina falhe com uma frequência muito alta, mas de maneira previsível, atuar na média é a melhor opção. Valores de coeficiente de variação baixo mostram que o processo está sob controle fazendo com que a redução do valor da variabilidade seja difícil e custosa.



**Figura 4.2** Resumo dos resultados encontrados para tempo entre falhas (tarefas simples)

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

Na presença de variabilidade moderada e alta, para todos os níveis de tempo entre falhas, não há diferença entre as três estratégias. Para essas situações efetuar uma melhoria em qualquer uma das três estratégias resultou em um efeito semelhante no *lead time*. Desta forma, novamente para todas as situações nas quais não tenha sido encontrada uma diferença significativa entre as três estratégias, a utilização da estratégia de melhoria no pior caso é sugerida como a 1ª opção de melhoria, pois a mesma é mais fácil de ser obtida e tem um baixo custo de implementação.

Na seção 4.6.2 são apresentadas as discussões dos resultados para tarefas complexas.

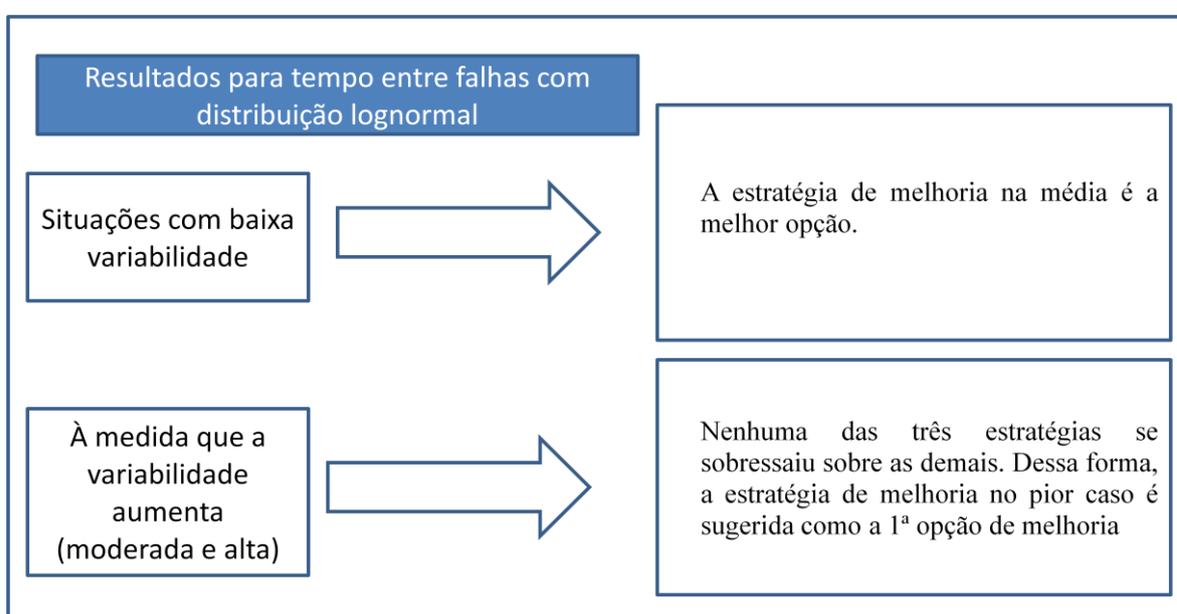
#### 4.6.2 Tarefas complexas (distribuição lognormal)

Novamente, com o objetivo de fornecer recomendações práticas aos gerentes de produção, foram investigadas tendências nas quais a melhoria no pior caso pode ser uma estratégia interessante e alternativa, pois em algumas situações pode ser impraticável realizar uma melhoria na média ou no desvio. Para isso foram calculadas as diferenças entre a melhoria na média e pior caso (média - pior caso) e desvio e pior caso (desvio - pior caso) para os dados referentes às tabelas 4.5, 4.6 e 4.7 apresentadas na seção 4.5.

Analisando as Tabelas 4.5, 4.6 e 4.7. foi possível identificar as seguintes tendências:

- i. Para tempo entre falhas médio (100 horas) e alto nível de variabilidade ( $CV = 1,4$ ), em situações nas quais são realizadas melhorias pequenas (10%) a melhoria no pior caso foi superior as estratégias de melhoria no desvio e na média em 2 das 3 amostras.
- ii. Para tempo entre falhas alto (120 horas) e nível de variabilidade moderado ( $CV = 0,8$ ), em situações nas quais são realizadas melhorias pequenas (10%) a melhoria no pior caso foi superior as estratégias de melhoria no desvio e na média em 2 das 3 amostras.

A Figura 4.3 resume os principais resultados para tarefas simples, as quais foram modeladas utilizando a distribuição normal.



**Figura 4.3** Resumo dos resultados encontrados para tempo entre falhas (tarefas complexas)

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

De acordo com a Figura 4.3 é possível afirmar que na presença de baixa variabilidade, para todos os níveis de tempo entre falhas, a melhor estratégia é a realização de melhoria na média. Conforme explicado na seção 4.6.1 esse resultado já era esperado.

Na presença de variabilidade moderada, para todos os níveis de tempo entre falhas, não foram encontradas diferenças entre as três estratégias. As únicas exceções são as melhorias de 30% e tempos entre falhas baixos e médios, pois nesse caso a estratégia de melhoria na média superou a melhoria no pior caso. A única tendência observada foi de que a utilização da estratégia focada no pior caso é uma boa alternativa para realização de pequenas melhorias em situações nas quais o tempo entre falhas é alto. Dessa forma, de maneira geral a

estratégia de melhoria no pior caso é sugerida como a 1ª opção de melhoria a ser utilizada em situações de variabilidade moderada, pois a mesma é mais fácil de ser obtida e tem um baixo custo de implementação.

Por fim, na presença de alta variabilidade, para todos os níveis de tempo entre falhas, não há diferença entre as três estratégias. Logo a estratégia de melhoria no pior caso é novamente sugerida como a 1ª opção de melhoria a ser utilizada em situações de alta variabilidade.

#### **4.6.3 Considerações finais**

Conforme observado neste capítulo, a contribuição principal encontrada foi que a estratégia de melhoria no pior caso pode ser utilizada como 1ª opção de melhoria para situações de variabilidade moderada e alta. A estratégia focada no pior caso pode ser mais fácil de ser implantada e menos custosa do que as estratégias focadas na média ou no desvio. Já para situações com baixa variabilidade a única estratégia indicada é a focada na média.

Os resultados encontrados nos capítulos 3 e 4 mostram que para situações de variabilidade moderada e alta a estratégia de melhoria no pior caso deve ser a estratégia escolhida para realização de melhorias no tempo de reparo e tempo entre falhas. Ou seja, a estratégia de melhoria focada nos piores casos pode trazer benefícios, aumentando a disponibilidade das máquinas e reduzindo o *lead time*. Esses benefícios observados constituem uma contribuição importante, pois a estratégia de melhoria no pior caso é pouco explorada na literatura de gestão e produção.

Adicionalmente, para baixa variabilidade a estratégia de melhoria na média é a melhor opção. No entanto, foi observado que para o tempo de reparo a estratégia de melhoria no pior caso é uma boa alternativa. Já para o tempo entre falhas, essa constatação não se manteve, pois nesse caso a única alternativa que apresenta benefícios significativos é a estratégia de melhoria focada na média.

No capítulo 5 é apresentado o estudo realizado para o tempo médio de *setup*.

## CAPÍTULO 5 COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE MELHORIA NO TEMPO DE *SETUP*

---

### 5.1 INTRODUÇÃO

O tempo de *setup* é definido como o tempo médio que uma tarefa gasta esperando enquanto uma estação de trabalho é preparada para o processamento desta tarefa (HOPP; SPEARMAN, 2008). Para atingir os requerimentos de qualidade exigidos pelo cenário competitivo, as organizações têm implantado a tecnologia de grupo, sistemas flexíveis de manufatura e a Manufatura Enxuta. Um pré-requisito para o sucesso dessas abordagens é exatamente baixos tempos de *setup*, pois permitem à utilização de menos estoques e lotes menores o que vai implicar em melhor qualidade, menos desperdício, melhores taxas de produtividade, melhor conhecimento sobre as causas de problemas e atrasos, melhor flexibilidade e resposta mais rápida (DIABY,2000; DIABY et al., 2013).

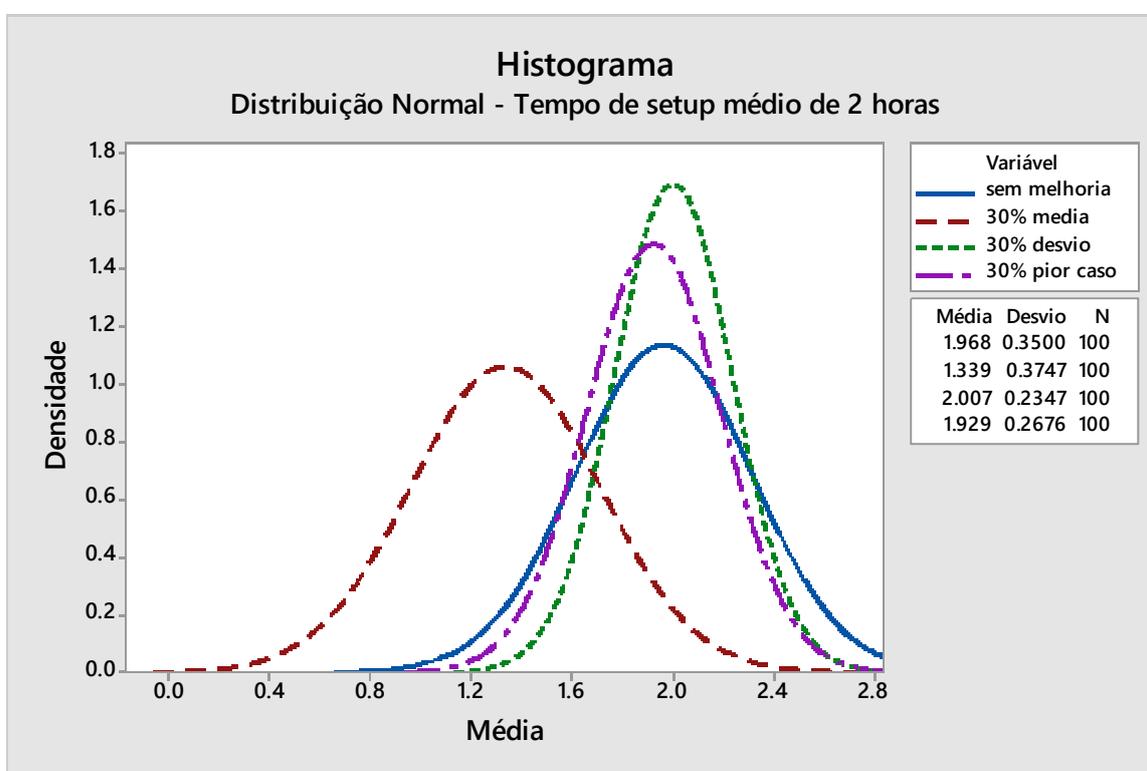
O objetivo deste capítulo é investigar qual das três estratégias apresenta o melhor resultado no que se refere à redução do *lead time*:

- i. Melhoria na média: Neste caso o investimento realizado visa diminuir o valor da média do tempo de *setup*;
- ii. Melhoria na variabilidade: Neste caso o foco da melhoria é reduzir variabilidade do tempo de *setup*. No presente capítulo a realização de uma melhoria na variabilidade implica em reduzir o desvio padrão do tempo de *setup*;
- iii. Melhoria no pior caso: Nesta estratégia o objetivo é a eliminação de casos extremos (piores casos), desta forma tanto a média quanto a variabilidade dos processos é alterada.

Um exemplo do comportamento das 3 estratégias de melhoria é apresentado na Figura 5.1. Neste exemplo é considerada uma estação de trabalho com um tempo de *setup* médio de 2 horas e um coeficiente de variação de 0,2. Adicionalmente, na Figura 5.1 é apresentada a melhoria nas 3 estratégias, seguindo uma distribuição normal e é feita uma comparação entre as 3 estratégias e a situação sem melhoria.

De acordo com a Figura 5.1 é possível observar que:

- i. A estratégia focada na media move o gráfico para a esquerda, reduzindo a media de 2 horas para aproximadamente 1,33 horas.
- ii. A estratégia direcionada a melhoria na variabilidade não altera a média, mas altera o formato da curva, pois o desvio padrão é reduzido de 0,40 para aproximadamente 0,23. Dessa forma o processo torna-se mais estável.
- iii. Por fim, é possível observar que a estratégia focada no pior caso, altera ambos, tanto a media quanto o desvio padrão do processo.



**Figura 5.1** Exemplo do efeito das três estratégias de melhoria: tempo de *setup*

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

Este capítulo é estruturado da seguinte forma: a seção 5.2 apresenta o referencial teórico deste capítulo; a seção 5.3 apresenta o modelo utilizado e os experimentos realizados; a seção 5.4 apresenta os resultados das simulações utilizando a distribuição normal e na seção 5.5 utilizando a distribuição lognormal; por fim, na seção 5.6 é apresentada uma síntese dos resultados e as recomendações práticas.

## 5.2 REFERENCIAL TEÓRICO

Entre as diversas variáveis que afetam a redução do *lead time* apontadas por Hopp e Spearman (2008), o foco deste capítulo é o tempo *setup*. Diversos autores, Hong e Hayya (1993), Nye et al. (2001) Cakmacki (2009), explicam os benefícios trazidos pela redução no tempo de *setup*. Nesta seção são apresentados estudos que discutem os efeitos positivos produzidos pelo programa de melhoria no tempo de *setup*.

Cakmacki (2009) explica que a necessidade por tempos de *setup* mais curtos cresceu em todos os tipos de indústrias devido aos requerimentos do mercado por alta flexibilidade e baixos custos e devido à globalização dos mercados. O grande desafio das empresas consiste em conseguir combinar baixo tempo de entrega e alta confiabilidade de entrega. A maneira mais eficiente de conseguir isso é por meio de baixos tempos de *setup* na produção. Além disso, Cakmacki (2009) explica que há uma relação forte entre tempo de *setup* e tamanhos de lote, ou seja, quanto menor o tempo de *setup* menor pode ser o tamanho de lote.

Hong e Hayya (1993) explicam que redução no tempo de *setup* com a conseqüente diminuição no tamanho dos lotes tem como benefícios: *lead times* reduzidos, melhoria na qualidade devido à detecção mais rápida de defeitos, estoque em processo reduzido, programação e seqüenciamento da produção mais fácil, aumento da capacidade produtiva, aumento da flexibilidade operacional, redução do espaço de estocagem e menor investimento em estoque.

Nye et al. (2001) são enfáticos ao explicar que os benefícios no custo, qualidade e agilidade obtidos pela redução do tempo de *setup* na manufatura são amplamente conhecidos. A redução do tempo de *setup* nas operações de manufatura requer o investimento de recursos. Esse investimento traz benefícios em termos de redução de custos operacionais, os quais as empresas podem utilizar para justificar os investimentos. Muitas técnicas são utilizadas para melhorar o tempo de *setup*, entre elas revisar os procedimentos de *setup*, padronização de ferramentas e organização das mesmas entre outras.

Há também trabalhos que evidenciam os benefícios que a redução do tempo de *setup* produz em alguma medida de desempenho específica. Godinho Filho (2008) e Godinho Filho e Uzsoy (2010) verificam o efeito que a redução do tempo de *setup* produz no *lead time*. Godinho Filho (2008) afirma que o efeito positivo da implantação do programa de melhoria no tempo de *setup* é potencializado pela redução dos tamanhos de lote. Os resultados deste trabalho indicam que mesmo empresas que possuem dificuldades em trabalhar com tamanhos

de lote reduzidos podem se beneficiar com programa de melhoria contínua no tempo de *setup*. Godinho Filho e Uzsoy (2010) afirmam que o programa de redução nos tempos de *setup* atinge melhor resultado com relação ao *lead time* quando são utilizados lotes pequenos. Na verdade, a melhoria no tempo de *setup* permite que o sistema produtivo trabalhe com tamanhos de lote bem menores do que aqueles que seriam utilizados caso nenhuma melhoria no tempo de *setup* tivesse sido implementada. Este resultado fornece suporte à literatura que defende a importância da utilização de métodos de redução de *setup*, como, por exemplo, o método SMED (*Single Minute Exchange of Die*) de Shingo (1986);

Diaby et al. (2013) analisam o efeito que a melhoria conjunta no tempo de *setup* e na taxa de defeitos produz no tempo de ciclo. Os autores afirmam que os benefícios das melhorias no tempo de *setup* e na taxa de defeitos são bastante discutidos na literatura, no entanto, os efeitos da melhoria conjunta em ambas as variáveis tem sido ignorado. Desta forma, os autores encontram soluções na implantação de melhorias conjuntas em ambas as variáveis de forma a reduzir o tempo de ciclo.

A respeito de ferramentas e técnicas de redução do tempo de *setup*, Nye et al. (2001) afirmam que um dos primeiros manuais no que se refere a técnicas de redução do tempo de *setup* foi escrito por Shingo (1985). A redução do tempo de *setup* pode ser obtida por meio da técnica *Single Minute Exchange of Dies* (SMED). Shingo (1985) explica que o SMED é um conjunto de técnicas que torna possível realizar as operações de *setup* em menos de 10 minutos.

Um aspecto importante no tratamento do tempo de *setup* é explicado por Shingo (1996), o qual explica que o *setup* pode ser dividido em dois tipos de operação:

- i. *Setup* interno: operações que só podem ser executadas com a máquina parada;
- ii. *Setup* externo: operações que podem, e devem ser concluídas enquanto a máquina está funcionando.

Shingo (1996) apresenta oito técnicas principais que compõem a técnica SMED: separação das operações de *setup* internas e externas; converter *setup* interno em externo; padronizar a função, não a forma; utilizar grampos funcionais ou eliminar grampos; usar dispositivos intermediários; adotar operações paralelas; eliminar ajustes; mecanização.

Do exposto nesta seção, nota-se que a importância do tempo de *setup* é amplamente propagada na literatura. No entanto, não foram encontrados trabalhos que abordam diretamente a questão da melhor estratégia de melhoria. Mais especificamente, qual estratégia de melhoria, média, variabilidade ou pior caso, produz o melhor efeito no *lead time*.

Desta forma, este capítulo visa produzir conhecimento de modo a atuar neste *gap* observado na literatura.

Na seção 5.3 é apresentada a modelagem e os experimentos realizados neste capítulo.

### 5.3 MODELAGEM E EXPERIMENTOS

Para a realização dos experimentos foi utilizado o mesmo modelo explicado no capítulo 3. Ou seja, foi utilizado como ambiente de simulação o *software* Maple e as equações matemáticas oriundas do *Factory Physics* (HOPP e SPEARMAN, 2008). As principais diferenças são os valores dos parâmetros, apresentados na Tabela 5.1.

**TABELA 5.1** Parâmetros utilizados para simulação de melhorias no tempo médio de *setup*.

Variáveis e parâmetros	Valores
Demanda média	11520 peças/ano
Tempo trabalhado	1920 horas/ano
Tempo médio entre falhas	80 horas
Tempo médio de reparo	1 hora
Tempo médio de setup	1, 1,5 ou 2 horas
Taxa média de defeitos	10%
Tempo de processamento	6 minutos
Coefficiente de variação do tempo de reparo	1,5
Coefficiente de variação do tempo de setup	0,2; 0,8; 1,4
Coefficiente de variação do tempo de processamento	1,5
Coefficiente de variação de chegadas	1,5
Tamanho da amostra	100 unidades
Tamanho do lote	200 unidades
* O valor do coeficiente de variação do tempo de <i>setup</i> pode ser 0,2; 0,8 ou 1,4; dependendo do nível de variabilidade investigado.	

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

Neste capítulo, foram testados 6 cenários, os quais são uma combinação dos seguintes fatores:

- i. Nível de tempo de *setup*: Definido pela média do tempo de *setup*. Foram considerados 3 níveis: baixo (1 hora), médio (1,5 horas) e alto (2 horas).

- ii. Nível de variabilidade do tempo de *setup*: Definido pelo coeficiente de variação (CV). Foram considerados três níveis: baixo (CV = 0,2), moderado (CV = 0,8) e alto (CV = 1,4)
- iii. Nível de melhoria: Definido pelo nível de melhoria aplicado na media, variabilidade ou no pior caso. Foram considerados três níveis de melhoria: baixo (10%), médio (20%) e alto (30%).
- iv. Distribuição de probabilidade: Definida pela distribuição de probabilidade utilizada para modelar a melhoria no tempo de *setup*. Foram usadas duas distribuições de probabilidade: normal e lognormal.

Todas as simulações foram realizadas utilizando um computador com as seguintes especificações técnicas: Intel Core i3 Duo CPU com 4GB de memória RAM. Na seção 5.4 são apresentados os resultados experimentais utilizando a distribuição normal e as comparações realizadas.

## **5.4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA TEMPO DE *SETUP* COM DISTRIBUIÇÃO NORMAL**

Nesta seção são apresentados os resultados experimentais das simulações realizadas com o objetivo de identificar qual das três alternativas de melhoria obtêm os melhores resultados de acordo com cada nível de tempo médio de *setup* e coeficiente de variação. São apresentados aqui os resultados relativos a distribuição normal e na seção 5.4 resultados para a distribuição lognormal. Os resultados são apresentados em 3 subtópicos de acordo com cada cenário: no subtópico 5.4.1 é apresentado o cenário 5.1, que consiste em um tempo médio de *setup* baixo (1 hora); o cenário 5.2, tempo médio de *setup* médio (1,5 horas) é apresentado em 5.4.2; por fim o cenário 5.3, tempo médio de *setup* alto (2 horas) é apresentado no subtópico 5.4.3.

### **5.4.1 Tempo de *setup* baixo**

O cenário 5.1 consiste em um tempo de *setup* baixo (1 hora). A Tabela 5.2 apresenta os valores, em horas, de *lead time* médios obtidos para o este cenário em conjunto com o parecer estatístico e a conclusão para cada nível de melhoria.

As seguintes conclusões foram obtidas analisando a Tabela 5.2.

- i. No caso de uma variabilidade baixa ( $CV = 0,2$ ):
  - a. Para as melhorias de 10%, 20% e 30%, a melhoria na média se sobressaiu sobre as demais. Comparando as alternativas de melhoria no desvio e pior caso não foi encontrada evidência estatística de que uma se sobressai sobre a outra.
- ii. No caso de variabilidade moderada ( $CV = 0,8$ ):
  - a. Não houve evidência estatística de diferenças significativas para os 3 níveis de melhoria entre as 3 estratégias de melhoria e o caso sem melhoria.
- iii. No caso de variabilidade alta ( $CV = 1,4$ ):
  - a. Para as melhorias de 10% e 20% não houve evidência estatística de diferenças significativas para os 3 níveis de melhoria entre as 3 estratégias de melhoria e o caso sem melhoria.
  - b. Para a melhoria de 30% em 1 das 3 amostras a melhoria média superou a melhoria no pior caso e em outra a melhoria no desvio foi superior a melhoria no pior caso.

**TABELA 5.2** Análises para tempo médio de *setup* de 1 hora

Nível de coeficiente de variação	Nível de melhoria (%)	Amostras	Programa de melhoria ( <i>lead time</i> médio em horas)				Parecer estatístico	Conclusão
			Sem melhoria	Média	Desvio	Pior caso		
0,2	10	AM1	165,6	161,0	165,3	165,5	média melhor que todos	média melhor
		AM2	165,4	160,4	165,1	166,0	média melhor que todos	
		AM3	165,6	162,2	164,7	166,8	média melhor que pior caso	
	20	AM1	164,3	156,4	165,5	164,7	média melhor que todos	média melhor
		AM2	165,4	157,0	163,9	165,1	média melhor que todos	
		AM3	165,9	157,5	165,2	164,1	média melhor que todos	
	30	AM1	164,3	152,3	164,9	163,2	média melhor que todos	média melhor
		AM2	165,4	153,3	164,7	164,1	média melhor que todos	
		AM3	165,6	153,2	165,0	164,1	média melhor que todos	
0,8	10	AM1	174,8	179,6	184,8	178,7	sem diferença	sem diferença
		AM2	180,2	173,9	183,0	177,6	sem diferença	
		AM3	186,0	182,4	177,8	182,1	sem diferença	
	20	AM1	174,8	172,5	178,3	182,9	sem diferença	sem diferença
		AM2	180,2	166,7	177,3	180,1	média melhor que desvio	
		AM3	186,0	174,7	172,8	184,7	sem diferença	
	30	AM1	174,8	164,9	172,8	180,5	média melhor que pior caso	sem diferença
		AM2	180,2	169,5	172,2	181,6	sem diferença	
		AM3	186,0	172,0	173,1	179,0	sem diferença	
1,4	10	AM1	237,7	232,4	213,4	212,3	sem diferença	sem diferença
		AM2	219,5	230,0	206,2	228,7	sem diferença	
		AM3	236,5	197,5	217,5	234,2	sem diferença	
	20	AM1	237,7	207,6	196,6	217,5	sem diferença	sem diferença
		AM2	219,5	196,3	197,9	232,8	média e desvio melhores que pior caso	
		AM3	236,5	215,6	200,3	224,8	sem diferença	
	30	AM1	237,7	200,1	195,8	226,8	média melhor que pior caso	sem diferença
		AM2	219,5	207,6	181,5	215,7	desvio melhor que pior caso	
		AM3	236,5	204,9	193,9	219,6	sem diferença	

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados do cenário 5.1 mostram que para situações com baixa variabilidade, investir na média é a melhor opção. À medida que a variabilidade aumenta ( $CV = 0,8$  e  $CV = 1,4$ ) não foi encontrada evidência estatística de diferença significativa entre as 3 estratégias de melhoria.

#### 5.4.2 Tempo de *setup* médio

O cenário 5.2 consistiu em um tempo de *setup* médio (1,5 horas). A Tabela 5.3 apresenta os valores, em horas, de *lead time* médios obtidos para este cenário em conjunto com o parecer estatístico e a conclusão para cada nível de melhoria.

**TABELA 5.3** Análises para tempo médio de *setup* de 1,5 horas

Nível de coeficiente de variação	Nível de melhoria (%)	Amostras	Programa de melhoria ( <i>lead time</i> médio em horas)				Parecer estatístico	Conclusão
			Sem melhoria	Média	Desvio	Pior caso		
0,2	10	AM1	194,1	186,3	194,2	197,9	média melhor que todos	média melhor
		AM2	194,3	185,2	194,8	196,3	média melhor que todos	
		AM3	196,3	186,5	194,4	193,2	média melhor que todos	
	20	AM1	194,1	175,0	193,8	192,8	média melhor que todos	média melhor
		AM2	194,3	175,9	192,4	198,5	média melhor que todos	
		AM3	196,3	175,1	191,5	191,4	média melhor que todos	
	30	AM1	194,1	169,8	191,6	189,7	média melhor que todos	média melhor
		AM2	194,3	168,8	194,1	191,0	média melhor que todos	
		AM3	196,3	168,9	192,9	187,8	média melhor que todos	
0,8	10	AM1	239,0	238,0	227,5	221,5	sem diferença	sem diferença
		AM2	236,6	230,3	217,0	244,9	sem diferença	
		AM3	237,3	224,4	235,0	242,5	sem diferença	
	20	AM1	239,0	214,2	226,5	236,4	sem diferença	sem diferença
		AM2	236,6	230,1	223,4	235,5	sem diferença	
		AM3	237,3	210,6	217,4	233,6	sem diferença	
	30	AM1	239,0	205,3	206,3	230,8	sem diferença	sem diferença
		AM2	236,6	200,9	222,0	236,7	média melhor que todos	
		AM3	237,3	222,0	207,1	230,9	sem diferença	
1,4	10	AM1	336,3	311,4	269,7	352,6	sem diferença	sem diferença
		AM2	370,4	301,8	289,1	359,8	sem diferença	
		AM3	360,4	354,5	331,8	331,5	sem diferença	
	20	AM1	336,4	323,6	274,5	373,9	sem diferença	sem diferença
		AM2	336,3	322,2	303,6	352,3	sem diferença	
		AM3	370,4	325,4	270,0	334,8	sem diferença	
	30	AM1	336,4	320,6	251,6	321,7	desvio melhor que todos	desvio melhor
		AM2	336,3	283,1	236,7	321,6	desvio melhor que todos	
		AM3	370,4	299,6	254,7	333,6	desvio melhor que todos	

Fonte: Elaborada pelo autor.

As seguintes conclusões foram obtidas analisando a Tabela 5.3

- i. No caso de uma variabilidade baixa ( $CV = 0,2$ ):
  - a. A melhoria na média é superior para todos os níveis de melhoria. Comparando as alternativas de melhoria no desvio e pior caso não foi encontrada evidência estatística de que uma se sobressai sobre a outra.
- ii. No caso de uma variabilidade moderada ( $CV = 0,8$ ):

- a. Não houve evidência estatística de diferenças significativas para os 3 níveis de melhoria entre as 3 estratégias de melhoria. Apenas na amostra 2, nível de melhoria de 20%, a estratégia de melhoria na média foi superior as demais estratégias
- iii. No caso de uma variabilidade alta ( $CV = 1,4$ ):
  - a. Para as melhorias de 10% e 20% não foi encontrada evidência estatística de diferença entre as 3 estratégias.
  - b. Para a melhoria de 30% a melhoria no desvio foi superior as demais estratégias.

Os resultados do cenário 5.2 mostram que para situações com baixa variabilidade, investir na média continua sendo a melhor opção. A medida que a variabilidade aumenta ( $CV = 0,8$  e  $CV = 1,4$ ) não há diferença significativa entre as 3 estratégias de melhoria, com exceção da melhoria de 30% e  $CV$  de 1,4, na qual a melhoria no desvio foi a melhor opção.

#### 5.4.3 Tempo de *setup* alto

O cenário 5.3 consiste em um tempo de *setup* alto (2 horas). A Tabela 5.4 apresenta os valores, em horas, de *lead time* médios para este cenário em conjunto com o parecer estatístico e a conclusão para cada nível de melhoria.

As seguintes conclusões foram obtidas analisando a Tabela 5.4.

- i. No caso de uma variabilidade baixa ( $CV = 0,2$ ):
  - a. A estratégia de melhoria na média foi superior para todos os níveis de melhoria. Comparando as alternativas de melhoria no desvio e pior caso não foi encontrada evidência estatística de que uma se sobressai sobre a outra.
- ii. No caso de uma variabilidade moderada ( $CV = 0,8$ ):
  - a. Não houve evidência estatística de diferenças significativas entre as 3 estratégias de melhoria, com exceção da amostra 3 e nível de melhoria de 20% na qual a melhoria na média superou a melhoria no pior caso.
- iii. No caso de uma variabilidade alta ( $CV = 1,4$ ):

- a. Para a melhoria de 10% e 20%, não foi encontrada evidência estatística de diferença entre as 3 estratégias.
- b. Para a melhoria de 30% a alternativa focada no desvio foi superior a estratégia de melhoria no pior caso em 2 das 3 amostras e superior a estratégia de melhoria na média em 1 das 3 amostras.

**TABELA 5.4** Análises para tempo médio de *setup* de 2 horas

Nível de coeficiente de variação	Nível de melhoria (%)	Amostras	Programa de melhoria ( <i>lead time</i> médio em horas)				Parecer estatístico	Conclusão
			Sem melhoria	Média	Desvio	Pior caso		
0,2	10	AM1	231,6	222,8	235,7	233,9	média melhor que todos	média melhor
		AM2	231,6	224,5	231,7	236,6	sem diferença	
		AM3	234,2	216,6	237,7	237,0	média melhor que todos	
	20	AM1	231,6	209,1	235,6	234,2	média melhor que todos	média melhor
		AM2	231,6	202,2	234,2	233,9	média melhor que todos	
		AM3	234,2	203,9	231,0	230,6	média melhor que todos	
	30	AM1	231,6	188,6	235,6	227,9	média melhor que todos	média melhor
		AM2	231,6	186,6	232,4	227,1	média melhor que todos	
		AM3	234,2	188,1	234,0	227,9	média melhor que todos	
0,8	10	AM1	311,1	311,8	308,2	321,9	sem diferença	sem diferença
		AM2	362,5	327,9	298,1	350,0	sem diferença	
		AM3	340,1	293,9	348,1	297,8	sem diferença	
	20	AM1	311,1	281,3	294,7	317,7	sem diferença	sem diferença
		AM2	362,5	321,0	282,8	323,0	sem diferença	
		AM3	340,1	252,0	283,7	323,1	média melhor que pior caso	
	30	AM1	311,1	276,6	281,2	293,7	sem diferença	sem diferença
		AM2	362,5	289,9	272,5	337,5	sem diferença	
		AM3	340,1	275,3	281,9	311,5	sem diferença	
1,4	10	AM1	667,9	254,0	1005,0	573,3	sem diferença	sem diferença
		AM2	665,0	561,0	590,6	951,0	sem diferença	
		AM3	751,0	559,0	537,8	596,2	sem diferença	
	20	AM1	667,9	568,7	668,0	554,9	sem diferença	sem diferença
		AM2	665,0	159,0	482,0	559,3	sem diferença	
		AM3	751,0	610,4	460,8	564,7	sem diferença	
	30	AM1	667,9	456,3	434,4	568,3	desvio melhor que pior caso	desvio melhor que pior caso
		AM2	665,0	527,8	421,8	552,4	sem diferença	
		AM3	751,0	694,0	392,4	559,0	desvio melhor que todos	

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

Os resultados do cenário 5.3 mostram que para situações com baixa variabilidade, investir na média continua sendo a melhor opção. A medida que a variabilidade aumenta ( $CV = 0,8$ ) não foram encontradas evidências estatísticas de diferenças entre as 3 estratégias. Já para a variabilidade alta ( $CV = 1,4$ ) parece haver a tendência da melhoria no desvio passar a ser a melhor opção, principalmente para o nível de melhoria de 30%.

Por fim, é possível resumir os resultados desta seção, utilizando a distribuição normal, que indicam que para todos os níveis de tempo de *setup* (baixo, alto e médio), investir na média é a melhor opção para situações com baixa variabilidade ( $CV = 0,2$ ). No entanto, à medida que o tempo de *setup* e o nível de variabilidade aumentam, parece ocorrer um reforço

na tendência observada ao longo desta seção de que a melhoria no desvio passa a ser a melhor opção.

## 5.5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA TEMPO DE *SETUP* COM DISTRIBUIÇÃO LOGNORMAL

Nesta seção são apresentados os resultados experimentais das simulações utilizando a distribuição lognormal. Os resultados são apresentados em 3 subtópicos de acordo com cada cenário: no subtópico 5.5.1 é apresentado o cenário 5.4, que consiste em um tempo de *setup* baixo (1 hora); o cenário 5.5, tempo de *setup* médio (1,5 horas) é apresentado em 5.5.2; por fim o cenário 5.6, tempo médio de *setup* alto (2 horas) é apresentado no subtópico 5.5.3.

### 5.5.1 Tempo de *setup* baixo

O cenário 5.4 consiste em um tempo de *setup* baixo (1 hora). A Tabela 5.5 apresenta os valores, em horas, de *lead time* em conjunto com o parecer estatístico e a conclusão para cada nível de melhoria.

**TABELA 5.5** – Análises para tempo médio de *setup* de 1 hora

Nível de coeficiente de variação	Nível de melhoria (%)	Amostras	Programa de melhoria ( <i>lead time</i> médio em horas)				Parecer estatístico	Conclusão
			Sem melhoria	Média	Desvio	Pior caso		
0,2	10	AM1	164,8	159,5	164,9	164,8	média melhor que todos	média melhor
		AM2	161,5	161,1	164,8	164,5	média melhor que todos	
		AM3	166,1	160,7	165,9	166,0	média melhor que todos	
	20	AM1	164,8	155,9	165,5	164,9	média melhor que todos	média melhor
		AM2	164,5	156,3	165,0	165,7	média melhor que todos	
		AM3	166,1	156,5	165,1	165,9	média melhor que todos	
	30	AM1	164,8	152,8	163,9	164,1	média melhor que todos	média melhor
		AM2	164,5	152,6	165,1	164,6	média melhor que todos	
		AM3	166,1	152,7	164,2	163,6	média melhor que todos	
0,8	10	AM1	198,9	177,6	182,7	180,6	sem diferença	sem diferença
		AM2	176,8	282,0	175,7	191,2	sem diferença	
		AM3	185,9	181,9	184,7	197,2	sem diferença	
	20	AM1	198,9	164,4	168,9	185,2	sem diferença	sem diferença
		AM2	176,8	166,4	177,3	177,0	média melhor que todos	
		AM3	185,9	183,7	178,7	174,5	sem diferença	
	30	AM1	198,9	156,9	172,9	170,5	média melhor que todos	média melhor
		AM2	176,8	165,3	171,7	186,9	média melhor que todos	
		AM3	185,9	160,8	174,3	182,6	média melhor que todos	
1,4	10	AM1	896,0	232,0	205,5	259,3	sem diferença	sem diferença
		AM2	220,1	193,8	227,5	177,7	sem diferença	
		AM3	181,1	176,9	281,0	370,0	sem diferença	
	20	AM1	896,0	224,6	184,6	283,0	sem diferença	sem diferença
		AM2	186,0	200,0	121,8	201,6	sem diferença	
		AM3	181,1	190,1	182,4	176,3	sem diferença	
	30	AM1	896,0	189,2	236,2	233,4	sem diferença	sem diferença
		AM2	220,1	168,2	183,2	197,8	sem diferença	
		AM3	181,1	182,3	197,9	229,2	sem diferença	

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

As seguintes conclusões foram obtidas analisando a Tabela 5.5.

- i. No caso de uma variabilidade baixa ( $CV = 0,2$ ):
  - a. A estratégia de melhoria na média foi superior para todos os níveis de melhoria. Comparando as alternativas de melhoria no desvio e pior caso não foi encontrada evidência estatística de que uma se sobressai sobre a outra.
- ii. No caso de uma variabilidade moderada ( $CV = 0,8$ ):
  - a. Não foi encontrada evidência estatística de diferença entre as 3 estratégias para os níveis de melhoria de 10% e 20%, com exceção da amostra 2 e nível de melhoria de 20%, na qual a estratégia focada na média foi superior as demais. Já para a melhoria de 30% a melhoria na média superou as demais.
- iii. No caso de uma variabilidade alta ( $CV = 1,4$ ):
  - a. Para todos os níveis de melhoria não foi encontrada evidência estatística de que uma estratégia supere as demais.

Os resultados do cenário 5.4 indicam que para situações com baixa variabilidade ( $CV = 0,2$ ), investir na média é a melhor opção, assim como observado na seção 3.3. À medida que a variabilidade aumenta ( $CV = 0,8$ ) não há diferença significativa entre as 3 estratégias com exceção do nível de melhoria de 30% no qual o investimento na média continua sendo a melhor opção. Já para a variabilidade alta, não há diferenças significativas entre as 3 estratégias.

### 5.5.2 Tempo de *setup* médio

O cenário 5.5 consiste em um tempo de *setup* médio (1,5 horas). A Tabela 5.6 apresenta os valores, em horas, de *lead time* médios em conjunto com o parecer estatístico e a conclusão para cada nível de melhoria.

Por meio da análise das Tabela 5.6 é possível concluir que:

- i. No caso de uma variabilidade baixa ( $CV = 0,2$ ):
  - a. A estratégia de melhoria na média foi superior para todos os níveis de melhoria. Comparando as alternativas de melhoria no desvio e pior caso não foi encontrada evidência estatística de que uma se sobressai sobre a outra.

- ii. No caso de uma variabilidade moderada ( $CV = 0,8$ ):
- Para a melhoria de 10% não foi encontrada evidência estatística de que uma das alternativas se sobressaia sobre a outra.
  - Para as melhorias de 20% a estratégia focada na média foi superior a melhoria no desvio em 2 das 3 amostras. Além disso a melhoria na média superou a melhoria no pior caso em 1 das 3 amostras.
  - Para a melhoria de 30% a melhoria na média foi superior as demais alternativas em 2 das 3 amostras, no entanto em 1 das 3 amostras a estratégia focada no desvio superou a melhoria na média.
- iii. No caso de uma variabilidade alta ( $CV = 1,4$ ):
- Para a melhoria de 10% e 20%, não foi encontrada evidência estatística de que uma das alternativas se sobressaia sobre a outra. Já para a melhoria de 30% a melhoria na média foi superior as demais.

**TABELA 5.6** – Análises para tempo médio de *setup* de 1,5 horas

Nível de coeficiente de variação	Nível de melhoria (%)	Amostras	Programa de melhoria ( <i>lead time</i> médio em horas)				Parecer estatístico	Conclusão
			Sem melhoria	Média	Desvio	Pior caso		
0,2	10	AM1	195,1	181,7	193,3	192,8	média melhor que todos	média melhor
		AM2	192,6	183,7	195,7	192,0	média melhor que todos	
		AM3	195,2	184,3	192,5	195,5	média melhor que todos	
	20	AM1	195,1	176,5	191,7	192,8	média melhor que todos	média melhor
		AM2	192,6	175,5	196,0	193,5	média melhor que todos	
		AM3	195,2	175,2	193,8	191,1	média melhor que todos	
	30	AM1	195,1	169,1	194,4	190,2	média melhor que todos	média melhor
		AM2	192,7	166,5	191,1	192,6	média melhor que todos	
		AM3	195,2	167,6	195,2	192,6	média melhor que todos	
0,8	10	AM1	200,8	237,3	245,6	289,0	sem diferença	sem diferença
		AM2	235,7	220,8	212,2	221,0	sem diferença	
		AM3	252,4	190,7	215,8	220,4	sem diferença	
	20	AM1	200,8	187,0	226,4	204,8	média melhor que desvio	média melhor que desvio
		AM2	235,7	186,0	242,0	254,4	média melhor que todos	
		AM3	251,7	232,9	214,9	234,5	sem diferença	
	30	AM1	200,8	193,9	191,6	212,4	média melhor que todos	média melhor
		AM2	235,7	368,0	217,8	223,4	desvio melhor que média	
		AM3	251,7	192,2	216,0	260,8	média melhor que todos	
1,4	10	AM1	314,6	250,4	305,4	212,0	sem diferença	sem diferença
		AM2	656,0	521,0	269,1	249,1	sem diferença	
		AM3	288,2	277,2	382,0	326,2	sem diferença	
	20	AM1	259,7	288,0	237,6	273,4	sem diferença	sem diferença
		AM2	652,0	427,0	363,0	260,9	sem diferença	
		AM3	208,6	247,7	255,1	389,0	sem diferença	
	30	AM1	316,3	206,3	320,1	321,0	média melhor que desvio	média melhor
		AM2	207,9	177,7	222,6	496,0	média melhor que desvio	
		AM3	292,4	191,5	278,0	330,7	média melhor que todos	

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados do cenário 5.5 mostram que para situações com baixa variabilidade, investir na média é a melhor opção, assim como observado na seção anterior. À medida que a variabilidade aumenta ( $CV = 0,8$  e  $CV = 1,4$ ) o investimento na média continua sendo a melhor opção, no entanto aparecem mais casos nos quais não há diferença significativa entre as 3 estratégias.

### 5.5.3 Tempo de *setup* alto

O cenário 5.6 consiste em um tempo médio de *setup* alto (2 horas). A Tabela 5.7 apresenta os valores, em horas, de *lead time* médios em conjunto com o parecer estatístico e a conclusão para cada nível de melhoria.

**TABELA 5.7** – Análises para tempo médio de *setup* de 2 horas

Nível de coeficiente de variação	Nível de melhoria (%)	Amostras	Programa de melhoria ( <i>lead time</i> médio em horas)				Parecer estatístico	Conclusão
			Sem melhoria	Média	Desvio	Pior caso		
0,2	10	AM1	235,7	219,9	234,4	231,3	média melhor que todos	média melhor
		AM2	225,8	212,1	225,2	229,8	média melhor que todos	
		AM3	228,7	212,7	232,3	236,2	média melhor que todos	
	20	AM1	235,7	202,6	236,5	231,7	média melhor que todos	média melhor
		AM2	225,8	202,7	229,9	234,9	média melhor que todos	
		AM3	228,7	199,0	236,4	235,9	média melhor que todos	
	30	AM1	235,7	188,7	229,6	228,5	média melhor que todos	média melhor
		AM2	225,8	189,3	234,9	230,3	média melhor que todos	
		AM3	228,7	188,7	227,7	226,4	média melhor que todos	
0,8	10	AM1	544,0	273,0	355,4	266,2	sem diferença	sem diferença
		AM2	252,1	304,0	273,0	414,0	sem diferença	
		AM3	332,9	271,4	307,4	310,6	sem diferença	
	20	AM1	544,0	274,3	319,6	257,0	média melhor que desvio	média melhor
		AM2	252,1	220,0	277,0	354,5	média melhor que todos	
		AM3	331,9	248,9	298,3	372,7	média melhor que todos	
	30	AM1	544,0	286,3	241,9	300,0	média melhor que todos	média melhor
		AM2	252,1	209,5	301,0	335,8	média melhor que todos	
		AM3	335,7	230,6	290,3	339,5	média melhor que todos	
1,4	10	AM1	279,0	738,0	347,5	404,0	desvio melhor que média	sem diferença
		AM2	384,0	304,3	326,6	362,8	sem diferença	
		AM3	760,0	388,7	558,0	469,0	sem diferença	
	20	AM1	277,9	319,8	616,0	593,0	média melhor que desvio	média melhor que desvio
		AM2	746,0	452,0	903,0	464,0	sem diferença	
		AM3	962,0	255,4	513,0	305,5	média melhor que desvio	
	30	AM1	414,3	237,5	372,9	349,2	sem diferença	desvio e pior caso melhores que média
		AM2	387,1	639,0	370,6	362,3	desvio e pior caso melhores que média	
		AM3	335,3	509,0	313,6	465,0	desvio e pior caso melhores que média	

**Fonte:** Elaborada pelo autor.

Por meio da análise da Tabela 5.7 é possível concluir que:

- iv. No caso de uma variabilidade baixa ( $CV = 0,2$ ):
  - a. A estratégia de melhoria na média foi superior para todos os níveis de melhoria. Comparando as alternativas de melhoria no desvio e pior caso não foi encontrada evidência estatística de que uma se sobressai sobre a outra.

- v. No caso de uma variabilidade moderada ( $CV = 0,8$ ):
  - a. Para a melhoria de 10% não foi encontrada evidência estatística de que uma das alternativas se sobressaia sobre a outra.
  - b. Para as melhoria de 20% e 30% a melhoria na média foi superior a todas as outras estratégias.
- vi. No caso de uma variabilidade alta ( $CV = 1,4$ ):
  - a. Para a melhoria de 10% em apenas uma das amostras a melhoria no desvio foi superior a estratégia de melhoria na média, nas outras 2 amostras não foi encontrada evidência estatística de que uma das alternativas se sobressaia sobre a outra.
  - b. Para a melhoria de 20% a melhoria na média superou a melhoria no desvio em 2 das 3 amostras. Comparando a melhoria na média e no pior caso, não foi encontrada evidência estatística de diferença entre essas estratégias.
  - c. Para a melhoria de 30%, foi encontrada evidência estatística de que a melhoria no desvio e a melhoria no pior caso são superiores a melhoria na média em 2 das 3 amostras.

Os resultados do cenário 5.6 sugerem que para situações com baixa variabilidade, investir na média ainda é a melhor opção. À medida que a variabilidade aumenta ( $CV = 0,8$ ) o investimento na média continua sendo a melhor opção, no entanto continuam havendo casos nos quais não há diferença significativa entre as 3 estratégias. Para uma alta variabilidade ( $CV = 1,4$ ) não há diferença entre as 3 estratégias para uma melhoria de 10%, no entanto para o nível de melhoria de 20% o investimento na média foi superior a melhoria no desvio. Já para a melhoria de 30% o investimento no desvio e pior caso foram superiores a melhoria na média.

Por fim, é possível resumir os resultados desta seção, utilizando a distribuição lognormal, os quais mostram que para todos os níveis de tempo de *setup* (baixo, alto e médio), investir na média continua sendo a melhor opção para situações com baixa variabilidade ( $CV = 0,2$ ). A medida que a variabilidade aumenta ( $CV = 0,8$  e  $CV = 1,4$ ) o investimento na média continua sendo a melhor opção, entretanto aparecem alguns casos nos quais não há diferença significativa entre as 3 estratégias, principalmente para os casos com variabilidade alta ( $CV = 1,4$ ).

Na seção 5.6 é apresentada a discussão dos resultados e são fornecidas recomendações práticas.

## **5.6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E RECOMENDAÇÕES PARA GERENTES NA PRÁTICA**

Os principais resultados encontrados no presente capítulo foram sintetizados a fim de recomendar práticas que possam ser utilizadas em decisões do dia-a-dia de gerentes de produção que precisem escolher a melhor maneira de realizar melhorias em variáveis do chão de fábrica no que se refere ao tempo de *setup*.

Esta seção é organizada da seguinte forma: no tópico 5.6.1 é feita a discussão para tarefas simples; na seção 5.6.2 é apresentada a discussão para tarefas complexas; na seção 5.6.3 são apresentadas as considerações finais deste capítulo. Além disso, inicialmente são mostrados os cálculos das tendências e em seguida é apresentada uma síntese com os resultados encontrados ao longo deste capítulo.

### **5.6.1 Tarefas simples (distribuição normal)**

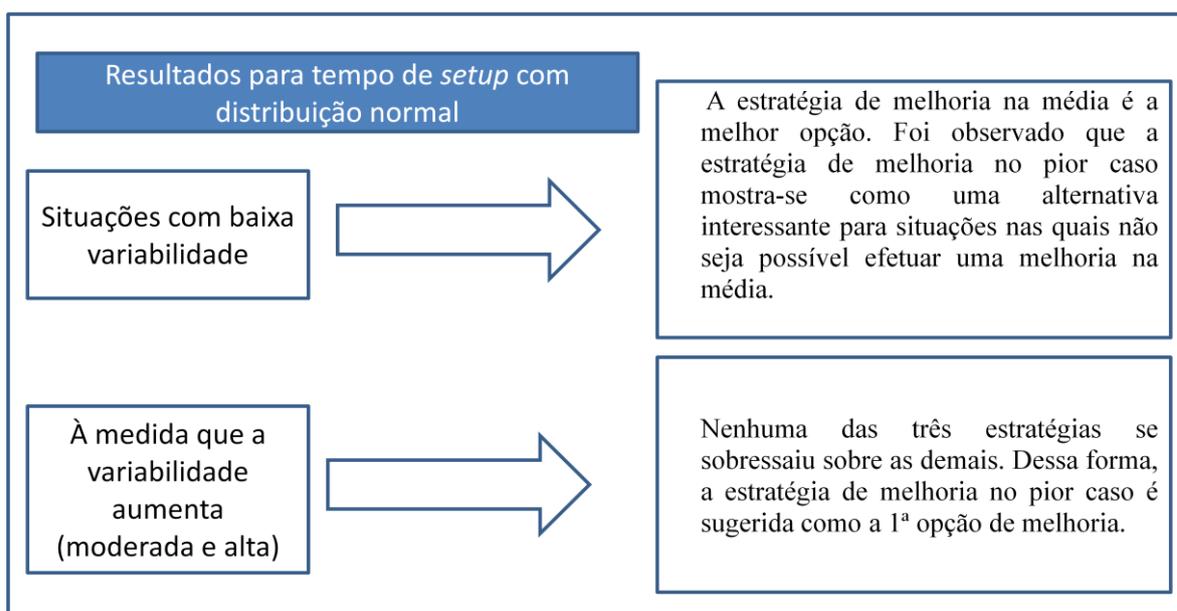
O foco do presente capítulo é entender os casos nos quais a estratégia de realização de melhoria no pior caso é uma boa opção. Para isso, além da análise estatística realizada nas seções 5.4 e 5.5, nesta seção foram calculadas as diferenças entre a melhoria na média e pior caso (média - pior caso) e desvio e pior caso (desvio - pior caso) para os dados referentes às Tabelas 5.2, 5.3 e 5.4 apresentadas na seção 5.4. O objetivo dessa análise é de identificar as situações nas quais a melhoria no pior caso possa ser uma estratégia interessante e alternativa as outras duas estratégias, pois em algumas situações pode ser impraticável realizar uma melhoria na média ou no desvio.

Analisando as Tabelas 5.2, 5.3 e 5.4 é possível identificar as seguintes tendências:

- i. No caso de uma variabilidade baixa ( $CV = 0,2$ ) a melhoria no pior caso parece ser uma alternativa interessante para as situações nas quais não seja possível efetuar uma melhoria. Esse argumento se baseia no fato de que em 20 das 27 amostras analisadas, a melhoria no pior caso teve um resultado superior a melhoria no desvio, ainda que não estatisticamente significativo, isso pode indicar uma tendência.

- ii. No caso de uma variabilidade moderada ( $CV = 0,8$ ) e alta ( $CV = 1,4$ ) e para tempo de *setup* baixo (1 hora) em situações nas quais são realizadas pequenas melhorias (10%) a estratégia de melhoria no pior caso é uma alternativa interessante a melhoria na média, tendo em vista que em 4 das 6 amostras a primeira foi superior a segunda.

A Figura 5.2 resume os principais resultados para tarefas simples, as quais foram modeladas utilizando a distribuição normal.



**Figura 5.2** Resumo dos resultados encontrados para tempo de *setup* (tarefas simples)

De acordo com o a Figura 5.2 é possível observar que na presença de baixa variabilidade, para todos os níveis de tempo de *setup*, a melhor estratégia é a realização de melhoria na média. Esse resultado já era esperado, tendo em vista que para um sistema com tempo previsível de realização de *setup*, ou seja, existe variabilidade, mas ela é relativamente estável, efetuar uma melhoria na média resulta em uma redução mais efetiva no *lead time*. Valores de coeficiente variação baixo mostram que o processo é estável. Desta forma, efetuar uma melhoria no desvio do tempo de *setup*, que já possui um valor baixo, pode ser muito difícil, custoso e não resultar em uma redução significativa no *lead time*. Por outro lado, efetuar melhorias na média do tempo de *setup* aumenta o tempo que o equipamento está disponível para a produção efetiva, o que resulta em reduções significativas do *lead time*. Adicionalmente, para esta situação a melhoria no pior caso é sugerida como uma boa alternativa para situações nas quais não seja possível efetuar uma melhoria na média devido a

ser muito difícil ou custosa. Desta forma, a estratégia de melhoria no pior caso pode trazer bons resultados, pois pode reduzir tanto à média quando a variabilidade do tempo de *setup*.

Em situações de variabilidade moderada, para todos os níveis de tempo de *setup*, não há diferença entre as três estratégias. Ou seja, efetuar uma melhoria no tempo de *setup* utilizando qualquer uma das três estratégias resultou em um efeito semelhante no *lead time*. Desta forma, para todas as situações nas quais não tenha sido encontrada uma diferença significativa entre as três estratégias, a utilização da estratégia de melhoria no pior caso é sugerida como a 1ª opção de melhoria, pois é em muitos casos simples de ser implantada e pouco custosa.

Na presença de alta variabilidade de maneira geral, para todos os níveis de tempo de *setup*, não há diferença entre as três estratégias. As únicas exceções são as melhorias de 30% para tempo de *setup* médio e alto, pois no primeiro caso estratégia de melhoria no desvio superou a ambas as estratégias e no segundo caso superou a estratégia de melhoria no pior caso. Logo, novamente a utilização da estratégia de melhoria no pior caso é sugerida como a 1ª opção de melhoria.

### **5.6.2 Tarefas complexas (distribuição lognormal)**

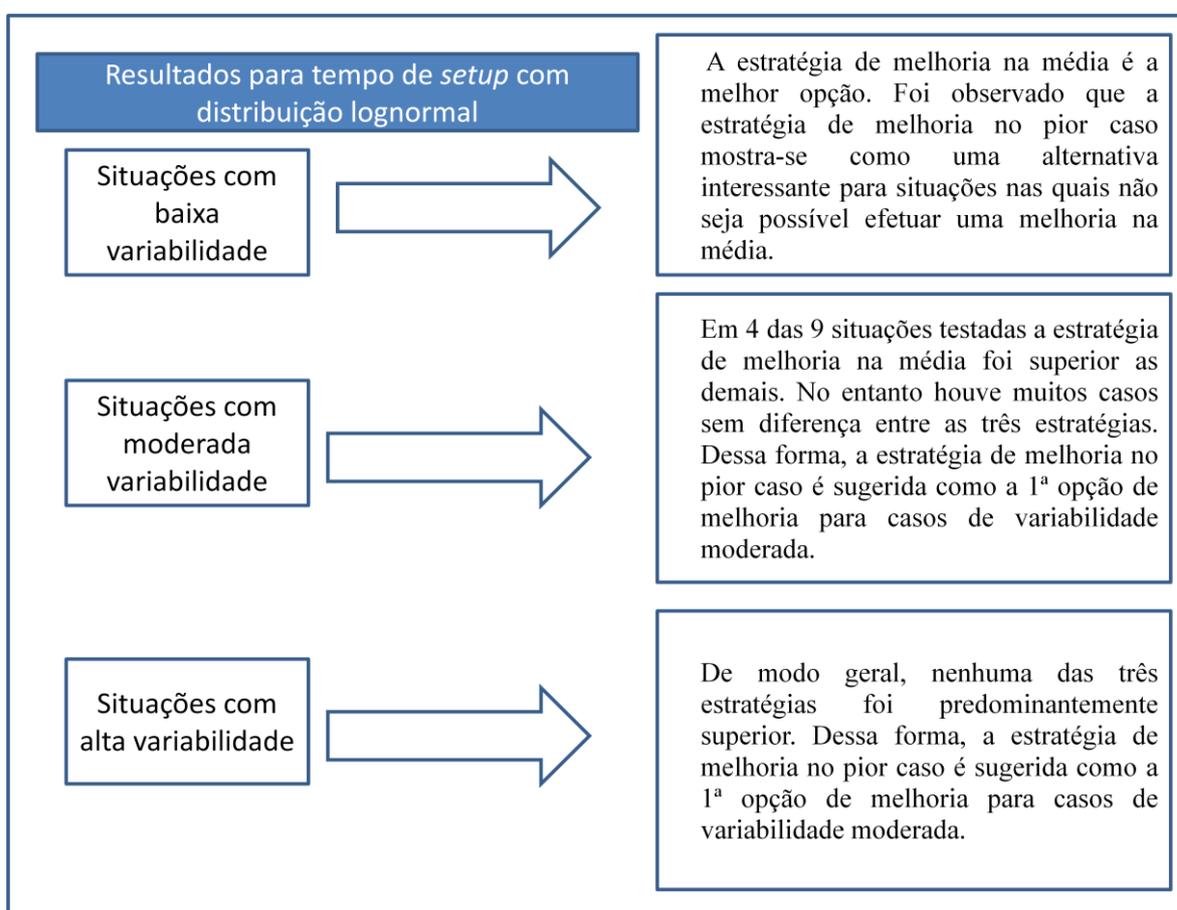
Novamente, com o objetivo de fornecer recomendações práticas aos gerentes de produção, foram investigadas algumas tendências nas quais a melhoria no pior caso pode ser uma estratégia interessante e alternativa, pois em algumas situações pode ser impraticável realizar uma melhoria na média ou no desvio. Para isso foram calculadas as diferenças entre a melhoria na média e pior caso (média - pior caso) e desvio e pior caso (desvio - pior caso) para os dados referentes às tabelas 5.5, 5.6 e 5.7 apresentadas na seção 5.5.

Analisando as Tabelas 5.5, 5.6 e 5.7. foi possível identificar as seguintes tendências:

- i. No caso de uma variabilidade baixa ( $CV = 0,2$ ) a melhoria no pior caso parece ser uma alternativa interessante para situações nas quais não seja possível efetuar uma melhoria na média. Observou-se que em 16 das 27 amostras analisadas, a melhoria no pior caso teve um resultado superior a melhoria no desvio, ainda que não estatisticamente significativo, isso pode indicar uma tendência.
- ii. Para uma variabilidade alta ( $CV = 1,4$ ) e tempo de *setup* médio a melhoria no pior caso supera respectivamente a estratégia focada no

desvio, para um nível de melhoria de 10%, e a estratégia com enfoque na média para um nível de melhoria de 10% e 20%. Além disso, para tempo de *setup* alto, a melhoria no pior caso supera a melhoria no desvio em todas as 6 amostras para os níveis de melhoria de 20% e 30%. Vale ressaltar que para essa situação de tempo de *setup* alto tanto a estratégia focada no desvio quanto a dedicada a eliminação dos piores casos superam a melhoria na média quando o nível de melhoria é de 30%.

A Figura 5.3 resume os principais resultados para tarefas complexas, as quais foram modeladas utilizando a distribuição lognormal.



**Figura 5.3** Resumo dos resultados encontrados para tempo de *setup* (tarefas complexas)

De acordo com a Figura 5.3 é possível concluir que na presença de baixa variabilidade, para todos os níveis de tempo de *setup*, a melhor estratégia é a realização de melhoria na média. Esse resultado já era esperado, tendo em vista que para um sistema no

qual o tempo para realizar o *setup* seja previsível, ou seja, existe variabilidade, mas ela é relativamente estável, efetuar uma melhoria na média resulta em uma redução mais efetiva no *lead time*. Valores de coeficiente de variação baixo mostram que o processo é estável. Desta forma, efetuar uma melhoria no desvio do tempo de *setup*, que já possui um valor baixo, pode ser muito difícil, custoso e não resultar em uma redução significativa no *lead time*. Por outro lado, efetuar melhorias na média do tempo de *setup* aumenta o tempo que o equipamento está disponível para a produção efetiva, o que resulta em reduções significativas do *lead time*. Adicionalmente, para esta situação a melhoria no pior caso é sugerida como uma boa alternativa para situações nas quais não seja possível efetuar uma melhoria na média devido a ser muito difícil ou custosa. Desta forma a estratégia de melhoria no pior caso pode trazer bons resultados, pois pode reduzir tanto à média quando a variabilidade do tempo de *setup*.

Na presença de variabilidade moderada, para tempo de *setup* baixo não há diferença entre as três estratégias, com exceção da melhoria de 30% na qual a melhoria na média é a melhor opção. Em relação a tempo de *setup* médio não há diferença entre as três estratégias para a melhoria de 10%. Já para a melhoria de 20% a estratégia de melhoria na média supera a melhoria no pior caso e para um nível de melhoria de 30% a estratégia de melhoria na média é a mais indicada. Por fim, referente ao tempo de *setup* alto a estratégia focada na média é a melhor opção, com exceção da melhoria de 10%, na qual não houve diferença entre as três estratégias e nesse caso a estratégia de melhoria no pior caso é uma boa alternativa. A mensagem aqui é para situações com tempo de *setup* alto e/ou com nível de melhoria de 30% a estratégia de melhoria na média é a melhor opção. Para as demais situações nas quais não tenha sido encontrada uma diferença significativa entre as três estratégias, a utilização da estratégia de melhoria no pior caso é sugerida como a 1ª opção de melhoria.

Na presença de alta variabilidade e baixo nível de tempo de *setup*, não há diferença entre as três estratégias. Para tempo de *setup* médio, foi observado que a estratégia focada na média é a melhor opção para um nível de melhoria de 30%. Já para melhorias de 10% e 20% não há diferença entre as 3 estratégias a estratégia focada na eliminação dos piores casos é sugerida como a 1ª opção de melhoria. Por fim, para um tempo de *setup* alto, não há diferença entre as três estratégias para uma melhoria de 10%. Para uma melhoria de 20% a estratégia focada na média supera a melhoria no desvio. Por fim, para um nível de melhoria de 30% a estratégia focada no desvio e piores casos são melhores que a focada na média. A mensagem básica aqui é que não há uma estratégia de melhoria predominantemente

superior, e, portanto a estratégia focada na eliminação dos piores casos é sugerida como a 1ª opção de melhoria, por ser em muitas situações mais fácil de ser implantada e menos custosa.

### 5.6.3 Considerações finais

Conforme observado neste capítulo, para situações com baixa variabilidade a estratégia de melhoria na média é a melhor opção. Além disso, em situações nas quais não seja possível realizar uma melhoria na média, a estratégia focada na eliminação dos piores casos é uma boa alternativa. Foi observado que essas conclusões independem da complexidade da tarefa de *setup*, ou seja, tanto para tarefas simples quanto complexas essas constatações se mantiveram.

Uma constatação importante é que a estratégia de melhoria no pior caso pode ser utilizada como 1ª opção de melhoria para situações de variabilidade moderada e alta, pois a estratégia focada no pior caso pode ser mais fácil de ser implantada e menos custosa do que as estratégias focadas na média ou no desvio. É importante destacar que no caso de variabilidade moderada, essa constatação é mais evidente para tarefas simples de *setup*, pois para tarefas complexas de a estratégia focada na média foi superior em 4 das 9 situações testadas.

Os resultados encontrados nos capítulos 3, 4 e 5 mostram que para situações de variabilidade moderada e alta a estratégia de melhoria no pior caso deve ser a estratégia escolhida para realização de melhorias. Ou seja, a estratégia de melhoria focada nos piores casos pode trazer benefícios, aumentando a disponibilidade das máquinas e reduzindo o *lead time*. Esses benefícios observados constituem uma contribuição importante, pois a estratégia de melhoria no pior caso é pouco explorada na literatura de gestão e produção.

Adicionalmente, para baixa variabilidade a estratégia de melhoria na média é a melhor opção. No entanto, foi observado que para o tempo de reparo e tempo de *setup* a estratégia de melhoria no pior caso é uma boa alternativa. Já para o tempo entre falhas, essa constatação não se sustenta, pois nesse caso a única alternativa que apresenta benefícios significativos é a estratégia de melhoria focada na média.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões deste trabalho.

## CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES

---

O objetivo do presente trabalho foi identificar as situações nas quais a estratégia de melhoria no *pior caso* produz um efeito superior ou semelhante às estratégias de melhoria na *média* e na *variabilidade*. Mais especificamente, foram efetuadas melhorias no tempo de reparo, tempo entre falhas e tempo de *setup*, direcionadas pelas três estratégias investigadas e foi analisado o efeito que cada uma delas produz no *lead time*. Para atingir esse objetivo, foi realizada uma modelagem/simulação considerando um ambiente de máquina única que processa um único tipo de produto.

Ao longo dos capítulos 3, 4 e 5 foram apresentadas as situações nas quais a estratégia de melhoria no *pior caso* é indicada. Desta forma, conclui-se que esta tese atingiu em sua plenitude ao objetivo proposto.

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas com a realização da presente tese. Desta forma, o mesmo é estruturado da seguinte forma: na seção 6.1 são apresentadas as contribuições para a prática e para a academia e, na seção 6.2, são apresentadas as principais limitações e são oferecidas sugestões de trabalhos futuros.

### 6.1 Contribuições práticas e para a academia da presente tese

Os resultados encontrados na presente tese mostram que para situações de variabilidades moderadas e altas a estratégia focada no pior caso é a melhor opção de melhoria considerando as três variáveis investigadas neste estudo. Ou seja, a estratégia de melhoria focada nos piores casos pode trazer benefícios mais facilmente e a um menor custo aumentando a disponibilidade das máquinas e reduzindo o *lead time*. Esses benefícios observados constituem uma contribuição importante para a academia, pois a estratégia de melhoria no pior caso é pouco explorada na literatura de gestão e produção.

Adicionalmente, para baixa variabilidade a estratégia de melhoria na média é a melhor opção. No entanto, foi observado que para o tempo de reparo e tempo de *setup* a estratégia de melhoria no pior caso é uma boa alternativa para as situações nas quais não seja possível efetuar uma melhoria na média dessas variáveis. Já para o tempo entre falhas, essa constatação não se sustenta, pois nesse caso a única alternativa que apresenta benefícios significativos é a estratégia de melhoria focada na média.

A principal contribuição para a prática foi fornecer as situações nas quais os gerentes de produção podem utilizar a estratégia focada no pior caso para realizar melhorias em variáveis do chão de fábrica. Com isso, além da estratégia focada na média e no desvio, os gerentes de produção podem optar pela melhoria no pior caso, pois a mesma é mais fácil de ser obtida e menos custosa e pode atacar simultaneamente a média e a variabilidade.

A principal contribuição para a academia é a de sugerir a estratégia de melhoria focada no pior caso como uma alternativa interessante de realização de melhorias em variáveis do chão de fábrica. Conforme explicado ao longo desta tese, poucos trabalham com o foco na melhoria nos piores casos, o que constitui um *gap* na literatura. Desta forma, a preocupação central deste trabalho foi a identificação das situações nas quais a estratégia de melhoria no *pior caso* produz um efeito no *lead time* superior ou semelhante às estratégias de melhoria na *média* e na *variabilidade*. Essa contribuição para a literatura visou contribuir para minimizar o *gap* encontrado e visa transformar a estratégia de melhoria no pior caso em uma boa alternativa de realização de melhorias em variáveis do chão de fábrica.

Outra importante contribuição para a academia foi a apresentação das distribuições de probabilidade mais adequadas para modelar variáveis do chão de fábrica e a utilização das mesmas na presente tese. Nota-se que foi constatado que esse ponto é uma lacuna na literatura, pois muitos trabalhos não fazem o uso de distribuições de probabilidade. Isso faz com que o estudo seja menos real tendo em vista que na prática há a presença de incerteza, a qual é mais bem representada por distribuições de probabilidade.

Por fim, a presente tese forneceu também um novo modelo de simulação que permite comparar as estratégias de melhoria na média, desvio e pior caso para o tempo de reparo, tempo entre falhas e tempo de *setup* e, além disso, já considera as distribuições de probabilidade normal e lognormal.

É importante destacar que as conclusões obtidas neste trabalho são sujeitas a determinadas limitações, as quais são explicadas na seção 6.2.

## **6.2 Principais limitações da presente tese e estudos futuros**

As conclusões obtidas neste trabalho são sujeitas a determinadas limitações. Nesta tese foram consideradas três variáveis de chão de fábrica e foram testados diferentes cenários de acordo com diferentes níveis de melhoria. Desta forma, as conclusões apresentadas neste trabalho são válidas para os pressupostos e dados utilizados nos capítulos 3, 4 e 5.

Mais explicitamente, as principais limitações em conjunto com as propostas de pesquisas futuras são:

- i. A avaliação comparativa das estratégias de melhoria focada na média, na variabilidade e nos piores casos não foi feita com valores reais. No entanto, trabalhos futuros podem verificar a robustez das conclusões obtidas na presente pesquisa utilizando dados reais de outras empresas, inclusive nacionais.
- ii. Foram utilizadas as distribuições de probabilidade normal e lognormal para modelar variáveis do chão de fábrica. Trabalhos futuros podem ser feitos utilizando distribuições de probabilidade diferentes como a de Weibull, por exemplo.
- iii. Neste trabalho foi considerada uma estação de trabalho com máquina única. Trabalhos futuros podem investigar a mesma questão de pesquisa para um padrão de fluxo *flow shop* com mais estações de trabalho.
- iv. Neste trabalho foram realizadas melhorias em cada uma das variáveis separadamente. Trabalhos futuros podem investigar a utilização de melhorias conjuntas em duas ou mais variáveis. Além disso, trabalhos futuros podem investigar outras variáveis de chão de fábrica que possuem efeito no *lead time*.

## CAPÍTULO 7 REFERÊNCIAS

---

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.

AMBANI, S.; MEERKOV, S.M.; ZHANG, L. Feasibility and optimization of preventive maintenance in exponential machines and serial lines. **IEEE Transactions on Reliability**, v. 42, n. 10, p. 766-777, 2010.

ANTUNES, J. *ET AL.* **Sistemas de Produção: conceitos e práticas para projeto e gestão da produção enxuta**. Porto Alegre: Bookman, 2008. 326p

ASHA, G; NAIR, N. U. Reliability properties of mean time to failure in age replacement models. **International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering**, v. 17, n. 1, p. 15-26, 2010.

BENDELL, T. A review and comparison of six sigma and the lean organisations. **The TQM Magazine**, v. 18, n.3, p. 255-262, 2006.

BERENDS, P.; ROMME, G. Simulation as a research tool in management studies. **European Management Journal**, v. 17, n.6, p. 576-583, 1999.

BERTOLINI, M.; BOTTANI, E.; RIZZI, A.; BEVILACQUA, M. *Lead time* reduction through ICT application in the footwear industry: A case study. **International Journal of Production Economics**, v. 110, p. 198-212, 2007.

BERTRAND, J.W.M.; FRANSOO, J.C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n.2, p. 241-264, 2002.

BETTERTON, C.E.; SILVER, S. J. Detecting bottlenecks in serial production lines – a focus on interdeparture time variance. **International Journal of Production Research**, v. 50, n. 15, p. 4158-4174, 2012.

BRAGLIA, M.; CARMIGNANI, G.; FROSOLINI, M.; ZAMMORI, F. Data classification and MTBF prediction with a multivariate analysis approach. **Reliability Engineering and System Safety**, 97, p. 27-35, 2012.

BRAH, S. A., CHONG, W. K. Relationship between total productive maintenance and performance. **International Journal of Production Research**, 42 (12), 2383-2401, 2004.

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

BUNCE, M. M.; WANG, L.; BIDANDA, B. Leveraging Six Sigma with industrial engineering tools in crateless retort production **International Journal of Production Research**, v. 46, n. 23, p. 6701-6719, 2008.

BURBIDGE, J. L. **The introduction of group technology**. London: Heinemann, 1975.

CAKMAKCI, M.. Process improvement: performance analysis of the *setup* time reduction-SMED in the automobile industry. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 41, p. 168-179, 2009.

CARLSON, J.G. Improvement curve analysis of changeovers in JIT environments. **Engineering costs and production economics**, v. 12, p. 259-266, 1987.

CHAHARSOOGHI, S.K.; HEYDARI, J. LT variance or LT mean reduction in supply chain management: which one has a higher impact on SC performance? **International Journal of Production Economics**, v. 124, p. 475-481, 2010.

CHAN, F., LAU, H. IP, R., CHAN, H., KONG, S. Implementation of total productive maintenance: A case study. **International Journal of Production Economics**, 95, 71-94, 2005.

CHELBI, A.; REZG, N. Analysis of a production/inventory system with randomly failing production unit subjected to a minimum required availability level. **International Journal of Production Economics**, 99, 131-143, n.1-2, 2006

CHEN, M.; XU, C.; ZHOU, D. Maintaining Systems With Dependent Failure Modes and Resource Constraints. **IEEE Transactions on Reliability**,v. 61, n. 2, p. 440-451, 2012.

CHHAJED, D.; KIM., K. How important are *lead times*? **Purchasing Magazine**, v.119. n. 5, 1995.

CHUNG, C. A. **Simulation modeling handbook: a practical approach**. Florida: CRC Press, 2004.

CORONADO, R. B.; ANTONY, J. Critical success factors for the successful implementation of six sigma projects in organisations. **The TQM Magazine**, v. 14, n. 2, p. 92-99, 2002.

CORREA, H.; GIANESI, I. G. N. **Just in time, MRPII e OPT**. 2 ed. São Paulo: Atlas, 1993.

COIT, D. System-reliability confidence-intervals for complex-systems with estimated component-reliability. **IEEE Transactions on Reliability**,v. 46, n. 4, p. 487-493, 1997.

CRAIGHEAD, C. W.; MEREDITH, J. R. Operations management research: evolution and alternative future paths. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 28, p.710-726, 2008.

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

CRISTOPHER, M. **Logística e gerenciamento da cadeia de suprimentos**. São Paulo: Cengage Learning, 2013.

DIABY, M. Integrated batch size and *setup* reduction decisions in multi-product, dynamic manufacturing environments. **International Journal of Production Economics**, v. 67, n.3. p. 219-233, 2000.

DIABY, M.; CRUZ, J. M.; NSAKANDA, A. L. Shortening cycle times in multi-product, capacitated production environments through quality level improvements and *setup* reduction. **European Journal of Operational Research**, v. 228, p. 526-535, 2013.

ERICKSEN, P. D.; STOFLET, N. J.; SURI, R. **Manufacturing Critical-path Time (MCT): The QRM Metric for *Lead time***. Technical Report, Center for QRM, Wisconsin-Madison, 2007

FEIGENBAUN, A. V. **Total quality control**. New York:McGraw Hill, 1986.

FENTON, N. E. A critique of software defect prediction models. **IEEE Transactions on software engineering**, v. 25, n. 5, p. 675-689, 1999.

FERNANDES, F.C.F; GODINHO FILHO, M. **Planejamento e Controle da Produção: Dos Fundamentos ao Essencial**. São Paulo: Atlas, 2010.

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

FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. R. **Confiabilidade e manutenção industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

GLOCK, C. H. *Lead time* reduction strategies in a single-vendor–single-buyer integrated inventory model with lot size-dependent *lead times* and stochastic demand. **International Journal of Production Economics**, v. 136, p. 37-44, 2012.

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

GODINHO FILHO, M. ; SAES, E. V . From time-based competition (TBC) to quick response manufacturing (QRM): the evolution of research aimed at *lead time* reduction. **International Journal, Advanced Manufacturing Technology**, v. 64, p. 1177-1191, 2013.

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

estratégia híbrida *System Dynamics-Factory Physics*. São Paulo. **Produção**, v.19, n.1, jan/abr., p.214-224, 2009.

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

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

GODINHO FILHO, M.; UZSOY, R. The impact of simultaneous continuous improvement in *setup* and repair time on manufacturing cycle times under uncertain conditions. **International Journal of Production Research**, v.51, n.2, 2012.

GODINHO FILHO, M. Effect of lot-size reduction and Continuous Improvement programs on Work In Process and utilisation: A study for single-machine and flow-shop environments. **International Journal of Logistics**, v.15, p. 285-302, 2012.

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

GODINHO FILHO, M.; BARCO, C.F. A framework for choosing among different lean-based improvement programs. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.81, p. 183- 197, 2015.

GODINHO FILHO, M.; UTIYAMA, M. H. R. Comparing different strategies for the allocation of improvement programmes in a *flow shop* environment. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.77, p. 1365- 1385, 2015.

GOLDRATT, E. **The goal**: Excellence in manufacturing. Croton-on-Hudson, NY:North River Press, 1984.

GOLDRATT, E. **A meta na prática**. Tradutora Maria Lúcia Cumo. São Paulo: Nobel, 2006.

GONG, Q.; WANG, S.; LAI, K.K. Stochastic analysis of TPS: expose and eliminate variability by highly specifying WCP. **International Journal of Production Research**, v. 47, n. 3, p. 751-775, 2009.

GROOVER, M. P. **Automation, Production, and Computer-Integrated Manufacturing**. Second Edition. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 2000.

GUPTA, R.; MUMTAZ, S. Z. Stochastic analysis of a two-unit cold standby system with maximum repair time and correlated failures and repairs. **Journal of Quality in Maintenance**, v. 2, n. 3, p. 66–76, 1996.

- HE, X. J.; KIM, J.G.; HAYYA, J.C. The cost of lead-time variability: The case of the exponential distribution. **International Journal of Production Economics**, v. 97, p. 130-142, 2005
- HINES, W. W.; MONTGOMERY, D.C.; GOLDSMAN, D. M.; BORROR, C. M. **Probabilidade e Estatística na Engenharia**. Rio de Janeiro: LTC, 2013
- HONG, J.; HAYYA, J.C. Dynamic lot sizing with *setup* reduction. **Comput. Ind. Eng.**, v. 24, n. 2, p. 209-218, 1993.
- HOPP, W. J.; IRAVANI, S. M. R.; SHOU, B. A diagnostic tree for improving production line performance. **Production and operations management**, v. 16, n.1, 77–92, 2007.
- HOPP, W. J.; SPEARMAN, M. L. **Factory Physics: Foundations of Manufacturing Management**, Nova Iorque: Irwin, 2001, 698p.
- HOPP, W. J.; SPEARMAN, M.L. **Factory Physics: Foundations of Manufacturing Management**. Nova Iorque: McGraw Hill Higher Education, 2008, 720p.
- HOPP, W. J.; SPEARMAN, M.L. **A ciência da fábrica**. Porto Alegre: Bookman, 2013, 694p.
- HWANG, H., KIM, D.B., KIM, Y.D. Multiproduct economic lot size models with investments costs for *setup* reduction and quality improvement. **International Journal of Production Research**, v. 31, 691–703, 1993.
- KAMPEN, T.J. Van; DONK, D. P. Van; ZEE, D. J. Van Der. Safety stock or safety *lead time*: coping with unreliability in demand and supply. **International Journal of Production Research**, v. 4, n. 24, p. 7463-7481, 2010.
- KAYTON, D., TEYNER, T., SCHWARTZ, C., UZSOY, R. Focusing maintenance improvement efforts in a wafer fabrication facility operating under theory of constraints. **Production and Inventory Management**, (Fourth Quarter), 51–57, 1997.
- KUIK, R.; TIELEMANS, P. F. J. Analysis of expected queueing delays for decision making in production planning. **European Journal of Operational Research**, v. 110, p. 658-681 1998.
- KUIK, R.; TIELEMANS, P. F. J. Lead-time variability in a homogeneous queueing model of batching. **International Journal of Production Economics**, v. 59, p. 435-441, 1999.
- LAKATOS, E.M.; MARCONI, M.A. **Metodologia do trabalho científico: procedimentos básicos, pesquisa bibliográfica, projeto e relatório, publicações e trabalhos científicos**. 6 ed. São Paulo: Atlas, 2001. 219 p.
- 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.
- LI, L.; CHANG, Q.; NI, J.; BILLER, S. Real time production improvement through bottleneck control. **International Journal of Production Research**, v. 47, n.21. p. 6145-6158, 2009.

LIAO, W.; PAN, E.; XI, L. Preventive maintenance scheduling for repairable system with deterioration. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 21, n.6. p. 875-884, 2010

LIKER, J.K. **O modelo Toyota: 14 princípios de gestão da maior fabricante do mundo**. Porto Alegre: Bookman, 2005.

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

LIU, X.; ÇETINKAYA, S. A note on quality improvement and *setup* reduction in the joint economic lot size model. **European Journal of Operational Research**, v. 182, n.1. p. 194-204, 2007

LYNES, K.; MILTENBURG, J. The application of an open queueing network to the analysis of cycle time, variability, *throughput*, inventory and cost in a batch production system of a microelectronic manufacturer. **International Journal of Production Economics**, 37, 189–203, 1994.

MALEYEFF, J.; ARNHEITER, E. D.; VENKATESWARAN, V. The continuing evolution of Lean Six Sigma. **The TQM Journal**, v. 24, n. 6, p 542 – 555, 2012.

MARTINS, P. G.; LAUGENI, F. P. **Administração da produção**. São Paulo: Saraiva, 2006.

MARTINS, R. A. Estratégias quantitativa e qualitativa. In: MIGUEL, P. A. C. ed. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010, p.73-128.

MASON-JONES, R.; TOWILL, D. R. Total cycle time compression and the agile logistic network. **International Journal Production Economics**, v.62, p.61-73, 1999.

MEREDITH, J. R. *ET AL*. Alternative research paradigms in operations. **Journal of operations Management**, v. 8, p. 297-326, 1989.

MOAYED, F., SHELL, R. Comparison and evaluation of maintenance operations in Lean versus non-Lean production systems, **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 15, n. 3, 285-296, 2009.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

NAHMIAS, S. **Production and operation analyses**. Singapore: McGraw-Hill, 2005.

NAKAJIMA, S. **Introduction to Tpm**. Portland, OR: Productivity Press, 1988.

NYE, T. J.; JEWKES, E. M.; DILTS, D.M. Optimal investment in *setup* reduction in manufacturing systems with WIP inventories. **European Journal of Operational Research**, v. 135, p. 128-141, 2001.

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

OUYANG, L.Y; CHEN, C.K.; CHANG, H. C. Quality improvement, setup cost and lead-time reductions in lot size reorder point models with an imperfect production process. **Computers & Operations Research**, v. 29, p. 1701-1717, 2002.

OUYANG, L.Y; WU, K.S.; HO, C.H. An integrated vendor–buyer inventory model with quality improvement and *lead time* reduction. **International Journal of Production Economics**, v. 108, p. 349-358, 2007.

PANDE, P.S.; NEUMAN, R.; CAVANAGH, R.R. **The Six Sigma Way: How GE, Motorola and Other Top Organizations are Honing Their Performance**. New York: McGraw Hill, 2000.

PATÉ-CORNELL, M. E.; DILLON, R. L.; GUIKEMA, S. D. On the limitations of redundancies in the improvement of System Reliability. **Risk Analysis**, v. 24, n. 6, 1423-1436, 2004.

PORTER, A. M. Unlocking leadtimes. **Purchasing**, p. 34-37, March 6, 2003.

RYU, S. W.; LEE, K. K. A stochastic inventory model of dualsourced supply chain with lead-time reduction. **International Journal of Production Economics**, v. 81-82, p. 513-524, 2003.

RAJARAM, K.; ROBOTIS, A. Analyzing variability in continuous processes. **Production, Manufacturing and Logistics**, v. 156, p. 312-325, 2004.

RAMIREZ-MARQUEZ, J. E.; JIANG, W. On improved confidence bounds for system reliability. **IEEE Transactions on Reliability**, v. 55, n.1, 2006.

RENTES, A. F. **TransMeth – Proposta de uma Metodologia para Condução de Processos de Transformação de Empresas**. Tese (Livre-Docência) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

ROTHER, M.; SHOOK, J. **Aprendendo a enxergar – mapeando o fluxo de valor para agregar valor e eliminar o desperdício**. São Paulo: Lean Institute Brasil, 2003.

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

SCHULTZ, C. R. Spare parts inventory and cycle time reduction. **International Journal of Production Research**, v. 42, n.4, 759-776, 2004.

SHERIF, J. S. Repair times for systems that have high early failures. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v.9, n.3, p. 279-283, 2003.

SHINGO S. **A revolution in manufacturing, the SMED system**. Productivity Press, 1985.

SHINGO, S. **A revolution in manufacturing: The SMED System**. Cambridge: Productivity Press, 1986.

SHINGO, S. **A Study of the Toyota Production System**. Productivity Press, 1989.

SHINGO, S. **O Sistema Toyota de Produção do ponto de vista da Engenharia de Produção**. Porto Alegre: Bookman, 1996. 292p.

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**, v. 14, n. 4, p. 343-355, 2008.

SINGH, V. V.; SINGH, S. B.; RAM, M.; GOEL, C. K. Availability, MTTF and cost analysis of a system having two units in series configuration with controller. **International Journal of System Assurance Engineering and Management**, v. 4, n. 4, p. 341-352, 2013.

SLACK, N. et al. **Administração da produção**. São Paulo: Atlas, 2002.

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

STALK JR., G. Time - the next source of competitive advantage. **Harvard Business Review**, p 41-51, 1988.

STALK, G., HOUT, T.M. **Competing against time: how time-based competition is reshaping global markets**. New York: Free Press, 1990.

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

SURI, R. **It's about time: the competitive advantage of quick response manufacturing**. New York: Productivity Press, 2010.

SURI, R.; KRISHNAMURTHY, A. **How to Plan and Implement POLCA – A Material Control System for High Variety or Custom-Engineered Products**, Technical Report, Center for Quick Response Manufacturing, University of Wisconsin-Madison, WI. – 2003.

THOMAS, H.R.; MICHAEL, J.H.; SOUZA, ZAVRSKI, I. Reducing variability to improve performance as a lean construction principle. **Journal of Construction Engineering and Management ASCE**, v. 128, n.2, p. 144-154, 2002.

WADHWA, S.; RAO, K.S.; CHAN, F.T.S. Comparative influence of three flexibility types on manufacturing lead-time performance. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 29, p. 1002-1007, 2006.

WAEYENBERGH, G.; PINTELON, L. A framework for maintenance concept development. **International Journal of Production Economics**, v. 77, p. 299-313, 2002.

WAEYENBERGH, G.; PINTELON, L. Maintenance concept development: A case study. **International Journal of Production Economics**, v. 89, p. 395-405, 2004.

WERKEMA, M. C. C.; DRUMOND, F. B.; AGUIAR, S. **Análise de variância: comparação de várias situações**. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 1996.

WILLITS, C.; DIETZ, D.; MOORE, A. Series-system reliability-estimation using very small binomial samples, *IEEE Transactions on Reliability*, v. 46, n. 2, p. 296, 1997.

WILLMOTT, P. **Tpm experience: showing the way to better equipment care through teamwork**. Horton Kirby, UK: Findlay Publications, 1997.

WOMACK, J. P.; JONES, D. T. **A mentalidade enxuta nas empresas**. 5 ed. Rio de Janeiro: Campus, 1998.

WOMACK, JAMES P.; JONES, DANIEL T.; ROOS, DANIEL. **A máquina que mudou o mundo**: baseado no estudo do Massachusetts Institute of Technology sobre o futuro do automóvel. Ivo Korytowski (Trad.). 5 ed. Rio de Janeiro: Campus, 1992