

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**DECISÕES DE POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO COM
BUFFER E INSPEÇÃO DE QUALIDADE PARA UM SISTEMA
DE PRODUÇÃO TIPO FILA**

DAIANE DE OLIVEIRA COSTA

Orientador: Prof. Rodrigo Sampaio Lopes, Doutor

CARUARU
2017

DAIANE DE OLIVEIRA COSTA

**DECISÕES DE POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO COM
BUFFER E INSPEÇÃO DE QUALIDADE PARA UM SISTEMA
DE PRODUÇÃO TIPO FILA**

Dissertação de Mestrado apresentada à UFPE para a obtenção de grau de Mestre como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Centro Acadêmico do Agreste (Área de Concentração: Otimização e Gestão da Produção). Orientador: Rodrigo Sampaio Lopes, Doutor.

CARUARU

2017

Catálogo na fonte:
Bibliotecária – Simone Xavier CRB/4 - 124

C837d Costa, Daiane de Oliveira.
Decisões de políticas de manutenção com buffer e inspeção de qualidade para um sistema de produção tipo fila. / Daiane de Oliveira Costa. – 2017.
105f. ; 30 cm.

Orientador: Rodrigo Sampaio Lopes
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2017.
Inclui Referências.

1. Manutenção. 2. Inspeção de produto. 3. Gestão da produção. I. Lopes, Rodrigo Sampaio (Orientador). II. Título.

658.5 CDD (23. ed.) UFPE (CAA 2017-058)

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA
DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE
MESTRADO ACADÊMICO DE**

DAIANE DE OLIVEIRA COSTA

“Decisões de Políticas de Manutenção com Buffer e Inspeção de Qualidade para um Sistema de Produção Tipo Fila”

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: OTIMIZAÇÃO E GESTÃO DA PRODUÇÃO

A comissão examinadora composta pelos professores abaixo, sob a presidência do primeiro, considera o candidato DAIANE DE OLIVEIRA COSTA **APROVADO**.

Caruaru, 21 de fevereiro de 2017.

Prof. RODRIGO SAMPAIO LOPES, Doutor (UFPE)

Prof. MARCELO HAZIN ALENCAR, Doutor (UFPE)

Prof. RODRIGO JOSÉ PIRES FERREIRA, Doutor (UFPE)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço ao meu orientador, Rodrigo Sampaio Lopes, pela total dedicação empregada neste trabalho. Obrigada por acreditar em minha capacidade, por me apoiar durante essa trajetória e pelos valiosos conselhos que levarei para minha vida profissional.

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Centro Acadêmico do Agreste - PPGEP/UFPE-CAA, pelo suporte dado para realização deste mestrado, incluindo com isso todos os professores deste programa.

À Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior – CAPES, pelo apoio financeiro durante o período de realização do mestrado.

À minha mãe, Maria Aparecida, por todo amor, incentivo e confiança; pelos vários conselhos e ensinamentos que me tornaram a pessoa que sou hoje; por muitas vezes abrir mão das suas vontades para que as minhas se tornassem possíveis; o meu eterno agradecimento pela incansável dedicação a mim prestada.

Ao meu pai, Neilson Teixeira, por ter se feito sempre tão presente em minha vida, não permitindo que nada me faltasse. Obrigada pela confiança em mim depositada.

Às minhas irmãs, Danniely e Beatriz, pela companhia e momentos de descontração; por dividirem comigo tantas ocasiões felizes, que nos permitiram superar as diferenças.

À minha madrinha, Maria Rita, pessoa que representa um exemplo de bondade e sabedoria; obrigada por me incentivar com as suas sábias e reconfortantes palavras, só tenho a agradecer pelo carinho incondicional.

À toda minha família, que é a minha base; a minha referência de união, amor, confiança e apoio.

Às amigas do mestrado, Nathalia e Julianna, pela amizade verdadeira que construímos no decorrer desses dois anos; com vocês compartilhei desde os momentos de aflição até os momentos de imensa felicidade a cada etapa concluída; agradeço pela paciência, pelas madrugadas de estudo apoiando umas às outras e pelas palavras de incentivo que não me permitiram desistir.

Enfim, a todos que de alguma forma me ajudaram na conclusão de mais essa etapa da minha vida, os meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

As rápidas mudanças nos mercados, a incerteza crescente em demandas de clientes, e as falhas em máquinas não confiáveis, contribuíram para elevar o custo de produção no atual ambiente industrial, fazendo com que a manutenção passasse a ocupar um papel estratégico dentro das empresas. No entanto, a manutenção apresenta-se como uma atividade conflitante à produção, uma vez que ações de manutenção provocam a indisponibilidade da unidade de produção quando esta precisa ser reparada ou substituída. Outra consequência das ações de manutenção é o impacto que estas práticas podem exercer na qualidade do processo de fabricação. Com o objetivo de ajudar na resolução desses problemas, este trabalho busca determinar políticas ótimas de manutenção com reparo mínimo e substituição considerando estoque buffer e inspeção de qualidade em um sistema de produção do tipo fila. Dessa forma, são desenvolvidos, primeiramente, dois modelos para o problema de indisponibilidade, no qual um deles trata da escassez provocada pelas ações de RM e outro apresenta a construção de um buffer para amenizar este problema. Em seguida, são apresentados outros cinco modelos referentes à inspeção de qualidade. O primeiro considera o impacto negativo que o RM provoca quando não existe aplicação de uma política de inspeção dos itens produzidos, enquanto os demais consideram a inserção de políticas de inspeção, retratando, em cada caso, diferentes aspectos como erros de inspeção, política de garantia do produto e retrabalho, como forma de diminuir esse impacto. Os resultados mostram que a adoção do estoque buffer à política de manutenção apresenta uma boa alternativa. Outra constatação foi que ao incorporar o retrabalho na política de inspeção automatizada obteve-se uma maior redução no custo total, que consiste no objetivo do problema.

Palavras-chave: manutenção; reparo mínimo; buffer; inspeção do produto.

ABSTRACT

Constant changes in markets, increasing uncertainty in customer demands, and unexpected failures in unreliable machines have raised production costs in the current industrial environment, so maintenance started to play a strategic role within companies. However, maintenance opposes to production since maintenance actions cause the production unit to be unavailable when it needs to be repaired or replaced. Another consequence of maintenance activities is the impact that they can cause on the quality of the manufacturing process. In this context, this paper aims to solve these problems by determining optimal maintenance policies with minimum repair and replacement, considering buffer stock and quality inspection in a queue-like production system. Firstly two models are developed for the problem of unavailability, in which one deals with the scarcity caused by the actions of RM and another presents the construction of a buffer to mitigate this problem. Then, five other models are presented for quality inspection. The first considers the negative impact that the RM causes when there is no application of an inspection policy of the items produced, while the others consider the insertion of inspection policies, showing, in each case, different aspects such as errors of inspection, product warranty policy and rework, as a way to reduce this impact. The results showed that the adoption of the buffer stock to the maintenance policy presents a good alternative. Another conclusion was that the incorporation of rework in the automated inspection policy resulted in a greater reduction in total cost, which is the objective of the problem.

Keywords: maintenance; minimum repair; buffer; inspection of product.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Modelo de resolução do problema	15
Figura 3.1: Distribuição dos artigos de buffer com manutenção por década.....	37
Figura 3.2: Distribuição das pesquisas conjuntas entre buffer e manutenção pelo mundo.....	37
Figura 3.3: Intersecção das variáveis de decisão dos problemas de manutenção com buffer.....	40
Figura 3.4: Distribuição dos artigos de política de inspeção de produtos e manutenção por década	47
Figura 4.1: Representação do sistema de produção tipo fila	53
Figura 4.2: Representação do sistema quando é realizada uma ação de manutenção	57
Figura 4.3: Representação do sistema de produção tipo fila com buffer	58
Figura 4.4: Evolução do estoque buffer	59
Figura 4.5: Fluxo dos itens durante o processo de produção imperfeito	64
Figura 4.6: Fluxo dos itens durante os processos de produção e inspeção imperfeitos.....	66
Figura 4.7: Fluxo dos itens durante os processos de produção e inspeção imperfeitos com erros uniformes.....	70
Figura 4.8: Fluxo dos itens durante os processos de produção e inspeção imperfeitos com erros exponenciais	73
Figura 4.9: Manutenção do processo de inspeção	75
Figura 4.10: Fluxo dos itens durante os processos de produção e inspeção imperfeitos com erros exponenciais e retrabalho	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Distribuição de publicações de buffer com manutenção por Jornal/Revista	36
Tabela 3.2: Distribuição das variáveis de decisão dos problemas de manutenção com buffer	39
Tabela 3.3: Distribuição dos métodos utilizados para resolução dos problemas de manutenção com buffer	42
Tabela 3.4: Distribuição das variáveis de decisão dos problemas de inspeção e manutenção.....	48
Tabela 3.5: Distribuição dos métodos utilizados para resolução dos problemas de inspeção com manutenção.....	49
Tabela 4.1: Descrição da nomenclatura utilizada	51
Tabela 5.1: Parâmetros para análise numéricas dos casos 1 e 2.....	83
Tabela 5.2: Comparação entre as soluções ótimas dos casos 1 e 2.	84
Tabela 5.3: Parâmetros para análise numérica dos casos 3, 4, 5, 6 e 7.....	86
Tabela 5.4: Comparação entre as soluções ótimas dos casos 3, 4, 5, 6 e 7.....	87
Tabela 5.5: Variação dos parâmetros dos casos 1 e 2.....	89
Tabela 5.6: Variação dos parâmetros dos casos 3 ao 7.....	92

LISTA DE SIGLAS

RM	Reparo mínimo
MP	Manutenção Preventiva
MC	Manutenção Corretiva
EPQ	Economic Production Quantity

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Objetivos do Trabalho	13
1.1.1 Objetivo Geral.....	13
1.1.2 Objetivos Específicos.....	13
1.2 Metodologia	14
1.3 Estrutura do trabalho	16
2 BASE CONCEITUAL	17
2.1 Manutenção	17
2.2 Tipos de Manutenção	18
2.2.1 Manutenção Corretiva.....	18
2.2.2 Manutenção Preventiva.....	19
2.3 Política de substituição baseada em idade com reparo mínimo	20
2.4 Integração das decisões entre manutenção e produção	21
2.5 Integração de decisões entre manutenção e estoque	22
2.5.1 Estoque Buffer.....	23
2.6 Integração de decisões entre manutenção e qualidade	23
2.6.1 Políticas de inspeção do produto.....	24
2.6.2 Erros tipo I e tipo II.....	25
2.6.3 Retrabalho.....	26
2.6.4 Garantia.....	27
2.7 Síntese do Capítulo 2	27
3 ANÁLISE DA LITERATURA	29
3.1 Análise da literatura relacionada a decisões de política de manutenção com buffer	29
3.1.1 Distribuição de publicações.....	35
3.1.2 Variáveis de decisão consideradas na formulação dos problemas.....	38
3.1.3 Métodos utilizados para otimização dos problemas.....	41
3.1.4 Síntese da revisão das análises de decisões conjuntas entre buffer e manutenção.....	43
3.2 Análise da literatura relacionada a decisões de manutenção com inspeção de qualidade do produto	43

3.2.1 Distribuição de publicações ao longo dos anos.....	46
3.2.2 Variáveis de decisão consideradas na formulação dos problemas.....	47
3.2.3 Métodos utilizados para otimização dos problemas.....	49
3.2.4 Síntese da revisão das análises de decisões conjuntas entre inspeção e manutenção.....	49
4 DESCRIÇÃO DOS MODELOS PROPOSTOS.....	51
4.1 Nomenclatura utilizada.....	51
4.2 Modelo Primário.....	52
4.3 Modelos de manutenção considerando escassez de itens e estoque buffer.....	56
4.3.1 Caso 1: Modelo de manutenção com reparo mínimo e substituição considerando escassez de itens processados.....	56
4.3.2 Caso 2: Modelo de manutenção com reparo mínimo e substituição considerando buffer....	58
4.4 Modelos de manutenção considerando produção imperfeita e políticas de inspeção.....	62
4.4.1 Caso 3: Modelo de manutenção com reparo mínimo e substituição considerando produção imperfeita.....	63
4.4.2 Caso 4: Modelo de manutenção com reparo mínimo e substituição considerando produção imperfeita e inspeção perfeita.....	65
4.4.3 Caso 5: Modelo de manutenção com reparo mínimo e substituição considerando produção imperfeita e inspeção com erros uniformes.....	69
4.4.4 Caso 6: Modelo de manutenção com reparo mínimo e substituição considerando produção imperfeita e inspeção com erros exponenciais.....	72
4.4.5 Caso 7: Modelo de manutenção com reparo mínimo e substituição considerando produção imperfeita, inspeção com erros exponenciais e retrabalho.....	77
5 APLICAÇÃO NUMÉRICA E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	82
5.1 Dados de entrada do modelo primário e casos 1 e 2.....	82
5.2 Dados de entrada e decisões gerenciais referentes aos casos 3, 4, 5, 6 e 7.....	84
5.3 Experimento numérico e decisões gerenciais.....	88
5.3.1 Variação dos parâmetros dos casos 1 e 2 referentes à escassez e ao buffer.....	89
5.3.2 Variação dos parâmetros dos casos 3 a 7 referentes à inspeção de qualidade.....	91
6 CONCLUSÃO.....	95
REFERÊNCIAS.....	97

1 INTRODUÇÃO

O ambiente competitivo onde estão inseridos os sistemas de produção modernos cria uma interdependência natural entre as atividades de produção e de manutenção (Aghezzaf *et al.* 2016). Dessa forma, o planejamento da manutenção deve ser feito simultaneamente com o planejamento e programação da produção, pois a sincronização entre ambos pode evitar falhas, atrasos na produção e problemas de replanejamento (Fitouhi & Nourelfath, 2012). No entanto, pode haver conflitos entre produção e manutenção, uma vez que ações de manutenção provocam a indisponibilidade da unidade de produção quando esta precisa ser reparada ou substituída.

Entre as políticas de manutenção mais estudadas, encontra-se a substituição baseada em idade, que consiste na troca de um componente/sistema quando este atinge uma determinada idade ou quando vem a falhar, o que ocorrer primeiro (Barlow & Proschan, 1975). Outros autores como Sheu (1991) e Chien (2008) estenderam o modelo clássico de substituição baseada em idade para o caso em que uma unidade operacional pode ser tratada com reparo mínimo quando a falha acontece antes da idade determinada para a substituição.

O reparo mínimo (RM) consiste em uma estratégia que permite reparar uma falha sem substituir o sistema, restaurando-o para a condição anterior à ocorrência de falha e prolongando o tempo de vida do mesmo (Ouali *et al.* 2011). Portanto, a idade do sistema permanece inalterada, o que faz com que o sistema possa vir a falhar novamente em um curto espaço de tempo, provocando novamente a indisponibilidade da instalação (Aven, 2011).

Para satisfazer a demanda durante estes períodos, um estoque buffer pode ser definido com antecedência quando uma capacidade de produção extra está disponível (Zequeira *et al.* 2008). Esses estoques servem para separar as fases do sistema de produção e protegê-lo contra falhas, logo, se uma etapa falhar, a produção pode continuar ininterrupta enquanto o equipamento está sendo reparado até que todo o buffer à jusante do estágio não seja esgotado (Jensen *et al.* 1991). Essa estratégia é de grande importância principalmente em sistemas de produção tipo fila, dado que nestes, todas as etapas do processo de produção são altamente dependentes. Isso significa que uma falha em qualquer destas etapas compromete todo o sistema.

Além do problema de indisponibilidade, outra consequência do fato do reparo mínimo não restaurar o sistema a uma condição de tão bom quanto novo, é o impacto que tal prática pode exercer na qualidade do processo de fabricação. Após uma atividade de RM, o sistema não

retorna à sua melhor condição, e pode elevar à produção de itens defeituosos (Wang, 2013). Um sistema de produção normalmente deteriora-se devido ao uso ou à idade, que leva às falhas das máquinas, ocasionando um processo de produção imperfeita (Hu *et al.* 2010).

Esta tem sido uma temática bastante estudada pelos pesquisadores ao longo dos anos. Considera-se que o processo de produção pode se deslocar de um estado “em controle”, para um estado “fora de controle”, levando à produção de itens defeituosos, que devem ser rejeitados ou reparados (Wang *et al.* 2010). Para tal, políticas de inspeção de qualidade com o fim de garantir a qualidade de saída do processo podem ser adotadas (Kurniati *et al.* 2015).

Dadas as considerações realizadas a respeito das ações de manutenção interromperem o processo de produção e influenciarem na qualidade de saída dos produtos processados, é importante entender como o sistema deve ser mantido, de forma que incorra nos menores custos possíveis. Portanto, neste trabalho é realizada a determinação de políticas ótimas de manutenção com reparo mínimo e substituição, considerando estoque buffer e inspeção de qualidade em um sistema de produção tipo fila.

1.1 Objetivos do Trabalho

O objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho são:

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver modelos para determinar políticas ótimas de manutenção com reparo mínimo e substituição considerando a possibilidade de escassez, estoque buffer e inspeção de qualidade em um sistema de produção do tipo fila.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Modelar os problemas que consideram escassez e buffer;
- Modelar os problemas que consideram inspeção de qualidade;
- Realizar experimentos numéricos para verificar a aplicabilidade e robustez dos modelos.

1.2 Metodologia

Primeiramente, este trabalho envolveu uma preparação conceitual fundamentada pela pesquisa bibliográfica acerca dos temas de interesse, utilizando livros e artigos científicos disponíveis. Conceitos básicos para o entendimento do problema são apresentados, bem como a importância do estudo em conjunto das temáticas trabalhadas (capítulo 2).

Uma revisão da literatura também é realizada para abranger as várias faces dos problemas abordados (capítulo 3), sendo desenvolvido como meio para compreender o atual estado das pesquisas e para identificar as direções que as mesmas estão tomando.

Posteriormente, através de técnicas de modelagem, dá-se a fase de construção dos modelos que visam apoiar as decisões acerca das políticas estudadas (capítulo 4), podendo-se, portanto, afirmar que a abordagem utilizada para responder às questões desta pesquisa é de natureza quantitativa. De acordo com de Almeida (2013), um modelo consiste na representação de um sistema ou uma situação real, possibilitando sua análise para obtenção de conclusões sobre seu funcionamento e desempenho. Uma das contribuições para a discussão sobre metodologia em desenvolvimento de modelos foi apresentada por Mitroff *et al.* (1974), que envolve quatro etapas, representadas na Figura 1.1, e serviu como referência no desenvolvimento dessa pesquisa.

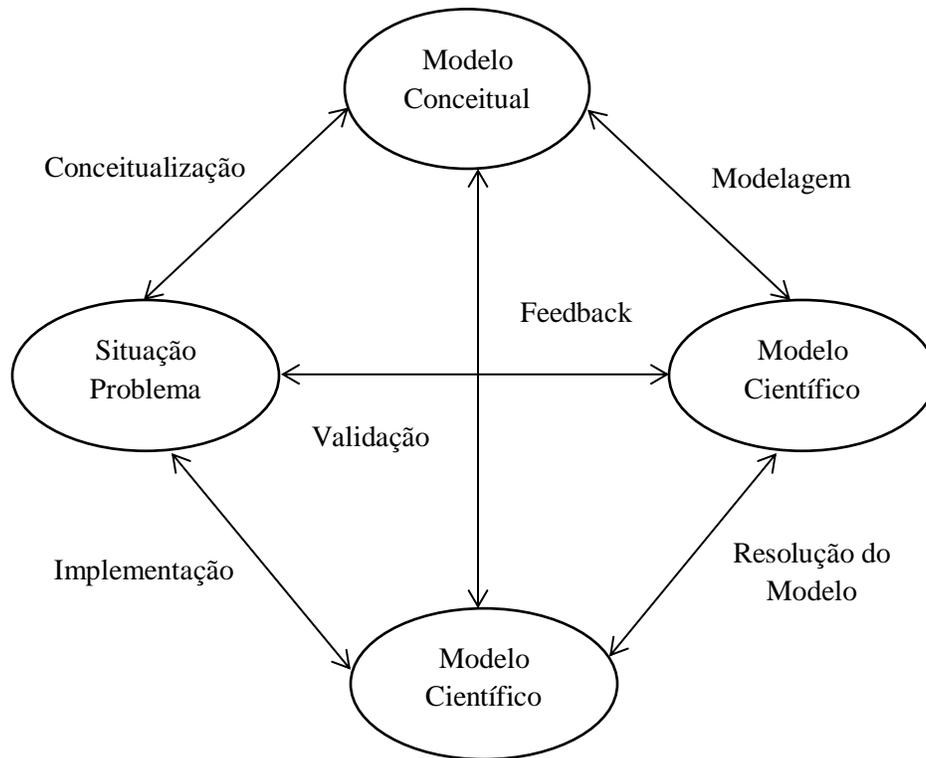


Figura 1.1: Modelo de resolução do problema

Fonte: Adaptado de Mitroff et al., (1974)

Na etapa de conceitualização, serão desenvolvidos os modelos conceituais, que consistem na descrição verbal dos problemas propostos, definindo o seu objetivo, as variáveis e os dados necessários à sua estruturação. Também será descrito o comportamento do sistema, considerando pressupostos baseados em um ambiente realístico. Dessa forma, os modelos conceituais serão formalizados através de uma modelagem matemática, apresentadas no capítulo 4.

O modelo matemático será desenvolvido com base nas informações já coletadas nas etapas anteriores e com base em outros modelos matemáticos existentes na literatura. Nessa fase, as relações do sistema serão expressas por formulações matemáticas, que buscam representar de uma forma quantitativa as hipóteses que foram usadas na construção dos modelos conceituais. Tais equações serão solucionadas no capítulo 5, utilizando valores e parâmetros conhecidos ou previstos com base no modelo real.

A solução dos modelos serão obtidas através da otimização, que visa encontrar a melhor solução possível (solução ótima) do ponto de vista do critério que será otimizado. É necessário

ainda que haja uma validação dos modelos para verificar se estes representam adequadamente os problemas propostos, ou seja, se os modelos apresentam uma descrição apropriada do sistema real. O propósito é validar tanto o modelo conceitual proposto na primeira fase quanto a solução proposta. Serão realizadas também análises de sensibilidade com o propósito de demonstrar a consistência e a robustez dos modelos, também no capítulo 5.

1.3 Estrutura do trabalho

A dissertação, além da presente introdução, foi dividida em outras cinco partes:

No capítulo 2 é apresentada uma base conceitual, onde são expostos alguns conceitos acerca da manutenção, cujo entendimento é fundamental para continuidade da pesquisa. Também são apresentados conceitos referentes a estoque e qualidade, bem como a importância da integração destas áreas com a manutenção nas tomadas de decisões.

O capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica sobre os dois assuntos que fundamentam esse trabalho: as decisões de manutenção com buffer e as decisões de manutenção com inspeção de qualidade. Os trabalhos existentes na literatura são analisados sob diversos fatores, como a sua distribuição dentre as revistas de publicação; a evolução das pesquisas em relação ao aspecto histórico; os países onde as mesmas vem sendo desenvolvidas; e as variáveis, os critérios e os métodos utilizados na sua solução.

No capítulo 4 é realizada a proposição e a estruturação detalhada dos modelos, onde são explanadas as suposições e apresentações quantitativas. Aplicações numéricas são construídas no capítulo 5 visando dar contornos mais concretos à aplicação teórica desenvolvida. Neste capítulo, também são realizados experimentos numéricos para verificação da robustez dos modelos propostos.

Por fim, no capítulo 6, são realizadas as considerações finais, destacando as contribuições deste trabalho. Também são apontadas sugestões para futuros trabalhos, incluindo possíveis extensões desta obra, com o intuito que esta se faça bastante útil.

2 BASE CONCEITUAL

O objetivo fundamental deste capítulo é trazer algumas definições bastante pertinentes ao desenvolvimento do trabalho. Primeiramente, são tratados termos como manutenção e a sua evolução histórica, manutenção corretiva, manutenção preventiva, política de substituição baseada em idade e reparo mínimo. Também é realizada uma descrição sucinta a respeito dos sistemas de produção do tipo fila, explanando suas características e o seu comportamento.

Posteriormente, procura-se destacar a importância da manutenção integrada a outros setores como produção, estoque e qualidade. Dentro destas seções também são definidos alguns termos relacionados a estoque e qualidade, a saber: custo de escassez, políticas de inspeção e tipos de erros incorridos destas; garantia e retrabalho.

2.1 Manutenção

Devido aos avanços tecnológicos, a inserção de máquinas em busca da otimização dos processos e uma maior preocupação com a questão de segurança, a importância da manutenção dentro das organizações vem tendo crescente destaque. Gits (1992) relata que a manutenção engloba todas as atividades requeridas para conservar o sistema ou restaurá-lo ao estado necessário onde seja capaz de executar sua função de produção. Seguindo a mesma linha de pensamento, de forma mais objetiva, Moubray (1997), define manutenção como a “ação de assegurar que os itens físicos continuem a fazer o que seus usuários querem que eles façam”.

Slack *et al.* (2002) introduz ao conceito de manutenção o propósito de evitar falhas, ressaltando a importância que esta possui em atividades de produção cujas instalações têm um papel fundamental na produção de bens e serviços. O autor ainda aponta alguns benefícios que podem ser oriundos da realização de uma manutenção adequada, como: segurança melhorada, confiabilidade aumentada, maior qualidade, custos de operação mais baixos e tempo de vida mais longo. Takata *et al.* (2004) complementa que operações de manutenção, quando bem-sucedidas, podem levar a um menor tempo de inatividade não programada, melhorar produtividade a longo prazo e manter o nível funcional de produtos.

2.2 Tipos de Manutenção

A evolução da manutenção ao longo dos anos acarretou em uma maior exigência em relação à antecipação no planejamento da mesma, trazendo assim a necessidade de novas políticas e novas técnicas para esta atividade. Como consequência, novas abordagens foram desenvolvidas, atualmente conhecidas como Políticas de Manutenção Preventiva (MP), que foram gradativamente substituindo a abordagem da Manutenção Corretiva (MC).

2.2.1 Manutenção Corretiva

Ações de Manutenção Corretiva correspondem a ações de reparação ou restauração em consequência da geração de avarias ou da perda de função. Tais ações são "reativas", ou seja, espera-se até que o equipamento falhe ou necessite de um ajuste (Pintelon & Parodi-herz, 2008). Esse tipo de manutenção centra-se na identificação das causas do fenômeno da falha, sendo que este pode ter um ou mais sintomas de falhas (Wang *et al.* 2014).

Segundo Fang & Zhaodong (2015) a MC inclui as seguintes atividades: localização do mau funcionamento; isolamento do mau funcionamento; decomposição; substituição, reinstalação; adaptação; verificação e fixação das peças danificadas. A partir disso, o autor descreve vários fatores de influência na manutenção corretiva como:

- Confiabilidade do equipamento: determina o tempo de mau funcionamento do equipamento num determinado período, que possui relação direta com o custo de manutenção.
- Capacidade de teste: determina o tempo gasto em detectar e localizar o mau funcionamento, que influencia diretamente nas horas trabalhadas.
- Reparabilidade: quando o equipamento ou parte dele tem boa reparabilidade, o pessoal de manutenção pode corrigir o mau funcionamento em um curto espaço de tempo com menos ferramentas e talvez menos material.

Logo, Fang & Zhaodong (2015) ressalta a importância dos fatores acima referidos serem considerados. Para Wang *et al.* (2014) um dos motivos que leva a manutenção corretiva a ainda ser amplamente adotada na prática da engenharia é o fato da manutenção preventiva não ser capaz de eliminar completamente as falhas.

2.2.2 Manutenção Preventiva

A Manutenção Preventiva corresponde a ações usadas para controlar a degradação e falhas de equipamentos (Jaturonnatee, 2006). Doostparast & Kolahan (2014) define-a como as ações agendadas que são executadas enquanto o sistema ainda pode operar, ou seja, quando ele ainda está no seu estado disponível, melhorando as condições de seus componentes.

No entanto, o fato da manutenção ocorrer com o sistema ainda operante, aumenta consideravelmente o custo de manutenção, já que as peças são substituídas antes do fim da sua vida útil, uma vez que o momento real de falha é difícil de prever, portanto, tais ações somente são interessantes se os custos resultantes destas forem inferiores aos custos de MC (Tinga, 2010).

Segundo Doostparast *et al.* (2014), a MP pode ser classificada de acordo com três tipos de ações:

- Apenas inspeção: quando diferentes partes de um sistema são inspecionadas e realiza-se serviços geralmente simples, como lubrificação, ajuste/calibração, apertar as peças soltas, limpar a poeira e adicionar suplementos (fluido, águas, etc.) Este tipo de ação ocorre quando o sistema está operando em condições normais, requer menos recursos e ferramentas e a melhoria obtida é pouca. Estes serviços não melhoram a confiabilidade e disponibilidade do sistema, em vez disso, eles ajudam a manter o estado atual e, conseqüentemente, reduzir a taxa de degradação.
- Baixo nível de reparo: quando ocorre a substituição de algumas peças simples, como molas, selos, correias e rolamentos. Também pode incluir as atividades de reparação de partes que possuam alto custo de aquisição ou que seja trabalhosa para substituir. Exemplos para este tipo de manutenção são revisões de motores, desmontagem e montagem de máquinas, tratamentos de superfície das partes móveis e calibrações. Um reparo geralmente melhora o estado dos componentes em termos de confiabilidade, mas não os tornam "como novo".
- Reparação de alto nível (de substituição): envolve um maior número de recursos, exigindo a substituição de subsistemas ou componentes principais por novos. Geralmente é adotada para os componentes-chave para, a fim de evitar graves danos a todo o sistema devido a falhas em tais itens. Além disso, em componentes que já tenham sofrido vários e não estão mais em condições de uso, essa ação também pode ser adotada. A substituição

faz com que o componente assuma o estado de “como novo”.

O autor ressalta que ainda que a MP é geralmente mais vantajosa, pois, como visto, pode evitar prejuízos graves em função de falhas imprevisíveis, uma vez que suas ações são normalmente realizadas em períodos pré-determinados de tempo para manter a confiabilidade do sistema a um nível desejado.

2.3 Política de substituição baseada em idade com reparo mínimo

Dados os tipos manutenção, diversas políticas podem ser consideradas, sejam as suas intervenções de caráter preventivo ou corretivo. Essas políticas são principalmente baseadas em falha; em tempo (idade); em condição ou em oportunidade (Pintelon & Parodi-herz, 2008). A política de manutenção baseada em idade é aquela na qual um componente ou sistema é sempre substituído em um período que é fixado ou no momento de ocorrência de uma falha, o que acontecer primeiro. Caso o período não seja constante, a política é chamada de substituição por idade aleatória (Ouali et al. 2011).

É importante destacar que esta vem sendo bastante incorporada a outras políticas de manutenção, como a de reparo mínimo (Beichelt, 1976; Cléroux *et al.* 1979; Berg *et al.* 1986; Block *et al.* 1988; Sheu & Liou, 1992; Lim *et al.* 2016). O RM consiste em manutenção de esforço limitado em que o componente ou sistema é retornado para o estado operacional em que se encontrava antes da falha, ou seja, o modelo assume que a taxa de falha do sistema permanece inalterada após os reparos que acontecem entre as substituições periódicas (Sim & Endrenyi, 1993).

O objetivo do reparo mínimo é obter a condição operacional do sistema de volta o mais rápido possível, o que para muitos sistemas é bastante vantajoso, visto que o RM é suficiente para que o sistema volte a funcionar sem que haja maior tempo de indisponibilidade (Ouali *et al.* 2011). Por outro lado, considerando que o sistema não voltará a uma condição de tão bom quanto novo e que o mesmo sofre deterioração com o tempo, os períodos de funcionamento sucessivo após os RM se tornarão cada vez mais curtos, enquanto os comprimentos médios dos períodos de reparo serão mais longos (Lam, 2007).

Como pode-se perceber, as políticas de manutenção podem interferir diretamente no desempenho dentro de uma empresa, logo, para garantir a sua sobrevivência estas empresas

precisam gerenciar a manutenção simultaneamente com várias outras áreas funcionais, como produção e qualidade. Neste sentido, é necessária uma análise acerca da integração entre essas áreas.

2.4 Integração das decisões entre manutenção e produção

Para atender às demandas futuras incertas e para garantir a o sucesso econômico de um sistema de produção, o planejamento de produção e agendamento da manutenção se faz necessário (Jin *et. al.* 2009).

Nesse mesmo contexto, Pandey (2010) explica que, atualmente, a competitividade acirrada e o desenvolvimento tecnológico conduzem as empresas a um ambiente altamente dinâmico, com rápidas mudanças dos mercados, aumento na variedade dos produtos e preocupações com a qualidade. Tudo isso têm levado as empresas de manufatura à automatização e modernização dos equipamentos, que por sua vez, elevaram o custo de processos de fabricação. Para atingir a excelência operacional neste novo ambiente, empresas precisam se concentrar na eficiência e eficácia do chão de fábrica e, para isso, é necessário que haja uma manutenção adequada dos sistemas de produção.

Segundo Blann (1997), para que a manutenção forneça uma contribuição relevante em termos de produtividade e qualidade é necessário, primeiramente, reconhecer que esta atividade é parte integrante da estratégia de produção da empresa. Para a manutenção desenvolver bem este trabalho, precisa contar com a colaboração de todos os outros departamentos, ou seja, a manutenção não deve agir de forma isolada, é necessário que esse setor realmente esteja integrado com a produção e, conseqüentemente, com todos os outros departamentos a fim de buscarem os mesmos objetivos.

Bamber *et al.* (2006) é ainda mais incisivo em relação a essa integração, afirmando que é possível generalizar que a manutenção atualmente não tem papel separado da produção, estando essa comprometida em contribuir com os lucros da organização, deve então adequar o seu planejamento com tais propósitos. Cui *et al.* (2014) explica que as atividades de programação de produção e manutenção estão inter-relacionadas umas com as outras através do impacto que ambas possuem sobre a capacidade da máquina e a sua confiabilidade: enquanto a produção esgota a confiabilidade da máquina e manutenção a restaura.

Para Budai *et al.* (2006) a manutenção está relacionada com a produção de várias maneiras. Em primeiro lugar, a manutenção destina-se a permitir a produção, mas para executar a manutenção, a produção tem que ser frequentemente parada, fato que deve ser considerado no planejamento e otimização de manutenção. Em segundo lugar, a manutenção pode também ser vista como um processo de produção que deverá ser planejado, o que implica na determinação de níveis adequados de capacidade a respeito da demanda. Em terceiro, existe a preocupação com o planejamento de produção em que é preciso levar em consideração os trabalhos de manutenção. A semelhança entre tais visões consiste no fato de que os trabalhos de manutenção precisam ser planejados em conjunto com a produção.

Xiao *et al.* (2015) ressalta o impacto que o tratamento isolado dessas duas áreas pode acarretar nos custos totais. Ele considera que um dos aspectos mais importantes em sistemas de manufatura é que as máquinas estão sujeitas a falhas aleatórias, que introduzem variabilidade da disponibilidade da máquina, portanto, os procedimentos de manutenção preventiva são realizados principalmente para evitar essa variabilidade, uma vez que esta afeta negativamente as medidas de desempenho como o tempo de ciclo médio do sistema de fabricação. Na tentativa de evitar esse problema, os gerentes costumam fazer operações de manutenção preventiva com uma certa frequência. Por outro lado, realizando muito frequentemente e desnecessariamente, a MP pode gerar baixa disponibilidade e acúmulo de trabalho em processo, além do custo de realizá-la.

Sabe-se, no entanto, que o planejamento da produção e manutenção preventiva são mutuamente conflitantes, uma vez que o tempo levado por uma atividade de MP poderia ser usado para produção. Por outro lado, o atraso da MP pode incorrer em aumento da probabilidade de falhas na produção. Na prática, as atividades de produção e planejamento de manutenção são geralmente realizadas de forma independente, isso faz com que os resultados obtidos possam não ser ótimos no que diz respeito ao objetivo de minimizar o custo total de manutenção e produção. Melhores soluções podem ser obtidas quando o planejamento de manutenção é integrado com outras áreas funcionais (Nourelfath & Châtelet, 2012).

2.5 Integração de decisões entre manutenção e estoque

Tem sido amplamente demonstrado na literatura que implementação de estratégias de manutenção preventiva para várias unidades de produção pode ser uma forma eficaz de estender

suas vidas e reduzir custos operacionais. O efeito da MP nos sistemas de produção tornou-se cada vez mais importante no contexto também de produção just-in-time, onde há a defesa de estoques mínimos e tempo de giro (Chelbi & Ait-Kadi, 2004).

Salameh & Ghattas (2001), ressalta que a confiabilidade do processo pode ser melhorada mantendo baixos níveis de estoque, juntamente com o aumento dos níveis de qualificação dos trabalhadores, logo, um sistema de produção bem desenhado requer algum estoque para operar eficientemente. O autor considera os estoques como uma maneira de evitar perdas econômicas devido à indisponibilidade de produção causada por ações de MP, pois isso faz com que a demanda possa ser satisfeita durante o período de indisponibilidade de produção. Dentro desse contexto, durante a manutenção preventiva, um estoque buffer se faz necessário para que as operações não sejam interrompidas.

2.5.1 Estoque Buffer

O estoque buffer corresponde a um estoque que é armazenado em cada fase do processo. Estes são mantidos unicamente para proteger contra falhas de alguma dessas fases, que podem ocorrer durante a operação do sistema. Um exemplo prático é uma linha de montagem de automóveis. Sem buffer, os estágios do sistema de produção seriam altamente interdependentes, logo, se qualquer etapa no sistema viesse a falhar, haveria consequências em todo o sistema. O tempo de inatividade resultaria em perda de produção ou retardamento da mesma. Esta consequência indesejável pode ser medida em termos de custo, geralmente referido como o custo de escassez. (Jensen et al. 1991).

Muitos autores examinaram as condições de construção de buffer para garantir o fornecimento contínuo da unidade de produção subsequente durante as interrupções de serviço devido a reparos ou manutenções preventivas (Chelbi & Ait-Kadi, 2004). Uma análise de literatura acerca das decisões de manutenção com estoque buffer é realizada no capítulo 3.

2.6 Integração de decisões entre manutenção e qualidade

A capacidade de produção de alta qualidade com menor custo é extremamente importante para as empresas se manterem competitivas sob as restrições de questões modernas da cadeia de suprimentos (Olhager & Selldin, 2004). Logo, em uma indústria de manufatura, além dos fatores

relevantes mencionados ao longo desta pesquisa, existe outro aspecto de grande importância a ser considerado em conjunto com a manutenção: a qualidade do produto.

É comumente argumentado que políticas de manutenção preventiva podem contribuir significativamente para o aumento da confiabilidade dos equipamentos, bem como a qualidade do produto. Dentro esta perspectiva, a necessidade de desenvolvimento de novas estratégias para a integrar a manutenção com a qualidade tornou-se uma necessidade (Gouiaa-Mtibaa, 2016). Isto desencadeou o crescimento do estudo dessa área de pesquisa para potenciais aplicações práticas (Wang & Meng, 2009).

Um foco particular dos pesquisadores ao longo dos anos tem sido a consideração da produção imperfeita, que acarreta em produtos defeituosos (Lee & Rosenblatt, 1989; Kim & Hong, 1999; Chen & Lo, 2006; Hu & Zong, 2009; Hlioui *et al.* 2015; Shih & Wang, 2016). Para reduzir a fração de defeitos, duas abordagens são propostas na literatura: a primeira é referente ao controle de tamanho do lote e a segunda diz respeito à aplicação de políticas de inspeção para tentar eliminar a saída de produtos defeituosos (Yeh & Chen, 2006).

2.6.1 Políticas de inspeção do produto

A maioria dos modelos de manutenção considera uma inspeção para verificação de todo o sistema em um determinado intervalo (Lee & Park, 1991; Wang & Sheu, 2003; Wang *et. al* 2014; Nourelfath *et. al.* 2016). No entanto, o processo de política de inspeção pode acarretar em uma elevação significativa do custo do trabalho. Para reduzir então custo de inspeção, em vez de política de inspeção completa, pode ser adotada uma política de inspeção do produto. Para esta política de inspeção, produtos defeituosos são detectados facilmente com custo de inspeção inferior (Sarkar & Saren, 2016). Estudos acerca da aplicação da política de inspeção de produtos podem ser encontrados em Wang & Sheu (2001); Sarkar & Saren (2016); Baudet *et. al.* (2013) e Bendavid & Herer (2009).

O objetivo da inspeção de produtos é determinar quaisquer defeitos de qualidade que impeçam a saída de produtos que estejam fora das especificações. Ao utilizar esta política, os custos podem ser minimizados, uma vez que ela busca evitar o envio de produtos não conformes ao mercado, o que geraria um custo adicional (Sarkar & Saren, 2016).

Para Bendavid & Herer (2009) o método principal para a melhoria da qualidade de produtos, antes destes poderem atingir o cliente, é inspecionar a saída do processo. Os autores destacam que a modalidade de inspeção mais popular e eficaz é de inspeção em linha, onde esta é realizada imediatamente após a operação de produção, enquanto o restante do lote ainda está em processo. Portanto, o desenvolvimento de um sistema de inspeção pode contribuir significativamente para a melhoria da qualidade dos produtos e reduzir as chances de passagem de peças defeituosas para o cliente (Hassan & Diab, 2010).

Essa política vem sendo bastante utilizada pelos pesquisadores principalmente com modelos EPQ (Economic Production Quantity). No entanto, o seu uso combinado com políticas de manutenção ainda é pouco explorado na literatura. Uma análise da literatura acerca de decisões integrando política de inspeção de produtos com manutenção é realizada no capítulo 3.

2.6.2 Erros tipo I e tipo II

De acordo com Sarkar & Saren (2016) a qualidade dos produtos pode ser obtida através da política de inspeção de produtos, assumindo um processo de controle perfeito onde os defeitos de 100% dos itens inspecionados são detectados com êxito. No entanto, em geral, processos de inspeção não estão livres de erros, podendo haver a possibilidade de ocorrência do erro tipo I (rejeitar itens não defeituosos) ou do erro tipo II (aceitar itens defeituosos).

Dessa forma, modelos que consideram inspeção de qualidade imperfeita vêm ganhando destaque na literatura. Hsu & Hsu (2013) e Yoo *et al.* (2009) desenvolvem um modelo de estoque em que os itens são submetidos a uma etapa de inspeção, onde podem ser classificados erroneamente devido aos erros tipo I e tipo II. A presença de erros de inspeção tipo I e tipo II também é incorporada ao modelo EPQ sob o sistema de produção imperfeita, onde o objetivo do modelo é determinar a duração do ciclo de produção e o número de inspeções que minimizam o custo total, considerando que a mudança do processo de produção segue uma distribuição geral.

Khan *et al* (2011), assumem um modelo EPQ com qualidade imperfeita e inspeção imperfeita em que a probabilidade de erros de classificação é assumida como sendo conhecida. Bettayeb & Bassetto (2016) estudam o efeito de erros de inspeção do tipo II sobre a eficácia de um plano de inspeção de qualidade personalizado utilizando uma abordagem de controle de exposição de risco.

Esses sistemas de produção e inspeção imperfeita incorrem em custos internos devido ao retrabalho de peças defeituosas, e custos externos, em razão da garantia dada ao cliente em caso de defeitos dos produtos (Yoo *et. al.*, 2012). Essas implicações são discutidas nos próximos tópicos.

2.6.3 Retrabalho

Geralmente, em ambientes de produção, os itens que apresentam alguma não conformidade podem ser, por vezes, reformulados e reparados, para que os custos globais de produção possam ser reduzidos significativamente. Várias indústrias adotam a prática do retrabalho como uma forma aceitável para obtenção de um maior nível de qualidade (Chiu *et al.* 2007). Exemplos de artigos que examinaram a questão do retrabalho em suas pesquisas são dados a seguir.

Liao *et al.* (2009) integra os programas de manutenção e de produção com o modelo EPQ para discutir o tempo de execução ótimo que minimiza o custo total. Eles consideram um processo imperfeito em um sistema de produção que se deteriora e permite reparação imperfeita e retrabalho em caso de falha (quando se encontra em um estado fora de controle). Ouyang & Chang (2013) estudam os efeitos dos itens de qualidade imperfeitos retrabalhos em um modelo EPQ com processos de produção imperfeitos e backlogging completa, incluindo custos de retrabalho e de escassez. Além disso, uma abordagem média da desigualdade aritmética-geométrica é empregada e um algoritmo é desenvolvido para encontrar a política de produção ideal. Chiu *et. al* (2011) e Cárdenas-barrón *et al.* (2013) determinam, em conjunto, o tamanho do lote de reposição ideal e o número ideal de remessas para um modelo de EPQ com retrabalho e múltiplas transferências. Chen (2013) estuda o problema integrado de produção, MP, inspeção e estoque, considerando um processo de produção imperfeita onde existe a possibilidade do erro de MP e do retrabalho para determinação do EPQ. Eles assumem que uma certa porcentagem de itens defeituosos podem ser retrabalhados, enquanto o resto é descartado.

De acordo com Sarkar *et al.* (2014), estes modelos que consideram o retrabalho tem atraído atenção de vários pesquisadores, dada a expectativa de que a sua aplicação ajude na redução do custo total.

2.6.4 Garantia

Foi visto que assim como o processo de produção, o processo de inspeção é passível de imperfeições, o que permite a possibilidade da saída de produtos defeituosos para o mercado. Nesse caso, o efeito do custo incorrido pela não conformidade de um produto vendido ao cliente deve ser analisado.

A garantia é uma forma do fabricante certificar para o cliente a confiabilidade de um produto usado sob condições normais. Uma vez adotada uma política de garantia, o fabricante precisa fornecer um serviço (como substituição ou reembolso) caso o produto deixe de funcionar como especificado (Park & Pham, 2016). Para Yeh & Chen (2006), o papel essencial da garantia do produto é justamente oferecer para os compradores uma proteção pós-venda durante um período determinado, nos casos em que o produto não cumpre o desempenho ao qual destina-se.

Vários pesquisadores têm considerado a garantia e o custo proveniente desta em seus trabalhos, como é o caso de Chen & Lo (2006), que investigam um sistema de produção imperfeito, admitindo escassez e garantia de reparação mínima gratuita. Eles buscam minimizar o custo total por item através da determinação ótima do comprimento do ciclo de produção e o tempo de duração quando um pedido retroativo é reabastecido. Djamaludin *et. al* (1994) discutem o melhor dimensionamento para atingir um trade-off adequado entre os custos de itens reparáveis vendidos com a política de garantia de substituição gratuita. Yeh *et. al* (2000) estuda o tempo de execução de produção ideal para um sistema de produção que sofre deterioração e os produtos também são vendidos com garantia de reparação mínima gratuita, onde o processo de deterioração do sistema é caracterizado por uma cadeia de Markov de tempo contínuo de dois estados.

Nos trabalhos que consideram produtos vendidos com garantia, o custo resultante desta está intimamente relacionado com a qualidade dos itens produzidos por um sistema de produção que se deteriora. Por isso, é importante incorporar o custo de garantia nos modelos estudados para refletir a situação prática.

2.7 Síntese do Capítulo 2

Este capítulo apresentou alguns conceitos relevantes para o entendimento deste trabalho. Ao longo dos anos, torna-se claro o papel estratégico da manutenção dentro das organizações, o

que motiva o desenvolvimento de diversas técnicas, políticas e abordagens para esta área. As políticas de manutenção tratadas neste capítulo correspondem à política baseada em idade e ao reparo mínimo, considerando também a influência que estas exercem tanto na disponibilidade do sistema de produção quanto na qualidade dos produtos, bem como os custos associados ao buffer.

Dadas essas duas implicações, políticas de buffer são consideradas como forma de garantir a continuidade da produção; da mesma forma, políticas de inspeção de qualidade são abordadas como meio de manter a qualidade dos produtos. Ao retratar políticas de manutenção, estoque e qualidade, este capítulo buscou evidenciar os principais conceitos e decisões conjuntas entre estas áreas.

3 ANÁLISE DA LITERATURA

Este capítulo busca descrever as decisões conjuntas de políticas de manutenção com buffer e políticas de manutenção com inspeção de qualidade do produto. Para tal, são apresentadas as diversas visões e abordagens encontradas na literatura, de modo a abranger as várias faces destes problemas e descrever os métodos de resolução mais aplicados.

3.1 Análise da literatura relacionada a decisões de política de manutenção com buffer

Este tópico busca descrever as políticas de manutenção considerando também a produção e o estoque. Para isso, é apresentada uma visão geral da literatura acerca do tema, disponível na Science Direct e Web of Science, contemplando publicações entre 1995 e 2016, utilizando as palavras “maintenance” e “buffer”, cujos problemas de decisão são descritos a seguir:

Schouten & Vanneste (1995) desenvolveram um modelo que considera um gerador de entrada e um processo de produção subsequente, com a existência de um buffer entre eles. Nesta análise, a capacidade de buffer é mantida fixa e investiga-se o problema de quando realizar a manutenção preventiva, levando em consideração tanto a idade da instalação, como o conteúdo do buffer.

Kyriakidis & Dimitrakos (2006) fizeram uma generalização do modelo introduzido por Schouten & Vanneste (1995), onde os estados consistem na condição de funcionamento da instalação e nível de buffer. Eles provaram que, para o índice de buffer fixo, a política ótima de custo médio inicia uma manutenção preventiva se, e somente se, a sua condição de trabalho é pior do que um nível crítico. Um modelo de decisão Markov para MP ótima da instalação que fornece matéria prima para uma unidade de produção é apresentado.

Meller & Kim (1996) desenvolveram um modelo de custo objetivando determinar o nível ótimo de buffer que desencadeia a manutenção preventiva na primeira operação de produção. Tal modelo é dependente dos valores de desempenho medidos em função do buffer, que define a política de manutenção preventiva. Vários cenários foram apresentados, mostrando como a implementação do programa de manutenção preventiva pode diminuir o custo do sistema e a variação do processo de saída.

Salameh & Ghattas (2001) realizaram um trabalho onde o problema fundamental é determinar o nível de buffer ideal para suportar a interrupção devido à manutenção preventiva, que ocorre em um determinado período. Antes do final desse período, acontece o reabastecimento do buffer.

Gharbi & Beit (2007) realizaram uma melhoria do trabalho de Salameh & Ghattas (2001), considerando a dependência da idade e da probabilidade de falha das máquinas. Portanto, os autores abordam os efeitos da política de manutenção preventiva e da idade da máquina para o nível ideal de buffer. Assim, uma estrutura unificada foi desenvolvida, permitindo que a produção e MP fossem consideradas em conjunto. Foi utilizado um modelo de otimização dependente da idade baseada na minimização de uma função de custo total, incluindo explorações de estoque, vendas perdidas, custos de manutenção preventiva e corretiva.

Zequeira *et al.* (2008) também propõem uma extensão do modelo apresentado por Salameh & Ghattas (2001), onde consideram uma capacidade de produção extra que está disponível em horários aleatórios para construção do buffer. Consideram também que a ação de manutenção começa na primeira oportunidade para sua realização após o término de fabricação do buffer. Além disso, a modelagem aborda a possibilidade de produção imperfeita.

Chelbi & Ait-Kadi (2003) apresentaram um modelo para determinar o tamanho de estoque buffer e o período de manutenção preventiva para uma unidade de produção, cuja vida útil é submetida à manutenção preventiva regular de duração aleatória. O modelo proposto integrou os custos de manutenção, armazenamento e escassez, onde permitiu determinar os valores dos parâmetros de funcionamento que minimizam o custo total médio por unidade de tempo.

Chelbi & Ait-Kadi (2004) propuseram uma estratégia que consiste na construção, no início de cada ciclo de manutenção preventiva, de um estoque buffer cujo tamanho cobre, pelo menos, o consumo médio durante os períodos de manutenção. No instante em que o aparelho de produção tem de ser parado para realizar a ação de manutenção preventiva planejada, um certo nível de buffer deve ainda estar disponível, a fim de evitar a paralisação da linha de montagem subsequente. Os valores ótimos das variáveis de decisão são obtidos por negociação para o custo de manutenção, o custo de manter o estoque, e o custo de escassez.

Zequeira *et al.* (2004) apresentaram um modelo para determinar o comprimento ideal de produção contínua entre os períodos de ação de manutenção e um buffer ideal para satisfazer a demanda ou reparo durante a manutenção preventiva de uma unidade de fabricação. Foi incluído ao modelo a possibilidade de produção imperfeita. Os autores consideraram também que a duração e o custo da ação de manutenção dependem do estado das instalações de produção.

Rezg, *et al.* (2005) abordaram um controle de estoque otimizado conjunto à estratégia de manutenção preventiva para uma unidade de produção que falha aleatoriamente e da qual depende o funcionamento de uma linha de montagem, seguindo uma configuração just-in-time. Segundo o modelo, a unidade de produção é submetida a uma ação de manutenção logo que ele atinge uma determinada idade ou devido à falha, o que ocorrer primeiro. A fim de atenuar as perturbações causadas por avarias e ações de manutenção planejada, consideraram o estoque buffer intermediário para garantir o abastecimento da linha de montagem a uma taxa constante. Um modelo matemático foi desenvolvido para avaliar o custo médio por unidade de tempo.

Chelbi & Rezg (2006) consideraram uma unidade de produção reparável sujeita a falhas aleatórias, que fornece entrada para uma linha de montagem posterior. A unidade de produção é submetida a uma operação de manutenção, logo que ele atinge uma determinada idade ou pela falha, o que ocorrer primeiro. Um buffer é construído de forma a garantir um fornecimento contínuo da linha de montagem a uma taxa constante durante as operações de manutenção, cujas durações respectivas são aleatórias. Eles investigaram esta estratégia de operação da unidade de produção considerando uma disponibilidade mínima exigida (estacionária). Foram encontradas as características ideais de operação que minimizam o custo total médio por unidade de tempo e satisfazem a restrição de disponibilidade.

Ribeiro *et al.* (2007) construíram um modelo cujo objetivo é a otimização conjunta entre a manutenção de um recurso com limitações de capacidade, a alimentação da máquina e o tamanho do buffer de entrada. A manutenção do recurso com limitações de capacidade é baseada em condições, enquanto o da máquina entrada é baseada no tempo. A otimização conjunta é atingida através do desenvolvimento de um modelo de programação linear inteira mista.

Dimitrakos & Kyriakidis (2008) estudaram um modelo também constituído por uma instalação em deterioração, que transfere matéria-prima para uma unidade de produção, com um buffer entre eles. O problema da manutenção preventiva ótima é considerado para um nível de

buffer fixo, onde a política ótima é do tipo de limite de controle, ou seja, a manutenção preventiva da instalação só inicia se, e somente se, o seu grau de deterioração exceder um nível crítico. Foi desenvolvido um algoritmo de decisão Semi-Markov, que opera na classe de políticas de limite de controle.

Murino *et al.* (2009) propuseram um modelo de simulação para definir a dimensão ideal de buffer no que diz respeito à política de manutenção que é aplicada ao sistema de produção. O modelo simula um sistema de unidades que pode ter características muito diferentes, tais como a produtividade ou confiabilidade, bem como pode simular um buffer entre eles. O conceito de limiares é considerado, uma vez que, ao depender do parâmetro de desgaste, diferentes intervenções de manutenção são determinadas. A otimização de custos consiste em determinar, por simulação, quais valores limiares deve ser fixado para minimizar o custo total de manutenção. O modelo é usado para determinar a dimensão do buffer, dependendo do custo.

Pavitsos & Kyriakidis (2009) estudaram um sistema composto por um gerador de entrada, um buffer fornecido por este, e uma unidade de produção subsequente se deteriorando com o passar do tempo. Considera-se que a instalação está sempre em condição operativa. Os estados do modelo consistem na condição de funcionamento da unidade de produção e no conteúdo do buffer. Supõe-se que os tempos de manutenção da unidade de produção são distribuídos geometricamente. A estrutura de custos inclui os custos operacionais, os custos de manutenção para a unidade de produção, os custos de armazenamento, os custos decorrentes da produção e de escassez e os custos que são incorridos quando uma manutenção preventiva ou corretiva é realizada na unidade de produção e o buffer está cheio. Os autores provam que, para um conteúdo de buffer fixo, a política ótima de custo médio inicia uma manutenção preventiva da unidade de produção, se e somente se o grau de deterioração excede algum valor crítico (política de limite de controle).

Karamatsoukis & Kyriakidis (2010) elaboraram o que pode ser considerada uma extensão do trabalho de Pavitsos & Kyriakidis (2009), onde ambas as máquinas deterioram com o passar do tempo e podem atingir uma condição inoperante de acordo com uma probabilidade. Um modelo de decisão Markov em tempo discreto é formulado, incluindo os custos operacionais para ambas as máquinas, os custos de armazenagem, custos de manutenção e custos devido à perda de produção quando a unidade de produção não funciona. Se os tempos de manutenção são

distribuídos geometricamente, é possível provar que a política que minimiza o custo médio por unidade de tempo esperado a longo prazo é caracterizado por um número crítico, de tal modo que as manutenções preventivas das máquinas são iniciadas apenas se os seus graus de deterioração são maiores ou iguais a estes números. Se os tempos de manutenção são contínuas, um “discrete-time” aproximado do modelo de decisão Markov é formulado para dar condições de encontrar a política ótima.

Radhoui *et al.* (2010) desenvolveram uma política de manutenção preventiva conjunta com um controle de qualidade para um sistema de produção que produz unidades conformes e defeituosas. O sistema considerado é composto por um conjunto de máquinas que devem fornecer matéria para uma outra linha de produção, operando em uma configuração just-in-time, onde cada lote produzido pela máquina está sujeito a um controle de qualidade de acordo com a proporção de unidades defeituosas. A realização ou não de ações de manutenção no sistema é baseada na comparação com um valor limite. Objetivando atenuar as perturbações causadas pela interrupção da máquina devido a ações de manutenção preventiva e corretiva de durações aleatórias, também é construído um buffer para assegurar o fornecimento contínuo da linha de produção subsequente. A estratégia proposta é modelada utilizando simulação e projeto experimental.

Zhou *et al.* (2010) propuseram uma política de manutenção oportuna preventiva para um sistema em série multi-unidade com base em sistemas de programação dinâmica e integração das informações on-line de buffers intermediários. Sempre que uma das unidades atinge o seu limite de confiabilidade, uma ação de manutenção preventiva tem de ser realizada naquela unidade. Uma prática de manutenção preventiva ideal foi determinada pela maximização dos cumulativos de redução dos custos de manutenção oportuna de curto prazo para todo o sistema, que é uma combinação da redução de custos de manutenção, a redução de custos de parada, o custo de penalidade para realização da ação de manutenção preventiva e o custo de penalidade para o trabalho em processo.

Sana (2012) realizou o estudo de um sistema que inclui a possibilidade de produção imperfeita e determina o nível de buffer e o tempo de produção ideal para minimização do custo por unidade do produto, através de uma negociação entre o custo de retenção, o custo de

escassez, custo de retrabalho, custo de reparação dado à garantia, os custos de trabalho/energia, custo do equipamento e os custos de manutenção.

Karamatsoukis & Kyriakidis (2012) também consideram um sistema de produção consiste em uma instalação de entrada de geração, uma unidade de produção e buffer intermediário. Para o problema de manutenção preventiva ideal, os autores analisaram dois quadros: o problema da manutenção preventiva ideal da instalação se esta deteriora-se estocasticamente com o uso e a unidade de produção está sempre em condição operativa; o problema da manutenção preventiva ideal da unidade de produção, se esta deteriora-se estocasticamente com o uso e a instalação está sempre em condição operativa. Dada uma estrutura de custos apropriada e o conteúdo de buffer, os autores mostram que a política ótima de custo médio para ambos os problemas inicia uma manutenção preventiva da unidade de produção/instalação se, e apenas se, o grau de deterioração destas exceder um determinado nível crítico.

Lee *et al.* (2013) estabeleceram abordagens analíticas para computar janelas de manutenção oportuna estocásticas de um sistema com duas máquinas não confiáveis e um buffer intermediário, tanto em tempo discreto quanto em modelos de Markov de tempo contínuo. Em vez de permitir que os buffers fiquem vazios, como na construção de outros modelos anteriores, os autores concentram-se em calcular um limite inferior para um buffer reserva, para suprir falhas aleatórias inesperadas durante as fases de recuperação. Além disso, as tendências gerais destes limites inferiores e seus valores estocásticos correspondentes foram investigados através de estudos de caso numéricos com várias alterações de parâmetros do sistema.

Gan & Shi (2014) estudam um sistema contendo duas máquinas em série e um buffer intermediário, construído para lidar com falhas inesperadas. A máquina a montante se deteriora com o tempo, e o aumento crescente dos graus de deterioração são classificados em diferentes estados. Neste trabalho, os autores consideraram como variáveis de decisão a manutenção, peças de reposição e o conteúdo de buffer, portanto, o estado do sistema contém três tipos de informação e a análise da ação do sistema e os custos incorridos, o que tornou-lhe mais complexos. Para este problema, o processo de decisão foi descrito por um modelo discreto de Markov, em que a substituição das peças de reposição foi dividida em vários estados para representar diferentes situações. A taxa de custo mínima esperada a longo prazo pode ser

alcançada, de acordo com os estados críticos da máquina e os diferentes níveis de buffer correspondentes.

Zhou & Zhang (2015) desenvolveram um método baseado no Processo de Decisão de Markov para identificar a estratégia de manutenção para um sistema multicomponente com dois subsistemas e um buffer intermédio. A estrutura obtida da estratégia ótima de manutenção é analisada, que mostra que a estratégia ótima não pode ser a estrutura modelada por um número limitado de parâmetros, no entanto, os autores obtêm algumas propriedades úteis da estratégia estruturada que pode simplificar a otimização de manutenção. Outro dado interessante abordado no estudo é que uma grande capacidade de buffer pode nem sempre levar a uma receita média alta, mesmo quando o custo de manter um item no buffer é muito menor do que a receita da produção por item.

Gan *et al.* (2015) investigaram um sistema que consiste em duas máquinas em série, um buffer intermediário e um estoque de peças de reposição. Com base no teorema de renovação, o modelo de custo foi construído, considerando o custo de manutenção; custo de manter o buffer, custo de perda; custo de ordem das peças de reposição e de mantê-las e os custos da eliminação de estoque buffer excedente. O desenvolvimento deste foi realizado através da análise matemática, utilizando-se o método do algoritmo genético para sua resolução.

Os artigos acima foram analisados de modo que tornasse mais fácil a compreensão do atual estado das pesquisas e a identificação das direções de pesquisa. Dessa forma, os trabalhos acadêmicos em questão foram classificados de acordo com as revistas em que foram publicados, ano de publicação, país da instituição dos autores, critérios mais comuns para formulação dos problemas, as variáveis de decisão relacionadas a estes e os métodos de resolução utilizados, como mostram os subtópicos a seguir.

3.1.1 Distribuição de publicações

As revistas incluídas neste estudo foram acessadas através da base de dados *Science Direct* e *Web of Science*. Foram pesquisados artigos cujo tema envolve a integração entre manutenção e produção e, dentre estes, foram selecionadas as pesquisas que consideram a decisão conjunta entre política de manutenção e estoque buffer. Dessa forma, foram consideradas

todas as revistas com pelo menos um artigo acerca do tema em questão, resultando em 25 artigos para consideração, distribuídos como mostra a Tabela 3.1:

Tabela 3.1: Distribuição de publicações de buffer com manutenção por Jornal/Revista

Journal/Revista	Nº de Publicações	%
European Journal of Operational Research	7	28
International Journal of Production Economics	5	20
Applied Mathematical Modelling	2	8
Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability	2	8
Computers & Operations Research	1	4
WSEAS Transactions on Business and Economics	1	4
Expert Systems with Applications	1	4
Mathematical Problems in Engineering	1	4
Journal of Intelligent Manufacturing	1	4
International Journal of Computer Integrated Manufacturing	1	4
Journal of Decision Systems	1	4
International Journal of Production Research	1	4
International Journal of Industrial and Systems Engineering	1	4

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

A maioria das publicações está concentrada nas duas primeiras revistas, que apresentam 12 dos 25 trabalhos pesquisados, reunindo 48% do total. Outro aspecto que é interessante notar é que, embora os primeiros trabalhos sobre Política de Manutenção com Buffer encontrados nesta pesquisa tenham sido publicados em 1995 e 1996 (Schouten, 1995; Meller & Kim, 1996), a grande maioria das pesquisas se deu nos últimos 10 anos (Figura 3.1).

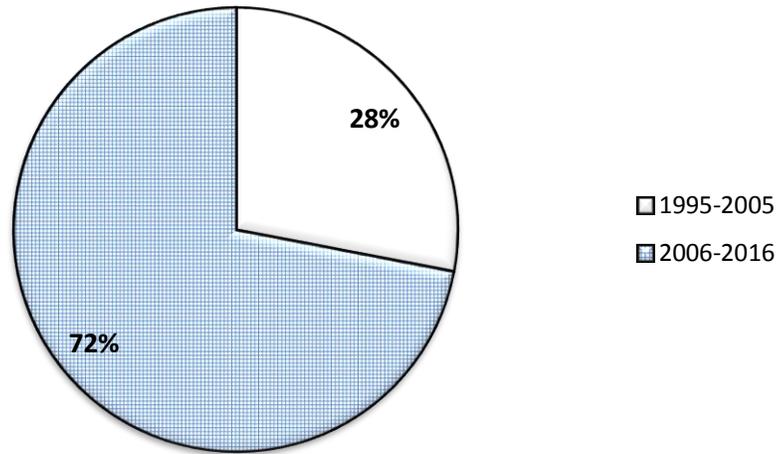


Figura 3.1: Distribuição dos artigos de buffer com manutenção por década

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

Essa diferença entre os dois períodos indica que a percepção da relevância de pesquisa em Política de Manutenção conjunta com Buffer aumentou na última década.

A distribuição de trabalhos por país da instituição dos autores é outro ponto identificado. Foi observado que as pesquisas integrando estes temas se espalham por 14 países. A Figura 3.2 ilustra esta distribuição em um mapa, onde um indicador mais escuro designa a região onde há uma maior quantidade de trabalhos encontrados.

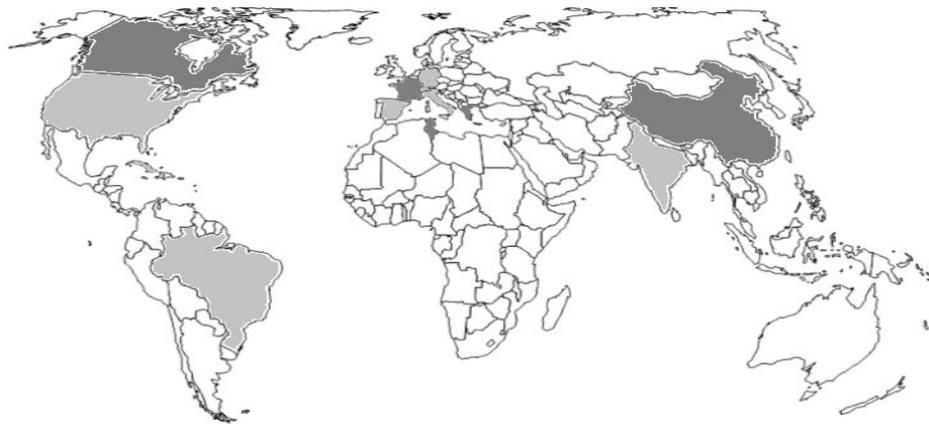


Figura 3.2: Distribuição das pesquisas conjuntas entre buffer e manutenção pelo mundo

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

China, Tunísia, França e Grécia são os países com maior número de publicações (5 cada), seguido do Canadá, com 3 publicações. Tanto os EUA quanto Cuba apresentam a quantidade de 2 trabalhos publicados, enquanto nos demais países marcados (Índia, Itália, Suíça, Espanha, Líbano, Brasil e Holanda), consta-se apenas 1 publicação.

Uma vez realizada a avaliação temporal e geográfica, dar-se-á agora uma análise acerca das características dos artigos pesquisados (variáveis, critérios e métodos de resolução).

3.1.2 Variáveis de decisão consideradas na formulação dos problemas

Sabe-se que a disponibilidade no processo de produção e os custos inerentes a este são influenciados pela confiabilidade e ações de manutenção, impactando diretamente no desempenho econômico da organização. A depender do objetivo estratégico da empresa, diferentes critérios, dependentes de algumas variáveis, podem ser analisados. Dentre os artigos analisados nesta pesquisa, todos utilizaram o mínimo custo como critério para otimização do modelo proposto, com exceção de Ribeiro *et al* (2007), cujo modelo tem como função objetivo a maximização do lucro total. Ainda assim, as variáveis consideradas em cada modelo dependem das particularidades do sistema de produção no qual este é implementado. Nas publicações avaliadas foram encontradas 11 variáveis com diferentes denominações, sendo “nível de buffer” e “grau de deterioração da máquina/instalação” as mais utilizadas. A distribuição destas é apresentada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Distribuição das variáveis de decisão dos problemas de manutenção com buffer

Variáveis de Decisão	Nº de Publicações	%	Referências
- Nível de buffer; - Grau de deterioração da máquina/instalação.	8	32	(Zequeira, <i>et al.</i> 2004; Dimitrakos & Kyriakidis, 2008; Pavitsos & Kyriakidis, 2009; Murino <i>et al.</i> 2009; Karamatsoukis & Kyriakidis, 2010; Karamatsoukis & Kyriakidis, 2012; Lee <i>et al.</i> 2013; Zhou & Zhang, 2015)
- Nível de buffer; - Idade da máquina/instalação.	4	16	(Schouten, 1995; Rezg <i>et al.</i> , 2005; Chelbi & Rezg, 2006; Gharbi <i>et al.</i> , 2007);
- Nível de buffer; - Período de realização da manutenção preventiva.	3	12	(Chelbi & Ait-Kadi, 2003; Chelbi & Ait-Kadi, 2004; Zhou <i>et al.</i> 2010;)
- Nível de buffer; - Momento que inicia acúmulo de buffer; - Tempo de chegada de peças de reposição; - Idade da máquina/instalação.	2	8	(Gan, <i>et al.</i> 2013; Gan <i>et al.</i> 2015)
- Nível de buffer.	2	8	(Meller & Kim, 1996; Salameh & Ghattas, 2001)
- Nível de buffer; - Grau de deterioração da máquina/instalação; - Idade da máquina/instalação.	1	4	(Kyriakidis & Dimitrakos, 2006)
- Nível de Buffer; - Grau de deterioração da máquina/instalação; - Tempo de chegada de peças de reposição.	1	4	(Gan & Shi, 2014)
- Nível de buffer; - Capacidade do sistema; - Tempo de processamento das máquinas.	1	4	(Ribeiro <i>et al.</i> 2007)
- Nível de buffer; - Tempo para usar a capacidade de produção extra disponível.	1	4	(Zequeira <i>et al.</i> 2008)
- Nível de buffer; - Tempo de produção de um lote.	1	4	(Sana, 2012)
- Nível de buffer - Quantidade de unidades defeituosas	1	4	(Radhoui <i>et al.</i> 2010)

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

Observa-se que vários pesquisadores investigaram o uso de mais de uma variável em modelos de manutenção. Vale ressaltar que, teoricamente, a complexidade da modelagem torna-se maior quando o número de variáveis abordadas no modelo é aumentado, assim a grande maioria das publicações (80%) utilizou apenas uma ou duas variáveis; os outros de 20% consideraram em seus modelos três ou quatro variáveis, dentre estes, a maioria foi publicada nos últimos anos, o que mostra uma tendência que uma maior quantidade de variáveis sejam analisadas.

Foi realizada também a avaliação dos termos que foram usados conjuntamente (Figura 3.3), permitindo ilustrar a composição dos modelos em maior detalhe do que a frequência das variáveis separadamente.

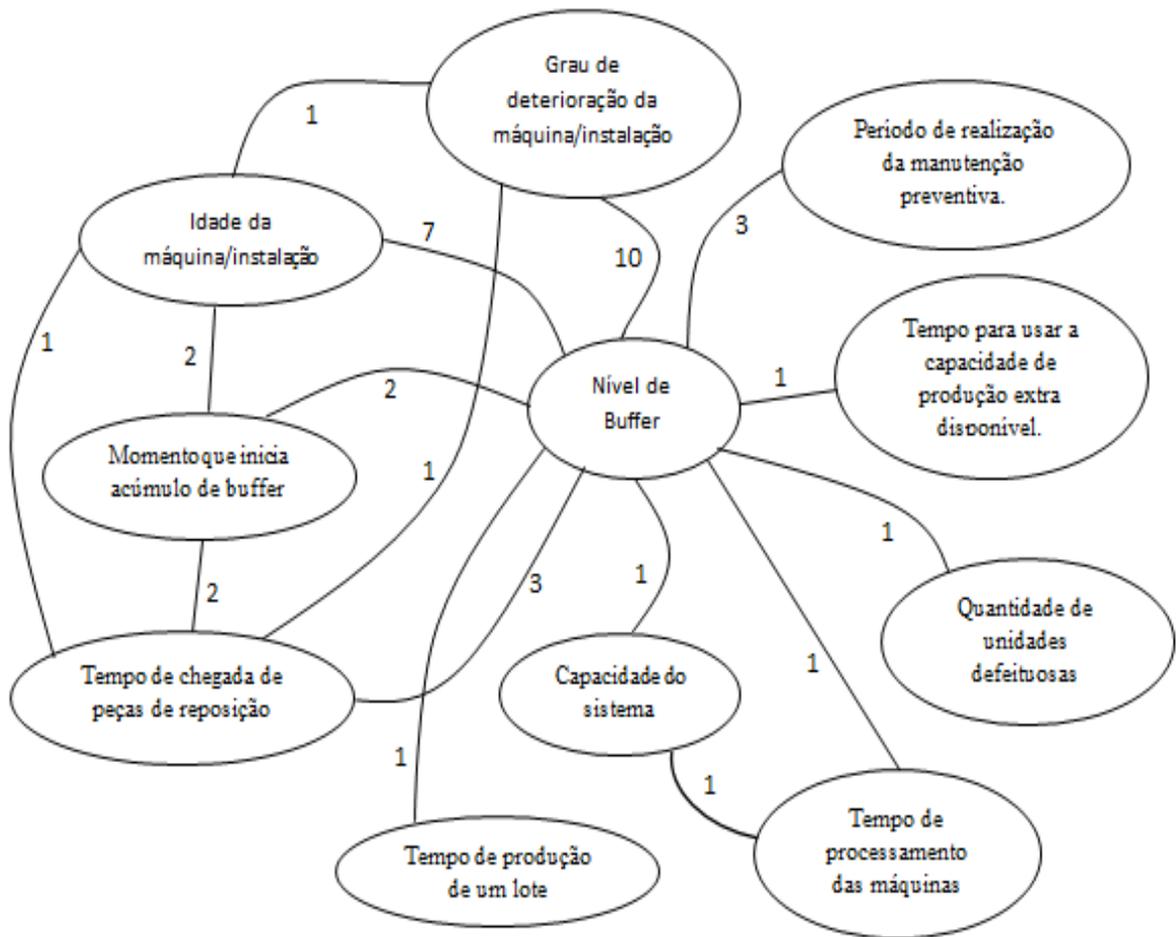


Figura 3.3: Intersecção das variáveis de decisão dos problemas de manutenção com buffer

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

A figura mostra a predominância do cruzamento dos 10 artigos que usam as variáveis "Nível de buffer" e "Grau de deterioração da máquina/instalação", representando 27 % do número total de intersecções. Nesses modelos, a manutenção preventiva depende do estado de funcionamento de uma máquina/instalação e da quantidade de buffer que é construído de modo a evitar interrupções frequentes do processo de produção quando a máquina falha. Tanto a capacidade de buffer quanto o grau de deterioração podem ser assumidos fixos ou variáveis. Se considerado o primeiro caso, então, a política ótima inicia uma manutenção preventiva se, e somente se, o grau de deterioração da unidade de produção exceder um certo nível crítico, ou, no caso do buffer, se atingir a sua capacidade. Caso sejam considerados variáveis, o problema consiste em encontrar, sob uma estrutura de custos adequados, o estado da máquina/instalação em que se é preferível realizar uma manutenção preventiva, o nível de buffer ideal para tal, ou ambos (Chelbi & Rezg, 2006).

Outra interação que aparece em grande proporção é aquela que se dá entre "Nível de buffer" e "Idade da máquina/instalação", com pouco mais de 19% do total de intersecções. Esses são os casos onde a otimização se dá pela política de substituição por idade, onde uma unidade de produção é submetida a uma operação de manutenção logo que ele atinge uma certa idade limite ou pela falha, o que ocorrer primeiro. Esses valores podem ser obtidos a partir da aplicação de diferentes métodos, a depender da natureza do problema. Os métodos encontrados nos artigos pesquisados são descritos no tópico seguinte.

3.1.3 Métodos utilizados para otimização dos problemas

A análise dos métodos de otimização do problema utilizados nos artigos desta pesquisa resultou em um total de 10 diferentes tipos de aplicação envolvendo 10 métodos, como mostra a Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Distribuição dos métodos utilizados para resolução dos problemas de manutenção com buffer

Método de Otimização do Problema	Nº de Publicações	%	Referências
Modelo de Markov	8	32	(Schouten, 1995; Meller & Kim, 1996; Kyriakidis & Dimitrakos, 2006; Pavitsos & Kyriakidis, 2009; Karamatsoukis & Kyriakidis, 2010; Karamatsoukis & Kyriakidis, 2012; Gan & Shi, 2014; Zhou & Zhang, 2015)
Modelo Analítico	7	28	(Salameh & Ghattas, 2001; Chelbi & Ait-Kadi, 2003; Chelbi & Ait-Kadi, 2004; Zequeira, et al., 2004; Gharbi et. al., 2007; Zequeira et al., 2008; Sana, 2012)
Método do Algoritmo Genético	2	8	(Gan, et al., 2013; Gan et al., 2015)
Simulação / Modelo Analítico	2	8	(Rezg et al., 2005; Chelbi & Rezg, 2006);
Simulação / Projeto Experimental	1	4	(Radhoui et al., 2010)
Simulação / Modelo de Bernoulli / Modelo de Markov	1	4	(Lee et al., 2013)
Simulação	1	4	(Murino et al., 2009)
Programação Inteira Mista / Programação Linear	1	4	(Ribeiro et al., 2007)
Programação Dinâmica	1	4	(Zhou et al., 2010)
Modelo Semi-Markov	1	4	(Dimitrakos & Kyriakidis, 2008)

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

Nota-se que para a otimização do problema formulado, a maioria dos autores fizeram uso do Modelo de Markov, utilizando-o juntamente com outros modelos ou de forma isolada, sendo esta última forma a de maior predominância (32%). Outro modelo bastante utilizado foi o Modelo Analítico (28%), sendo também utilizado, em alguns casos, em conjunto com outros métodos. A melhor adequação de um método a um determinado problema irá depender das hipóteses que este assume.

3.1.4 Síntese da revisão das análises de decisões conjuntas entre buffer e manutenção

Pode-se observar nas pesquisas citadas, os autores geralmente abordam uma única política de manutenção a ser realizada em conjunto com o estoque buffer e outras variáveis, sendo a mais comum a política de substituição dependente de uma determinada idade T , que solicita a ação de manutenção quando esta é atingida pelo sistema. No entanto, poucas pesquisas consideram o efeito de uma política de reparo mínimo e uma política de substituição em conjunto com uma política de estoque buffer. Quando um reparo ou substituição é realizado, algum tempo de operação do sistema é perdido e a taxa de transferência do sistema é reduzida. Se o sistema é reparado com demasiada frequência, então, pode ser incapaz de processar todas as peças recebidas, porque uma grande quantidade de tempo é perdida durante a reparação, o que pode gerar um custo à produção, principalmente tratando-se de um sistema de produção do tipo fila, onde a escassez de produto resultante destas paradas afeta todo o processo de produção subsequente. Um estoque buffer intermediário pode ser uma alternativa para suprir a produção durante os tempos de parada para realização de ações de manutenção.

3.2 Análise da literatura relacionada a decisões de manutenção com inspeção de qualidade do produto

Este tópico busca descrever políticas de manutenção que consideram em sua proposição inspeção de qualidade do produto. Para isso, é apresentada uma visão geral da literatura acerca do tema, disponível na *Science Direct* e *Web of Science*, contemplando publicações entre 1995 e 2016, cujos problemas de decisão são descritos a seguir:

Hsu & Kuo (1995) estudam a concepção de políticas ótimas de manutenção e controle de qualidade com base em planos de amostragem online. Em seu estudo, eles analisaram o

desempenho de uma política de inspeção e manutenção que começa a realizar 100% de amostragem de um lote de produção após a produção de n partes e, em seguida, inicia uma atividade de manutenção preventiva/corretiva quando a fração de partes ruins da amostra atinge um determinado limiar f^* . O tomador de decisão deve selecionar n e f^* para alcançar um trade-off econômico entre os custos de amostragem, inspeção, manutenção, sucata e produção perdida.

Wang & Sheu (2001) estudam o problema da determinação simultânea de tamanho ideal do lote e política de inspeção de produtos para um modelo EPQ com um processo de produção que pode sair do controle. Uma vez fora de controle, o processo permanece nesse estado até que o restante do lote seja produzido. Nessa altura, a manutenção preventiva é realizada, garantindo que o processo fique sob um estado “em controle” e retorne a uma condição de “tão bom como novo” no início do próximo ciclo de produção. Além disso, a fim de reduzir o custo de garantia que tenha surgido como resultado da produção de produtos defeituosos, uma política de inspeção é considerada. Erros de inspeção são considerados negligenciáveis e uma inspeção da unidade incorre em um determinado custo.

Radhoui *et al.* (2010) desenvolveram uma política de manutenção preventiva conjunta com um controle de qualidade para um sistema de produção que produz unidades conformes e defeituosas. No sistema considerado, cada lote produzido pela máquina está sujeito a um controle de qualidade de acordo com a proporção de unidades defeituosas. Todos os itens produzidos são inspecionados e a realização ou não de ações de manutenção no sistema é baseada na comparação com um valor limite de proporção de defeitos. Objetivando atenuar as perturbações causadas pela interrupção da máquina devido a ações de manutenção preventiva e corretiva de durações aleatórias, também é construído um buffer para assegurar o fornecimento contínuo da linha de produção subsequente. A estratégia proposta é modelada utilizando simulação e projeto experimental.

Sarkar *et al.* (2010) propuseram a determinação conjunta de tamanho do lote de produção ideal, estoque de segurança e parâmetro confiabilidade sob as hipóteses realistas de que as máquinas da unidade de produção estão sujeitas à quebra aleatória e de que o parâmetro confiabilidade é variável. Para generalização deste modelo são adotadas manutenção preventiva e corretiva e estoque de segurança para os tempos de reparação e escassez. É assumido que o sistema de produção pode mudar de estado “em controle” para o estado “fora de controle”.

Durante o estado “fora de controle”, uma determinada percentagem da produção total é composta de itens defeituosos que podem ser reformulados imediatamente a um custo que os tornam tão bons como itens de qualidade perfeita. A função de custo é minimizada pelo método de Khun-Tucker. Os resultados numéricos são apresentados para ilustrar tanto o estudo das soluções ótimas quanto a sensibilidade de diferentes parâmetros chave.

Colledani & Tolio (2012) apresentaram uma teoria geral para analisar a taxa de produção de peças conformes em sistemas de manufatura com máquinas que sofrem deterioração progressiva e manutenção preventiva. O sistema é composto por várias máquinas com estoques intermediários. A inspeção da característica do produto é monitorada por carta de controle e a taxa média de inspeção da máquina é obtida analiticamente. As estações de inspeção são consideradas perfeitamente precisas e não sujeitas à deterioração.

Ming Wee & Widyadana (2013) desenvolveram um modelo de dimensionamento de produção considerando itens que deterioram-se com o tempo, o retrabalho utilizando a regra *First In First Out* (FIFO) e manutenção com tempo estocástico, onde os itens são produzidos antes da inspeção. Os itens de boa qualidade são vendidos para o cliente imediatamente e itens defeituosos são mantidos para o retrabalho. Além dos itens, o funcionamento do sistema também sofre deterioração. O problema é resolvido através de um procedimento de busca simples; dois exemplos de casos que utilizam distribuição exponencial e tempo de manutenção preventiva uniforme são aplicados.

Kurniati *et al.* (2015) propuseram um quadro geral de interação entre inspeção e manutenção, que fornece um pensamento gerencial abrangente na manutenção de equipamentos. Os autores buscam demonstrar que a determinação da política de manutenção com base no histórico de qualidade dos produtos, ao invés da condição da máquina, pode proporcionar uma decisão de manutenção mais confiável e, por outro lado, a determinação da política e da estratégia de manutenção pode afetar a futura qualidade de um produto. Essas relações são analisadas de forma a se obter garantias de melhor qualidade e de desempenho do sistema de produção. A ênfase é mostrar que importância da garantia de qualidade através de manutenção de equipamentos se torna cada vez mais indispensável.

Bouslah *et al.* (2016) consideraram um problema da produção integrada à manutenção preventiva e ao controle de qualidade de um sistema de produção estocástico sujeito a

deteriorações de confiabilidade e qualidade. A estratégia de produção com estoque é usada para fornecer proteção contra incertezas e o controle de qualidade é realizado utilizando um único plano de amostragem por atributos aceitável. A estratégia de manutenção preventiva consiste na realização de uma manutenção imperfeita como uma parte do processo no início de cada lote de produção, enquanto uma grande manutenção (revisão geral) é realizada quando a proporção de defeitos num lote rejeitado atinge ou excede um determinado limiar. O principal objetivo é otimizar conjuntamente o tamanho do lote de produção, o limiar de estoque, os parâmetros do plano de amostragem e do limiar de revisão, minimizando o custo total incorrido.

Os artigos apresentados foram analisados para obter uma compreensão do caminho que as pesquisas acerca deste tema estão tomando. Os trabalhos acadêmicos em questão foram analisados de acordo com as revistas o ano de publicação, critérios mais comuns para formulação dos problemas, as variáveis de decisão relacionadas a estes e os métodos de resolução utilizados.

3.2.1 Distribuição de publicações ao longo dos anos

Os artigos pesquisados para esse estudo foram acessados através da base de dados *Science Direct* e *Web of Science*. As palavras utilizadas para esse levantamento foram “maintenance” e “inspection policy”. Dentre estes, foram selecionadas apenas os trabalhos que consideram a política de inspeção de produtos em conjunto com manutenção.

A maioria das publicações está concentrada na última década, embora tenham sido encontrados trabalhos datados de 1995 e 2001 (Hsu & Kuo, 1995; Wang & Sheu, 2001), como apresenta a Figura 3.4:

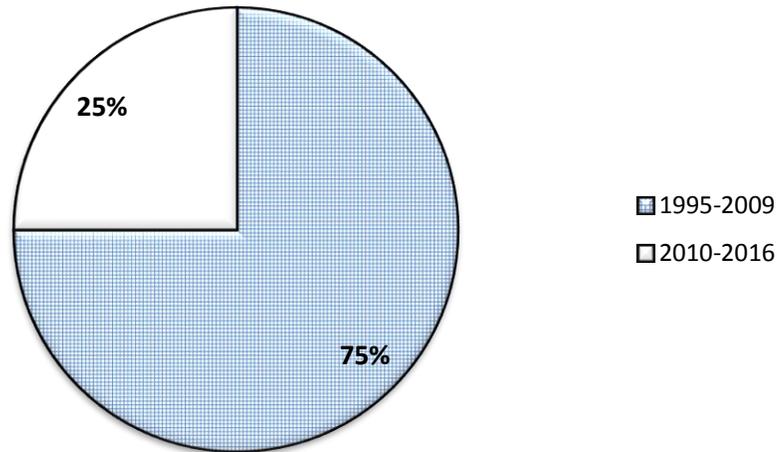


Figura 3.4: Distribuição dos artigos de política de inspeção de produtos e manutenção por década

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

O crescimento das pesquisas nos últimos anos indica que existe um aumento no interesse acerca de estudos integrados entre Política de Inspeção de Produtos e Manutenção.

Uma vez realizada a análise em relação ao tempo, dar-se-á agora uma análise acerca das características dos artigos pesquisados (variáveis, critérios e métodos de resolução). É importante destacar que dentre os estudos analisados, um deles possui como proposta um quadro geral de interação entre inspeção e manutenção, não contendo, portanto, a aplicação de um modelo.

3.2.2 Variáveis de decisão consideradas na formulação dos problemas

Dentre os artigos considerados para análise, todos utilizaram o mínimo custo como critério para otimização do modelo proposto, com exceção de Colledani & Tolio (2012), cujo modelo adota como critério a taxa de produção efetiva. As individualidades de cada modelo definem as variáveis de decisão consideradas para atingir o objetivo destes. Nas publicações analisadas foram encontradas 12 variáveis com diferentes denominações, sendo “tempo do ciclo de produção” a mais utilizada. A distribuição destas é apresentada na Tabela 3.4:

Tabela 3.4: Distribuição das variáveis de decisão dos problemas de inspeção e manutenção

Variáveis de Decisão	Nº de Publicações	%	Referências
- Tempo do ciclo de produção - Limite de estoque - Tamanho da amostra - Limiar de defeitos - Limiar de revisão	1	14,28	(Bouslah <i>et al.</i> 2016)
- Tempo do ciclo de produção	1	14,28	(Wee & Widyadana, 2013)
- Estado crítico	1	14,28	(Colledani & Tolio, 2012)
- Tempo do ciclo de produção - Limiar de estoque - Parâmetro de confiabilidade	1	14,28	(Sarkar <i>et al.</i> , 2010)
- Número de partes processadas - Limiar de defeitos	1	14,28	(Hsu & Kuo, 1995)
- Tempo do ciclo de produção - Intervalo de inspeção - Nível de manutenção.	1	14,28	(Wang & Sheu, 2001)
- Nível de buffer - Quantidade de unidades defeituosas	1	14,28	(Radhoui <i>et al.</i> , 2010)

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

Observa-se que grande parte dos pesquisadores investigou o uso de mais de uma variável em modelos conjuntos de manutenção com inspeção de produtos, onde todos usaram diferentes combinações. No entanto, a variável “tempo de ciclo de produção” aparece em 57,14 % das abordagens, sendo portanto predominante o seu cruzamento com outras variáveis.

Os valores para estas variáveis podem ser obtidos a partir da aplicação de diferentes métodos, a depender da natureza do problema. Estes métodos são descritos no tópico seguinte.

3.2.3 Métodos utilizados para otimização dos problemas

A análise dos métodos de otimização do problema utilizados nos artigos desta pesquisa resultou em um total de 5 diferentes tipos de aplicação envolvendo diversos métodos, como mostra a Tabela 3.5:

Tabela 3.5: Distribuição dos métodos utilizados para resolução dos problemas de inspeção com manutenção

Método de Otimização do Problema	Nº de Publicações	%	Referências
Modelo Analítico	2	28,57	(Hsu & Kuo, 1995; Colledani & Tolio, 2012)
Simulação	2	28,57	(Bouslah et al., 2016; (Radhoui et al., 2010)
Modelo de Markov	1	14,28	(Wang & Sheu, 2001)
Método de Khun-Tucker	1	14,28	(Sarkar et al., 2010)
Método de Newton	1	14,28	(Wee & Widyadana, 2013)

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

Nota-se que para a otimização do problema formulado, o método que aparecem com mais frequência são o Método Analítico e o Modelo de Markov, com 28,57 % cada. Os métodos são escolhidos para resolução do problema dependendo de vários fatores, dentre elas, as hipóteses que o modelo assume.

3.2.4 Síntese da revisão das análises de decisões conjuntas entre inspeção e manutenção

A maioria dos modelos de manutenção considera uma inspeção para verificação de todo o sistema em um determinado intervalo. No entanto, como foi mostrado na revisão acima, poucos são os modelos de manutenção que incorporam a inspeção de qualidade dos itens produzidos. Outro fator observado foi que a maioria das pesquisas considera um processo de produção

imperfeito, mas negligenciam o fato de que o processo de inspeção também pode ser passível de erros. Considerações acerca da influência do reparo mínimo na qualidade do processo de produção é outra questão que não tem sido abordada pelos pesquisadores. Portanto, modelos que visam a determinação de políticas ótimas de manutenção com reparo mínimo e substituição, considerando inspeção de qualidade dos produtos, são proposto no capítulo 4.

4 DESCRIÇÃO DOS MODELOS PROPOSTOS

Nesta seção são propostos, primeiramente, modelos que consideram a possibilidade de escassez e a manutenção de estoque buffer. Em um segundo momento, são propostos modelos referentes aos processos de produção e inspeção de qualidade dos itens produzidos. O objetivo destes modelos consiste em minimizar o custo total esperado por unidade de tempo.

4.1 Nomenclatura utilizada

Tabela 4.1: Descrição da nomenclatura utilizada

$g(.)$	Função densidade probabilidade do tempo de processamento necessário para processar um item
$h(.)$	Taxa de falha do sistema
$f(.)$	Função densidade probabilidade da duração de vida do sistema
α, θ	Parâmetros de vida do sistema
λ	Taxa de chegada/taxa de transferência
τ	Tempo médio necessário para processar um item
α	Taxa de reabastecimento do buffer
β	Taxa de consumo do buffer
N	Número de itens processados antes de uma substituição
$n_{b(N)}$	Número esperado de falhas do sistema antes de N itens serem processados
$P(N)$	Proporção de itens defeituosos processados em um ciclo de produção
K	Parâmetro de taxa da distribuição exponencial da proporção de itens defeituosos
$k1$	Parâmetro de taxa da distribuição exponencial do erro tipo I
$k2$	Parâmetro de taxa da distribuição exponencial do erro tipo II
Id	Índice de inspeção
$f1(q1)$	Função de distribuição de probabilidade uniforme do erro tipo I
$f2(q2)$	Função de distribuição de probabilidade uniforme do erro tipo II
$q1$	Valor esperado da proporção do erro uniforme tipo I

q_2	Valor esperado da proporção do erro uniforme tipo II
$Q_1(N)$	Função de distribuição de probabilidade exponencial do erro tipo I
$Q_2(N)$	Função de distribuição de probabilidade exponencial do erro tipo II
$f(r)$	Função de distribuição de probabilidade da proporção de itens defeituosos que podem ser retrabalhados
r	Valor esperado da proporção de itens defeituosos que podem ser retrabalhados
C_1	Custo de reparo mínimo em relação ao tempo de operação
C_0	Custo fixo do reparo mínimo
C_m	Custo esperado de reparo mínimo
C_p	Custo de perder um item
C_s	Custo de manter um item
C_r	Custo esperado de substituição
C_g	Custo de garantia referente a um item defeituoso vendido ao mercado
C_i	Custo de inspeção em um ciclo de produção
C_d	Custo de descarte por item defeituoso retirado do processo
C_w	Custo de produzir um item
V_r	Valor residual
C_t	Custo de retrabalho de um item
T_m	Tempo médio para realizar um reparo mínimo
T_r	Tempo médio para realizar uma substituição do sistema
T_b	Tempo médio de retrabalho de um item
S_b	Conteúdo do buffer

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

4.2 Modelo Primário

Para formulação dos modelos propostos neste trabalho foram tomados como base estudos que consideram um sistema de produção não confiável do tipo fila (Hsu, 1994; Hsu e Kuo, 1999),

cuja unidade de produção está sujeita a falhas aleatórias e fornece entrada para uma linha de montagem posterior, como mostra a Figura 4.1:

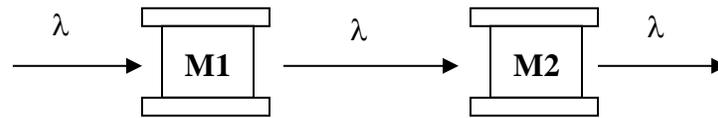


Figura 4.1: Representação do sistema de produção tipo fila

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

Os itens que chegam para serem processados na linha de montagem seguem um processo de Poisson, com taxa de chegada λ . A quantidade de tempo necessário para processar um item é estocástica e segue uma função densidade de probabilidade conhecida (pdf) $g(\cdot)$, com média τ . A taxa de falha do sistema $h(\cdot)$ é uma função não decrescente do tempo do sistema operacional.

O objetivo do modelo é definir o número de itens a serem processados antes da substituição do sistema que minimize o custo de manutenção por unidade de tempo, através de um trade-off entre o custo de RM e de substituição. Para atingir esse objetivo é necessário identificar aspectos considerados pertinentes a este, logo, os seguintes pressupostos são assumidos:

1. Os reparos mínimos não afetam a taxa de falha do sistema;
2. As falhas no sistema são imediatamente detectadas;
3. O tempo gasto para realizar um RM é estocástico com pdf $m(\cdot)$ e média Tm .
4. O tempo para proceder a substituição de todo o sistema também é estocástico com pdf $r(\cdot)$ e média Tr .
5. O custo esperado de RM na idade (tempo de operação do sistema cumulativo) x é conhecido e dado por $Cm(x)$;
6. O custo esperado de substituição do sistema é conhecido e dado por Cr .

Considera-se a possibilidade das falhas serem corrigidas tanto por reparo mínimo, quanto através da substituição do sistema. Assim, a política de manutenção a ser investigada combina as vantagens da política baseada em uma idade T (idade para substituição) e políticas de RM

baseada em um número N (itens processados). A substituição é indicada quando ocorrer uma falha e, pelo menos, N itens já tiverem sido processados pelo sistema. Se uma falha ocorrer antes disso, é indicada a ação do reparo mínimo.

As equações (4.1) à (4.8) são propostas por Hsu (1994) e Hsu & Kuo (1999).

O número de falhas ocorridas no sistema antes de N itens serem processados é representado por n_b e dado pela Equação (4.1):

$$n_b(N) = \int_0^{\infty} g^N(x) \left[\int_0^x h(t) dt \right] dx \quad (4.1)$$

Onde $g^N(x)$ é a N -ésima convolução de $g(x)$.

Já a duração de vida do sistema de produção é representada pela variável aleatória T , sendo sua PDF dada por $f(t)$, logo, a taxa de falha do sistema é dada pela Equação (4.2):

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = -\frac{R'(t)}{R(t)} \quad (4.2)$$

Com

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(s) ds \quad (4.3)$$

Considerando T' como o tempo total de operação do sistema quando este é substituído por um novo se ocorrer uma falha e, pelo menos, N itens tiverem sido processados, o seu valor esperado é obtido pela Equação (4.4):

$$E(T') = \int_0^{\infty} g^N(x) \left[\int_0^x t \frac{f(t)}{R(x)} dt \right] dx \quad (4.4)$$

Deve ser considerado também o ciclo de produção T_c , que consiste no tempo decorrido entre duas substituições sucessivas, logo, T_c é um ciclo de renovação com média dada pela Equação (4.5):

$$E(T_c) = \frac{E(T')}{\lambda\tau} + Tr + n_b(N)Tm \quad (4.5)$$

Nota-se que o número esperado de itens processados em um ciclo de produção é $E(T')/\tau$ e o tempo decorrido esperado para processar $E(T')/\tau$ itens é $E(T')/(\lambda\tau)$, uma vez que a taxa de chegada e taxa de transferência do sistema é λ . Em outras palavras, $E(T_c)$ inclui o tempo necessário para processar $E(T')/\tau$ itens e o tempo ocioso do sistema. Então, se τ_e é o tempo de processamento eficaz médio quando os efeitos de RM ou substituição são considerados, tem-se a Equação (4.6):

$$\tau_e = \tau \left(1 + \frac{Tr + n_b(N) \cdot Tm}{E(T')} \right) \quad (4.6)$$

A equação acima indica que a capacidade do projeto de um sistema de produção deve levar em conta os requisitos para a reparação do sistema e substituição. Em outras palavras, em vez de satisfazer $\lambda\tau < 1$, o gestor do sistema de produção deve satisfazer $\lambda\tau_e < 1$; caso contrário, o sistema não irá ter capacidade suficiente para processar todas as partes de entrada.

O custo de reparo mínimo pode ser representado por uma função linear da idade do sistema, definido pela Equação (4.7):

$$Cm(t) = C_0 + C_1 t \quad (4.7)$$

Logo, o custo esperado de manutenção por unidade de tempo pode ser obtido através da soma entre os custos de reparo mínimo e de substituição em razão do tempo de ciclo de produção, dado pela Equação (4.8):

$$Cmt = \frac{Cm+Cr}{E(Tc)} \quad (4.8)$$

As equações (4.1) à (4.8) descorideram algumas questões importantes, como a escassez resultante das paradas para manutenção que interrompem o sistema tipo filas e a possibilidade de produção imperfeita. Estas questões são abordadas nos modelos propostos a seguir.

4.3 Modelos de manutenção considerando escassez de itens e estoque buffer

Em um sistema de produção do tipo fila, os processos são altamente dependentes (Jensen et al. 1991). Logo, a falha de uma etapa resulta em um impacto em todo restante do processo. Dessa forma, a parada para uma ação de manutenção pode acarretar em penalidades provenientes de um esforço adicional para o fornecimento de produtos ou até mesmo da escassez dos mesmos, uma vez que reparos constantes ou substituições acarretam em perda de tempo para operação e redução da taxa de transferência do sistema.

Uma vez que as paradas para realização de reparo mínimo e substituição acarretam em um custo adicional para a organização, é preciso definir estratégias que visem a redução desse custo. Uma maneira de evitar perdas econômicas devido à indisponibilidade de produção causada por ações de manutenção é a construção de um estoque buffer para satisfazer a demanda durante o período de indisponibilidade (Gan et al., 2015).

4.3.1 Caso 1: Modelo de manutenção com reparo mínimo e substituição considerando escassez de itens processados

Neste caso é realizada a construção de um modelo considerando o impacto negativo que as paradas do sistema exercem sobre desempenho do mesmo. As paradas para uma ação de manutenção podem acarretar em penalidades provenientes de um esforço adicional para o fornecimentos de produtos ou até mesmo da escassez dos mesmos, uma vez que reparos constantes ou subbtuições acarretam em perda de tempo de operação, ocasionando a redução da taxa de transferência do sistema, o que inviabiliza o processamento de todos os itens recebidos, como representado na Figura 4.2:

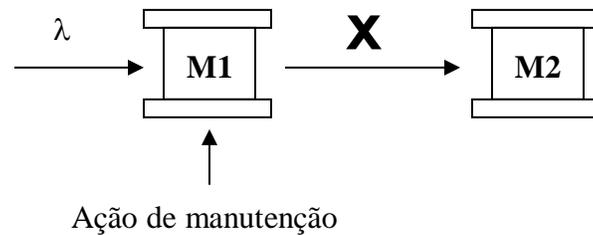


Figura 4.2: Representação do sistema quando é realizada uma ação de manutenção

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

O objetivo do modelo é definir o número de itens a serem processadas antes da substituição do sistema que minimize o custo total esperado por unidade de tempo. Para isso, é preciso levar em consideração o custo de escassez proveniente do período em que ações de manutenção estão sendo executadas. Para atingir este objetivo, os seguintes pressupostos são assumidos:

1. Existe um custo de penalidade associado aos tempos de paradas para ações de manutenção.
2. O custo de perda de um item é conhecido e dado por C_p .

Dado que o custo de perder um item é conhecido, é possível obter o custo de escassez em um ciclo de produção, sabendo-se que este corresponde ao tempo decorrido entre duas substituições consecutivas. Durante esse período, podem acontecer falhas que são corrigidas através do reparo mínimo, que leva um tempo T_m para ser realizado, até que se dê a substituição, cujo tempo de duração é T_r . Nesse caso, o custo de escassez por unidade de tempo está associado à quantidade de itens que deixam de ser processados durante esses tempos, referentes às ações de manutenção executadas ao longo de um ciclo de duração $E(T_c)$, podendo ser expressado pela Equação (4.9):

$$C_{pt} = \frac{C_p \lambda (n_b(N) T_m + T_r)}{E(T_c)} \quad (4.9)$$

Com o custo de escassez formulado, pode-se definir a equação para obtenção do custo total esperado por unidade de tempo pela Equação (4.10):

$$CT_1 = Cmt + Cpt \quad (4.10)$$

O número N de itens a serem processados que minimiza esse custo resulta na solução ótima para o modelo proposto.

4.3.2 Caso 2: Modelo de manutenção com reparo mínimo e substituição considerando buffer

A fim de atenuar as perturbações causadas pelas ações de manutenção e as perdas que estas acarretam, desenvolveu-se um modelo com a construção de um estoque buffer intermediário, com o propósito de assegurar o abastecimento contínuo da linha de produção, garantindo assim a continuidade do processo durante o período de indisponibilidade da máquina, como mostra a Figura 4.3:

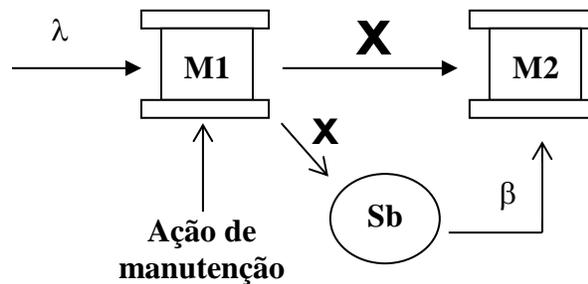


Figura 4.3: Representação do sistema de produção tipo fila com buffer

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

A estratégia proposta consiste na construção, no início de cada ciclo da manutenção preventiva, de um estoque buffer Sb , cujo tamanho cobre pelo menos o consumo médio durante os períodos de reparação e substituição que ocorrem durante o ciclo, como representado na Figura 4.4:

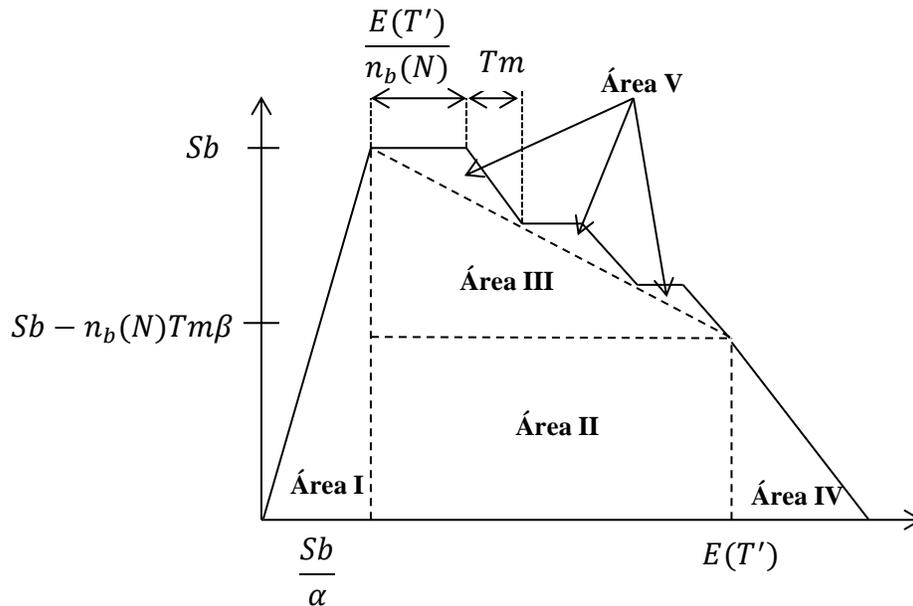


Figura 4.4: Evolução do estoque buffer

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

A área I mostra o acúmulo de buffer, que ocorre até um determinado nível, o qual deve ser suficiente para suprir o processo quando ocorre uma falha e o sistema precisa ser interrompido para realizar as ações de MR, representadas pela área V. A área III mostra o decréscimo da quantidade de buffer após o consumo durante os períodos de MR. Após estes períodos, uma certa quantidade de buffer ainda deve ser mantida (área II), a fim de evitar a parada do sistema durante o período de substituição, que é representado pela área IV.. Para esta estratégia, o modelo desenvolvido assume os seguintes pressupostos:

1. A máquina pode simultaneamente satisfazer a demanda e produzir Sb unidades adicionais antes da falha ocorrer. Isso sempre acontece após a substituição do sistema;
2. O nível de buffer Sb deve ser pelo menos igual ao consumo médio durante os períodos de RM e de substituição, dentro do intervalo de tempo de duração $E(T')$;
3. Existe capacidade suficiente para permitir a rápida acumulação de estoque buffer Sb a uma taxa α ($E(T') \gg Sb/\alpha$);
4. As despesas de manter o estoque são conhecidas;

5. O estoque é imperecível com o tempo;
6. O buffer não utilizado durante os períodos de manutenção são levados a zero para o próximo ciclo.

O objetivo do modelo é determinar, simultaneamente, o número de itens N que devem ser processados antes de realizar uma substituição e o tamanho do buffer Sb que minimizem o custo total esperado por unidade de tempo. Para isso, é levado em consideração o custo de manutenção, o custo de manter o buffer e o custo de escassez relacionado às paradas para manutenção.

O custo de manter o estoque em uma instalação é proveniente da necessidade de aquisição de recursos para produzir atividades necessárias à armazenagem, como, por exemplo, o espaço de armazenamento adequado, fornecimento de capital e mão de obra. (Peter, 2008). Para definição do custo de manter o buffer em um ciclo de produção no modelo proposto, os pressupostos 2 e 3 devem ser levados em consideração, o que remete à seguinte restrição: $(n_b Tm + Tr) \cdot \beta \leq Sb < \alpha \cdot E(T')$. Esta restrição garante que existe capacidade suficiente para permitir uma rápida acumulação de buffer se comparada ao período de produção, e que esse acúmulo é suficiente para suprir o sistema durante as paradas para ações de manutenção. Em seguida, a expressão que define o custo de manter o buffer é dada pela Equação (4.11):

$$\begin{aligned}
 CS = & C_s \left(\frac{Sb}{\omega} \cdot \frac{Sb}{2} \right) + \\
 & + C_s (Sb - n_b Tm \beta) \cdot \left(\frac{E(T')}{\lambda \tau} - \frac{Sb}{\omega} \right) + \\
 & + C_s \left[\frac{\left(\frac{E(T')}{\lambda \tau} - \frac{Sb}{\omega} \right) \cdot (n_b Tm \cdot \beta)}{2} \right] + \\
 & + C_s \left[\frac{Tr \cdot [Sb - (n_b Tm \cdot \beta)]}{2} \right] + \\
 & + C_s \cdot n_b \left(\frac{E(T')}{\lambda \tau} - \frac{Sb}{\omega} \right) \cdot \left[\frac{\left(\frac{E(T')}{n_b} + Tm \right) \cdot (Tm \cdot \beta)}{2} - \left(\frac{Tm \cdot \beta}{2} \cdot Tm \right) \right]
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

Cada etapa da equação corresponde a um período dentro da evolução do buffer, ou seja, o custo de manter o buffer durante o período de acúmulo, somado ao seu custo durante as execuções de MR e enquanto vai sendo consumido, mais o custo de mantê-lo até o momento da substituição e durante a mesma como foi mostrado na Figura 4.4. Dessa forma, o custo esperado de manter o buffer por unidade de tempo em razão do tempo de ciclo de produção pode ser descrito pela Equação (4.12):

$$Cst = \frac{CS}{E(Tc)} \quad (4.12)$$

Sabe-se que uma ação de reparo mínimo não retorna o sistema a uma condição de tão bom quanto novo e que o mesmo sofre deterioração com o tempo. Dessa forma, os reparos podem tornar-se cada vez mais constantes em períodos de tempo mais curtos, fazendo com que a soma do tempo para realizar estas ações seja maior do que o período de tempo necessário para o consumo do buffer, o que leva ao custo de penalidade, que é expresso pela Equação (4.13):

$$CP = \begin{cases} 0, & (n_b Tm + Tr) \leq \frac{Sb}{\beta} \\ Cp\beta \left[(n_b Tm + Tr) - \left(\frac{Sb}{\beta} \right) \right], & (n_b Tm + Tr) > \frac{Sb}{\beta} \end{cases} \quad (4.13)$$

Nos casos em que o total do tempo utilizado para executar as ações de manutenção é menor do que o tempo que foi levado para consumir Sb , não existe custo de escassez, sendo este igual a zero. Para obtenção do custo de escassez esperado por unidade de tempo, o custo de escassez durante o ciclo deve ser dividido pelo tempo de duração do mesmo, como apresentado na Equação (4.14):

$$Cpt = \frac{CP}{E(Tc)} \quad (4.14)$$

O custo total esperado do sistema de produção por unidade de tempo é formado pela soma do custo de manutenção, o custo de manter o buffer e o custo de perda, dados pelas Equações

(4.8), (4.12) e (4.14), respectivamente. Dessa forma, a equação que o define é representada pela Equação (4.15):

$$CT_2 = Cmt + Cst + Cpt \quad \text{Equação 4.15}$$

A solução ótima para o problema proposto é obtida encontrando o número N de itens processados e a quantidade Sb de buffer a ser mantida que minimizam o custo da Equação (4.15).

4.4 Modelos de manutenção considerando produção imperfeita e políticas de inspeção

Em um sistema de produção, a qualidade do processo de produção muitas vezes não é perfeito e, portanto, produz itens defeituosos (Khan et al., 2011). Os modelos desenvolvidos anteriormente desconsideram tal possibilidade, uma vez que assumem implicitamente que todos os itens processados estão em conformidade com as especificações do produto.

Com objetivo de retratar um sistema de produção tipo fila onde a atividade de manutenção tem consequência na qualidade dos itens produzidos, os modelos propostos nesta sessão buscam representar um sistema de produção que inicialmente encontra-se em um estado “em controle”, produzindo itens não defeituosos, mas que, depois de um período de funcionamento aleatório, pode mudar para o estado “fora de controle” e começar a produzir uma proporção de itens defeituosos. Considera-se também que o fabricante produz e inspeciona simultaneamente os itens processados durante o ciclo de produção.

Além da imperfeição do processo de produção, são também retratados alguns casos onde há imperfeição do processo de inspeção, uma vez que, na prática, este muitas vezes não é perfeito, resultando em erros de inspeção do tipo I e II.

A seguir, são apresentadas diferentes situações referentes aos processos de produção e inspeção, tratadas em casos distintos. Cada particularidade destes casos é considerada na formulação dos modelos propostos, que visam a minimização do custo total esperado por unidade de tempo.

4.4.1 Caso 3: Modelo de manutenção com reparo mínimo e substituição considerando produção imperfeita

Este caso apresenta um sistema de produção imperfeito onde uma proporção de itens defeituosos é considerada. Esta pode ser associada ao fato de uma ação de reparo mínimo não retornar o sistema a uma condição de tão bom quanto novo, fazendo com que a sua aplicação constante ao longo do processo de produção leve o sistema a uma condição “fora de controle”, dado que a deterioração impacta diretamente na qualidade de saída dos produtos. Nesse caso, o efeito do custo incorrido pela não conformidade dos produtos influencia na determinação do período de execução de produção ideal.

O objetivo do modelo é encontrar o número de itens processados que minimize o custo total esperado por unidade de tempo, assumindo os seguintes pressupostos:

1. O sistema passa do estado “em controle” para o estado “fora de controle” conforme reparos mínimos vão sendo realizados, o que leva à produção de uma proporção de itens defeituosos;
2. A função de distribuição de probabilidade de itens defeituosos é conhecida;
3. O sistema pode ser devolvido ao estado original “em controle” (após uma substituição);
4. Os defeitos dos itens não são detectados durante o processo;
5. A garantia é assegurada aos clientes em caso de venda de itens defeituosos;
6. Os itens defeituosos devolvidos não são reinsertidos no processo de produção;
7. Não há possibilidade de escassez

Para obtenção do custo total por unidade de tempo é preciso considerar, além do custo de manutenção apresentado nos modelos anteriores, o custo de garantia derivado do processo de produção imperfeito. Este custo está relacionado à proporção de itens defeituosos processados durante o ciclo de produção, que segue uma função de probabilidade conhecida $P(N)$. Logo, a proporção de itens não defeituosos é expressa por: $1 - P(N)$.

O fluxo dos itens ao longo do processo é demonstrado na figura 4.5:

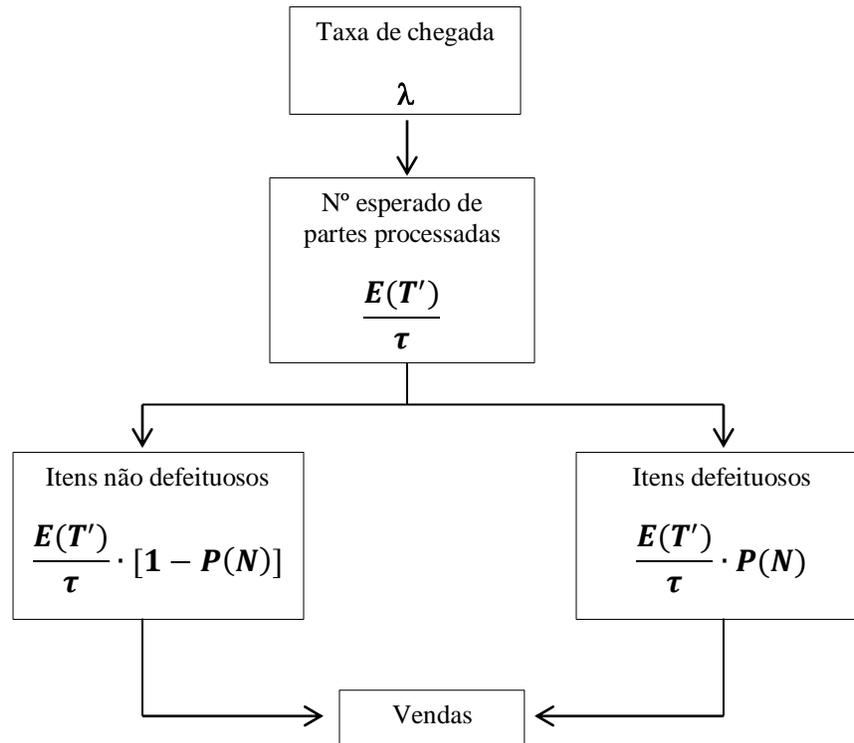


Figura 4.5: Fluxo dos itens durante o processo de produção imperfeito

Fonte: Esta pesquisa (2017)

Neste modelo é assumido que a proporção de itens defeituosos relaciona-se com a quantidade de reparos mínimos realizados durante o ciclo, visto que a realização destes mantém o sistema no mesmo estado que encontrava-se antes da falha. Dessa forma, quando um RM posterior é executado, o sistema encontra-se ainda mais deteriorado, o que aumenta a probabilidade de produzir itens defeituosos.

Uma vez conhecida esta proporção, pode-se determinar o custo de garantia incorrido da venda destes itens ao mercado, que é dado pela Equação (4.16):

$$Cgp = \frac{c_g \cdot \frac{E(T')}{\tau} \cdot P(N)}{E(Tc)} \quad (4.16)$$

A expressão reflete o custo de garantia por unidade de tempo, que leva em consideração o custo de garantia referente a um item defeituoso vendido ao mercado e a quantidade de itens defeituosos processados, em razão do tempo esperado do ciclo de produção. O modelo assume que os defeitos dos itens não são detectados durante o processo (pressuposto 4), logo, todos os itens processados que apresentam algum defeito quando o sistema assume um estado “fora de controle” são vendidos ao mercado.

Uma vez definido o custo de garantia de um item, deve-se realizar um trade-off entre este e o custo de manutenção para obtenção do custo total esperado por unidade de tempo, expresso pela Equação (4.17):

$$CT_3 = Cmt + Cpg \quad (4.17)$$

O número N de itens a serem processados que minimiza esse custo resulta na solução ótima para o modelo proposto. Uma alternativa para diminuir o impacto do custo de garantia no custo total é a adoção de uma política de inspeção, tratada no próximo caso.

4.4.2 Caso 4: Modelo de manutenção com reparo mínimo e substituição considerando produção imperfeita e inspeção perfeita

Considera-se no presente cenário que o fabricante produz e inspeciona os itens processados durante o ciclo de produção, objetivando reduzir o custo que se tem com garantia de itens defeituosos vendidos ao mercado e conseqüentemente o seu custo total.

Uma vez adotada uma política de inspeção, o fluxo dos itens ao longo do processo passa a ser representado pela Figura 4.6:

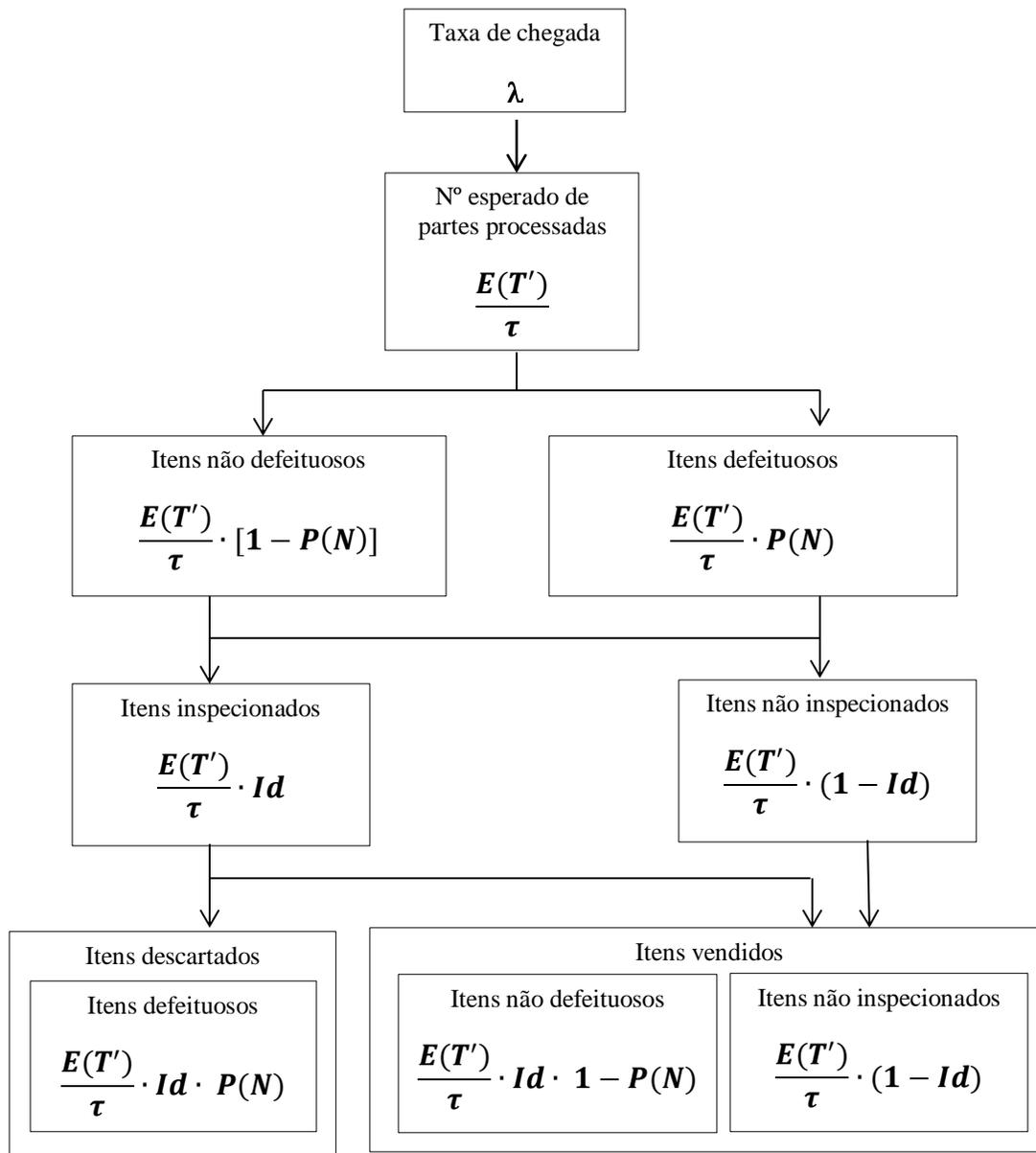


Figura 4.6: Fluxo dos itens durante os processos de produção e inspeção imperfeitos

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

A partir de uma taxa de chegada λ , o fabricante produz e, simultaneamente, inspeciona uma quantidade esperada de itens, dada por $E(T')/\tau$. Uma vez que o processo de produção não é perfeito, os itens processados pelo sistema contém uma proporção de defeituosos, dada por $P(N)$,

bem como uma proporção de não defeituosos, expressa por $1 - P(N)$, cujas funções de distribuição de probabilidade são conhecidas.

A quantidade de itens produzidos é inspecionada de acordo com a política de inspeção do fabricante (Id), podendo variar do total de itens produzidos (100%) até mesmo à inexistência de inspeção (0%). Os itens que não passam pelo processo de inspeção ($E(T')/\tau \cdot (1 - Id)$) são diretamente vendidos ao cliente, já os itens inspecionados ($E(T')/\tau \cdot (Id)$) podem ter dois diferentes destinos: a venda ou o descarte. Como o processo de inspeção é considerado isento de erros, todos os itens defeituosos que passam por ele são detectados e então descartados. Analogamente, todos os itens aprovados na inspeção como estando dentro dos padrões de conformidade são encaminhados para serem vendidos.

Considerando o comportamento do sistema, o objetivo do modelo é determinar o número de itens N a serem processados antes da substituição do sistema e a melhor política de inspeção Id que minimize o custo total por unidade de tempo. Os seguintes pressupostos são considerados:

1. A política de inspeção é perfeita, não existindo a possibilidade de erros;
2. O custo de inspeção é conhecido e realizado manualmente, dado por C_i e pode variar de acordo com a política de inspeção adotada pela empresa;
3. Os produtos detectados como defeituosos não podem ser retrabalhados, sendo então descartados, não retornando ao processo;
4. O custo de descarte (C_d) corresponde ao custo de produzir um item (C_w) menos o valor residual deste item (V_r), onde o valor residual consiste em um valor obtido através da venda do item defeituoso para terceiros, sendo $V_r \ll C_w$.
5. O custo de inspeção C_i deve ser inferior ao custo de garantia C_g , pois, caso contrário, a inspeção torna-se uma atividade inviável.

Para obtenção do custo total por unidade de tempo é preciso considerar, além do custo de manutenção e do custo de garantia já tratados, o custo incorrido do processo de inspeção e o custo de descarte dos produtos detectados como defeituosos e retirados do processo.

A adoção de uma política de inspeção para identificação de itens defeituosos incorre em um custo para inspecionar os itens produzidos em um ciclo de produção, que é conhecido e dado por C_i . O custo de inspecionar um item por unidade de tempo, no entanto, pode variar de acordo

com a política de inspeção adota pela empresa e, de acordo com o tempo esperado do ciclo de produção, logo, este custo pode ser expresso pela Equação (4.18):

$$Cip = \frac{Ci \cdot id}{E(Tc)} \quad (4.18)$$

Através do processo de inspeção, os itens detectados como defeituosos são impedidas de serem vendidos ao mercado, proporcionando assim uma redução no custo de garantia abordado anteriormente. No entanto, é preciso considerar o custo referente ao descarte dos itens, visto que os mesmos não podem ser reaproveitados (pressuposto 3).

Considerando que o custo de descartar um item defeituoso é conhecido, a Equação (4.19) descreve o custo de descarte esperado por unidade de tempo:

$$Cdt = \frac{\frac{E(T')}{\tau} \cdot id \cdot P(N) \cdot Cd}{E(Tc)} \quad (4.19)$$

A equação mostra que deve ser considerado o custo de descartar todos os itens processados que foram identificados como defeituosos no processo de inspeção.

Considerando agora que o custo de vender um item defeituoso ao mercado também é conhecido, a Equação (4.20) pode ser obtida para representar o custo de garantia esperado por unidade de tempo:

$$Cgp = \frac{\frac{E(T')}{\tau} \cdot P(N) \cdot (1-id) \cdot Cg}{E(Tc)} \quad (4.20)$$

A Equação (4.20) mostra que deve ser considerado o custo de garantia de todos os itens defeituosos que não foram inspecionados (uma vez que a política de inspeção pode variar de 0% a 100) e, por isso, podem ser vendidos ao mercado.

O custo total esperado por unidade de tempo é obtido através de um trade-off entre o custo de manutenção e os outros três custos desenvolvidos neste caso. Dessa forma, a Equação

(4.21) define este custo:

$$CT_4 = Cmt + Cip + Cdt + Cgp \quad (4.21)$$

O número de itens processados N e a política de inspeção de Id que minimizam a equação (4.21) resultam na solução ótima para o problema proposto neste caso.

4.4.3 Caso 5: Modelo de manutenção com reparo mínimo e substituição considerando produção imperfeita e inspeção com erros uniformes

Como descrito por Yoo *et al.* (2012), o processo de inspeção muitas vezes não é perfeito, resultando em erros de inspeção do tipo I e II. O erro de inspeção do tipo I acarreta em perda de oportunidade, visto que os itens erroneamente selecionados como defeituosos não poderão ser vendidos aos clientes. Já o erro de inspeção do tipo II incorre em perdas de vendas e custos adicionais, uma vez que os itens defeituosos serão retornados para troca ou reembolso (Ho *et al.* 2012). Nesse cenário, um modelo que engloba ambos os erros é construído para verificação do impacto do processo de inspeção imperfeita nos custos.

A figura 4.7 descreve o fluxo dos itens ao longo desse processo:

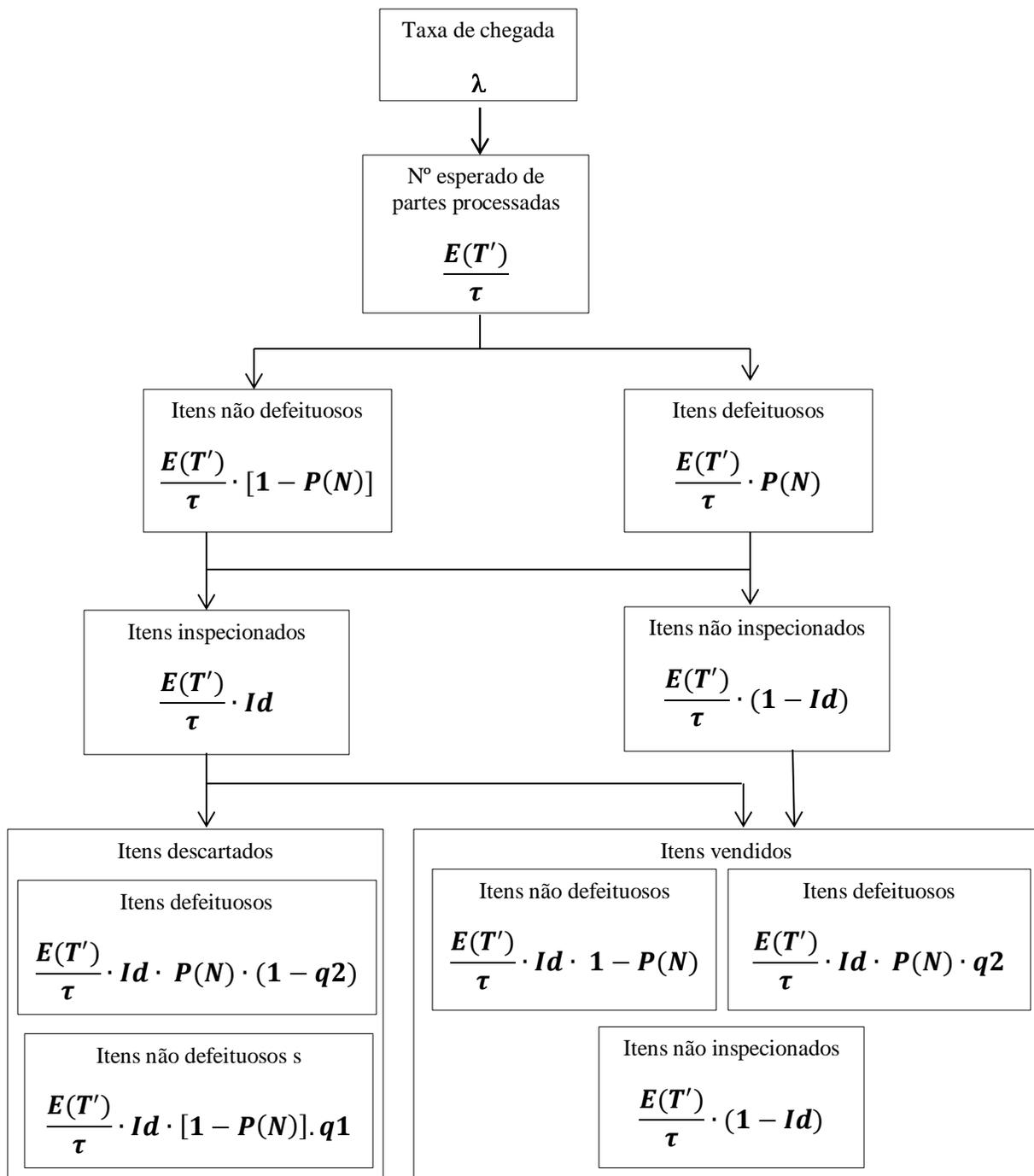


Figura 4.7: Fluxo dos itens durante os processos de produção e inspeção imperfeitos com erros uniformes

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

A partir de uma taxa de chegada λ , o fabricante produz e, simultaneamente, inspeciona uma quantidade esperada de itens, dada por $E(T')/\tau$. Uma vez que o processo de produção não é perfeito, os itens processados pelo sistema contém uma proporção de defeituosos, dada por $P(N)$, bem como uma proporção não defeituosos, expressa por $1 - P(N)$, cujas funções de distribuição de probabilidade são conhecidas.

Como o processo de inspeção não é perfeito, existe uma probabilidade $q1$ de itens não defeituosos serem selecionados durante a inspeção como sendo defeituosos $(E(T')/\tau \cdot Id \cdot [1 - P(N)] \cdot q1)$, sendo então descartados juntamente com os itens que de fato apresentam defeitos. Além disso, existe uma probabilidade $q2$ de itens defeituosos passarem pela inspeção como sendo não defeituosos $(E(T')/\tau \cdot Id \cdot P(N) \cdot q2)$, sendo vendidos dessa forma aos clientes juntamente com os itens que foram identificados como não defeituosos de acordo com as especificações do fabricante e com aqueles que não passaram pelo processo de inspeção.

O objetivo do modelo é determinar o número de itens N a serem processados antes da substituição do sistema e a melhor política de inspeção Id que minimize o custo total por unidade de tempo. Para tal, o modelo assume que as proporções de erros tipo I e tipo II seguem funções de distribuição de probabilidade conhecidas, dadas por $f1(q1)$ e $f2(q2)$. Outro pressuposto assumidos pelo modelo é que $q1$ e $q2$ são independentes da proporção de defeitos $P(N)$;

A obtenção do custo total é uma composição do custo de manutenção, custo de inspeção, custo de descarte e custo de garantia, sendo estes dois últimos descritos pelas Equações (4.22) e (4.23).

O custo de descarte, é proveniente dos itens defeituosos que são inspecionados e corretamente reconhecidos como tal, sendo retirados do processo $(E(T')/\tau \cdot Id \cdot P(N) \cdot (1 - q2))$, bem como dos itens não defeituosos que devido ao erro de inspeção do tipo I acabam sendo selecionados erroneamente como defeituosos $(E(T')/\tau \cdot Id \cdot [1 - P(N)] \cdot q1)$ e consequentemente também são descartados. Logo, o custo de descarte por unidade de tempo é expresso pela Equação (4.22):

$$C_{dt} = \frac{c_d \cdot \left[\left(\frac{E(T')}{\tau} \cdot id \cdot P(N) \cdot (1 - q2) \right) + \left(\frac{E(T')}{\tau} \cdot id \cdot (1 - P(N)) \cdot q1 \right) \right]}{E(Tc)} \quad (4.22)$$

Para formulação do custo de garantia devem ser consideradas todos os itens defeituosos que não foram inspecionados $(E(T')/\tau \cdot [1 - id] \cdot P(N))$ e, por isso, acabaram sendo vendidos, bem como os itens processados defeituosos que foram inspecionados e ainda assim acabaram passando para fase de vendas como sendo não defeituosos $(E(T')/\tau \cdot id \cdot P(N) \cdot q2)$, devido ao erro de inspeção tipo II. Dessa forma, a expressão que define o custo de garantia esperado por unidade de tempo é descrita pela Equação (4.23):

$$C_{gp} = \frac{c_g \cdot \left[\left(\frac{E(T')}{\tau} \cdot (1-id) \cdot P(N) \right) + \left(\frac{E(T')}{\tau} \cdot id \cdot P(N) \cdot q2 \right) \right]}{E(Tc)} \quad (4.23)$$

O custo total esperado por unidade de tempo é obtido através de um trade-off entre o custo de manutenção e inspeção e os custos de descarte e garantia desenvolvidos, sendo a soma dos custos das Equações (4.8), (4.18), (4.22) e (4.23). Dessa forma, a expressão que o define é dada pela Equação (4.24):

$$CT_5 = C_{mt} + C_{ip} + C_{dt} + C_{gp} \quad (4.24)$$

O número de itens processados N e a política de inspeção Id que minimizam a Equação (4.24), resulta na solução ótima para o problema proposto neste caso.

4.4.4 Caso 6: Modelo de manutenção com reparo mínimo e substituição considerando produção imperfeita e inspeção com erros exponenciais

Este caso diferencia-se do caso 5 ao propor um processo de inspeção que se dá através de um sistema automatizado, onde 100% das partes que são processadas passam pela inspeção de qualidade. As tecnologias em um sistema de inspeção podem ajudar a reduzir erros tradicionais de controle de qualidade e conseqüentemente o custo global, além de contribuir para melhoria da qualidade de saída do processo visto que este reduzem as chances da passagem de peças não conformes para a etapa de vendas (Hassan & Diab, 2010).

O fluxo dos produtos neste processo é representado na Figura 4.8:

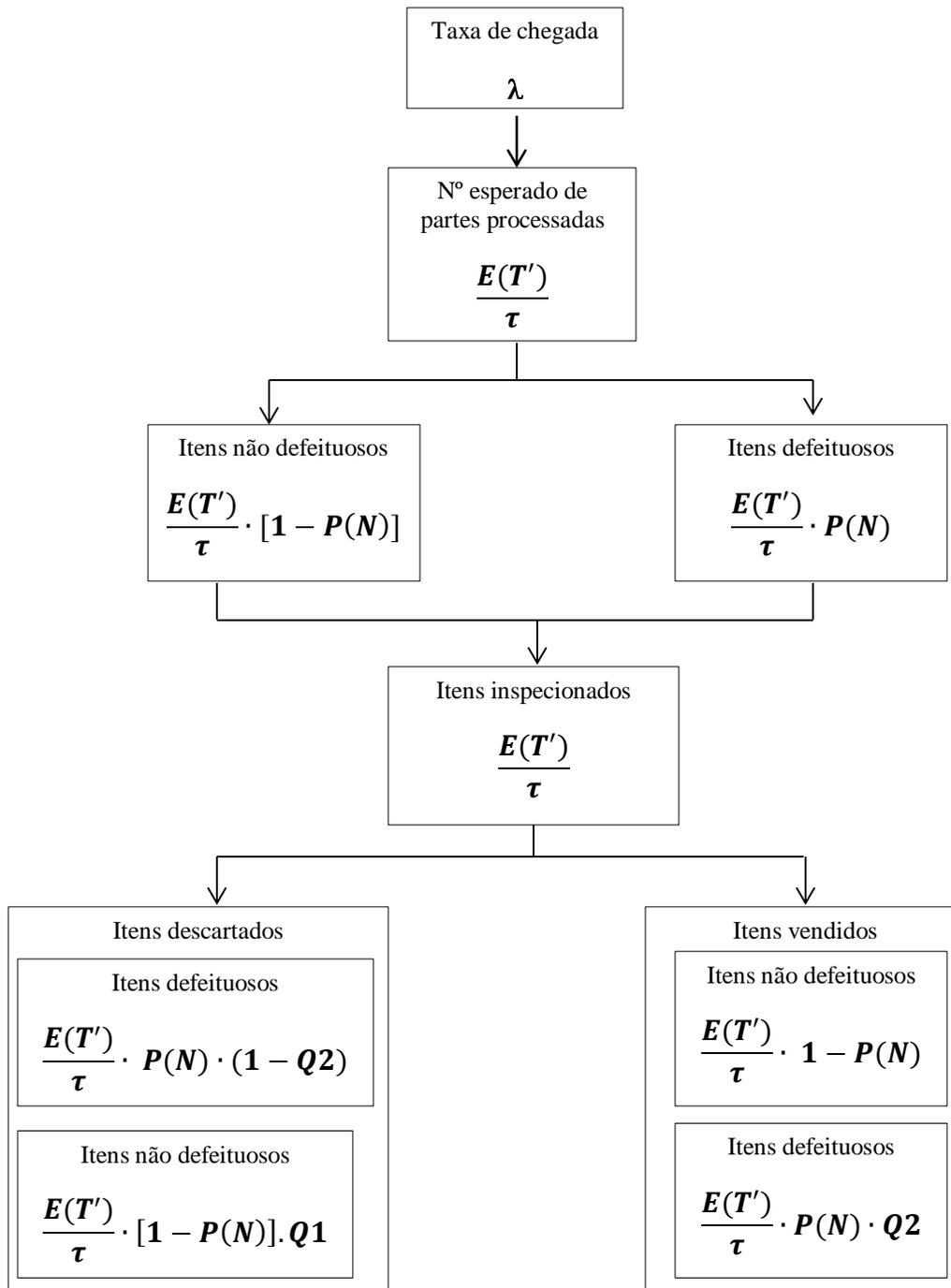


Figura 4.8: Fluxo dos itens durante os processos de produção e inspeção imperfeitos com erros exponenciais

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

A partir de uma taxa de chegada λ , o fabricante produz e, simultaneamente, inspeciona, através de um processo de inspeção automatizado, uma quantidade esperada de itens, dada por $E(T')/\tau$. Uma vez que o processo de produção não é perfeito, os itens processados pelo sistema contém uma proporção de defeituosos, dada por $P(N)$, bem como uma proporção de não defeituosos, expressa por $1 - P(N)$, cujas funções de distribuição de probabilidade são conhecidas.

Por tratar-se de um processo de inspeção automatizado, a quantidade de itens produzidos é totalmente inspecionada, podendo ter dois diferentes destinos: a venda, caso estes estejam em conformidade com as especificações do fabricante ($E(T')/\tau \cdot [1 - P(N)]$) ou o descarte, casos estes apresentem algum defeito ($E(T')/\tau \cdot P(N) \cdot (1 - Q2)$).

Considerando que itens não defeituosos podem ser ainda erroneamente admitidos como sendo defeituosos ($E(T')/\tau \cdot [1 - P(N)] \cdot Q1$) e analogamente, itens defeituosos podem ser detectados como sendo não defeituosos ($E(T')/\tau \cdot P(N) \cdot Q2$). Isso acontece porque o sistema responsável pela inspeção, assim como o sistema de produção, está sujeito à deterioração. Uma vez que o sistema sofre desgaste com o tempo, a qualidade do processo de inspeção pode ser afetada, o que acaba por ocasionar erros. Portanto, embora a adoção de um sistema automatizado vise a diminuição dos erros de inspeção tipo I e tipo II, os mesmos continuam propícios a ocorrer, com probabilidades exponencialmente distribuídas e conhecidas, dadas por $f(Q1)$ e $f(Q2)$.

Neste caso, a proporção dos erros de inspeção varia de acordo com a quantidade de itens processados. Tal relação se dá pelo fato do sistema sofrer deterioração ao longo do ciclo de produção, logo, à medida que os itens vão sendo produzidos, a probabilidade do sistema de inspeção falhar em sua detecção aumenta.

Dessa forma, após um determinado período de funcionamento, se faz necessária a realização de uma ação de manutenção para calibração do sistema de inspeção, com o propósito de que o mesmo volte a apresentar uma maior confiabilidade. Esta ação de manutenção acontece de forma oportuna, ocorrendo simultaneamente à substituição do sistema de produção, buscando aproveitar o momento em que este se encontra inoperante. Portanto, o período para realização de manutenção no sistema de inspeção é determinado pelo número de itens processados que minimiza o custo de produção durante um ciclo, como mostra a Figura 4.9:

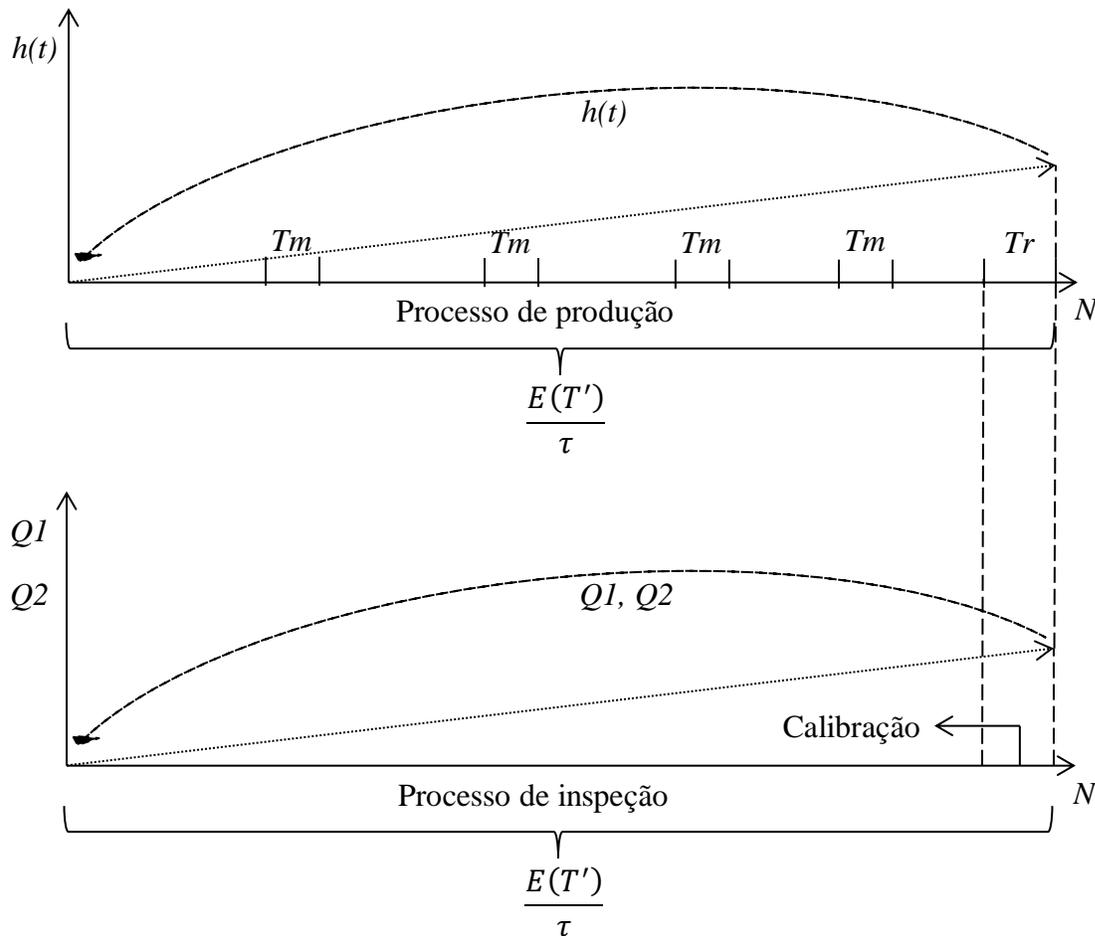


Figura 4.9: Manutenção do processo de inspeção

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

O objetivo do modelo é determinar o número de itens N a serem processados antes da substituição do sistema que minimize o custo total por unidade de tempo, o qual é obtido através de um trade-off entre o custo de manutenção, o custo de inspeção, o custo de descarte e o custo de garantia.

Considera-se neste modelo que o custo para inspecionar os itens produzidos em um ciclo de produção é conhecido e dado por C_i . No entanto, o custo de inspecionar um item por unidade de tempo varia de acordo o tempo esperado do ciclo de produção, sendo expresso pela Equação (4.25):

$$Cip = \frac{Ci}{E(Tc)} \quad (4.25)$$

Diferente do caso 5, o custo de inspeção por unidade de tempo não depende de uma política adotada pela empresa para realização da mesma, visto que no sistema de inspeção automatizado todos os itens processados são inspecionados.

O custo de descarte é proveniente dos produtos defeituosos que são retirados do processo $(E(T')/\tau \cdot P(N) \cdot (1 - Q2))$ após passarem pela inspeção, bem como dos produtos não defeituosos que devido ao erro de inspeção tipo I são selecionados erroneamente como defeituosos $(E(T')/\tau \cdot [1 - P(N)] \cdot Q1)$ e conseqüentemente também descartados. Logo, o custo de descarte por unidade de tempo é expresso pela Equação (4.26)

$$Cdt = \frac{Cd \cdot \left[\left(\frac{E(T')}{\tau} \cdot P(N) \cdot (1 - Q2) \right) + \left(\frac{E(T')}{\tau} \cdot (1 - P(N)) \cdot Q1 \right) \right]}{E(Tc)} \quad (4.26)$$

Para formulação do custo de garantia devem ser considerados os itens processados defeituosos que passam para fase de vendas como sendo não defeituosos $(E(T')/\tau \cdot P(N) \cdot Q2)$, devido ao erro de inspeção tipo II. Dessa forma, a expressão que define o custo de garantia esperado por unidade de tempo é representado pela Equação (4.27)

$$Cgp = \frac{cg \cdot \left[\left(\frac{E(T')}{\tau} \cdot P(N) \cdot Q2 \right) \right]}{E(Tc)} \quad (4.27)$$

O custo total esperado por unidade de tempo é obtido através de um trade-off entre os custos de manutenção, inspeção, descarte e garantia, apresentados nas Equações (4.8), (4.25), (4.26) e (4.27), respectivamente. Dessa forma, a expressão que o define é dada na Equação (4.28):

$$CT_6 = Cmt + Cip + Cdt + Cgp \quad (4.28)$$

O número de itens processados N que minimiza a equação acima resulta na solução ótima para o problema proposto neste caso.

4.4.5 Caso 7: Modelo de manutenção com reparo mínimo e substituição considerando produção imperfeita, inspeção com erros exponenciais e retrabalho.

Apesar do custo de descartar um produto não conforme ser bem menor do que o custo de vendê-lo (Sarkar & Saren, 2016), este custo ainda impacta de forma negativa o custo total, uma vez que um custo de produção foi demandado para fabricação dos mesmos. Dessa forma, o retrabalho pode aparecer como uma considerável opção, desempenhando um importante papel na eliminação de resíduos que afetam o custo de produção (Wen-ying Wang, 2013). Nesse contexto, é considerada no presente cenário a possibilidade de retrabalho dos itens defeituosos, diferenciando-se então do caso 6 neste aspecto.

No sistema de produção existe a possibilidade de itens defeituosos serem descartados, mesmo com a inclusão da atividade de retrabalho ao processo. A explicação parte do pressuposto de que nem todos os produtos defeituosos podem ser retrabalhados, uma vez que alguns possuem não conformidades que não podem ser reparadas, tornando-os assim irrecuperáveis e fazendo com que o destino destes não possa ser outro além do descarte. Dessa forma, o fluxo dos itens no processo é apresentado na Figura 4.10:

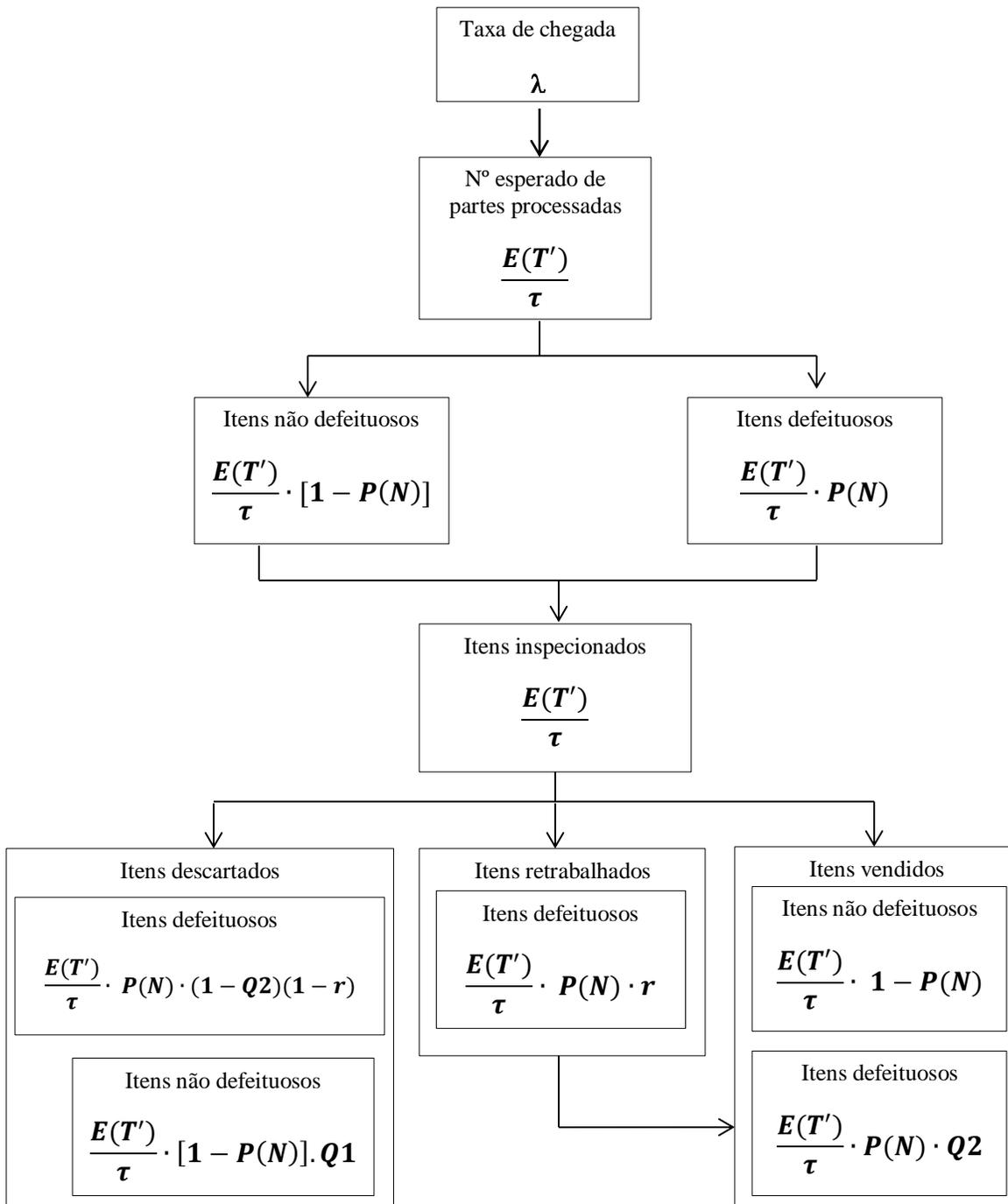


Figura 4.10: Fluxo dos itens durante os processos de produção e inspeção imperfeitos com erros exponenciais e retrabalho

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

A quantidade de itens produzidos pode ter três diferentes destinos: a venda, caso estes estejam em conformidade com as especificações do fabricante $(E(T')/\tau \cdot [1 - P(N)])$; o descarte, casos estes apresentem algum defeito que é corretamente detectado e também não possam ser retrabalhados $(E(T')/\tau \cdot P(N) \cdot (1 - Q2) \cdot (1 - r))$; e o retrabalho, casos estes apresentem algum defeito que possa ser corrigido através dessa prática $(E(T')/\tau \cdot P(N) \cdot (1 - Q2) \cdot r)$. O conjunto dos itens que são vendidos ao mercado, neste caso, é composto ainda pelos itens que foram retrabalhados e encontram-se de acordo com as especificações do fabricante, bem como por itens defeituosos que podem ser erroneamente considerados como sendo não defeituosos $(E(T')/\tau \cdot P(N) \cdot Q2)$, devido à existência do erro de inspeção tipo II. Analogamente, o conjunto de itens descartados também é composto por itens não defeituosos que podem ser detectados como sendo defeituosos $(E(T')/\tau \cdot [1 - P(N)] \cdot Q1)$, devido à existência do erro de inspeção tipo I. Assume-se que não existe a possibilidade de itens não defeituosos serem retrabalhados, logo, não há possibilidade da atividade de retrabalho ser praticada em função de possíveis erros. Outros pressupostos assumidos pelo modelo são:

1. Os itens que podem ser retrabalhados são identificados no momento da inspeção, estes seguem uma função de probabilidade conhecida dada por $f(r)$.
2. Itens defeituosos são classificados como aptos ao retrabalho;
3. O retrabalho dos itens defeituosos identificados durante um ciclo de produção acontece durante este mesmo ciclo;
4. Desconsidera-se a possibilidade de que itens retrabalhados podem possuir algum defeito, logo, após o retrabalho, os mesmos podem ser vendidos ao mercado dentro das especificações;
5. O custo de retrabalhar um item é conhecido e dado por Ct ;
6. O tempo para retrabalhar um item é conhecido e dado por Tb .

Dado o pressuposto 1, a função de distribuição de probabilidade que define a proporção de itens defeituosos retrabalhados é conhecida e dada por $f(r)$.

Se faz relevante também uma análise acerca do pressuposto 3, o qual assume que o retrabalho dos produtos defeituosos recuperáveis precisa ser realizado durante o mesmo ciclo de produção no qual foram processados. Assim, o tempo de retrabalho deve ser incluso na equação

que define o tempo esperado do ciclo, sendo necessário então rever a equação (4.5) que o define, a qual passa a ser expressa pela Equação (4.29):

$$E(Tc)_2 = \frac{E(T')}{\lambda\tau} + Tr + n_b(N) \cdot Tm + Tb \cdot \left(\frac{E(T')}{\tau} \cdot P(N) \cdot r \right) \quad (4.29)$$

O tempo de processamento eficaz médio deve considerar também, além dos efeitos de reparação e substituição, os efeitos do retrabalho, descrito pela Equação (4.30):

$$\tau_{e2} = \tau \left(1 + \frac{Tr + n_b(N)Tm + Tb \cdot \left(\frac{E(T')}{\tau} \cdot P(N) \cdot r \right)}{E(T')} \right) \quad (4.30)$$

Dadas as considerações feitas neste caso, o objetivo do modelo é determinar o número de itens N a serem processados antes da substituição do sistema que minimize o custo total por unidade de tempo, o qual é obtido através de um trade-off entre o custo de manutenção, o custo de inspeção, o custo de descarte, o custo de garantia e o custo de retrabalho.

O custo de descarte é proveniente dos itens defeituosos do processo e que não podem ser retrabalhados $(E(T')/\tau \cdot P(N) \cdot (1 - r))$, bem como dos itens não defeituosos que devido ao erro de inspeção do tipo I acabam sendo selecionados erroneamente como defeituosos $(E(T')/\tau \cdot [1 - P(N)] \cdot Q1)$ e também são descartados. Assim, o custo de descarte por unidade de tempo é expresso pela Equação 4.31:

$$Cdt = \frac{Cd \cdot \left[\left(\frac{E(T')}{\tau} \cdot P(N) \cdot (1 - Q2) \cdot (1 - r) \right) + \left(\frac{E(T')}{\tau} \cdot id \cdot (1 - P(N)) \cdot Q1 \right) \right]}{E(Tc)} \quad (4.31)$$

O custo de retrabalho é referente aos itens processados defeituosos que são inspecionados e considerados aptos para serem retrabalhados $(E(T')/\tau \cdot P(N) \cdot r)$. Dessa forma, a expressão que define o custo de retrabalho esperado por unidade de tempo é encontrada pela Equação (4.32):

$$Crt = \frac{ct \cdot \left[\left(\frac{E(T')}{\tau} \cdot P(N) \cdot (1 - Q2) \cdot r \right) \right]}{E(Tc)_2} \quad (4.32)$$

O custo total esperado por unidade de tempo é obtido através de um trade-off entre o custo de manutenção, inspeção, descarte, garantia e retrabalho. Dessa forma, a Equação (4.33) define o custo total:

$$CT_7 = Cmt + Cip + Cdt + Cgp + Crt \quad (4.33)$$

O número de partes processadas N que minimiza as equações de custo total expressas acima, resulta na solução ótima para o problema proposto neste caso.

5 APLICAÇÃO NUMÉRICA E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Sem que haja perda da generalidade, os modelos desenvolvidos são utilizados para calcular o custo total esperado por unidade de tempo sob uma configuração de parâmetros específicos escolhidos para ilustrar cada caso. Estes valores foram arbitrados para rodar uma simulação numérica e posterior análise da variação destes parâmetros.

5.1 Dados de entrada do modelo primário e casos 1 e 2.

O tempo de vida do sistema de produção segue uma Distribuição Weibull, com parâmetro de forma α e parâmetro de escala θ , dessa forma, a PDF da duração de vida do sistema é dada pela Equação (5.1):

$$f(t) = \begin{cases} \frac{\alpha}{\theta^\alpha} t^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\alpha}, & t \geq 0, \alpha > 0, \theta > 0, \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (5.1)$$

Assim, a taxa de falha do sistema é expressa pela Equação (5.2):

$$h(t) = \alpha \frac{t^{\alpha-1}}{\theta^\alpha}, t \geq 0, \alpha > 0, \theta > 0 \quad (5.2)$$

Supondo que o tempo de processamento necessário para processar um item é constante, tem-se a Equação (5.3):

$$g(x) = \begin{cases} 1, & if \ x = \tau \\ 0, & if \ x \neq \tau \end{cases} \quad (5.3)$$

O número esperado de falhas e o tempo de vida esperado do sistema de produção podem ser reformulados de acordo com as Equações (5.4) e (5.5):

$$n_b(N) = \left(\frac{N\tau}{\theta}\right)^\alpha \quad (5.4)$$

e

$$E(T') = \theta e^{\left(\frac{N\tau}{\theta}\right)^\alpha} \left[\Gamma\left(\frac{1}{\alpha} + 1\right) - I_G\left(\frac{1}{\alpha} + 1; \left(\frac{N\tau}{\theta}\right)^\alpha\right) \right] \quad (5.5)$$

Quando,

$$I_G(\alpha; x) = \int_0^x v^{\alpha-1} e^{-v} dv \quad (5.6)$$

O caso 1 retrata um modelo de manutenção que considera reparo mínimo e substituição em um sistema de produção do tipo fila, onde as paradas para realizar estas ações incorrem em um custo de escassez. O caso 2 inclui o dimensionamento de buffer intermediário com o propósito de suprir ou amenizar o custo de escassez e conseqüentemente reduzir o custo total esperado por unidade de tempo. Para aplicação numérica, os parâmetros da Tabela 5.1 são adotados:

Tabela 5.1: Parâmetros para análise numéricas dos casos 1 e 2

λ	5	Tm	4	Cr	5000
α	1,5	Tr	6	Cs	0,1
θ	200	C0	100	Cp	50
τ	0,19	C1	1	ω	4
				β	5

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

A partir da definição dos valores acima, o número ideal de itens processados N e a quantidade ótima de buffer a ser mantida durante um ciclo de produção Sb que minimizam o custo total esperado por unidade de tempo referente às equações (4.8), (4.10) e (4.15) foram obtidos e demonstrados na Tabela 5.2:

Tabela 5.2: Comparação entre as soluções ótimas dos casos 1 e 2.

Modelo	N^*	Sb^*	CT
Caso 1 (Eq. 4.10)	2763	-	19,056
Caso 2 (Eq. 4.15)	2199	90	16,951

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

No caso 1, onde a paradas para realização de reparos mínimos são penalizadas devido à parada do sistema de produção, o número de itens que devem ser processados antes de uma substituição para minimizar o custo total é de $N = 2763$.

Já no caso 2, a melhor estratégia consiste em processar 2199 itens antes de substituir o sistema e construir um buffer de 90 unidades assim que a produção é iniciada ou retomada após a substituição. Adotando essa política, o custo total obtido é de R\$ 16,951, resultando em uma redução de 11,05% se comparado ao caso 1, onde o buffer não é mantido, cujo custo total mínimo esperado é de R\$ 19,056, mostrando que a adoção de uma política de manutenção de buffer para suprir a linha de produção tipo fila nos momentos em que setem que parar devido a uma falha é satisfatória.

5.2 Dados de entrada e decisões gerenciais referentes aos casos 3, 4, 5, 6 e 7

O caso 3 consiste em um sistema que encontra-se inicialmente em um estado “em controle” e que, depois de um período de funcionamento, pode mudar para o estado “fora de controle” e começar a produzir uma proporção de itens defeituosos, que segue uma função de probabilidade conhecida, distribuída exponencialmente, dada pela Equação (5.7):

$$P(N) = \begin{cases} 1 - e^{-kn_b(N)} & , N > 0, \text{ onde } k = 0,01 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.7)$$

O caso 4 retrata um modelo onde o fabricante produz e inspeciona simultaneamente os itens processados durante o ciclo de produção. A política de inspeção Id do fabricante pode variar do total de itens produzidos (100%) até mesmo à inexistência de inspeção (0%).

No caso 5, os erros tipo I e II são considerados no processo de inspeção. Estes erros são uniformemente distribuídos e seguem funções de probabilidade conhecidas, expressas pelas Equações (5.8) e (5.9):

$$f1(q1) = \begin{cases} 25 & \text{se } 0,03 < q1 < 0,07 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.8)$$

$$f2(q2) = \begin{cases} 20 & \text{se } 0,07 < q1 < 0,15 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.9)$$

Dadas as funções de distribuição uniforme, os valores esperados dos erros de inspeção tipo I e tipo II são expressos pela Equação (5.10) e (5.11), respectivamente:

$$q1 = \int_{0,03}^{0,07} q1 f1(q1) dq1 \quad \text{Equação 5.10}$$

e

$$q2 = \int_{0,07}^{0,15} q2 f2(q2) dq2 \quad \text{Equação 5.11}$$

O caso 6 retrata o processo de inspeção dos itens através de um sistema automatizado que visa a diminuição de erros, onde 100% dos itens que são processados passam pelo processo de inspeção. Os erros de inspeção tipo I e tipo II apresentam probabilidades exponencialmente distribuídas e conhecidas, dadas por $Q1(N)$ e $Q2(N)$ e expressas pelas Equações (5.12) e (5.13):

$$Q1(N) = \begin{cases} 1 - e^{-k1 \cdot \frac{E(T')}{\tau}} & \text{se } N > 0, \text{ onde } k1 = 10 \cdot 10^{-6} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.12)$$

e

$$Q2(N) = \begin{cases} 1 - e^{-k2 \cdot \frac{E(r')}{\tau}} & \text{se } N > 0, \text{ onde } k2 = 30 \cdot 10^{-6} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.13)$$

No caso 7 há o processo de inspeção dos itens através de um sistema automatizado onde o retrabalho aparece como uma alternativa para diminuição de resíduos e para recuperação dos itens defeituosos, tornando-os aptos para serem vendidos. A proporção de itens reparáveis segue uma função uniformemente distribuída e de probabilidade conhecida, expressa pela Equação (5.14):

$$f(r) = \begin{cases} 20 & \text{se } 0,10 < q1 < 0,20 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.14)$$

Dada a função de distribuição uniforme, o valor esperado dos itens retrabalhados é dado pela Equação (5.15):

$$r = \int_{0,10}^{0,20} rf(r)dr \quad (5.15)$$

O objetivo dos modelos apresentados é determinar o número de itens N a serem processados antes da substituição do sistema e a melhor política de inspeção Id (quando aplicável) que minimizem o custo total por unidade de tempo. Para isto, os seguintes parâmetros são adotados e descritos na Tabela 5.3:

Tabela 5.3: Parâmetros para análise numérica dos casos 3, 4, 5, 6 e 7

λ	5	Tm	4	Cw	3
α	1,5	Tr	6	Vr	0
θ	200	C0	100	Cg	25
τ	0,19	C1	1	Tb	0,8
Cr	5000	Ci	800	R	0,3
				Ct	1,5

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

A partir dos valores da Tabela 5.3, o número ótimo de itens processados N e a política de inspeção Id que minimizam o custo total esperado por unidade de tempo CT , são encontrados através das equações (4.17), (4.21), (4.24), (4.28) e (4.33) e comparados entre si:

Tabela 5.4: Comparação entre as soluções ótimas dos casos 3, 4, 5, 6 e 7.

Modelo	N^*	Id^*	CT
Caso 3 (Eq. 4.17)	2042	-	14,632
Caso 4 (Eq. 4.21)	3431	100	11,829
Caso 5 (Eq. 4.24)	3102	100	13,501
Caso 6 (Eq. 4.28)	3051	-	12,883
Caso 7 (Eq. 4.33)	3096	-	12,726

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

O resultado mostra que, no caso 3, o custo mínimo por unidade de tempo ocorre quando $N = 2042$. Isto significa que, quando ocorrer uma falha e pelo menos 2042 itens tiverem sido processados pelo sistema de produção, o sistema deve ser substituído por um novo. Caso contrário, a ação indicada é o RM.

No caso 4, a minimização do custo total esperado por unidade de tempo ocorre quando $N = 3431$, sob uma política de inspeção de 100% dos itens produzidos. Isto significa que o sistema deve ser substituído por um novo quando 3431 itens forem processados e inspecionados, resultando em um aumento do número de itens processados que minimizam o custo total em relação ao caso 3. A quantidade de itens defeituosos aumenta à medida que RM são realizados. No entanto, com a adoção de uma política de inspeção, o resultado mostra que mais itens devem ser processados antes da substituição, visto que, embora um maior processamento de itens resulte no aumento da probabilidade de itens defeituosos, estes são descartadas do processo pela política de inspeção. Dessa forma, de acordo com os resultados no caso 4, nenhum item defeituoso é vendido ao mercado, visto que 100% dos itens são inspecionados e a inspeção é considerada

como sendo perfeita.

O caso 5 apresenta a minimização do custo total esperado por unidade de tempo ocorre quando $N = 3102$, sob uma política de inspeção de 100% dos itens produzidos. Isto significa que o sistema deve ser substituído por um novo quando 3102 itens tiverem sido processados e inspecionados pelo sistema de produção. Com relação ao número de itens processados, há uma redução em relação ao caso 4. Isto porque, a ocorrência dos erros tipo I e II resulta em uma menor quantidade de itens processados, a fim de realizar um menor número de RM e, conseqüentemente produzir um menor número de itens defeituosos. No que diz respeito ao custo total em relação ao caso 4, existe um aumento. Este comportamento também pode ser explicado pela existência dos erros de inspeção tipo I e tipo II que resultam em custos adicionais fazendo com que este seja maior do que o custo total referente ao modelo que considera uma política de inspeção perfeita.

Os resultados mostram que no caso 6, onde todos os itens processados são inspecionados pelo processo automatizado, a minimização do custo ocorre com $N = 3051$. Isto significa que o sistema deve ser substituído por um novo quando 3051 itens tiverem sido processados. O sistema de inspeção também deverá sofrer uma ação de calibração neste mesmo período. O sistema automatizado diminui a probabilidade de erros de inspeção, logo, no que diz respeito ao custo total, percebe-se que existe uma diminuição em relação ao caso 5.

No caso 7, onde o processo de inspeção identifica os itens aptos ao retrabalho, a minimização do custo total esperado por unidade de tempo ocorre quando $N = 3096$. A adoção da atividade de retrabalho resulta em uma diminuição no custo referente aos itens descartados, pois os itens são retrabalhados a um custo inferior ao custo de descarte, resultando em uma redução de 1,22% do custo total em relação ao caso 6. Quando esta é comparada ao caso 3, onde a inspeção não é considerada, resulta na redução do custo em 13,02%, o que mostra que a atividade de retrabalho consiste em uma importante alternativa para redução de custos.

5.3 Experimento numérico e decisões gerenciais

Nesta seção, são realizadas diferentes variações dos parâmetros definidos anteriormente. O objetivo desta análise é demonstrar a eficiência e robustez das abordagens de otimização de simulação propostas e estudar o comportamento da política de manutenção obtida. As tabelas a

seguir apresentam diferentes configurações desses parâmetros, alterando os seus valores para mais e para menos, a partir dos valores tomados como base nos exemplos numéricos dos tópicos anteriores.

5.3.1 Variação dos parâmetros dos casos 1 e 2 referentes à escassez e ao buffer

Ao realizar a variação dos parâmetros referentes aos casos 1 e 2, os seguintes resultados foram obtidos e expressos na Tabela 5.5:

Tabela 5.5: Variação dos parâmetros dos casos 1 e 2

Parâmetros										Caso 1		Caso 2		
C1	Cr	Cp	Cs	β	ω	α	θ	λ	τ	N*	CT(N*)	N*	Sb*	CT(N*,Sb*)
1	5000	50	0,01	5	4	1,5	200	5	0,19	2764	19,056	2649	110	13,807
3	5000	50	0,01	5	4	1,5	200	5	0,19	1875	21,915	2068	85	14,398
5	5000	50	0,01	5	4	1,5	200	5	0,19	1504	23,622	1588	67	16,362
1	4000	50	0,01	5	4	1,5	200	5	0,19	2440	17,456	2356	97	9,684
1	6000	50	0,01	5	4	1,5	200	5	0,19	3035	20,514	2731	115	18,876
1	5000	40	0,01	5	4	1,5	200	5	0,19	2888	17,293	2681	112	11,532
1	5000	30	0,01	5	4	1,5	200	5	0,19	3025	15,508	3057	130	10,987
1	5000	50	0,05	5	4	1,5	200	5	0,19	2764	19,056	2687	52	13,916
1	5000	50	0,10	5	4	1,5	200	5	0,19	2764	19,056	2707	43	14,005
1	5000	50	0,01	2	4	1,5	200	5	0,19	2764	19,056	2853	68	12,649
1	5000	50	0,01	8	4	1,5	200	5	0,19	2764	19,056	2478	125	15,875
1	5000	50	0,01	5	1	1,5	200	5	0,19	2764	19,056	2649	110	13,807
1	5000	50	0,01	5	8	1,5	200	5	0,19	2764	19,056	2649	110	13,807
1	5000	50	0,01	5	4	1,3	200	5	0,19	3690	16,228	3991	143	9,422
1	5000	50	0,01	5	4	1,8	200	5	0,19	2215	21,373	2152	92	15,928
1	5000	50	0,01	5	4	1,5	180	5	0,19	2569	20,859	2212	101	14,810
1	5000	50	0,01	5	4	1,5	220	5	0,19	2948	17,560	2818	108	13,167
1	5000	50	0,01	5	4	1,5	200	6	0,19	-	-	-	-	-
1	5000	50	0,01	5	4	1,5	200	7	0,19	-	-	-	-	-
1	5000	50	0,01	5	4	1,5	200	5	0,17	3082	17,113	2998	112	12,791
1	5000	50	0,01	5	4	1,5	200	5	0,20	-	-	-	-	-

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

1) **Variação do parâmetro C_1** : percebe-se que um aumento no valor de C_1 provoca uma diminuição na quantidade ótima de itens a serem processados e um aumento no custo total. Para

reduzir o impacto causado pelo aumento do custo de reparo, o sistema passa a processar um menor número de itens, visto que a taxa de falha cresce à medida que uma maior quantidade de itens são processadas.

2) Variação do parâmetro C_r : quando o valor de C_r aumenta, tanto a quantidade ótima de itens a serem processados, quanto o custo total passam a ser maiores. Um aumento em C_r resulta também em uma maior quantidade de buffer a ser mantida, pois se um número maior de paradas para reparos mínimos forem realizadas, mais buffer será necessário para suprir a produção nos momentos de interrupção.

3) Variação do parâmetro C_p : quanto maior o custo de perda, maior o seu impacto no custo total. Assim, o número de buffer deve aumentar, de forma a suprir o sistema durante o tempo inoperante. Percebe-se também que há uma diminuição no número de itens processados, isso se deve ao fato de que, quando se tem um custo de perda muito alto, o interessante é reduzir o número de paradas para manutenção, uma vez que o custo de perda está relacionado às paradas.

4) Variação do parâmetro C_s : quanto maior o custo de manter o buffer, mais a política ótima de manutenção se assemelha à política de manutenção do caso 1 (onde a manutenção do buffer não é considerada). Isso acontece porque o custo de mantê-lo torna-se muito elevado, o que acaba também elevando o custo total, logo, a melhor política para um C_s muito alto será aquela em que o buffer é o menor possível.

5) Variação dos parâmetro β e ω : quando o valor de β aumenta, a quantidade ótima de buffer aumenta, visto que o buffer é consumido mais rapidamente. Isso acarreta também um aumento no custo total, dada uma maior quantidade de buffer que é preciso manter, o que eleva o custo. Já a variação do parâmetro ω não influencia na política ótima. Isso se dá ao fato de que a taxa de abastecimento de buffer determina apenas a velocidade com a qual uma determinada quantidade de S_b é atingida, como é mostrado na figura 3.

6) Variação dos parâmetro α e θ : Quando se tem um menor valor α ou um maior valor de θ , o sistema é menos propenso a falhas, o que resulta em uma maior quantidade de itens processados e um menor custo total, dada a possibilidade do sistema passar mais tempo em operação com uma ocorrência de falha em menor número. A diminuição de falhas torna propícia a manutenção de uma menor quantidade de buffer, visto que este serve para suprir o sistema durante os tempos em que ocorre ações de manutenção destinadas à correção destas falhas.

7) Variação dos parâmetros λ e τ : Dadas as configurações adotadas para representação do sistema, um aumento nos valores de λ e τ faz com que o mesmo não possua capacidade suficiente para processar todas as partes, dada a restrição referente à Equação (4.6).

5.3.2 Variação dos parâmetros dos casos 3 a 7 referentes à inspeção de qualidade

Ao realizar a variação dos parâmetros referentes aos casos 3, 4, 5, 6 e 7, os resultados foram obtidos e demonstrados na Tabela 5.6:

Tabela 5.6: Variação dos parâmetros dos casos 3 ao 7

Parâmetros										Caso 3		Caso 4		Caso 5			Caso 6		Caso 7		
C1	Cr	Cd	Cg	Ci	Ct	α	θ	τ	λ	N*	CT(N*)	N*	Id*	CT(N*,Id*)	N*	Id*	CT(N*,Id*)	N*	CT(N*)	N*	CT(N*)
1	5000	3	25	800	1,5	1,5	200	0,19	5	2042	14,632	3431	100	11,829	3102	100	13,501	3151	12,883	3096	12,726
3	5000	3	25	800	1,5	1,5	200	0,19	5	1579	16,554	2195	100	15,735	1579	0	16,554	2094	16,324	2113	16,220
5	5000	3	25	800	1,5	1,5	200	0,19	5	1318	17,850	1318	0	17,850	1318	0	17,85	1671	18,395	1693	18,315
1	4000	3	25	800	1,5	1,5	200	0,19	5	1800	12,609	3128	100	10,512	1800	0	12,609	2789	11,430	2829	11,298
1	6000	3	25	800	1,5	1,5	200	0,19	5	2255	16,492	3704	100	13,051	3353	100	14,836	3286	14,239	3333	13,387
1	5000	0,5	25	800	1,5	1,5	200	0,19	5	2042	14,632	3720	100	11,100	3260	100	12,423	3275	11,936	3272	11,943
1	5000	5	25	800	1,5	1,5	200	0,19	5	2042	14,632	3241	100	12,356	2042	0	14,632	2894	13,591	2967	13,322
1	5000	3	10	800	1,5	1,5	200	0,19	5	2663	12,298	3431	100	11,829	2663	0	12,298	3233	12,519	3285	12,352
1	5000	3	5	800	1,5	1,5	200	0,19	5	3002	11,259	3012	0	11,259	3012	0	11,259	3305	12,386	3361	12,215
1	5000	3	25	900	1,5	1,5	200	0,19	5	2042	14,632	3459	100	11,955	2042	0	14,632	3076	13,022	3457	12,226
1	5000	3	25	700	1,5	1,5	200	0,19	5	2042	14,632	3402	100	11,702	3075	100	13,363	3027	12,742	3398	11,974
1	5000	3	25	800	0,5	1,5	200	0,19	5	2042	14,632	3459	100	11,955	3102	100	13,501	3151	12,883	3460	12,018
1	5000	3	25	800	3,5	1,5	200	0,19	5	2042	14,632	3402	100	11,702	3102	100	13,501	3151	12,883	3367	12,262
1	5000	3	25	800	1,5	1,3	200	0,19	5	2298	13,285	4123	100	10,228	3669	100	11,914	3493	11,475	4064	10,613
1	5000	3	25	800	1,5	1,8	200	0,19	5	1778	16,280	2778	100	13,902	1778	0	16,28	2574	14,755	2454	14,217
1	5000	3	25	800	1,5	1,5	180	0,19	5	1943	15,686	3241	100	12,658	2933	100	14,393	2906	13,689	3085	12,894
1	5000	3	25	800	1,5	1,5	220	0,19	5	2135	13,730	3612	100	11,119	3261	100	12,738	3186	12,195	3595	11,440
1	5000	3	25	800	1,5	1,5	200	0,17	5	2189	13,467	3790	100	10,712	3396	100	12,369	3303	11,849	3772	11,046
1	5000	3	25	800	1,5	1,5	200	0,20	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	5000	3	25	800	1,5	1,5	200	0,19	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Esta Pesquisa (2017)

1) Variação do parâmetro C_1 : quando o valor de C_1 aumenta o número de itens processados é pequeno e a política de inspeção não é satisfatória (0%). Isso acontece porque uma menor quantidade de itens produzidos acarreta em um menor número de reparos mínimos que, conseqüentemente, leva a uma menor proporção de itens defeituosos.

2) Variação do parâmetro C_r : Quando o valor de C_r diminui de forma que o número de itens processados é pequeno, a política de inspeção não é satisfatória (0%). Isso acontece porque, quanto menor a quantidade de itens processados, menor a taxa de falha e, conseqüentemente, menor o número de reparos mínimos a serem realizados. Dessa forma, uma menor proporção de itens defeituosos será produzida, visto que a mesma está relacionada diretamente ao número de reparos.

3) Variação do parâmetro C_d : a variação do parâmetro C_d não influencia os resultados do caso 3, visto que este não apresenta política de inspeção e conseqüentemente nenhum item é descartado. Nos demais, quando há um aumento no valor de C_d , a quantidade ótima de itens a serem processados diminui e o custo total aumenta.

4) Variação do parâmetro C_g : No caso 3, onde não há adoção da política de inspeção, um valor menor de C_g resulta em uma maior quantidade de itens processados e um menor custo total. Isso ocorre porque o custo de garantia dos itens defeituosos vendidos ao mercado é baixo. No caso 4, onde a política de inspeção é considerada isenta de erros, apenas um custo de garantia muito baixo faz com que a adoção desta não seja necessária. Isso porque se o custo resultante dos itens defeituosos vendidos ao mercado for muito pequeno, os custos com inspeção e descarte não se justificam. Já no caso 5 mostra que uma política de inspeção não é viável, mesmo com o custo de garantia um pouco maior (em relação ao caso 4).

5) Variação do parâmetro C_i : a variação do parâmetro C_i não influencia os resultados do caso 3, visto que este não apresenta política de inspeção. Nos demais, quando há um aumento no valor de C_i , há um aumento também do número ótimo de itens processados e do custo total. Analogamente, quando há uma diminuição no valor de C_i , o número ótimo de itens processados e o custo total diminuem. Se o custo de inspeção é muito alto na política em que o erro de inspeção é considerado (caso 5), então não torna-se viável adotá-la.

6) Variação do parâmetro C_t : a variação do parâmetro C_t influencia apenas os resultados obtidos no caso 7. Quando há um aumento no valor de C_t , a quantidade ótima de itens

processados diminui e o custo total aumenta. Isso se dá ao fato de que, se o custo de retrabalhar uma unidade for muito alto, o sistema se comportará de forma a produzir uma menor quantidade de itens para fazer com que a quantidade de reparos realizados seja reduzida.

7) Variação dos parâmetro α e θ : Quando se tem um menor valor α ou um maior valor de θ , a probabilidade de falhas no sistema torna-se menor, possibilitando assim que uma maior quantidade de itens sejam processados com um menor custo. Se a confiabilidade do sistema for muito baixa, a política de inspeção torna-se inviável. Isso acontece porque a baixa confiabilidade leva a uma menor produção de itens, que conseqüentemente resulta em uma menor proporção de itens defeituosos, fazendo com que o custo de garantia seja reduzido. Logo, os custos com inspeção acabam não sendo compensados, dado que o custo de inspecionar uma unidade irá aumentar com a diminuição do número de itens processados.

8) Variação dos parâmetros λ e τ : Dadas as configurações adotadas para representação do sistema, um aumento nos valores de λ e τ faz com que o mesmo não possua capacidade suficiente para processar todas as partes, dada a restrição referente à Equação 4.30.

6 CONCLUSÃO

Este estudo apresentou, primeiramente, uma estratégia conjunta entre manutenção e estoque buffer em um sistema de produção do tipo-fila, onde a unidade de produção falha aleatoriamente e pode ser corrigida através de reparo mínimo ou substituição. Para tomada de decisão, duas variáveis foram caracterizadas: a quantidade de partes processadas N em um ciclo de produção e o nível Sb de buffer a ser construído após a conclusão de cada um destes ciclos, a fim de atenuar as paradas ocasionadas pelas ações de manutenção.

Além disso, foi tratada uma política conjunta entre manutenção e inspeção de qualidade, considerando a imperfeição dos processos de produção e de inspeção. Para tomada de decisão, duas variáveis foram caracterizadas: a quantidade de partes processadas N em um ciclo de produção período e a política de inspeção Id (quando necessária).

Pode-se afirmar então que a primeira grande contribuição deste trabalho diz respeito à integração de decisões de diferentes áreas, dado que poucas pesquisas consideram o efeito de uma política de RM em conjunto com uma política de buffer; e no que diz respeito às pesquisas envolvendo política de inspeção dos produtos, foi visto que o seu uso combinado com políticas de manutenção também é pouco explorado na literatura.

Outra relevante contribuição trata-se do desenvolvimento de modelos para diferentes problemas de decisão. Foram desenvolvidos modelos que abordaram o problema de escassez provocado pelas ações de RM e a construção de um buffer para amenizar este problema. Também foi apresentado um modelo que considera o impacto negativo que o RM provoca quando não existe aplicação de uma política de inspeção dos itens produzidos, seguido de modelos que consideram a inserção de políticas de inspeção como forma de diminuir este impacto. Em cada caso, diferentes aspectos foram considerados, como os erros de inspeção, a política de garantia do produto e o retrabalho. Dessa forma, foram traçadas várias estratégias para os diferentes cenários realísticos, sempre considerando suas particularidades.

Estes modelos foram utilizados para obtenção da política ótima, que corresponde àquela que minimiza o custo total esperado por unidade de tempo, assim, foi possível comparar os diferentes modelos propostos. Tal comparação constitui mais uma importante contribuição do presente trabalho, pois, através desta, foi possível analisar o impacto de cada política nas decisões gerenciais. Os resultados mostraram que a adoção do estoque buffer à política de manutenção

apresenta uma boa alternativa. Outra constatação foi que a política de inspeção automatizada incorporando o retrabalho é a que mais contribuiu para a redução do custo total, que consiste no objetivo do problema.

Uma possível extensão para este trabalho seria o estudo de uma política conjunta entre os três temas aqui abordados (manutenção, buffer e inspeção de qualidade), visto que a literatura acerca da integração entre tais temas ainda é bastante escassa.

REFERÊNCIAS

- Aghezzaf, E.-H., Khatab, A., & Tam, P. Le. (2016). Optimizing production and imperfect preventive maintenance planning's integration in failure-prone manufacturing systems. *Reliability Engineering & System Safety*, *145*, 190–198. <http://doi.org/10.1016/j.ress.2015.09.017>
- Aven, T. (2011). Information-Based Minimal Repair Models. In *Replacement Models with Minimal Repair* (pp. 101–113). http://doi.org/10.1007/978-0-85729-215-5_2
- Bamber, C. J., Sharp, J. M., Castka, P., Sharp, J. M., & Castka, P. (2006). Third party assessment: the role of the maintenance function in an integrated management system. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, *10*(1), 26 – 36. <http://doi.org/10.1108/13552510410526848>
- Barlow, R. E., & Proschan, F. (1975). Importance of system components and fault tree events. *Stochastic Processes and Their Applications*, *3*(2), 153–173. [http://doi.org/10.1016/0304-4149\(75\)90013-7](http://doi.org/10.1016/0304-4149(75)90013-7)
- Baudet, N., Maire, J. L., & Pillet, M. (2013). The visual inspection of product surfaces. *Food Quality and Preference*, *27*(2), 153–160. <http://doi.org/10.1016/j.foodqual.2012.08.006>
- Beichelt, F. (1976). A general preventive maintenance policy. *Mathematische Operationsforschung Und Statistik Series*, *7*(6), 927–932. <http://doi.org/10.1080/02331937608842395>
- Bendavid, I., & Herer, Y. T. (2009). Economic optimization of off-line inspection in a process that also produces non-conforming units when in control and conforming units when out of control. *European Journal of Operational Research*, *195*(1), 139–155. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.01.026>
- Berg, M., Bdenvenu, M., & Cleroux, R. (1986). Age Replacement Policy With Age-Dependent Minimal Repair. *Information Systems and Operational Research*, *24*(1), 26–32. <http://doi.org/10.1080/03155986.1986.11731982>
- Bettayeb, B., & Bassetto, S. (2016). Impact of type-II inspection errors on a risk exposure control approach based quality inspection plan. *Journal of Manufacturing Systems*, *40*, 87–95. <http://doi.org/10.1016/j.jmsy.2016.06.003>
- Blann, D. R. (1997). Proactive maintenance as a Strategic business advantage. In *Greater Chicago Plant Maintenance Show and Conference*.
- Block, H. W., Borges, W. S., & Savits, T. H. (1988). A general age replacement model with minimal repair. *Naval Research Logistics (NRL)*, *35*(5), 365–372. <http://doi.org/10.1002/1520->

6750(198810)35:5<365::AID-NAV3220350502>3.0.CO;2-#

Bouslah, B., Gharbi, A., & Pellerin, R. (2016). Integrated production , sampling quality control and maintenance of deteriorating production systems with AOQL constraint. *Omega*, *61*, 110–126.

Budai, G., Dekker, R., & Nicolai, R. P. (2006). *Maintenance and Production: A Review of Planning Models*. *Complex System Maintenance Handbook*. <http://doi.org/10.1007/978-1-84800-011-7>

Cárdenas-barrón, L. E., Sarkar, B., & Treviño-garza, G. (2013). An improved solution to the replenishment policy for the EMQ model with rework and multiple shipments. *Applied Mathematical Modelling*, *37*(7), 5549–5554. <http://doi.org/10.1016/j.apm.2012.10.017>

Chelbi, A., & Ait-Kadi, D. (2004). Analysis of a production/inventory system with randomly failing production unit submitted to regular preventive maintenance. *European Journal of Operational Research*, *156*, 712–718. [http://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00254-6](http://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00254-6)

Chelbi, A., & Ait-Kadi, D. (2003). Joint Optimal Buffer Inventory and Preventive Maintenance Strategy for a Randomly Failing Production Unit. *Journal of Decision Systems*, *12*(1), 21–30. <http://doi.org/10.3166/jds.12.21-30>

Chelbi, A., & Rezg, N. (2006). Analysis of a production / inventory system with randomly failing production unit subjected to a minimum required availability level. *International Journal of Production Economics*, *99*(1-2), 131–143. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2004.12.012>

Chen, C., & Lo, C. (2006). Optimal production run length for products sold with warranty in an imperfect production system with allowable shortages. *Mathematical and Computer Modelling*, *44*(3-4), 319–331. <http://doi.org/10.1016/j.mcm.2006.01.019>

Chen, Y. (2013). An optimal production and inspection strategy with preventive maintenance error and rework. *Journal of Manufacturing Systems*, *32*(1), 99–106. <http://doi.org/10.1016/j.jmsy.2012.07.010>

Chien, Y. (2008). A general age-replacement model with minimal repair under renewing free-replacement warranty. *European Journal of Operational Research*, *186*, 1046–1058. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.02.030>

Chiu, Y. P., Liu, S., Chiu, C., & Chang, H. (2011). Mathematical modeling for determining the replenishment policy for EMQ model with rework and multiple shipments. *Mathematical and Computer Modelling*, *54*(9-10), 2165–2174. <http://doi.org/10.1016/j.mcm.2011.05.025>

Cléroux, R., Dubuc, S., & Tilquin, C. (1979). The Age Replacement Problem with Minimal Repair and Random Repair Costs. *Operations Research*, *27*(6), 1158–1167.

<http://doi.org/10.1287/opre.27.6.1158>

Colledani, M., & Tolio, T. (2012). Integrated quality , production logistics and maintenance analysis of multi-stage asynchronous manufacturing systems with degrading machines. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, *61*, 455–458.

Cui, W., Lu, Z., & Pan, E. (2014). Integrated production scheduling and maintenance policy for robustness in a single machine. *Computers and Operation Research*, *47*, 81–91. <http://doi.org/10.1016/j.cor.2014.02.006>

de Almeida, A. T. (2013). *Processo de decisão nas organizações: Construindo modelos de decisão multicritério*. São Paulo: Atlas.

Dellagi, S., Achour, Z., Gouiaa-Mtibaa, A., & Erray, W. (2016). Development Maintenance-Quality according imperfect quality item produced. *IFAC-PapersOnLine*, *49*(12), 1400–1405.

Dimitrakos, T. D., & Kyriakidis, E. G. (2008). A Semi-Markov decision algorithm for the maintenance of a production system with buffer capacity and continuous repair times. *International Journal of Production Economics*, *111*, 752–762. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.03.010>

Djamaludin, I. (1994). Quality control through lot sizing for items sold with warranty. *International Journal of Production Economics*, *33*(1-3), 97–107.

Doostparast, M., Kolahan, F., & Doostparast, M. (2014). A reliability-based approach to optimize preventive maintenance scheduling for coherent systems. *Reliability Engineering and System Safety*, *126*, 98–106. <http://doi.org/10.1016/j.ress.2014.01.010>

Fang, L., & Zhaodong, H. (2015). System Dynamics Based Simulation Approach on Corrective Maintenance Cost of Aviation Equipments. *Procedia Engineering*, *99*, 150–155. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.519>

Fitouhi, M., & Nourelfath, M. (2012). Integrating noncyclical preventive maintenance scheduling and production planning for a single machine. *International Journal of Production Economics*, *136*, 344–351. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.12.021>

Gan, S., & Shi, J. (2014). Maintenance Optimization for a Production System with Intermediate Buffer and Replacement Part Order Considered. *Eksploatacja I Niezawodnosc – Maintenance and Reliability*, *16*(1), 140–149.

Gan, S., Zhang, Z., Zhou, Y., & Shi, J. (2013). Intermediate buffer analysis for a production system. *Applied Mathematical Modelling*, *37*(20-21), 8785–8795.

Gan, S., Zhang, Z., Zhou, Y., & Shi, J. (2015). Joint optimization of maintenance, buffer, and

- spare parts for a production system. *Applied Mathematical Modelling*, 39(19), 6032–6042. <http://doi.org/10.1016/j.apm.2015.01.035>
- Gharbi, A., & Beit, M. (2007). Age-dependent production planning and maintenance strategies in unreliable manufacturing systems with lost sale. *European Journal of Operational Research*, 178, 408–420. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.01.029>
- Gits, C. W. (1992). Design of maintenance concepts. *International Journal of Production Economics*, 24(3), 217–226. [http://doi.org/10.1016/0925-5273\(92\)90133-R](http://doi.org/10.1016/0925-5273(92)90133-R)
- Hassan, M. H., & Diab, S. L. (2010). Visual inspection of products with geometrical quality characteristics of known tolerances. *Ain Shams Engineering Journal*, 1(1), 79–84. <http://doi.org/10.1016/j.asej.2010.09.011>
- Hlioui, R., Gharbi, A., & Hajji, A. (2015). Replenishment, production and quality control strategies in three-stage supply chain. *International Journal of Production Economics*, 166, 90–102. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.04.015>
- Ho, S., Kim, D., & Park, M. (2009). Economic production quantity model with imperfect-quality items, two-way imperfect inspection and sales return. *International Journal of Production Economics*, 121(1), 255–265. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.05.008>
- Ho, S., Kim, D., & Park, M. (2012). Lot sizing and quality investment with quality cost analyses for imperfect production and inspection processes with commercial return. *International Journal of Production Economics*, 140(2), 922–933. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.07.014>
- Hsu, J., & Hsu, L. (2013). An EOQ model with imperfect quality items, inspection errors, shortage backordering, and sales returns. *International Journal of Production Economics*, 143, 162–170.
- Hsu, L. (1994). Optimal replacement schedules in a queue-like production system with minimal repair. *Reliability Engineering & System Safety*, 46, 189–198.
- Hsu, L. (1999). Simultaneous determination of preventive maintenance and replacement policies in a queue-like production system with minimal repair. *Reliability Engineering & System Safety*, 63, 161–167.
- Hsu, L., & Kuo, S. (1995). Design of optimal maintenance policies based on on-line sampling plans. *European Journal of Operational Research*, 2217(94), 345–357.
- Hu, F., & Zong, Q. (2009). Optimal production run time for a deteriorating production system under an extended inspection policy. *European Journal of Operational Research*, 196(3), 979–986. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.05.008>

- Hu, J., Zheng, H., Guo, C., & Ji, Y. (2010). Optimal production run length with imperfect production processes and backorder in fuzzy random environment. *Computers & Industrial Engineering*, 59, 9–15. <http://doi.org/10.1016/j.cie.2010.01.012>
- Jaturonnatee, J. (2006). Optimal preventive maintenance of leased equipment with corrective minimal repairs. *European Journal of Operational Research*, 174(1), 201–215. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.01.049>
- Jensen, P. A., Pakath, R., & Wilson, J. R. (1991). Optimal buffer inventories for multistage production systems with failures. *European Journal of Operational Research*, 51(1989), 313–326.
- Jin, X., Li, L., & Ni, J. (2009). Option model for joint production and preventive maintenance system. *International Journal of Production Economics*, 119(2), 347–353. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.03.005>
- Karamatsoukis, C. C., & Kyriakidis, E. G. (2010). Optimal maintenance of two stochastically deteriorating machines with an intermediate buffer. *European Journal of Operational Research*, 207(1), 297–308. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.04.022>
- Khan, M., Jaber, M. Y., & Bonney, M. (2011). An economic order quantity (EOQ) for items with imperfect quality and inspection errors. *International Journal of Production Economics*, 133(1), 113–118. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.01.023>
- Kim, C. H., & Hong, Y. (1999). An optimal production run length in deteriorating production processes. *International Journal of Production Economics*, 58(2), 183–189.
- Kurniati, N., Yeh, R., & Lin, J. (2015). Quality inspection and maintenance: the framework of interaction. *Procedia Manufacturing*, 4, 244–251. <http://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.11.038>
- Kyriakidis, E. G., & Dimitrakos, T. D. (2006). Optimal preventive maintenance of a production system with an intermediate buffer. *European Journal of Operational Research*, 168(1), 86–99. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.01.052>
- Kyriakidis, E. G., & Karamatsoukis, C. (2012). Optimal Maintenance of a Production System with L Intermediate Buffers. *Mathematical Problems in Engineering*, 2012, 1–14. <http://doi.org/10.1155/2012/673864>
- Lam, Y. (2007). A geometric process maintenance model with preventive repair. *European Journal of Operational Research*, 182(2), 806–819. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.08.054>
- Lee, H. L., & Rosenblatt, M. J. (1989). A Production and Maintenance Planning Model with Restoration Cost Dependent on Detection Delay. *IIE Transactions*, 21(4), 368–375. <http://doi.org/10.1080/07408178908966243>

- Lee, J. S., & Park, K. S. (1991). Joint Determination of Production Cycle and Inspection Intervals in a Deteriorating Production System. *The Journal of the Operational Research Society*, 42(9), 775. <http://doi.org/10.2307/2583660>
- Lee, S., Gu, X., & Ni, J. (2013). Stochastic maintenance opportunity windows for unreliable two-machine one-buffer system. *Expert Systems with Applications*, 40(13), 5385–5394.
- Liao, G., Hung, Y., & Sheu, S. (2009). Optimal economic production quantity policy for imperfect process with imperfect repair and maintenance. *European Journal of Operational Research*, 195(2), 348–357. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.01.004>
- Lim, J. H., Qu, J., & Zuo, M. J. (2016). Age replacement policy based on imperfect repair with random probability. *Reliability Engineering and System Safety*, 149, 24–33. <http://doi.org/10.1016/j.ress.2015.10.020>
- Meller, R. D., & Kim, D. S. (1996). The impact of preventive maintenance on system cost and buffer size. *European Journal of Operational Research*, 7(95), 577–591.
- Ming, H., & Agus, G. (2013). A production model for deteriorating items with stochastic preventive maintenance time and rework process with FIFO rule. *Omega*, 41(6), 941–954. <http://doi.org/10.1016/j.omega.2012.12.001>
- Mitroff, I. I., Betz, F., Pondy, L. R., & Sagasti, F. (1974). On Managing Science in the Systems Age: Two Schemas for the Study of Science as a Whole Systems Phenomenon. *Interfaces*, 4(3), 46–58. <http://doi.org/10.1287/inte.4.3.46>
- Moubray, J. (1997). Reliability-centred maintenance. *Fuel and Energy Abstracts*. Retrieved from <http://trove.nla.gov.au/work/7149348?selectedversion=NBD13125283>
- Murino, T., Romano, E., & Zoppoli, P. (2009). Maintenance policies and buffer sizing: an optimization model. *WSEAS TRANSACTIONS on BUSINESS and ECONOMICS*, 6(1), 21–30.
- Nourelfath, M., & Châtelet, E. (2012). Integrating production, inventory and maintenance planning for a parallel system with dependent components. *Reliability Engineering and System Safety*, 101, 59–66. <http://doi.org/10.1016/j.ress.2012.02.001>
- Nourelfath, M., Nahas, N., & Ben-daya, M. (2016). Integrated preventive maintenance and production decisions for imperfect processes. *Reliability Engineering and System Safety*, 148, 21–31. <http://doi.org/10.1016/j.ress.2015.11.015>
- Olhager, J., & Selldin, E. (2004). Supply chain management survey of Swedish manufacturing firms. *International Journal of Production Economics*, 89(3), 353–361. [http://doi.org/10.1016/S0925-5273\(03\)00029-X](http://doi.org/10.1016/S0925-5273(03)00029-X)

- Ouali, M.-S., Tadj, L., Yacout, S., & Ait-Kadi, D. (2011). A Survey of Replacement Models with Minimal Repair. In *Replacement Models with Minimal Repair* (pp. 3–100). http://doi.org/10.1007/978-0-85729-215-5_1
- Ouyang, L., & Chang, C. (2013). Optimal production lot with imperfect production process under permissible delay in payments and complete backlogging. *International Journal of Production Economics*, *144*(2), 610–617. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.04.027>
- Pandey, D., Kulkarni, M. S., & Vrat, P. (2010). Joint consideration of production scheduling, maintenance and quality policies: a review and conceptual framework. *International Journal of Advanced Operations Management*, *2*(1-2), 1–24. <http://doi.org/10.1504/IJAOM.2010.034583>
- Park, M., & Pham, H. (2016). Cost models for age replacement policies and block replacement policies under warranty. *Applied Mathematical Modelling*, *40*(9-10), 5689–5702.
- Pavitsos, A., & Kyriakidis, E. G. (2009). Markov decision models for the optimal maintenance of a production unit with an upstream buffer. *Computers & Operations Research*, *36*(6), 1993–2006. <http://doi.org/10.1016/j.cor.2008.06.014>
- Peter, B. (2008). Holding cost determination: An activity-based cost approach. *International Journal of Production Economics*, *112*, 829–840. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2005.10.010>
- Pintelon, L., & Parodi-herz, A. (2008). Maintenance: An Evolutionary Perspective. In *Complex System Maintenance Handbook* (pp. 21–48).
- Radhoui, M., Rezg, N., & Chelbi, A. (2010). Joint quality control and preventive maintenance strategy for imperfect production processes. *Journal International Manufacturing*, *25*(2), 205–212. <http://doi.org/10.1007/s10845-008-0198-x>
- Rezg, N., Chelbi, A., & Xie, X. (2005). Modeling and optimizing a joint inventory control and preventive maintenance strategy for a randomly failing production unit: Analytical and simulation approaches. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, *18*(2-3), 225–235. <http://doi.org/10.1080/0951192052000288152>
- Ribeiro, M. A., Silveira, J. L., & Qassim, R. Y. (2007). Joint optimisation of maintenance and buffer size in a manufacturing system. *European Journal of Operational Research*, *176*(1), 405–413. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.08.007>
- Salameh, M. K., & Ghattas, R. E. (2001). Optimal just-in-time buffer inventory for regular preventive maintenance. *International Journal of Production Economics*, *74*, 157–161.
- Sana, S. S. (2012). Preventive maintenance and optimal buffer inventory for products sold with warranty in an imperfect production system. *International Journal of Production Research*, *50*(23), 6763–6774. <http://doi.org/10.1080/00207543.2011.623838>

- Sarkar, B., Cárdenas-barrón, L. E., Sarkar, M., & Laksono, M. (2014). An economic production quantity model with random defective rate, rework process and backorders for a single stage production system. *Journal of Manufacturing Systems*, 33(3), 423–435. <http://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.02.001>
- Sarkar, B., Sana, S. S., & Chaudhuri, K. (2010). Optimal reliability, production lot size and safety stock in an imperfect production system. *International Journal of Mathematics in Operational Research*, 2(4), 467. <http://doi.org/10.1504/IJMOR.2010.033441>
- Sarkar, B., & Saren, S. (2016). Product inspection policy for an imperfect production system with inspection errors and warranty cost. *European Journal of Operational Research*, 248(1), 263–271. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.06.021>
- Schouten, F. A., & Vanneste, S. G. (1995). Maintenance optimization of a production system with buffer capacity. *European Journal of Operational Research*, 2217(94), 323–338.
- Sheu, S. (1991). A General Age Replacement Model with Minimal Repair and General Random Repair Cost. *Microelectronics Reliability*, 31(5), 1009–1017.
- Sheu, S. H., & Liou, C. T. (1992). An age replacement policy with minimal repair and general random repair cost. *Microelectronics Reliability*, 32(9), 1283–1289. [http://doi.org/10.1016/0026-2714\(92\)90652-2](http://doi.org/10.1016/0026-2714(92)90652-2)
- Shih, N., & Wang, C. (2016). Determining an optimal production run length with an extended quality control policy for an imperfect process. *Applied Mathematical Modelling*, 40, 2827–2836. <http://doi.org/10.1016/j.apm.2015.09.045>
- Sim, S. H., & Endrenyi, J. (1993). A Failure-Repair Model with Minimal & Major Maintenance. *IEEE Transactions on Reliability*, 42(1), 134–140. <http://doi.org/10.1109/24.210285>
- Slack, N., Chambers, S., & Jonhston, R. (2002). *Administração da Produção* (2nd ed.). Atlas.
- Takata, S., Kirnura, F., van Houten, F. J. a. M., Westkamper, E., Shpitalni, M., Ceglarek, D., & Lee, J. (2004). Maintenance: Changing Role in Life Cycle Management. *Annals of the CIRP*, 53(2), 643–655. [http://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60033-X](http://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60033-X)
- Tinga, T. (2010). Application of physical failure models to enable usage and load based maintenance. *Reliability Engineering and System Safety*, 95(10), 1061–1075. <http://doi.org/10.1016/j.ress.2010.04.015>
- Wang, C., & Meng, F. (2009). Optimal lot size and offline inspection policy. *Computers and Mathematics with Applications*, 58(10), 1921–1929. <http://doi.org/10.1016/j.camwa.2009.07.089>
- Wang, C., & Sheu, S. H. (2003). Determining the optimal production–maintenance policy with

inspection errors: using a Markov chain. *Computers & Operations Research*, 30(1), 1–17.

Wang, C.-H., & Sheu, S.-H. (2001). Simultaneous determination of the optimal production inventory and product inspection policies for a deteriorating production system. *Computers & Operations Research*, 28(11), 1093–1110.

Wang, S., Wang, S., & Chiu, Y. P. (2007). Determining the optimal run time for EPQ model with scrap, rework, and stochastic breakdowns. *European Journal of Operational Research*, 180(2), 664–676. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.05.005>

Wang, W. (2013). Optimum production and inspection modeling with minimal repair and rework considerations. *Applied Mathematical Modelling*, 37(4), 1618–1626. <http://doi.org/10.1016/j.apm.2012.04.028>

Wang, W., Zhao, F., & Peng, R. (2014). A preventive maintenance model with a two-level inspection policy based on a three-stage failure process. *Reliability Engineering and System Safety*, 121, 207–220. <http://doi.org/10.1016/j.ress.2013.08.007>

Xiao, L., Song, S., Chen, X., & David, W. (2015). Joint optimization of production scheduling and machine group preventive maintenance. *Reliability Engineering and System Safety*, 146, 68–78.

Yeh, R. H. (2000). Optimal production run length for products sold with warranty. *European Journal of Operational Research*, 120(3), 575–582.

Yeh, R. H., & Chen, T. (2006). Optimal lot size and inspection policy for products sold with warranty. *Mathematical and Computer Modelling*, 174(3-4), 766–776. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.02.049>

Zequeira, R. I., Prida, B., & Valdés, J. E. (2004). Optimal buffer inventory and preventive maintenance for an imperfect production process. *International Journal of Production Research*, 42(5), 959–974. <http://doi.org/10.1080/00207540310001631610>

Zequeira, R. I., Valdes, J. E., & Berenguer, C. (2008). Optimal buffer inventory and opportunistic preventive maintenance under random production capacity availability. *International Journal of Production Economics*, 111, 686–696. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.02.037>

Zhou, X., Lu, Z., & Xi, L. (2010). A dynamic opportunistic preventive maintenance policy for multi-unit series systems with intermediate buffers. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 6(3), 276. <http://doi.org/10.1504/IJISE.2010.035012>

Zhou, Y., & Zhang, Z. (2015). Optimal maintenance of a series production system with two multi-component subsystems and an intermediate buffer. *Maintenance and Reliability*, 17(2), 314–325.