



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

DANIELE ARAÚJO ALECRIM

**PROPOSIÇÃO DE UM MODELO MULTICRITÉRIO
PARA APOIAR DECISÕES ENVOLVENDO POLÍTICAS
INTEGRADAS ENTRE MANUTENÇÃO E SISTEMA DE
PRODUÇÃO IMPERFEITO**

Caruaru

2019

DANIELE ARAÚJO ALECRIM

**PROPOSIÇÃO DE UM MODELO MULTICRITÉRIO PARA APOIAR
DECISÕES ENVOLVENDO POLÍTICAS INTEGRADAS ENTRE MANUTENÇÃO E
SISTEMAS DE PRODUÇÃO IMPERFEITO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de Concentração: Otimização e Gestão da Produção.

Orientador: Prof^o Dr. Rodrigo Sampaio Lopes

Caruaru

2019

Catálogo na fonte:
Bibliotecária – Paula Silva - CRB/4 - 1223

A366p Alecrim, Daniele Araújo.
Proposição de um modelo multicritério para apoiar decisões envolvendo políticas integradas entre manutenção e sistemas de produção imperfeito. / Daniele Araújo Alecrim. – 2019.
73 f.; il.: 30 cm.

Orientador: Rodrigo Sampaio Lopes.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2019.
Inclui Referências.

1. Manutenção. 2. Processo decisório por critério múltiplo. 3. Cadeia de logística integrada. 4. Processo decisório – Modelos matemáticos. I. Lopes, Rodrigo Sampaio (Orientador). II. Título.

CDD 658.5 (23. ed.) UFPE (CAA 2019-236)

DANIELE ARAÚJO ALECRIM

**PROPOSIÇÃO DE UM MODELO MULTICRITÉRIO PARA APOIAR
DECISÕES ENVOLVENDO POLÍTICAS INTEGRADAS ENTRE MANUTENÇÃO E
SISTEMAS DE PRODUÇÃO IMPERFEITO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Aprovada em: 10/07/2019.

BANCA EXAMINADORA

Profº Dr. Rodrigo Sampaio Lopes (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Profº Dr. Thalles Vitelli Garcez (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Profº Dr. Thiago Poletto (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Primeiramente eu gostaria de agradecer a Deus, pois sem a sua força diária através de preces e orações eu não teria chegado até aqui, minha gratidão a todos os momentos que passei e que me ajudaram a me tornar mais forte.

De forma especial gostaria também de agradecer aos meus pais, Damiana e Francisco, por todo amor, cuidado e incentivo a seguir sempre adiante apesar das dificuldades, vocês são meus maiores exemplos de vida.

Aos meus irmãos Alana e Junior que são meus grandes parceiros de vida com quem sei que posso contar sempre, também agradeço ao meu sobrinho Luiz Henrique por me transmitir paz e um amor tão grande e puro que tornam a vida um pouco mais leve.

Ao meu orientador professor Rodrigo, por toda a paciência e pelos muitos conselhos, aprendi a admirá-lo ainda mais com a convivência, todos os ensinamentos e conversas serão sempre lembradas como impulsionadores ao meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Meu muito obrigado também aos meus grandes amigos Fernanda, Jackson, Thiago, Helder, Ingrid, Geisianne, Matheus, Edinalva, Aldênia e Francisca, por todo suporte nas horas difíceis e por todo companheirismo e alegria que sempre estiveram presentes em nossas conversas.

Por fim, gostaria de agradecer a FACEPE pelo apoio financeiro.

RESUMO

Esta pesquisa tem como objetivo propor um modelo multicritério para apoiar a tomada de decisão envolvendo políticas integradas entre manutenção e sistemas de produção imperfeito. Para atender a este objetivo um levantamento dos modelos mais recentes encontrados na literatura foi realizado através de uma revisão sistemática, através dessa revisão identificou-se que dentre os artigos avaliados apenas o critério financeiro é considerado para a definição das políticas integradas entre manutenção e sistemas de produção imperfeito. Com isso, foi possível construir um modelo de apoio a decisão multicritério, onde além do critério custo a qualidade final dos itens produzidos também foi considerado. Para agregação de tais critérios foi utilizado o método multicritério aditivo com veto, que demonstrou ser eficiente em contextos similares ao tratado nesta pesquisa, onde a função de veto desempenha papel fundamental ao aplicar penalidades à indústrias que não conseguem atingir determinados limiares de qualidade e custo dos seus produtos exigidos para a sua inserção ou permanência em uma cadeia de suprimentos. Uma aplicação numérica foi realizada para o modelo proposto e os resultados obtidos indicaram uma política de manutenção considerada satisfatória as preferências do decisor para os critérios avaliados. Além disso, foi realizado uma análise de sensibilidade que comprovou através de variações na ordem de preferência do decisor a robustez e coerência do modelo proposto de acordo com os dados considerados nesta pesquisa.

Palavras-chave: Manutenção. Sistemas de produção imperfeito. Decisões integradas. Apoio a decisão multicritério.

ABSTRACT

This research aims to propose a multicriteria model to support decision making involving integrated policies between maintenance and imperfect production systems. To meet this objective, a survey of the most recent models found in the literature was performed through a systematic review. Through this review, it was found that among the articles evaluated only the financial criterion is considered for the analysis definition of integrated policies between maintenance and imperfect production systems. Thus, it was possible to construct a multicriteria decision support model, where besides the cost criterion the final quality of the produced items was also considered. The aggregation of these criteria was possible thanks to the use of the veto additive model, which proved to be efficient in contexts similar to the one addressed in this research, where the veto function plays a fundamental role in defining the quality and cost thresholds that the products need to obtain so that industries reach enough potential to enter or stay in a supply chain. A numerical application was performed for the proposed model and the results indicated a maintenance policy considered satisfactory to the decision maker's preferences for the evaluated criteria. In addition, a sensitivity analysis was performed, which proved that the robustness and coherence of the proposed model, according to the data considered in this research, through variations in the order of preference of the decision maker.

Keywords: Maintenance. Systems of imperfect production. Integrated decisions. Multicriteria decision support.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Metodologia utilizada nesta pesquisa.....	13
Fluxograma 1 –	Etapas da Revisão Sistemática da Literatura.....	28
Figura 2 –	Seleção de artigos primários.....	31
Gráfico 1 –	Distribuição de publicações por banco de dados.....	32
Gráfico 2 –	Total de artigos publicados de acordo com a respectiva combinação....	33
Gráfico 3 –	Distribuição dos artigos na última década.....	34
Mapa 1 –	Distribuição das pesquisas pelo mundo.....	35
Gráfico 4 –	Palavras-Chaves mais frequentes entre os artigos.....	36
Gráfico 5 –	Distribuição das Variáveis de Decisão.....	37
Figura 3 –	Modelo Proposto.....	41
Figura 4 –	Identificação do estado do processo.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Distribuição das Publicações por Jornal/Revista.....	33
Tabela 2 –	Matriz de consequências para os critérios AOQ e Custo.....	48
Tabela 3 –	Parâmetros para aplicação numérica.....	51
Tabela 4 –	Dados para a aplicação numérica.....	51
Tabela 5 –	Resultados do modelo aditivo e aditivo-veto para a problemática de ordenação.....	53
Tabela 6 –	Ordenação final das alternativas.....	54
Tabela 7 –	Resultados do modelo aditivo e aditivo-veto de acordo com o novo cenário.....	55
Tabela 8 –	Ordenação final das alternativas após a mudança na ordem de preferência do decisor.....	56

SUMÁRIO

1	<i>INTRODUÇÃO</i>	11
1.1	OBJETIVOS.....	12
1.1.1	Objetivo Geral.....	12
1.1.2	Objetivos Específicos.....	12
1.2	METODOLOGIA DE PESQUISA.....	13
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	14
2	<i>REFERENCIAL TEÓRICO</i>	16
2.1	GESTÃO DA MANUTENÇÃO.....	16
2.2	POLÍTICA ÓTIMA DE MANUTENÇÃO EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO IMPERFEITO.....	17
2.3	POLÍTICAS INTEGRADAS ENTRE MANUTENÇÃO, PRODUÇÃO E QUALIDADE.....	18
2.4	SISTEMAS DE PRODUÇÃO IMPERFEITO.....	20
2.5	MANUTENÇÃO PREVENTIVA EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO IMPERFEITO.....	21
2.6	AÇÕES DE INSPEÇÃO EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO IMPERFEITO.....	22
2.7	MÉTODOS DE APOIO A DECISÃO MULTICRITÉRIO.....	23
2.7.1	Modelo Aditivo com Veto.....	24
3	<i>REVISÃO DA LITERATURA</i>	28
3.1	PLANEJAMENTO.....	29
3.2	FORMULAÇÃO DAS PALAVRAS CHAVES.....	29
3.3	EXTRAIR E SINTETIZAR OS DADOS.....	30
3.4	ANÁLISE DOS DADOS.....	31
3.4.1	Classificação e Análise dos Modelos Integrados entre Manutenção e Sistemas de Produção Imperfeito.....	31
3.4.2	Análise Descritiva.....	33
3.4.3	Palavras Chaves Consideradas nos Artigos.....	35

3.4.4	Variáveis de Decisão Consideradas na Formulação dos Problemas.....	36
3.5	DISCUSSÃO DA LITERATURA.....	38
4	<i>MODELO PROPOSTO</i>	40
4.1	MODELO MULTICRITÉRIO PARA DECISÕES INTEGRADAS ENVOLVENDO SISTEMAS DE PRODUÇÃO IMPERFEITO E MANUTENÇÃO.....	40
4.1.1	Critério Custo.....	43
4.1.2	Critério AOQ.....	45
5	<i>RESULTADOS E DISCUSSÕES</i>	47
5.1	APLICAÇÃO NÚMERICA PARA O MODELO PROPOSTO.....	47
5.1.1	Análise de Sensibilidade.....	55
5.1.2	Implicações Gerenciais do Modelo Proposto.....	57
6	<i>CONCLUSÕES</i>	59
	<i>REFERÊNCIAS</i>	60

1 INTRODUÇÃO

As mudanças no cenário econômico e o crescente desenvolvimento da tecnologia ocasionam maiores desafios as organizações, o que faz com que as mesmas para sobreviver a este cenário busquem melhorias nos seus sistemas de produção (KANG; SUBRANIAM, 2018). Segundo Bouslah, Gharbi e Pellerin (2016), a integração entre qualidade, produção e manutenção é vital para o sucesso das organizações, pois constitui um dos elementos fundamentais para melhorar a eficiência dos sistemas de produção, diminuindo os seus custos.

A maior parte dos sistemas de produção não produz somente itens de qualidade conforme. Durante o tempo de execução da produção, o processo pode mudar para um estado “fora de controle” a qualquer momento aleatório. Geralmente neste estado ocorre a produção de itens de qualidade não conforme (SANA, 2010).

Os itens de qualidade não conforme também chamados de defeituosos podem ser resultantes de controle de processo insuficiente, manutenção mal planejada, instruções de trabalho inadequadas ou danos durante a produção (RAD; KHOSHALHAN; GLOCK, 2014). Dentre estes fatores, a ausência de um planejamento de manutenção eficiente é um dos mais críticos, pois equipamentos com falhas regulares que não são submetidos a manutenção periódica podem sofrer reduções de velocidade e falta de desempenho que contribuem para a produção de itens defeituosos (BEN-DAYA; DUFFUAA, 2008).

Desta forma, para evitar produtos defeituosos e aumentar assim a qualidade final dos produtos faz-se necessário manter a “boa” condição do processo de produção, isto pode ser feito através da implementação de programas de manutenção (DARWISH, 2006). Neste contexto, a função de manutenção passa a ter grande relevância, pois se realizada de forma adequada, pode auxiliar na redução de falhas ou perdas, prolongando a vida útil dos equipamentos e aumentando a confiabilidade do sistema (YEDES et al., 2012).

Apesar de tratadas separadamente em muitos contextos, a função de manutenção está associada a qualidade do produto e a integração destas duas áreas demonstra ser mais rentável na melhoria do desempenho do sistema de produção (PANDEY; KULKARNI; VRAT, 2011).

Pesquisadores e gestores reconheceram que estratégias que dissociam funções complementares (manutenção, qualidade, produção) eram ineficazes e uma das chaves para o sucesso consiste em considerar uma abordagem sistêmica global integrando a interação entre todas essas funções ou parte delas (GOUJIAA-MTIBAA et al., 2018).

Segundo Bouslah, Gharbi e Pellerin (2016) os modelos integrados visam essencialmente analisar, projetar e otimizar sistemas de produção por meio de uma abordagem holística, considerando as inter-relações e intersecções substanciais entre aspectos de produção, qualidade e manutenção.

A qualidade dos itens produzidos sempre desempenhou um papel fundamental nos negócios, tal fator é determinante em muitos contextos, onde os itens produzidos precisam atender a um determinado nível de qualidade, denominado bom para sobreviver no mercado. Este é o caso dos itens produzidos em uma cadeia de suprimentos, onde a meta de qualidade precisa ser atendida sob as condições de operação existentes (SANA, 2010).

Desta forma, o desenvolvimento de estratégias integradas entre a função de manutenção aliadas ao papel da condição do equipamento no controle de qualidade e custos da produção passam a ter maior relevância para o aumento da competitividade nas indústrias (DHOUIB et al., 2012).

Apesar da sua relevância a literatura atual aborda as decisões integradas entre manutenção e sistemas de produção imperfeito por meio de modelos que avaliam as consequências das decisões sob a perspectiva de um único critério. Neste contexto esta pesquisa propõe um modelo de apoio a decisão multicritério que permite avaliar as consequências das decisões considerando os critérios AOQ (*Average outgoing quality*) e custo para determinar as políticas integradas entre manutenção e sistemas de produção imperfeito.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa tem como objetivo geral propor um modelo multicritério para apoiar a tomada de decisão envolvendo políticas integradas entre manutenção e sistemas de produção imperfeito.

1.1.2 Objetivos Específicos

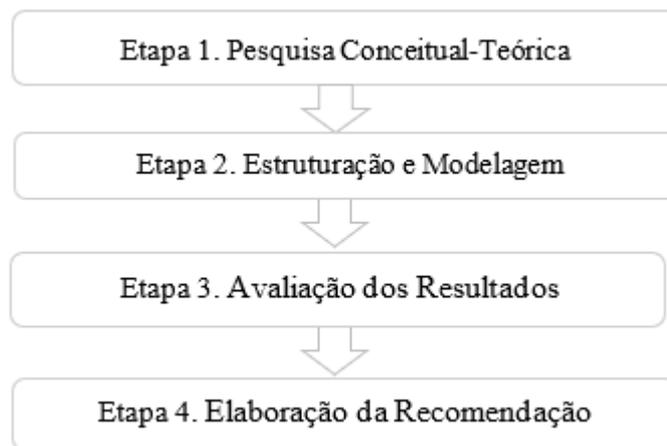
- Identificar através de uma revisão sistemática da literatura o problema de pesquisa.
- Construir um modelo de decisão sob uma abordagem multicritério para definir uma política integrada entre manutenção e sistemas de produção imperfeito, considerando a estrutura de preferência do decisor em uma cadeia de suprimentos.

- Validar o modelo através da análise numérica e da análise de sensibilidade.

1.2 METODOLOGIA DE PESQUISA

A metodologia proposta nesta pesquisa baseou-se em algumas etapas de estruturação para resolução de problemas multicritério proposto por (DE ALMEIDA, 2013). Sendo assim, as etapas desta pesquisa foram divididas em: Pesquisa Conceitual-Teórica, Estruturação e Modelagem, Avaliação dos Resultados e Elaboração da Recomendação, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1- Metodologia utilizada nesta pesquisa.



Fonte: A Autora (2019)

1. Pesquisa Conceitual-Teórica

Através de um embasamento teórico apresentado no (capítulo 2) buscou-se obter maior conhecimento a respeito do tema abordado, porém para a identificação da questão central de pesquisa tornou-se necessário a realização de um levantamento dos atuais modelos existentes na literatura, apresentados na revisão sistemática (capítulo 3), a partir desta revisão e da base conceitual foi possível entender melhor o problema e dar início a estruturação do modelo.

2. Estruturação e modelagem

Nesta etapa o problema de pesquisa é contextualizado e são definidas algumas etapas importantes para o processo decisório, tais como a definição das variáveis de decisão, os critérios estabelecidos, o método utilizado e a estrutura de preferência do decisor, todas estas etapas estão relacionadas com o procedimento de resolução de um problema multicritério

proposto de De Almeida, (2013) e são utilizadas no desenvolvimento do modelo desta pesquisa (Figura 3). A estruturação do modelo é apresentada no (capítulo 4).

Após a estruturação, é realizado a modelagem matemática do modelo proposto nesta pesquisa, através da modelagem é possível demonstrar matematicamente o que conceitualmente foi definido pela estruturação do modelo. Essa demonstração pode ser realizada através de símbolos matemáticos, linguagem computacional ou por meio de ambos (LANDRY; MALOUIN; ORAL, 1983). O desenvolvimento do modelo também é abordado no (capítulo 4).

3. Avaliação dos Resultados

Os resultados apresentados pelo modelo incluem a avaliação das alternativas geradas e discussões a respeito do seu comportamento. Além disso, após a construção do modelo é fundamental que o pesquisador verifique a compatibilidade dos resultados gerados com a realidade na qual o modelo está inserido (SAGASTI; MITROFF, 1973). Isso pode ser feito através de uma análise de sensibilidade, que comprova a robustez do modelo para diferentes cenários analisados (DE ALMEIDA, 2013). A análise de sensibilidade realizada para o modelo proposto é apresentada no capítulo 5.

4. Elaboração das Recomendações

A partir dos resultados encontrados no modelo, é possível elaborar algumas recomendações para o processo, estas recomendações pretendem auxiliar os decisores na tomada de decisão. As recomendações desta pesquisa são apresentadas no (capítulo 5) sob o título de implicações gerenciais.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta pesquisa foi estruturada em seis capítulos conforme apresentado a seguir:

O capítulo 1 é composto por uma breve introdução a respeito do tema da pesquisa, os seus objetivos gerais e específicos, além da metodologia utilizada para o desenvolvimento do modelo de decisão.

No capítulo 2 são apresentados alguns conceitos fundamentais a compreensão desta pesquisa.

O capítulo 3 apresenta uma revisão sistemática da literatura sobre o tema decisões integradas e sistemas de produção imperfeito, procurando assim abordar os artigos mais relevantes desta área nos últimos dezoito anos.

O capítulo 4 trata do desenvolvimento do modelo de decisão sugerido por esta pesquisa.

O capítulo 5 aborda os resultados e discussões a respeito do modelo de decisão proposto, incluindo a análise de sensibilidade e implicações gerenciais deste modelo.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões desta pesquisa.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo será apresentado uma base conceitual que aborda temas considerados relevantes a compreensão da pesquisa.

2.1 GESTÃO DA MANUTENÇÃO

O conceito de manutenção vem mudando ao longo dos anos e o que antes era compreendido por muitas organizações e gestores como um mal necessário agora passa a ser visto como um elemento chave para obter vantagem competitividade nas organizações (WAEYENBERGH; PINTELON, 2002). De acordo com Ruschel; Santos e Loures (2017), a manutenção desempenha o papel de evitar ou mitigar falhas em máquinas ou equipamentos de uma organização.

O gerenciamento eficiente desta função pode aumentar a confiabilidade dos equipamentos, prolongando seu ciclo de vida útil e reduzindo perdas no processo produtivo devido a paradas de produção ou produção de itens não conformes (RUSCHEL; SANTOS; LOURES, 2017) As ações de manutenção podem ser identificadas em geral como ações de manutenção planejadas e não planejadas (CHAN; ASGARPOOR, 2006).

Dentre as ações de manutenção não planejada, temos a ação de manutenção corretiva que é considerada uma estratégia reativa, pois só é realizada após a ocorrência da falha. A vantagem de se adotar esta política é que ela utiliza toda a vida útil do equipamento e a grande desvantagem desta política é que, quando a manutenção é necessária, os recursos ainda não foram programados para serem enviados à máquina, o que significa que podem ser necessárias medidas de emergência dispendiosas que geralmente podem incorrer em altos custos para a organização (POPPE et al., 2017).

As ações de manutenção planejada, podem ser identificadas como ações preventivas e preditivas (CHAN; ASGARPOOR, 2006). A manutenção preventiva pode ser introduzida em um sistema para minimizar o efeito de avarias não programadas, ela interfere de maneira planejada, melhorando a condição do componente (MARTINOD et al., 2017). A principal vantagem em realizar ações de manutenção preventiva consiste no planejamento que pode ser realizado para a compra de peças e organização da disponibilidade da equipe de manutenção, já que a realização deste tipo de manutenção é programada, o planejamento realizado tem como finalidade reduzir os custos incorridos de manutenção, a grande desvantagem na realização da ação de manutenção preventiva é a prática da substituição do componente, caso o mesmo ainda

esteja funcionando, isso significa que o componente não atingiu o máximo de rendimento esperado (POPPE et al., 2017).

A manutenção preditiva surge a partir da evolução da manutenção preventiva, porém a manutenção preditiva caracteriza-se pela postergação da atividade de manutenção até o momento em que é identificada alguma anomalia no sistema (HU; ZHANG; LIANG, 2012). Neste tipo de manutenção podem ser utilizados equipamentos para monitoramento dos dados de falha, a fim de prever possíveis falhas no sistema (WANG; CHU; WU, 2007). A grande vantagem desta política é que ela utiliza informações precisas para agendar a manutenção preventiva, proporcionando o aumento da vida útil do equipamento. As desvantagens são os altos custos para implementação dos equipamentos de monitoramento e treinamento de pessoas para interpretar e garantir a confiabilidade das informações obtidas.

É importante destacar que estas vantagens e desvantagens estão diretamente relacionadas ao tipo específico de máquina ou sistema utilizado, em alguns casos realizar a ação de manutenção corretiva é considerada a melhor decisão a ser tomada, em outros a realização deste tipo de política pode trazer consequências indesejadas ao sistema, portanto algumas questões precisam ser avaliadas de modo individual por cada organização, estas considerações são válidas para os outros tipos de políticas de manutenção existentes.

2.2 POLÍTICA ÓTIMA DE MANUTENÇÃO EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO IMPERFEITO.

Uma política de manutenção consiste em estabelecer quais parâmetros (como por exemplo, tempo de operação do maquinário) devem acionar uma ação de manutenção (GOOSSENS; BASTEN, 2015). Determinar uma política ótima de manutenção é uma tarefa crítica em um sistema de produção, porém uma vez estabelecida de acordo com o objetivo estratégico da organização, ela pode contribuir para o aumento da confiabilidade a um custo mínimo por unidade de tempo (incluindo custos de manutenção, qualidade e estoque) (AZADEH et al., 2017).

De acordo com Wang (2002), normalmente uma política ótima de manutenção do sistema pode fornecer:

- ✓ A Minimização da taxa de custo de manutenção do sistema;
- ✓ A Maximização das medidas de confiabilidade do sistema;

- ✓ Minimizar o custo de manutenção do sistema e atender ao mesmo tempo os requisitos de confiabilidade do sistema;
- ✓ Maximizar os requisitos de confiabilidade do sistema ao mesmo tempo em que são atendidos os critérios de manutenção do sistema.
- ✓ Maximiza as medidas de confiabilidade do sistema quando os requisitos para a manutenção do sistema custo são satisfeitos.

Segundo Wayenbergh e Pintelon (2002), as políticas ótimas de manutenção foram surgindo ao longo do tempo e logo foram implementadas, entre elas podemos destacar a manutenção baseada em falha (FBM), manutenção baseada em uso (UBM), manutenção baseada em condição (CBM), manutenção de projeto (DOM) e manutenção baseada em detecção (DBM).

Em sistemas de produção imperfeito, as políticas ótimas de manutenção devem estabelecer um plano de manutenção adequado, determinando assim (por exemplo, a capacidade da equipe de manutenção, tempo e intervalo entre inspeção e preparação do equipamento para o trabalho (SHAFIEE; PATRIKSSON; CHUKOVA, 2016). A otimização da política de manutenção surge da necessidade das indústrias em aumentar a confiabilidade/disponibilidade dos equipamentos ao menor custo possível de manutenção (SHAFIEE; FINKELSTEIN, 2015).

Esta relação principalmente entre confiabilidade e custo em sistemas de produção imperfeito pode ser justificada pelo fato de que a longo prazo a maior parte dos sistemas de produção se deterioram, como consequência sua confiabilidade pode ser reduzida e a produção de itens defeituosos pode aumentar (SARKAR; SANA; CHAUDHURI, 2011). O aumento dos itens defeituosos pode gerar custos extras para a organização, como é o caso dos gastos com retrabalho. Deste modo, uma política ótima de manutenção pode ser utilizada para tratar preventivamente a deterioração do sistema (CHENG; ZHOU; LI, 2018).

2.3 POLÍTICAS INTEGRADAS ENTRE MANUTENÇÃO, PRODUÇÃO E QUALIDADE

Nas últimas três décadas, as indústrias começaram a perceber que para gerenciar de forma adequada a função de manutenção, seria necessário introduzi-la no plano organizacional e realizar o seu gerenciamento de modo integrado com outras funções organizacionais (PINTELON; GELDERS, 1992). Nesta perspectiva, alguns pesquisadores e gestores afirmam que o desenvolvimento de estratégias que envolvem uma integração entre as funções (de

manutenção, produção e qualidade) são consideradas mais eficazes do que estratégias que dissociam estas funções (GOUJIAA-MTIBAA et al., 2018).

De acordo com Beheshti; Nourelfath e Gendreau (2017) funções de manutenção, produção e qualidade estão diretamente relacionadas. A manutenção do processo é um dos fatores que mais influenciam a qualidade do produto (WANG, 2013). Assim, por exemplo, danos causados por deterioração em sistemas cujas linhas de produção são altamente automatizadas e integradas podem afetar não só as condições de operação do sistema, mas a qualidade dos produtos (AGHEZZAF; KHATAB; TAM, 2016). Portanto, além do planejamento da manutenção e a programação da produção, é cada vez mais importante considerar os seus efeitos na qualidade dos produtos (CHENG; ZHOU; LI, 2018).

A determinação de programas de manutenção integrado aos objetivos estratégicos das indústrias pode envolver inicialmente um maior planejamento para a organização, porém os benefícios proporcionados pela sua adoção podem superar estes contratempos iniciais, benefícios estes que podem ser destacados principalmente pelo aumento da eficiência de máquinas e equipamentos, proporcionando assim, um aumento da confiabilidade do sistema, o aumento da segurança dos operadores, aumento da qualidade dos produtos fabricados, uma vez que reduz a probabilidade de que o sistema mude de um estado de controle para um estado fora de controle, redução dos custos de retrabalho, redução dos custos de paradas de produção, entre outros benefícios (LIAO, 2012).

Logo, manter as condições de operação dos equipamentos em um sistema de produção pode ser mais econômico, proporcionando assim melhorias na organização que podem refletir em maior vantagem competitiva (BEN-DAYA, 2002). Apesar de ser comprovado a interação existente entre as funções de manutenção, produção e qualidade e o seu impacto nas decisões organizacionais poucas indústrias consideram a integração entre estas três funções no planejamento de operações (CHENG; ZHOU; LI, 2018).

A consequência de não alinhar o planejamento da manutenção e produção, podem resultar em efeitos negativos para o sistema, como por exemplo a determinação de cronogramas de manutenção equivocados, que podem gerar interrupções e perdas de produtividade (GLAWAR et al., 2018). Além destas funções é importante integrar a função de qualidade nos sistemas industriais, uma vez que grande parte das organizações produz itens não conformes (DELLAGI; CHELBI; TRABELSI, 2017).

Glawar et al. (2018) afirmam que os fatores que mais influenciam o desempenho de um sistema de produção são o planejamento da produção, manutenção e gestão da qualidade.

Portanto, para gerenciar adequadamente, funções os gestores e tomadores de decisão devem considerem uma abordagem global, em que estas funções ou parte delas estejam integradas (DELLAGI; CHELBI; TRABELSI, 2017).

2.4 SISTEMAS DE PRODUÇÃO IMPERFEITO

Alguns modelos clássicos desenvolvidos na literatura, tal como de quantidade de produção econômica (EMQ) foram fundamentados na hipótese de que o sistema de produção produz apenas itens de qualidade perfeita, essa hipótese, porém, não retrata a realidade enfrentada por grande parte das organizações (SARKAR; SANA; CHAUDHURI, 2011). Na produção real, apesar da produção se iniciar em um estado “em controle”, onde se produz itens de qualidade perfeita, este estado pode mudar para “fora de controle”, o qual resulta na produção de itens defeituosos (CHIU; CHEN; YANG, 2009).

A mudança no estado do sistema de produção pode depender de vários fatores dentre eles pode-se mencionar excesso de capacidade produtiva, quebras da máquina, problemas com o operador, entre outros (CHEN, 2017). Para Sarkar e Sarkar (2013) a maior parte dos sistemas de produção quando operam a longo prazo tendem a mudar de um estado em controle para um estado fora de controle.

Sendo assim, para evitar a mudança de estado no processo produtivo e suas consequências, pode-se destacar o papel da realização de ações de manutenção preventivas ou corretivas, que a depender da política de manutenção adotada pela empresa, apresentam como objetivo evitar ou minimizar a produção de itens defeituosos. Em algumas organizações dos itens defeituosos produzidos podem ser retrabalhados e posteriormente enviados ao mercado, geralmente este processo ocorre após a produção e tem como característica a recuperação total ou parcial da qualidade do produto, porém apesar dos benefícios esse processo requer um custo adicional a organização (CHEN, 2017).

De acordo com Gouiaa-Mtibaa et al.(2018), a atividade de retrabalho está relacionada ao estado de degradação da qualidade dos itens fabricados, como a degradação de máquinas e equipamentos interfere na qualidade final dos produtos, quanto maior a degradação do equipamento mais itens defeituosos são gerados e conseqüentemente maiores custos de retrabalho. Uma vez que as organizações se preocupam com a redução dos custos totais para obter uma boa margem de lucro, eliminar ou reduzir a produção de itens defeituosos pode resultar em maiores ganhos para a organização.

2.5 MANUTENÇÃO PREVENTIVA EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO IMPERFEITO

A manutenção preventiva tem como objetivo evitar falhas graves cujas consequências podem impactar em altos custos de produção, mantendo assim as condições de máquinas e equipamentos em estado operacional de forma segura (LIAO, 2015). Segundo Lee e Cha (2016) para modelar o efeito das ações de manutenção preventiva é necessário ter como base o seu impacto na taxa de falha, ou seja, o seu impacto nas respectivas:

- ✓ Intensidade de falha / ajuste de taxa;
- ✓ Desaceleração do processo de deterioração;
- ✓ Redução de idade.

A manutenção preventiva geralmente, é realizada em determinados intervalos de tempo pré-estabelecidos, com o intuito de manter as condições operacionais do sistema, evitando assim possíveis falhas e minimizando os custos de operação (LIAO; SHEU, 2011). Portanto, escolhas adequadas de intervalos e níveis de MP podem ajudar a reduzir os custos de produção e melhorar o desempenho do sistema, no entanto determinar o intervalo ótimo para realizar ações de manutenção preventiva é um desafio para a maioria das indústrias.

Para determinar este intervalo ou a frequência ótima em que estas ações de manutenção preventiva devem ser realizadas, é necessário primeiramente entender que o fato de não realizar ou realizar com pouca frequência ações de manutenção, apesar de ter um custo aparentemente baixo com manutenção, podem impactar diretamente o surgimento de falhas e aumento de itens defeituosos, por outro lado realizar várias ações de manutenção com uma frequência relativamente muito alta, apesar de aumentar o desempenho e a confiabilidade do sistema, geralmente resultam em maiores gastos para a organização, a ponto deste tipo de estratégia não ser considerada viável economicamente para a organização. (SHAFIEE; FINKELSTEIN, 2015)

DO et al. (2015) afirmam que determinar o período ótimo para a execução da manutenção preventiva de maneira a minimizar o custo total de manutenção é uma decisão difícil para a organização e que a mesma deve ser estabelecida de acordo com os objetivos e critérios de cada sistema de produção específico. Como a função da manutenção preventiva (PM) tem o intuito de evitar falhas quando o sistema está operando, a determinação precisa da realização de atividades de manutenção preventiva em períodos considerados ótimos, pode proporcionar benefícios a organização, fornecendo suporte as operações normais e contínuas do sistema produtivo (CHANG, 2014).

De acordo com Dhouib et al.(2012), o papel da manutenção preventiva é reduzir a transferência do estado de controle para o estado fora de controle e conseqüentemente reduzir a produção de itens não conformes. Para Sarkar (2012), geralmente no início da produção o sistema se encontra no estado de controle, neste estado é assumido que os itens produzidos são perfeitos, com o passar do tempo o sistema pode mudar para o estado fora de controle, resultando na produção de itens não conformes.

Portanto, a não priorização de ações de manutenção preventiva em ambientes industriais, ou até mesmo a realização destas ações em intervalos inadequados, podem resultar em transferências mais rápidas do estado de controle para o estado fora de controle, como consequência a organização pode ter perdas no processo produtivo decorrente de falhas nas suas máquinas/equipamentos e aumento no número de itens defeituosos ou da produção excedente não desejável (AGHEZZAF; KHATAB; TAM, 2016).

2.6 AÇÕES DE INSPEÇÃO EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO IMPERFEITO

As atividades de inspeção geralmente são realizadas logo após a fabricação dos produtos, com o intuito de detectar itens defeituosos que poderão ser descartados ou retrabalhados pelo processo produtivo e itens perfeitos que usualmente são estocados e revendidos aos clientes (TAI, 2013). A qualidade dos produtos pode ser comprovada através de uma inspeção perfeita no sistema, porém implementar esse tipo de inspeção nem sempre é possível, devido principalmente a erros humanos que podem ocorrer durante a sua execução ou porque simplesmente algumas máquinas não permitem a inspeção total (SARKAR e SAREN, 2016).

Pesquisas anteriores não consideram erros de inspeção em sistemas produtivos e os transtornos relacionados as suas consequências, como por exemplo a devolução de produtos por falta de qualidade e a insatisfação do cliente com a empresa, atualmente problemas voltados a ocorrência dos erros de inspeção e seu impacto na qualidade final dos produtos é melhor retratada (TAHERI, et al 2011). Os erros de inspeção que ocorrem nos sistemas de produção podem ser classificados em dois tipos denominados de erro tipo I e erro tipo II, no erro tipo I a inspeção classifica os itens como perfeitos quando na realidade eles deveriam ser tratados como defeituosos, já no erro tipo II a inspeção não consegue identificar os itens defeituosos (YOO et al., 2009).

É importante considerar estes erros e se possível evitá-los a fim de impedir que a indústria revenda produtos defeituosos para os clientes, a inspeção realizada de maneira adequada pode assegurar a qualidade dos itens produzidos de acordo com as especificações do consumidor

(HUANG; LIN; HO, 2013). Geralmente em um sistema de produção a realização de uma atividade de manutenção preventiva só ocorre depois que um determinado número de inspeções for realizado (DRIESSEN; PENG; VAN, 2017).

Para um sistema de produção atingir um máximo de rendimento esperado é fundamental que as instalações ou equipamentos estejam disponíveis para produção, portanto interrupções causadas principalmente por desgaste de equipamentos/máquinas e eventuais quebras contribuem para a redução do seu rendimento (PANDEY; KULKARNI; VRAT, 2012).

Portanto, desenvolver uma política de inspeção alinhada aos objetivos estratégicos da organização pode auxiliar na determinação do número de inspeções ótimas antes de realizar uma manutenção preventiva, reduzindo assim os custos de realizar atividades de manutenção desnecessárias (HUANG; LIN; HO, 2013). Além disso, um programa de inspeção e reparo adequado pode evitar gastos de retrabalho e ajudar a manter uma imagem positiva do produto aos seus clientes.

2.7 MÉTODOS DE APOIO A DECISÃO MULTICRITÉRIO

Durante o planejamento e avaliação de políticas ótimas em um sistema de produção imperfeito, não se deve considerar apenas o critério econômico, que apesar da sua importância não abrange alguns aspectos importantes a produção. Assim, um outro critério avaliado nesta pesquisa será o AOQ (qualidade média de saída). Tal critério representa o número médio de itens defeituosos que devem ser enviados ao mercado. Desta forma, para atender as expectativas do consumidor, o sistema não deve exceder um número máximo de itens defeituosos repassados ao mercado (LOPES, 2018). Apesar dos benefícios relacionados a qualidade, o critério AOQ requer um maior investimento para sua implementação e controle, o que pode comprometer os custos totais da produção (KAHRAMAN; KAYA, 2010).

Segundo De Almeida (2013), quando não é possível representar os objetivos de um problema através de uma única métrica, como unidades monetárias, por exemplo, faz-se necessário o uso de métodos MCDA. Assim o processo decisório que envolve a determinação de políticas ótimas integradas entre as áreas de manutenção e sistemas de produção imperfeitos será abordado nesta pesquisa sob uma perspectiva multidimensional realizado com o auxílio de um dos métodos de apoio a decisão multicritério melhor relacionados a está problemática.

Alguns autores classificam os métodos de apoio a decisão multicritério em três importantes categorias: Critério Único de Síntese, Sobreclassificação e Interativos (ROY, 1996; VINCKE, 1992; PARDALOS et al. 1995; KEENEY; RAIFFA, 1976).

- Critério Único de síntese: Os critérios existentes neste modelo são agregados em um único critério de síntese. A natureza compensatória está presente nos métodos deste grupo, onde o baixo desempenho obtido em um critério pode ser compensado por um bom desempenho obtido em outro critério, como exemplo pode se destacar o (MAUT) Teoria da Utilidade Multiatributo. (KEENEY; RAIFFA, 1976).
- Métodos de sobreclassificação: Estes métodos são caracterizados por uma relação de sobreclassificação entre as alternativas e diferente do método anterior este não apresenta um caráter compensatório entre os critérios. Entre os métodos deste grupo destacam-se os métodos da família ELECTRE e PROMETHEE (ROY, 1996; VINCKE, 1992).
- Métodos Interativos: Estes métodos apresentam etapas alternadas de cálculos, onde informações extras sobre a preferência do decisor são obtidas (VINCKE, 1992).

Os métodos MCDA foram desenvolvidos para casos específicos, portanto não existe único método aplicável a todas as possíveis problemáticas, cada um deles possui vantagens e limitações que são melhor aplicáveis a cada situação (SITORUS; CILLIERS; BRITO-PARADA, 2018).

Entre os métodos do grupo critério único de síntese pode-se destacar o AHP (Analytic Hierarchy Process), SMARTS/SMARTER (Simple Multi-Attribute Rating Technique), MAUT (Multi Attribute Utility Theory), Modelo Aditivo determinístico e o aditivo com Veto. (DE ALMEIDA, 2013).

O Modelo aditivo com veto aditivo será aplicado nesta pesquisa, além da sua característica compensatória, este método se destaca pela vasta quantidade de aplicações na literatura, principalmente em problemas referente a logística e cadeia de suprimentos. A estrutura para aplicação deste método e os seus principais conceitos serão melhor contextualizados no tópico 2.7.1.

2.7.1 Modelo Aditivo com Veto

Modelos aditivos apresentam caráter compensatório em relação aos critérios estabelecidos no modelo, porém nem sempre esse efeito compensatório atende a estrutura de preferencias do decisor, existem casos em que o decisor não aceita um desempenho muito inferior de uma alternativa em um dado critério, ou seja, mesmo que o valor global desta alternativa seja maior o suficiente para justificar a sua aceitação, mesmo assim o decisor pode não se sentir satisfeito com a escolha desta alternativa, principalmente tendo conhecimento de

que o aumento do valor global só foi possível graças a compensação obtida em outros critérios. (DE ALMEIDA, 2013).

Para estes casos, em que o decisor pode não se sentir satisfeito com a escolha da alternativa devido a compensação do modelo, De Almeida (2013) propõe o modelo aditivo com veto. Este veto é determinado pela união da função de veto e do modelo aditivo. Para Moulin (1981) a função de veto é baseada na concepção de escolha social, assim esta função indica a quantidade de alternativas que serão vetadas para cada conflito de DMs, após este conflito tais alternativas vetadas serão penalizadas. Além disso, os níveis de veto representam os limites para aceitar o desempenho de uma determinada alternativa em algum critério (DE LIMA; CLEMENTE; DE ALMEIDA, 2016). Estes níveis são identificados como limite superior e inferior de veto.

- Limite superior (u_i): Trata-se do valor mínimo de desempenho $v_i(a)$ o qual determinada alternativa deve apresentar em um critério i para ser aceita pelo decisor.
- Limite Inferior (l_i): Determina o valor máximo de desempenho $v_i(a)$ no critério i , alternativas com valor igual ou inferior a este limiar certamente serão rejeitadas pelo decisor, mesmo que apresentem um bom desempenho nos outros critérios.

Segundo De Almeida, (2013) o decisor poderá aceitar uma alternativa quando o seu desempenho $v_i(a)$ no critério i apresentar valor igual ou superior a (u_i), entretanto existem situações em que o decisor pode hesitar a aceitação de uma alternativa, isto acontece quando o seu desempenho $v_i(a)$ encontra-se a baixo do limiar superior, para estes casos a função de veto $z_i(a)$ entre 0 e 1 passa a ser considerada entre os limiares (l_i) e (u_i). A função de veto $z_i(a)$, para o critério i , é apresentada conforme a Equação (2.1).

$$z_i(a) = \begin{cases} 0, & \text{se } v_i(a) \leq l_i \\ 1, & \text{se } v_i(a) \geq u_i \\ \frac{v_i(a) - l_i}{u_i - l_i}, & \text{se } u_i < v_i(a) < l_i \end{cases} \quad (2.1)$$

Nesta pesquisa, o método aditivo com veto para a problemática de ordenação é considerado mais adequado do que a abordagem voltada a problemática de escolha. De acordo com (Roy, 1996) para a problemática de ordenação, o fator considerado mais relevante para o decisor é a posição das alternativas no ranking entre as avaliadas, assim a função de veto ao

invés de rejeitar a alternativa, poderá vetar a sua posição no ranking. A princípio, a função de veto é ponderada para cada critério i de acordo com a sua respectiva constante de escala k_i , no qual a alternativa está sendo vetada. A função ponderada de veto pode ser demonstrada a seguir.

$$r_i(a) = z_i(a) \cdot k_i \quad (2.2)$$

Já o índice de veto $r(a)$ para a alternativa (a) será obtido através da soma das funções ponderadas de veto para todos os critérios. Este índice é dado pela seguinte equação (2.3).

$$r(a) = \sum_{i=1}^n r_i(a) \quad (2.3)$$

O comportamento deste índice pode ser descrito a seguir:

- 1, caso seja aceitável o desempenho da alternativa para todos os critérios.
- Entre 0 e 1, se a alternativa for parcialmente vetada. Nos casos onde o valor da função de veto $z_i(a) = 0$, este índice é adaptado para $1 - k_i$ para o critério i , dessa forma ocorre uma redução no valor da alternativa que está sendo vetado, esta redução deve ser proporcional ao peso do critério avaliado para a alternativa.
- 0, caso seja inaceitável o desempenho da alternativa para todos os critérios.

Portanto, o resultado da inserção da função ponderada de veto em (2.3) no modelo aditivo determinístico fornecerá o modelo aditivo com veto para a problemática de ordenação, conforme pode ser visto em (2.4).

$$v'(a) = r(a) \cdot \sum_{i=1}^n k_i \cdot v_i(a) \quad (2.4)$$

De Almeida (2013) afirma que o uso do modelo aditivo com veto em alguns casos pode ser mais satisfatório para o decisor do que o método aditivo determinístico. Nesta pesquisa, a sua utilização é justificada devido a possibilidade de penalização das alternativas que não apresentam um desempenho aceitável para o decisor em algum critério avaliado, a penalização reduz o valor global da alternativa e pode alterar a sua posição no ranking entre as alternativas avaliadas, com isso a função de veto pretende minimizar alguns problemas causados pela natureza compensatória do modelo aditivo.

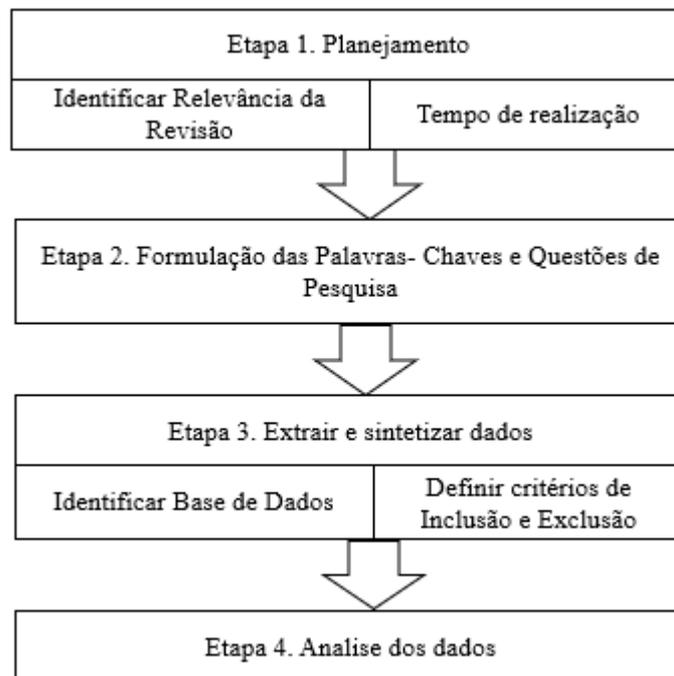
Nesta pesquisa, o modelo aditivo com veto será aplicado com o propósito de estabelecer políticas ótimas integradas em sistemas de produção imperfeito, com o intuito de auxiliar os gestores na tomada de decisão considerando os critérios de AOQ e custo.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Esta seção apresenta uma revisão sistemática da literatura sobre modelos integrados entre manutenção e sistema de produção imperfeito publicados entre os anos de 2000 e 2018. Segundo Kitchenham (2004) uma revisão sistemática da literatura pode ser entendida como um método para analisar e explorar todas as pesquisas consideradas relevantes para um determinado setor de estudo ou fenômeno de interesse. Desta forma, a partir de uma revisão sistemática da literatura sobre políticas integradas entre manutenção e sistemas de produção imperfeito pretende-se avaliar e discutir como este tema está sendo abordado entre os pesquisadores e os principais avanços na área.

O procedimento utilizado para realizar esta revisão sistemática baseou-se em algumas metodologias propostas por Ruschel; Santos e Loures (2017), De Almeida *et al.* (2017) e Palmarini *et al.* (2018). As quatro etapas que conduzem esta revisão podem ser definidas em: Planejamento; Formulação de palavras-chaves; Extrair e Sintetizar os dados e Análise dos dados, cada uma delas pode ser melhor visualizado através do Fluxograma 1.

Fluxograma 1- Etapas da Revisão Sistemática da Literatura



Fonte: A Autora (2019)

3.1 PLANEJAMENTO

Nesta etapa é importante compreender a relevância de se realizar uma revisão sistemática da literatura sobre políticas integradas entre manutenção e sistemas de produção imperfeito. Segundo Palmarini et al.(2018), através de uma revisão sistemática é possível identificar lacunas na literatura que podem fornecer evidências para possíveis trabalhos futuros. Portanto, com o auxílio da revisão pretende-se obter um maior conhecimento das tendências e dificuldades encontradas na literatura, de modo a centralizar esforços para o desenvolvimento desta pesquisa (RUSCHEL; SANTOS; LOURES, 2017). Além disso, definiu-se um tempo de 3 meses para a realização desta revisão, a partir desta previsão pode-se definir um melhor planejamento da conclusão das etapas definidas na metodologia desta revisão.

3.2 FORMULAÇÃO DAS PALAVRAS CHAVES

As palavras-chaves formuladas nesta pesquisa foram obtidas através de uma busca inicial na literatura que pretendia identificar a partir da análise preliminar de artigos relacionados ao tema da pesquisa as principais palavras-chaves utilizadas pelos autores, buscou-se também analisar a frequência com que estas eram citadas, assim baseados nesse análise inicial e com o conhecimento prévio do assunto foi possível formular a combinação de palavras-chaves utilizadas nesta pesquisa, estas combinações são apresentadas abaixo:

1. Joint optimal policy AND Inspection;
2. Joint optimal policy AND Preventive Maitenance;
3. Joint optimal policy AND Quality Control;
4. Imperfect production system AND Inspection;
5. Imperfect production system AND Quality Control;
6. Imperfect production system AND Quality;
7. Maintenance and Imperfect production.

Com base nos aspectos vistos nos artigos através da análise preliminar podemos formular as questões da pesquisa que devem ser respondidas através da revisão da literatura:

Q1: Como os modelos evoluíram em termos de aumento no número de publicações?

Q2: Quais os países de instituição dos autores possuem maior número de publicações sobre o tema?

Q3: Quais as ferramentas e métodos mais utilizados nas publicações?

Q4: Quais as tendências futuras das pesquisas em relação a este tema.

3.3 EXTRAIR E SINTETIZAR OS DADOS

Com o objetivo de encontrar artigos para a revisão sistemática realizou-se inicialmente uma seleção dos Bancos de Dados que serão utilizados nesta pesquisa, isto foi feito através de uma avaliação de disponibilidade e eficiência de alguns deles, resultando assim na seleção dos seguintes bancos de dados: Ieee Xplore, Elsevier e Web of Science - Isi Web of Knowledge. Após a definição dos bancos de dados e das palavras-chaves, iniciou-se uma busca preliminar por artigos, tal busca retornou um total de 1464 artigos que posteriormente foram reduzidos para 101. Estes artigos que permaneceram após a aplicação de diversos critérios de exclusão e inclusão são considerados pelo autor como de alta importância para a pesquisa, sendo utilizados para responder as questões do estudo (PALMARINI et al., 2018).

Os critérios de inclusão e exclusão definidos nesta pesquisa são:

Os critérios de Inclusão:

- 1) Estudo primário que evolva políticas integradas entre manutenção e sistemas de produção imperfeito;

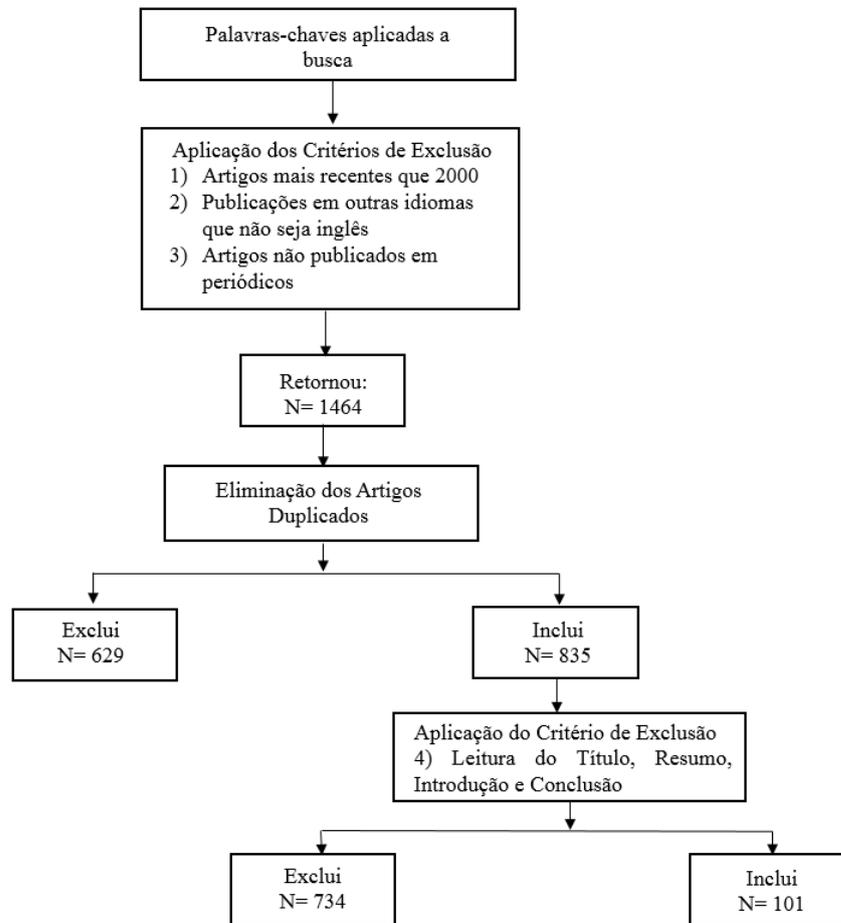
Os critérios de exclusão utilizados:

- 1) Artigos mais antigos, publicados antes de 2000;
- 2) Artigos que utilizam outro idioma diferente do inglês;
- 3) Artigos não publicados em periódicos;
- 4) Artigos que não analisam as políticas de manutenção em sistemas de produção imperfeito.

Os critérios utilizados são baseados nos trabalhos de Palmirini et al.(2018), Ruschel; Santos e Loures (2017) e De Almeida et al. (2017).

Uma sequência de atividades foi realizada para a aplicação desses critérios, estas atividades consistem em utilizar as ferramentas de busca para localizar um número significativo de artigos que foram restritos a alguns critérios de exclusão definidos anteriormente, após esta coleta de artigos utilizou-se a ferramenta de referências Mendeley a fim de eliminar os artigos duplicados encontrados nos bancos de dados, por fim foi aplicado o quarto critério de exclusão que eliminou artigos que não foram considerados relevantes para a pesquisa, nesta última etapa foi realizada uma leitura do título, resumo, introdução e conclusão. Este roteiro de atividades pode ser melhor visualizado através da Figura 2.

Figura 2 - Seleção de artigos primários



Fonte: A Autora (2019)

3.4 ANÁLISE DOS DADOS

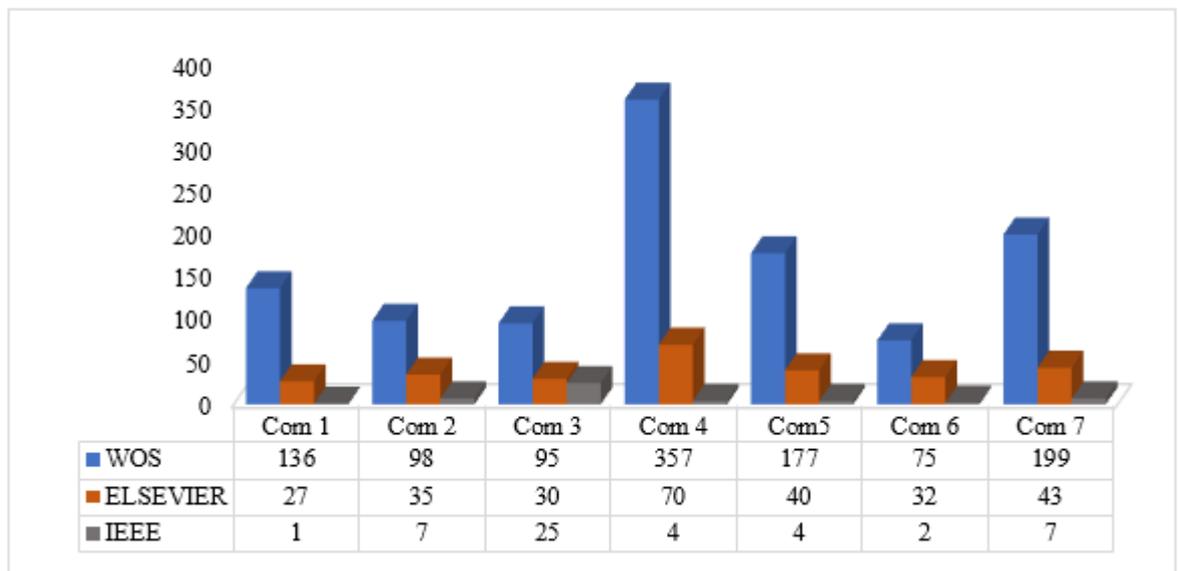
Após a realização dos filtros utilizados acima, os artigos considerados mais relevantes e que atendem as questões de pesquisa serão analisados a fim de extrair suas principais informações. Assim a análise ocorreu de acordo com as revistas em que foram publicadas, o ano da publicação, as variáveis de decisão do problema, os critérios mais relevantes, os métodos utilizados, os países de origem dos autores e as palavras chaves utilizadas. Todas estas avaliações serão desenvolvidas nos tópicos seguintes.

3.4.1 Classificação e Análise dos Modelos Integrados entre Manutenção e Sistemas de Produção Imperfeito

Para a construção da revisão sistemática da literatura, inicialmente foram definidas as palavras-chaves e os bancos de dados onde se retornaria os artigos que posteriormente seriam

analisados, o número de artigos obtidos inicialmente apenas com as restrições de ano, idioma e artigos publicados em periódicos, resultou em quantidades diferentes a depender do tipo de banco de dados pesquisado e da combinação de palavra-chave. Desta forma, cada combinação foi pesquisada nos três bancos de dados utilizados pela pesquisa, as quantidades retornadas em cada uma delas pode ser melhor visualizada através do Gráfico 1.

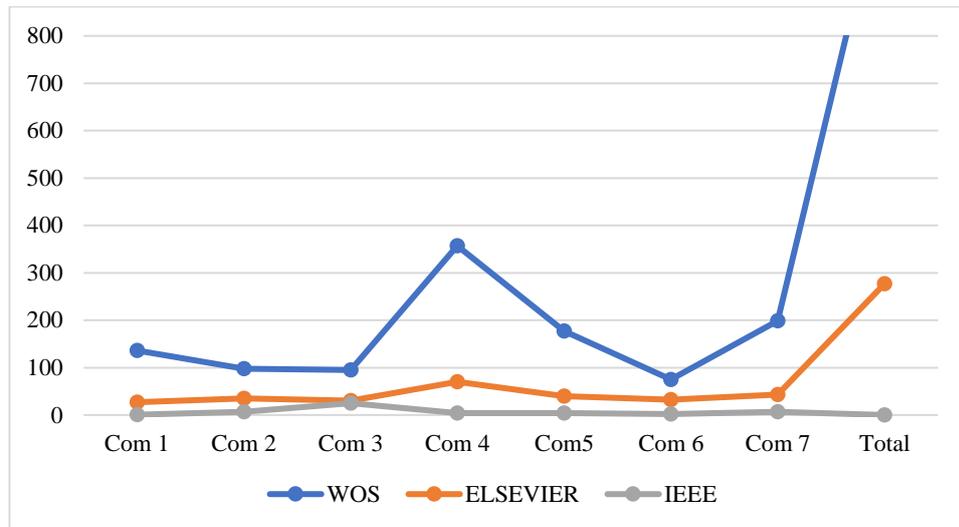
Gráfico 1 - Distribuição de publicações por banco de dados



Fonte: A Autora (2019)

A partir da análise do gráfico é possível verificar que a “combinação 4” Sistema de produção imperfeito e inspeção apresentou o maior número de artigos retornados para o banco de dados da WOS e Elsevier, já a “combinação 3” política ótima conjunta e controle de qualidade retornou o maior número de artigos na plataforma IEEE. O total de artigos obtidos nas três plataformas de acordo com a sua respectiva combinação podem ser melhor visualizados no Gráfico 2.

Gráfico 2 - Total de artigos publicados de acordo com a respectiva combinação



Fonte: A Autora (2019)

É possível observar que o maior número de artigos totais retornados foi obtido pelo banco de dados Web of Science-WOS, sendo assim pode-se demonstrar a eficiência desta base de dados para a obtenção dos resultados nesta fase da pesquisa.

3.4.2 Análise Descritiva

O levantamento de artigos em jornais e revistas, bem como as análises posteriormente desenvolvidas nesta seção consideram apenas os 101 artigos encontrados após a aplicação de todos os critérios de exclusão e inclusão selecionados, ou seja, serão avaliados apenas os artigos considerados relevantes para a pesquisa.

É importante ressaltar que nesta análise de publicações considerou-se revistas com pelo menos uma publicação a respeito do referido tema. A distribuição destes artigos de acordo com as revistas/ jornais, o número de publicações obtidas e a porcentagem das suas respectivas publicações podem ser observadas na Tabela 1:

Tabela 1 - Distribuição das Publicações por Jornal/Revista

Revista	Quantidade	Frequência %
Int. J. Production Economics	13	13%
International Journal of Systems Science	9	9%
International Journal of Production Research	9	9%
European Journal of Operational Research	8	8%
Computers & Industrial Engineering	8	8%
Applied Mathematical Modelling	6	6%
Journal of Manufacturing Systems	4	4%

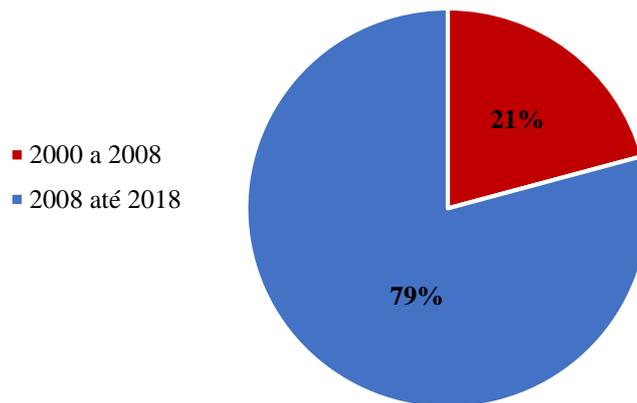
Applied Mathematics and Computation	4	4%
Computers and Mathematics with Applications	3	3%
Reliability Engineering and System Safety	3	3%
Journal of Intelligent Manufacturing	3	3%
Economic Modelling	2	2%
Omega	2	2%
Computers & Operations Research	2	2%
IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems	2	3%
Naval Research Logistics	2	2%
Engineering Optimization	2	2%
Journal of the Operational Research Society	2	2%
Outras revistas com uma publicação	17	17%

Fonte: A Autora (2019)

A partir desta Tabela 1 é possível identificar que a maioria dos artigos encontrados nesta pesquisa foram publicados nas revistas *International Journal of Production Economics*, *International Journal of Systems Science*, *International Journal of Production Research*, juntas elas representam 31% do total de publicações analisadas neste estudo.

É importante observar também a partir de uma análise temporal dos artigos publicados entre 2000 e 2018 que houve um aumento no número de publicações sobre o tema desta pesquisa, este fato pode demonstrar maior relevância do tema entre os autores na última década. O Gráfico 3 mostra a distribuição dos artigos por década.

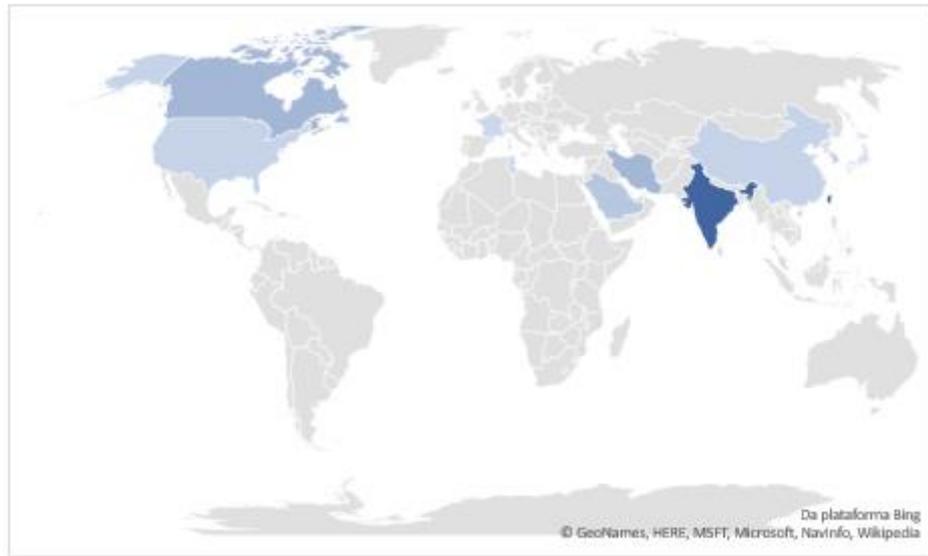
Gráfico 3 - Distribuição dos artigos na última década



Fonte: A Autora (2019)

Também é interessante analisar a distribuição dos artigos por país de instituição dos autores, no total as pesquisas são distribuídas em 16 países, tendo maior concentração de publicações os países que apresentam um tom mais escuro no Mapa 1.

Mapa 1- Distribuição das pesquisas pelo mundo



Fonte: A Autora (2019)

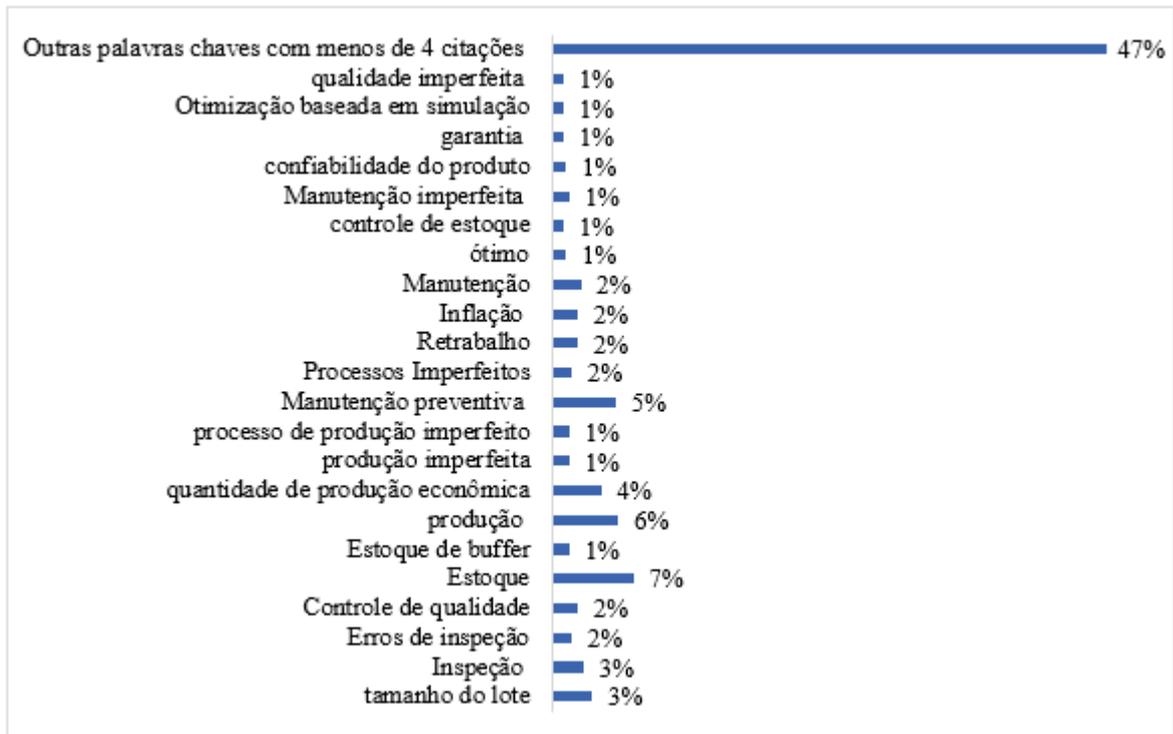
Taiwan, Índia, Irã e Canadá são os países com maior número de publicações, (Taiwan apresenta 27 artigos publicados, Índia com 24, em seguida temos Irã e Canadá com 9 publicações cada um, Arábia Saudita com 6, USA, Coreia do Sul e China contam com 4 publicações do total, Tunísia, Hong Kong e França com 3 e os demais apresentam apenas 1 artigo publicado.

Após uma análise temporal e geográfica dos artigos, as palavras chaves, os critérios, as variáveis de decisão e os métodos utilizados também serão avaliadas, a fim de obter mais detalhes sobre as características das publicações.

3.4.3 Palavras Chaves Consideradas nos Artigos

As palavras-chaves identificadas em cada periódico também foram avaliadas nesta pesquisa, como elas são consideradas instrumentos de busca a sua combinação pode auxiliar o leitor a realização de pesquisas sobre o tema desta pesquisa ou até mesmo incitar os pesquisadores para elaboração de trabalhos futuros. As palavras-chaves mais utilizadas entre os artigos avaliados nesta pesquisa podem ser observadas conforme o Gráfico 4.

Gráfico 4 - Palavras- Chaves mais frequentes entre os artigos



Fonte: A Autora (2019)

A partir deste gráfico é possível identificar que as palavras-chaves mais utilizadas pelos artigos são “Estoque” com (7%) do total de palavras-chaves mais frequentes, em seguida temos a palavra “Produção” que se apresenta com (6%) do total de artigos retornados, “Manutenção Preventiva” aparece com (5%) entre o total de artigos avaliados, logo após temos “Quantidade de produção econômica” que possui (4%) de representatividade entre todas as palavras-chaves obtidas e analisadas nesta pesquisa, o restante das palavras-chaves obtidas que tiverem menos de sete citações para o total de artigos coletados e por isso foram reunidas em uma única categoria que representa (59%) do total de palavras-chaves obtidas.

3.4.4 Variáveis de Decisão Consideradas na Formulação dos Problemas

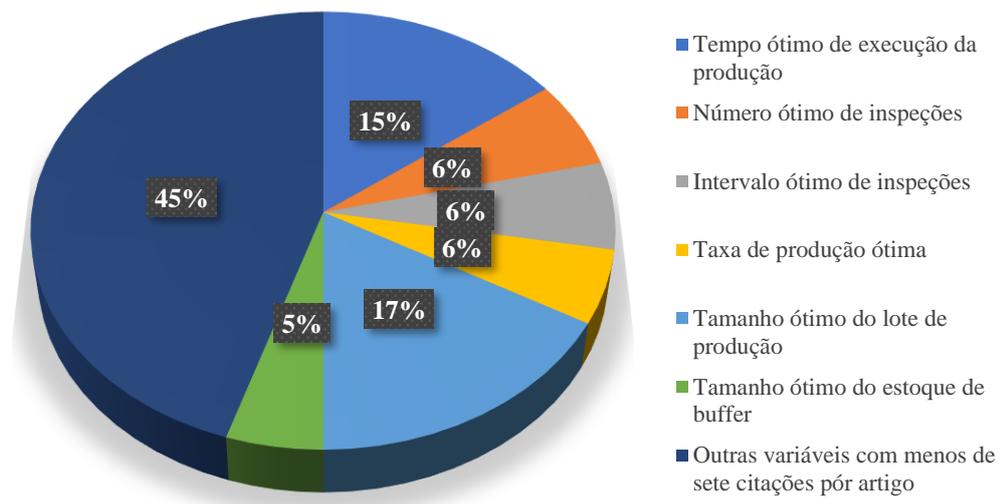
Para que um sistema de produção possa obter um desempenho considerado satisfatório as várias funções da organização precisam também executar suas atividades de modo satisfatório, entre as várias funções existentes a de manutenção se destaca principalmente pelas vantagens proporcionadas a produção quando ela é realizada de modo adequado na organização, tais vantagens podem ser mencionadas como melhoria da qualidade dos produtos e redução de custos que estão associados ao aumento do rendimento e da confiabilidade do sistema

(PANDEY; KULKARNI; VRAT, 2011). Portanto, alinhar os objetivos da produção com a sua política de manutenção, torna-se de fundamental importância para garantir a eficiência do equipamento evitando com que ações como deterioração prejudiquem a produção.

As variáveis de decisão consideradas em um modelo dependem muito das particularidades do sistema. Além disso o tipo de variável de decisão determinará os critérios utilizados. Nesta pesquisa, os artigos avaliados apresentaram apenas dois critérios, minimizar o custo e maximizar o lucro, dos quais, 81 artigos (80,2%) do total, apresentam o critério minimizar o custo e o restante 20 artigos (19,8%) do total, correspondem ao critério maximizar o lucro.

Em relação as variáveis de decisão obtidas nesta pesquisa, identificou-se que as variáveis mais utilizadas são “Tamanho ótimo do lote de produção” que aparece em (17%) do total de artigos avaliados e “Tempo ótimo de execução da produção” com retorno de (15%) entre o total abordado, o Gráfico 5 mostra a distribuição das variáveis de decisão mais utilizadas nesta pesquisa.

Gráfico 5 - Distribuição das Variáveis de Decisão



Fonte: A Autora (2019)

É possível também identificar que a maior parte dos artigos avaliados apresentam mais de uma variável de decisão, desta forma artigos com duas variáveis de decisão representam (54%) entre o total avaliado, (31%) apresentam três variáveis de decisão e apenas (15%)

possuem quatro ou mais variáveis de decisão. O ano de publicação destes artigos também demonstra que as publicações com mais de duas variáveis de decisão são mais recentes, o que pode justificar um aumento na utilização de variáveis de decisão por parte dos autores.

Com relação as variáveis de decisão mais utilizadas percebeu-se entre os artigos avaliados que o sistema tende a se deteriorar com o passar do tempo ou o aumento da taxa de produção, essa ação de deterioração implica muitas vezes em redução da confiabilidade do sistema e há um provável deslocamento do estado do sistema para fora de controle. Geralmente, no estado fora de controle ocorre a produção de itens defeituosos (SARKAR; SANA; CHAUNDHURI, 2011). Desta forma, torna-se de grande relevância para as organizações determinar o tempo ótimo de execução da produção a fim de diminuir a ação de deterioração dos equipamentos e manter a qualidade dos itens produzidos.

O tamanho do lote de produção também influencia as ações de manutenção, uma vez que estas ações podem ocorrer após a produção do lote, logo o tamanho do lote determinará em alguns casos os intervalos de manutenção (LIAO, 2015).

3.5 DISCUSSÃO DA LITERATURA

Neste capítulo foi apresentado uma revisão da literatura com foco nas decisões integradas entre manutenção e sistemas de produção imperfeito. Para atingir tais objetivos foram utilizados alguns filtros temporais, além de critérios de exclusão e inclusão que conduziram a seleção e posterior análise de artigos. A contribuição desta revisão se refere a execução de abordagens teóricas e estatísticas dos artigos avaliados que permitiram um maior embasamento sobre o tema desta pesquisa. Além de uma perspectiva atual e tendências futuras dos artigos avaliados. Segundo os resultados obtidos após a revisão alguns pontos podem ser melhor discutidos:

- O crescente interesse dos autores no tema desta pesquisa, principalmente em alguns países como: Taiwan e Índia. Outra importante constatação é o aumento do número de variáveis de decisão utilizadas nos artigos publicados recentemente, o que indica uma tendência no aumento da complexidade envolvendo a modelagem de decisões integradas entre manutenção e sistemas de produção imperfeito para pesquisas futuras.
- Além disso, pode-se destacar a ausência de artigos que avaliam as decisões integradas entre manutenção e sistemas de produção imperfeito sob a perspectiva de mais critérios, além do financeiro. Neste contexto, foi identificado uma lacuna de pesquisa para o desenvolvimento do modelo proposto nesta pesquisa, em que

além do custo, a qualidade tratada sob o critério AOQ (Qualidade média de saída) também será utilizada para avaliar as decisões integradas entre manutenção e sistemas de produção imperfeito.

4 MODELO PROPOSTO

Este capítulo abrange a construção de um modelo de apoio a decisão multicritério que pretende auxiliar os gestores na tomada de decisão por meio da priorização de políticas integradas entre manutenção e sistemas de produção imperfeito, considerando os critérios AOQ e custo.

4.1 MODELO MULTICRITÉRIO PARA DECISÕES INTEGRADAS ENVOLVENDO SISTEMAS DE PRODUÇÃO IMPERFEITO E MANUTENÇÃO

Em alguns processos produtivos é comum o surgimento de itens defeituosos. A origem de tais itens pode estar associada a diversos a diversos fatores, entre eles: humanos, matéria prima, paradas de produção, entre outros. Geralmente, o problema da não conformidade é atribuído ao setor de qualidade, porém em muitos casos este problema pode estar associado ao desempenho de outros setores, como, por exemplo, o de manutenção.

Com o intuito de garantir a qualidade pretendida, atingir uma maior eficiência do sistema de produção e redução dos custos operacionais, a integração entre qualidade, manutenção e produção torna se imprescindível (BOUSLAH; GHARBI e PELLERIN, 2016). A qualidade final do produto pode em alguns casos ser comprometida a depender do estado em que a produção se encontra, geralmente quando o sistema de produção está em estado fora de controle ocorre a produção de itens defeituosos (SALAMEH; JABER, 2000).

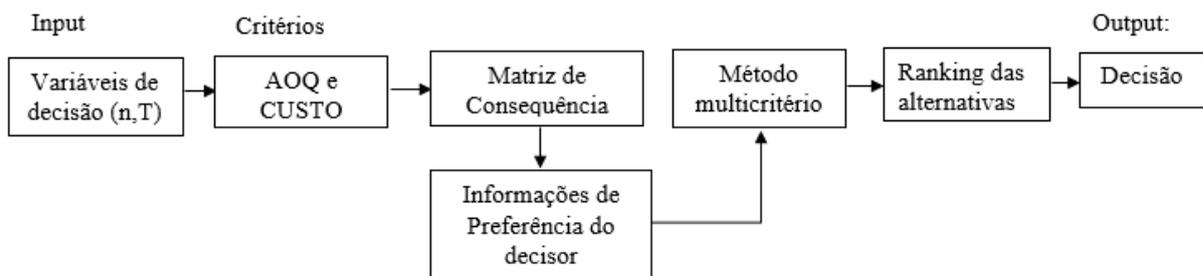
Deste modo, identificar o estado do processo e um aumento do número de itens defeituosos produzidos é de fundamental importância para o controle de qualidade. Segundo Giri e Chakraborty (2007), o estado do sistema de produção só pode ser identificado a partir de ações de inspeção durante o ciclo de produção. Neste contexto, a realização de inspeções com frequência pode auxiliar na identificação da quantidade de itens defeituosos repassados aos clientes. Caso tal quantidade ultrapasse um determinado limiar permitido ações restaurativas serão realizadas de modo a contribuir com uma melhoria na qualidade média de saída dos produtos (AOQ).

No entanto, realizar inspeções gera custo, que pode em alguns casos não compensar a qualidade retornada. Por outro lado, realizar inspeções insuficientes pode provocar uma perda de qualidade final dos produtos que chega a ser imensurável para a organização. Sendo assim, este modelo pretende auxiliar na tomada de decisão dos gestores, através da determinação de

políticas integradas envolvendo decisões de inspeção e tempo de execução da produção que impactam a qualidade final do produto e o seu custo.

Neste contexto, um modelo foi desenvolvido para auxiliar os gestores de manutenção a definir políticas de manutenção considerando sistemas de produção imperfeito. O uso da abordagem multicritério neste modelo pretende auxiliar na priorização de tais políticas com maior desempenho entre os critérios avaliados. Deste modo, esta abordagem contribui para a obtenção de resultados otimizados, levando em consideração a preferência do decisor em contextos onde mais de um critério deve ser avaliado. A estrutura do modelo proposto pode ser observada através da Figura .

Figura 3 – Modelo Proposto



Fonte: A Autora (2019)

O processo de tomada de decisão consiste em determinar o número de inspeções, n , e o tempo de execução da produção, T , em um ciclo de produção $P.T$, de modo a maximizar o critério AOQ (*Average Outgoing Quality*) e minimizar o critério custo.

A estruturação do modelo proposto pode ser definida seguindo algumas etapas:

1. Alguns valores de inspeção e tempo de execução da produção são avaliados para cada critério, estes valores podem ser observados em uma matriz de consequências;
2. Conforme a ordem de preferência dos critérios definida pelo decisor é aplicado o método multicritério aditivo com veto, tal método fornece um ranking entre as alternativas avaliadas segundo o desempenho obtido nos critérios estabelecidos.
3. A partir dos resultados obtidos pelo método é possível obter a política integrada entre manutenção e sistemas de produção imperfeito.

A notação utilizada para o desenvolvimento do modelo é apresentada a seguir:

$C_h(>0)$	Custo de estoque por unidade de produto por unidade de tempo
$C_m(>0)$	Custo de manutenção preventiva
$C_p(>0)$	Reparação completa / custo de substituição na falha de um produto
$C_s (>0)$	Custo de Setup
$D(>0)$	Taxa de demanda
$f_x(.)$	Função de densidade de probabilidade de falha no tempo para um turno de processo.
$F_x(.)$	Função de distribuição cumulativa de falha no tempo para um turno de processo.
$\bar{F}_x(.)$	Função de Confiabilidade
$h_1(t)$	Taxa de risco de um item em conformidade
$h_2(t)$	Taxa de risco de um item não conforme $h_2(t) \gg h_1(t)$, $0 < t < \infty$;
$n(\geq 1)$	Número de inspeções realizadas durante um período de produção
N_f	Número de itens não conformes produzidos durante cada ciclo de produção
$P(>0)$	Taxa de produção
$R(.)$	Custo de restauração que é uma função do atraso na detecção;
$S(w)$	Aumento no nível de estoque por unidade de tempo
$T(>0)$	Tempo de execução da produção
$v (>0)$	Custo de cada inspeção
$w (>0)$	Período total de garantia
$W_1(<w)$	Período FRW
$\bar{w}, \underline{w}(>0)$	Limite superior e inferior de w
X	Variável aleatória denotando o tempo para uma mudança em um processo
θ_1	Probabilidade de que um item produzido no estado 'em controle' não esteja em conformidade $0 \leq \theta_1 < 1$.
$\theta_2 (>\theta_1)$	Probabilidade de que um item produzido no estado "fora de controle" não esteja em conformidade.

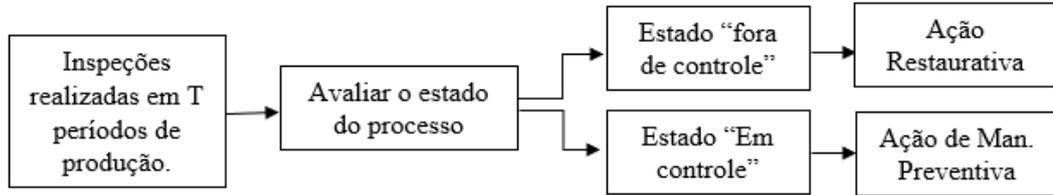
Para a formulação do modelo alguns pressupostos são considerados ao longo desta pesquisa, são eles:

1. O processo de produção sempre começa em um estado "em controle," mas pode mudar para um estado "fora de controle" em qualquer momento aleatório durante uma execução de produção;
2. O tempo no qual um processo se desloca segue uma distribuição de probabilidade arbitrária com uma taxa de falha (risco) não decrescente;
3. Durante cada execução de produção, o processo é inspecionado periodicamente. No momento da inspeção, se o processo estiver no estado "fora de controle", ele será restaurado para o estado "em controle" por conserto ou substituição de equipamento (s). Se o processo estiver no estado "em controle", a manutenção preventiva será realizada. Tanto a manutenção preventiva quanto a ação de restauração tomam um tempo insignificante e restauram o sistema para uma condição "tão boa quanto nova".
4. Os itens não conformes são produzidos não apenas no estado "fora de controle", mas também podem ser produzidos no estado "em controle". Esses itens são operacionais quando colocados em uso, mas suas características de desempenho são inferiores àquelas dos itens em conformidade.
5. Itens não conformes são detectados somente através de testes durante um período de tempo significativo.
6. Itens produzidos (conforme e não conforme, se houver) são liberados para venda com uma política de garantia de combinação de bônus.

4.1.1 Critério Custo

Em cada ciclo de produção P.T são realizadas n inspeções com o objetivo de identificar o estado do processo produtivo. Caso a inspeção identifique “estado fora de controle” uma restauração no sistema deve ser realizada a um custo $R(\cdot)$, porém se a inspeção identificar que o processo está “sob controle” será então realizado uma ação de manutenção preventiva a um custo de (C_m) . A estrutura para identificação e posterior recuperação de itens defeituosos ao longo do sistema produtivo baseou-se no estudo de (GIRI; CHAKRABORTY, 2007) e pode ser representada através da Figura 4.

Figura 4 – Identificação do estado do processo



Fonte: A Autora (2019)

Além dos custos de restauração e manutenção preventiva também serão incluídos os custos de set-up (C_s) e de inspeção (C_i) por item unitário, custo de estoque de manutenção (C_h) e custo de reparação/substituição completa na falha de um item (C_p) (GIRI; CHAKRABORTY, 2007). Portanto o custo total esperado é representado pelo somatório dos custos mencionados acima mais os custos de reparação/substituição para uma fração de itens conformes e não conformes para um determinado período de garantia.

A equação do critério custo desenvolvida por Giri e Chakraborty (2007) e adaptada conforme a necessidade deste estudo, pode ser observada pela Equação (4.1):

$$\begin{aligned}
 C(n, T) = & c_p + \frac{c_h \cdot (P - D) \cdot T}{2D} + \frac{c_s \cdot (n \cdot v)}{P \cdot T} \\
 & + \frac{n}{P \cdot T} \cdot \left[\int_0^{\frac{T}{n}} k \cdot \left(\frac{T}{n} - \tau \right) \cdot f_x(\tau) d\tau + c_m \cdot \int_{\frac{T}{n}}^{\infty} f_x(\tau) d\tau \right] \\
 & + (1 - q) \cdot c_p \cdot \int_0^{w_1} h_1(t) dt \\
 & + (1 - q) \cdot c_p \cdot \int_{w_1}^w \frac{w - t}{w - w_1} \cdot h_1(t) dt \\
 & + q \cdot c_p \cdot \int_0^{w_1} h_2(t) dt + q \cdot c_p \cdot \int_{w_1}^w \frac{w - t}{w - w_1} \cdot h_2(t) dt
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

A demanda do produto D é definida pela seguinte equação (4.2):

$$D = K_1 \cdot (w + K_2)^\beta \tag{4.2}$$

Onde:

K_1 : é uma constante determinada como fator de amplitude

K_2 : constante denominada como deslocamento de tempo.

β : Representa a elasticidade do comprimento de garantia.

Enquanto, a variável q é equivalente a $q(t)$ e indica a fração de itens não conformes fabricados em um lote de produção P.T, o valor de q pode ser obtido pela equação seguinte:

$$q = q(T) = E\left(\frac{N_f}{P.T}\right) = \theta_2 - \frac{n \cdot (\theta_2 - \theta_1)}{T} \cdot \int_0^T \bar{F}x(\tau) d\tau \quad (4.3)$$

Onde: N_f determina o número esperado de itens não conformes.

4.1.2 Critério AOQ

Segundo Giri e Chakraborty (2007) alguns itens não conformes podem não ser identificados pelo processo de inspeção, porém todos os itens fabricados são entregues para a venda, permitindo assim que alguns dos itens defeituosos sejam repassados ao estoque final e em seguida aos consumidores. A proporção média de itens defeituosos repassados aos consumidores é chamada de AOQ (Average Outgoing Quality) - Qualidade Média de Saída. Geralmente este critério é tratado como uma restrição ao sistema produtivo, no qual o número de itens não conformes não pode superar o limiar máximo estabelecido como AOQL (Limite médio de qualidade de saída).

Deste modo só devem ser repassados aos consumidores finais uma porcentagem de itens defeituosos estabelecidos e controlados pela organização. O controle da qualidade é uma das questões mais discutidas e importantes por estudiosos e gestores da área de qualidade que desejam implementar técnicas e métodos de monitoramento que garantam a conformidade dos seus processos e conseqüentemente dos seus itens produzidos. Além da satisfação do consumidor é através da qualidade final dos produtos que órgãos fiscalizadores como o INMETRO podem atestar as especificações dos produtos e sugerir possíveis recomendações.

Logo, é de fundamental interesse não só dos fabricantes, mas também dos consumidores e de outros órgãos de fiscalização, que a organização desempenhe suas atividades de modo a atender as expectativas geradas em relação a qualidade final de seus produtos. Muitas são as vantagens ao controlar a qualidade por meio do critério AOQ ou de outros métodos relacionados, uma destas vantagens e talvez a mais expressiva seja a satisfação do consumidor com o produto que pode elevar o nível de vendas e a consolidação da marca no mercado.

Tendo em vista a importância da qualidade dos itens produzidos, uma organização que repassa itens defeituosos aos consumidores eleva seus custos de reparação e substituição que aliados a insatisfação do consumidor com o produto podem provocar incontáveis prejuízos a organização (CHEN, 2006).

Sob este contexto o objetivo do critério AOQ nesta pesquisa é garantir o mínimo de qualidade dos itens produzidos, esta qualidade é representada pela fração máxima de itens defeituosos em um lote de produção que podem ser repassados aos consumidores (KLEIHNEN *et al.* 1992). Os valores para o critério AOQ são obtidos através da equação (4.4).

$$EN(n, T) = \frac{q \cdot \int_0^{w_1} h_2(t) dt + q \cdot \int_{w_1}^w \frac{w-t}{w-w_1} \cdot h_2(t) dt}{P \cdot T} \quad (4.4)$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo uma aplicação numérica será realizada com a finalidade de demonstrar a aplicabilidade do modelo. Além de apresentar as principais discussões dos resultados encontrados, será abordado a realização de uma análise de sensibilidade do modelo e suas principais implicações gerenciais.

5.1 APLICAÇÃO NÚMERICA PARA O MODELO PROPOSTO

Nesta seção será apresentada uma aplicação numérica para ilustrar o modelo proposto. Supõe-se que a distribuição que represente a mudança do estado do processo seja a Weibull, definida por:

$$F_X(\tau) = 1 - e^{-(\lambda \cdot \tau)^Y}, \tau > 0, \lambda > 0, Y \geq 1 \quad (5.1)$$

Os tempos de vida útil de itens conformes e não conformes também apresentam uma distribuição weibull, com funções de densidade de probabilidade definidas por Wang (2004):

$$h_1 = \frac{t}{18} \cdot e^{-\left(\frac{t}{6}\right)^2}; h_2 = \frac{t}{2} \cdot e^{-\left(\frac{t}{2}\right)^2} \quad (5.2)$$

Os valores dos parâmetros utilizados no modelo proposto são: $c_p = 5, c_s = 250, c_h = 0,5, c_m = 2; K = 5; K_1 = 50, K_2 = 0,2, v = 0,5, w_1 = 0,75, w, \lambda = 0,7, \beta = 1,05, Y = 2, \theta_1 = 0,05, \theta_2 = 0,95, P = 300$ (Em unidades apropriadas). A partir destes dados pode-se aplicar o modelo proposto, que ao contrário da análise apresentada por (GIRI; CHAKRABORTY, 2007), objetiva realizar uma abordagem multicritério, considerando os critérios AOQ e custo.

A Tabela 2 representa a matriz de consequências deste estudo, onde o valor das alternativas para os critérios AOQ e custo são obtidos por meio das equações (4.1) e (4.4).

Tabela 2- Matriz de consequências para os critérios AOQ e Custo

Alternativas		Critérios			Alternativas		Critérios		
n	T	AOQ	Custo	n	T	AOQ	custo		
x1	2	1,10	1,443. 10 ⁻⁴	6,837	X46	6	1,60	6,466. 10 ⁻⁵	6,769
x2	2	1,20	1,432. 10 ⁻⁴	6,831	X47	6	1,70	6,219. 10 ⁻⁵	6,780
x3	2	1,30	1,430. 10 ⁻⁴	6,836	X48	6	1,80	6,006. 10 ⁻⁵	6,796
x4	2	1,40	1,434. 10 ⁻⁴	6,849	X49	6	1,90	5,823. 10 ⁻⁵	6,814
x5	2	1,50	1,443. 10 ⁻⁴	6,871	X50	6	2,00	5,664. 10 ⁻⁵	6,836
x6	2	1,60	1,456. 10 ⁻⁴	6,898	X51	7	1,10	8,357. 10 ⁻⁵	6,814
x7	2	1,70	1,471. 10 ⁻⁴	6,931	X52	7	1,20	7,758. 10 ⁻⁵	6,788
x8	2	1,80	1,487. 10 ⁻⁴	6,968	X53	7	1,30	7,260. 10 ⁻⁵	6,772
x9	2	1,90	1,505. 10 ⁻⁴	7,008	X54	7	1,40	6,839. 10 ⁻⁵	6,766
x10	2	2,00	1,523. 10 ⁻⁴	7,052	X55	7	1,50	6,481. 10 ⁻⁵	6,766
x11	3	1,10	1,081. 10 ⁻⁴	6,800	X56	7	1,60	6,175. 10 ⁻⁵	6,771
x12	3	1,20	1,043. 10 ⁻⁴	6,783	X57	7	1,70	5,910. 10 ⁻⁵	6,781
x13	3	1,30	1,014. 10 ⁻⁴	6,778	X58	7	1,80	5,679. 10 ⁻⁵	6,796
x14	3	1,40	9,921. 10 ⁻⁵	6,781	X59	7	1,90	5,479. 10 ⁻⁵	6,813
x15	3	1,50	9,766. 10 ⁻⁵	6,791	X60	7	2,00	5,303. 10 ⁻⁵	6,834
x16	3	1,60	9,657. 10 ⁻⁵	6,807	X61	8	1,10	8,225. 10 ⁻⁵	6,825
x17	3	1,70	9,587. 10 ⁻⁵	6,828	X62	8	1,20	7,615. 10 ⁻⁵	6,797
x18	3	1,80	9,547. 10 ⁻⁵	6,853	X63	8	1,30	7,104. 10 ⁻⁵	6,780
x19	3	1,90	9,533. 10 ⁻⁵	6,881	X64	8	1,40	6,672. 10 ⁻⁵	6,772
x20	3	2,00	9,539. 10 ⁻⁵	6,913	X65	8	1,50	6,303. 10 ⁻⁵	6,771
x21	4	1,10	9,507. 10 ⁻⁵	6,794	X66	8	1,60	5,984. 10 ⁻⁵	6,776
x22	4	1,20	9,009. 10 ⁻⁵	6,773	X67	8	1,70	5,708. 10 ⁻⁵	6,785
x23	4	1,30	8,611. 10 ⁻⁵	6,764	X68	8	1,80	5,466. 10 ⁻⁵	6,798
x24	4	1,40	8,289. 10 ⁻⁵	6,762	X69	8	1,90	5,254. 10 ⁻⁵	6,815
x25	4	1,50	8,030. 10 ⁻⁵	6,768	X70	8	2,00	5,067. 10 ⁻⁵	6,834
x26	4	1,60	7,820. 10 ⁻⁵	6,779	X71	9	1,10	8,135. 10 ⁻⁵	6,836
x27	4	1,70	7,651. 10 ⁻⁵	6,795	X72	9	1,20	7,516. 10 ⁻⁵	6,807
x28	4	1,80	7,515. 10 ⁻⁵	6,815	X73	9	1,30	6,998. 10 ⁻⁵	6,789
x29	4	1,90	7,408. 10 ⁻⁵	6,838	X74	9	1,40	6,557. 10 ⁻⁵	6,780
x30	4	2,00	7,324. 10 ⁻⁵	6,864	X75	9	1,50	6,180. 10 ⁻⁵	6,778
x31	5	1,10	8,894. 10 ⁻⁵	6,798	X76	9	1,60	5,853. 10 ⁻⁵	6,781
x32	5	1,20	8,343. 10 ⁻⁵	6,774	X77	9	1,70	5,569. 10 ⁻⁵	6,790
x33	5	1,30	7,892. 10 ⁻⁵	6,762	X78	9	1,80	5,319. 10 ⁻⁵	6,802
x34	5	1,40	7,519. 10 ⁻⁵	6,758	X79	9	1,90	5,099. 10 ⁻⁵	6,818
x35	5	1,50	7,207. 10 ⁻⁵	6,761	X80	9	2,00	4,904. 10 ⁻⁵	6,837
x36	5	1,60	6,947. 10 ⁻⁵	6,770	X81	10	1,10	8,070. 10 ⁻⁵	6,847
x37	5	1,70	6,728. 10 ⁻⁵	6,783	X82	10	1,20	7,446. 10 ⁻⁵	6,817
x38	5	1,80	6,543. 10 ⁻⁵	6,800	X83	10	1,30	6,921. 10 ⁻⁵	6,798
x39	5	1,90	6,387. 10 ⁻⁵	6,821	X84	10	1,40	6,475. 10 ⁻⁵	6,788
x40	5	2,00	6,256. 10 ⁻⁵	6,844	X85	10	1,50	6,092. 10 ⁻⁵	6,785
X41	6	1,10	8,560. 10 ⁻⁵	6,805	X86	10	1,60	5,760. 10 ⁻⁵	6,788
X42	6	1,20	7,979. 10 ⁻⁵	6,780	X87	10	1,70	5,469. 10 ⁻⁵	6,796
X43	6	1,30	7,498. 10 ⁻⁵	6,766	X88	10	1,80	5,214. 10 ⁻⁵	6,808
X44	6	1,40	7,096. 10 ⁻⁵	6,760	X89	10	1,90	4,988. 10 ⁻⁵	6,823
X45	6	1,50	6,756. 10 ⁻⁵	6,762	X90	10	2,00	4,787. 10 ⁻⁵	6,841

Fonte: A Autora (2019)

A partir dos resultados encontrados no modelo proposto e ilustrados na Tabela 2 pode se realizar algumas observações a respeito do comportamento do AOQ e Custo quando os mesmos são submetidos a diferentes tempos de execução da produção e número de inspeção.

Diferentes resultados são obtidos a partir da mudança no valor das variáveis de decisão. Estas variáveis são tratadas como inputs do modelo para ambos os critérios analisados, já o output difere em relação aos critérios, para o critério AOQ, o output obtido será representado pelo valor máximo de itens defeituosos que podem ser repassados aos consumidores, este valor máximo indica a qualidade mínima que aquele lote de produção deve conter para ser aceito pelo mercado.

Com o auxílio da Tabela 2 notou-se que X10 é a alternativa considerada ótima para o critério AOQ, obtida para os seguintes inputs ($T=2,0$ meses e número de inspeção $n=2$). De acordo com estes dados e ao considerar uma taxa de produção de 300 unidades/mês pode se afirmar que ao término de dois meses de produção serão realizados um total de 600 itens, entre estes existirá uma fração de defeituosos representado pelo valor de (AOQ 0,0001523), este valor define o limiar máximo de defeituosos que podem ser repassados aos consumidores de forma a garantir o mínimo de qualidade a produção.

Para garantir a qualidade mínima dos itens fabricados o controle da fração de defeituosos deve ser realizado a fim de evitar o aumento de defeituosos e conseqüentemente o repasse destes itens aos consumidores. Está é a função do critério AOQ, garantir a qualidade mínima dos itens que serão entregues ao consumidor, através do estabelecimento da fração máxima de defeituosos permitidos para fabricação.

Além disso, também pode ser observado na Tabela 2 que o aumento no número de inspeções reduz o valor do AOQ e do AOQL, isso porque umas das premissas do AOQ afirma que os itens defeituosos só podem ser identificados por meio de ações de inspeção e que após a sua identificação serão realizadas tarefas de restauração com o intuito de retornar a qualidade do item. Portanto, nesta concepção o aumento no número de inspeções até um dado ponto pode influenciar na melhoria na qualidade de saída dos itens produzidos por meio da identificação e seguinte recuperação destes itens em um ciclo de produção.

Neste contexto em que a qualidade final dos produtos é atrelada a um número de ações de inspeção, a não realização desta ação ou até mesmo a sua realização com frequência insuficiente pode afetar a qualidade final dos produtos. Por outro lado, realizar muitas inspeções em pequenos intervalos de tempo pode resultar em gastos muito altos, que muitas vezes não justificam a qualidade final retornada dos produtos.

Ao assumir os mesmos valores de intervalo de tempo e número de inspeção ($T=2,0$ e $n=2$) do exemplo referente ao critério AOQ, pode se notar que para uma produção de 600 unidades obtidas ao final de um ciclo de produção de 2 meses o custo total será de 7,052. Este custo não é considerado o menor entre os avaliados, portanto esta alternativa que se apresenta satisfatória para o critério AOQ não corresponde a alternativa “ótima” para o custo.

Desta forma, o input gerado através das variáveis de decisão pode produzir diferentes resultados considerados ótimos a depender dos critérios avaliados AOQ ou Custo. Os valores ótimos para cada um dos critérios e seus respectivos comportamentos quando ocorre um aumento nas variáveis de decisão também serão tratados nesta pesquisa.

Conforme apresentado na matriz de consequência o comportamento do AOQ (Average Outgoing Quality) inicialmente sofre um aumento na saída de defeituosos até atingir um valor máximo de 0,0001523 unidades defeituosas, quando $n=2$ e $T=2$ meses, este valor máximo de AOQ é denominado de AOQL (Limite Médio de Qualidade de Saída) e representa o limite máximo de itens defeituosos que podem ser repassados aos clientes.

Já o comportamento do critério custo em relação a matriz de consequência fornecida a partir da Tabela 2, quando são atribuídos diferentes valores para as variáveis de decisão: número de inspeção (n) e tempo de execução da produção (T) apresenta um valor mínimo de 6,758 \$ por unidade, quando $n=5$ e $T=1,40$ meses. É importante também verificar que o custo é maior quando o número de inspeções aumenta ao contrario do AOQ que reduz a medida que o número de inspeção aumenta.

A partir das análises realizadas através da matriz de consequência é notório que a escolha entre a alternativa ótima dentre as avaliadas é um processo difícil para o decisor, pois é necessário avaliar qual critério deve ser priorizado para melhoria no seu sistema de produção, caso o decisor prefira minimizar o custo a alternativa com melhor desempenho nesse critério será a x_{34} ($n=5$ e $T=1,40$). No entanto, se preferir maximizar o AOQ a alternativa indicada será x_{10} ($n=2$ e $T=2$), dado que estas alternativas fornecem respectivamente o menor valor de custo e o maior valor para o AOQ.

Neste caso, fica claro a existência de um trade-off entre os critérios analisados, pois quando o decisor resolve escolher o menor valor para o custo por exemplo, haverá uma consequência para o valor do AOQ, caso contrário se o decisor escolher a alternativa com maior

desempenho de AOQ, o valor do custo associado a esta alternativa não será o melhor entre os avaliados.

Aplicando o método aditivo com veto espera-se encontrar uma alternativa que proporcione resultados satisfatórios para ambos os critérios definidos pelo modelo proposto. É importante destacar que os critérios custo e AOQ utilizados nesta pesquisa foram estabelecidos por meio de uma análise na literatura realizada por esta pesquisa. A definição de cada critério e a sua respectiva dedução matemática pode ser vista com maior foco no capítulo 4.

Para prosseguir com a aplicação do método faz-se necessário definir o valor das constantes de escala para cada um dos critérios estabelecidos, nesta pesquisa optou-se por calcular tais valores a partir do procedimento ROC (Ranking Ordered Centroid). A Tabela 3 mostra os valores das constantes de escala (k_i) e os limites superior (u_i) e inferior (l_i) de veto para os critérios C_1 (Average outgoing quality-AOQ) e C_2 (Custo).

Tabela 3 - Parâmetros para aplicação numérica

Parâmetros	C_1	C_2
Constante de escala (Ki)	0,75	0,25
Limite inferior	0,05	0,6
Limite Superior	0,4	0,8

Fonte: A Autora (2019).

Já na Tabela 4 são fornecidas as alternativas para a aplicação do método, onde os valores de tais alternativas para cada critério são obtidos por meio das equações 4.1 e 4.4.

Tabela 4- Dados para a aplicação numérica

Alternativas	AOQ	Custo
x1	0,0001443	6,837
x2	0,0001432	6,831
x3	0,0001430	6,836
x4	0,0001434	6,849
x5	0,0001443	6,871
x6	0,0001456	6,898
x7	0,0001471	6,931
x8	0,0001487	6,968
x9	0,0001505	7,008
x10	0,0001523	7,052
x11	0,0001081	6,800
x12	0,0001043	6,783
x13	0,0001014	6,778

x14	0,0000992	6,781
x15	0,0000977	6,791
x16	0,0000966	6,807
x17	0,0000959	6,828
x18	0,0000955	6,853
x19	0,0000953	6,881
x20	0,0000954	6,913
x21	0,0000951	6,794
x22	0,0000901	6,773
x23	0,0000861	6,764
x24	0,0000829	6,762
x25	0,0000803	6,768
x26	0,0000782	6,779
x27	0,0000765	6,795
x31	0,0000889	6,798
x32	0,0000834	6,774
x33	0,0000789	6,762
x34	0,0000752	6,758
x41	0,0000856	6,805
x42	0,0000798	6,780
x51	0,0000836	6,814
x52	0,0000776	6,788
x61	0,0000823	6,825
x62	0,0000762	6,797
x71	0,0000814	6,836
x81	0,0000807	6,847

Fonte: A Autora (2019)

Os limites superior e inferior para cada critério são obtidos com a ajuda de um decisor, que determina qual valor máximo para que uma alternativa seja rejeitada (limite inferior) e o valor mínimo para que ela seja aceita (limite superior), as alternativas penalizadas serão sempre aquelas com valores entre os limites superior e inferior.

A determinação do valor destes limiares para os critérios de AOQ e custo, objetivam uma melhoria no sistema de produção imperfeito, através do estabelecimento de decisões de manutenção mais eficientes, que proporcionam além da maximização da qualidade final dos produtos, uma redução nos custos de manutenção que se refletem nos custos organizacionais. Contribuindo assim para que a organização se torne mais competitiva, uma vez que ela pode ser mais eficiente em dois critérios de grande relevância para os consumidores.

A Tabela 5 mostra os resultados obtidos após a aplicação do método, onde é possível observar o valor das funções globais e o ranking das alternativas avaliadas para o método aditivo e o aditivo com veto.

Tabela 5 - Resultados do modelo aditivo e aditivo-veto para a problemática de ordenação.

Alternativas	V(a)	Ranking sem Veto	r(a)	v(a)	Ranking com veto
x1	0,853	1	0,904	0,771	2
x2	0,847	2	0,93	0,788	1
x3	0,841	3	0,908	0,764	3
x4	0,834	4	0,852	0,710	4
x5	0,824	5	0,757	0,623	5
x6	0,813	6	0,75	0,610	6
x7	0,800	7	0,75	0,600	7
x8	0,784	8	0,75	0,588	8
x9	0,769	9	0,75	0,576	9
x10	0,750	10	0,75	0,563	10
x11	0,533	11	1	0,533	11
x12	0,511	12	0,952	0,486	12
x13	0,487	13	0,871	0,424	13
x14	0,463	14	0,81	0,375	14
x15	0,439	15	0,767	0,337	15
x16	0,415	16	0,737	0,306	16
x17	0,390	18	0,66	0,257	18
x18	0,364	20	0,541	0,197	20
x19	0,339	23	0,453	0,153	23
x20	0,312	26	0,454	0,142	24
x21	0,412	17	0,695	0,286	17
x22	0,382	19	0,557	0,213	19
x23	0,351	21	0,446	0,157	22
x24	0,321	24	0,357	0,115	27
x25	0,291	28	0,285	0,083	29
x26	0,261	32	0,25	0,065	33
x27	0,230	37	0,25	0,058	36
x31	0,348	22	0,525	0,183	21
x32	0,316	25	0,372	0,117	26
x33	0,283	29	0,25	0,071	32
x34	0,250	34	0,25	0,063	34
x41	0,310	27	0,432	0,134	25
x42	0,275	31	0,271	0,075	31
x51	0,282	30	0,376	0,106	28
x52	0,247	35	0,25	0,062	35
x61	0,260	33	0,295	0,077	30
x62	0,225	39	0,25	0,056	37
x71	0,241	36	0,222	0,054	38
x81	0,226	38	0,156	0,035	39

Fonte: A Autora (2019)

Em alguns casos após a aplicação da função ponderada de veto ocorre a redução no valor global da alternativa, esta redução pode alterar ou não a sua classificação final. De acordo com os resultados obtidos na Tabela 5 a maioria das alternativas avaliadas é penalizada pela função

ponderada de veto, cerca de 38 das 39 alternativas avaliadas. Além disso, 17 do total de alternativas avaliadas mudam a sua posição final.

Ainda segundo a tabela acima, identificou-se que a alternativa que estava na primeira posição antes da função de veto, com valor global de $v(X1)=0,853$ caiu para a segunda posição após a sua aplicação, com valor global de $v'(X2)=0,771$. Esta mudança de posição no ranking das alternativas indica o caráter da função de veto para o modelo. A função de veto não permite que uma determinada alternativa se mantenha em uma boa posição no ranking devido a penalização imposta a alternativas com desempenho entre os limiares estabelecidos pelo decisor.

Assim, a alternativa escolhida será a X2 que é referente a primeira posição no ranking das alternativas com veto, apresentando um valor global de $v'(X2) = 0,771$. Uma comparação na ordem final das alternativas melhor posicionadas no ranking do método aditivo e aditivo com veto, podem ser observadas com o auxílio da Tabela 6.

Tabela 6- Ordenação final das alternativas

Ranking	Modelo aditivo	Modelo aditivo com veto
1°	X1	X2
2°	X2	X1
3°	X3	X3
4°	X4	X4
5°	X5	X5
6°	X6	X6
7°	X7	X7
8°	X8	X8
9°	X9	X9
10°	X10	X10

Fonte: A Autora (2019)

De acordo com a tabela acima é possível observar a mudança na ordem das alternativas após a inserção da função de veto ao modelo, no modelo aditivo a alternativa X1 se encontra em melhor posição se comparada a X2 por exemplo, isso ocorre devido ao caráter compensatório do método, onde o decisor está disposto a aceita-la mesmo que apresente um desempenho a baixo do esperado em algum critério.

Após a aplicação da função de veto essa alternativa foi penalizada e perdeu uma posição em relação ao modelo aditivo, isto porque o veto além de não permitir a compensação imposta pelo método aditivo como mencionado anteriormente, também utiliza da estrutura de preferência do decisor para delimitar os limiares impostos para aceitação ou rejeição das

alternativas, assim com a utilização do veto o método consegue atender as expectativas do decisor quanto aos critérios estabelecidos.

Dessa forma, a alternativa indicada pelo método aditivo com veto, X2 (realizar 2 inspeções em intervalos de tempo de 1,20 meses), posicionada em primeiro lugar no ranking com veto, substituindo a alternativa X1 obtida pelo método aditivo, é considerada a melhor escolha para o decisor, pois oferece o melhor desempenho para os critérios avaliados.

5.1.1 Análise de Sensibilidade

A fim de comprovar a robustez dos resultados obtidos após a aplicação do método, uma análise de sensibilidade será realizada alterando a ordem de preferência dos critérios AOQ (C_1) e Custo (C_2). O resultado deste novo cenário pode ser observado com o auxílio da Tabela 7.

Tabela 7- Resultados do modelo aditivo e aditivo-veto de acordo com o novo cenário.

ALTERNATIVA	V(a)	Ranking sem Veto	r(a)	v(a)	Ranking com veto
x1	0,766	6	0,711	0,544	18
x2	0,778	2	0,789	0,614	10
x3	0,765	7	0,724	0,553	17
x4	0,732	16	0,555	0,406	27
x5	0,678	23	0,271	0,184	32
x6	0,613	29	0,25	0,153	33
x7	0,534	33	0,25	0,134	34
x8	0,446	36	0,25	0,112	35
x9	0,352	38	0,25	0,088	36
x10	0,250	39	0,25	0,063	38
x11	0,746	12	1	0,746	3
x12	0,778	3	0,984	0,766	1
x13	0,782	1	0,957	0,748	2
x14	0,767	5	0,937	0,718	4
x15	0,735	14	0,922	0,678	5
x16	0,690	20	0,912	0,629	8
x17	0,633	27	0,734	0,464	26
x18	0,566	31	0,405	0,230	30
x19	0,494	35	0,151	0,074	37
x20	0,412	37	0,151	0,062	39
x21	0,719	17	0,898	0,646	7
x22	0,758	9	0,852	0,646	6
x23	0,769	4	0,815	0,627	9
x24	0,764	8	0,786	0,600	11
x25	0,740	13	0,762	0,564	14
x26	0,704	19	0,75	0,528	21
x27	0,656	25	0,75	0,492	24
x31	0,689	21	0,842	0,580	13

x32	0,734	15	0,791	0,580	12
x33	0,751	10	0,75	0,564	15
x34	0,750	11	0,75	0,563	16
x41	0,659	24	0,811	0,535	20
x42	0,707	18	0,757	0,535	19
x51	0,629	28	0,792	0,498	23
x52	0,678	22	0,75	0,509	22
x61	0,596	30	0,647	0,386	28
x62	0,650	26	0,75	0,487	25
x71	0,565	32	0,495	0,280	29
x81	0,534	34	0,346	0,185	31

Fonte: A Autora (2019)

A alternativa X12 (realizar 3 inspeções no intervalo de 1,20 meses) é considerada a alternativa mais adequada quando o critério custo tem maior importância para o decisor, sendo posicionada em primeiro lugar no ranking para o método aditivo com veto, com valor global de $v'(x12) = 0,766$. Já as alternativas X71 e X81 são consideradas as piores para este critério, com valor global de $v'(X82) = 0,280$ e $v'(X83) = 0,185$. A Tabela 8 apresenta uma comparação no ranking das alternativas melhor posicionados quando o critério AOQ é priorizado pelo decisor e após a mudança na ordem dos critérios estabelecidos, identificado como novo cenário.

Tabela 8- Ordenação final das alternativas após a mudança na ordem de preferência do decisor.

Ranking	Ranking final priorizando AOQ	Ranking final novo cenário
1º	X2	X12
2º	X1	X13
3º	X3	X11
4º	X4	X14
5º	X5	X15
6º	X6	X22
7º	X7	X21
8º	X8	X16
9º	X9	X23
10º	X10	X2

Fonte: A Autora (2019)

De acordo com os dados fornecidos pela Tabela 8, é possível observar que as dez melhores alternativas fornecidas pelo método mostram se coerentes com a sua posição no ranking, por exemplo quando o critério AOQ é priorizado, o rank das melhores alternativas é o mesmo obtido para a aplicação numérica. Por sua vez quando ocorre a inversão dos critérios e o custo tem maior prioridade entre os avaliados, o ranking das melhores alternativas tende a

beneficiar o critério custo, é o caso da alternativa, X12, que é considerada a alternativa com melhor desempenho para este novo cenário. Portanto, pode-se observar que o modelo proposto tem coerência com os resultados recomendados pelo método para diferentes ordens de preferência do decisor.

5.1.2 Implicações Gerenciais do Modelo Proposto

As implicações gerenciais desse modelo visam a sua contribuição prática para ambientes industriais que desejam melhorar o desempenho dos seus sistemas de produção através do desenvolvimento de políticas integradas entre sistemas de produção imperfeito e manutenção. Neste contexto, o modelo proposto é apresentado sob uma perspectiva multicritério que aborda o conflito entre a qualidade representada pelo critério AOQ e o custo em uma cadeia de suprimentos.

O conflito que pôde ser observado na aplicação numérica representa a particularidade de cada critério e como ele se comporta face a mudança nas variáveis de decisão: Tempo de execução da produção e número de inspeções. O comportamento das alternativas que se referem ao critério AOQ tendem a diminuir com o aumento no número de inspeção para longos períodos de produção, já as alternativas referentes ao custo aumentam à medida que o número de inspeção cresce ao longo do tempo. Desta forma, fica claro a necessidade de investir mais em ações de inspeções a longo do tempo para reduzir o número de itens considerados defeituosos, porém quanto e quando o decisor deve investir para reduzir a não conformidade dos itens produzidos é uma decisão difícil para o gestor de manutenção.

A não conformidade dos itens produzidos gera perdas não só financeira para a organização mas também traz transtornos aos consumidores que podem se refletir em perdas de demanda e outros prejuízos ligados a imagem da marca no mercado, para reduzir tal transtorno muitas empresas decidem reutilizar os matérias utilizados na fabricação dos itens ou mesmo retrabalhar tais itens para que eles possam voltar a ser competitivos. Mesmo que esse retrabalho não seja considerado perfeito, a reutilização e reaproveitamento dos itens defeituosos proporciona muitas vezes o aumento da vantagem competitiva na indústria através da sua inserção ou permanência em uma cadeia de suprimentos.

Neste contexto a utilização do método multicritério aditivo com veto tornou-se apropriada, pois é a partir da utilização do veto que o decisor delimita o que deve ser aceito ou

rejeitado em cada critério, impedindo assim que algumas alternativas sejam beneficiadas pelo método de agregação aditivo e se mantenham em boas posições no ranking. Com isso é possível aumentar o controle dos itens produzidos que devem ser enviados ou não ao mercado, a depender do seu desempenho nos critérios estabelecidos.

Logo, a partir da utilização do modelo proposto foi possível definir uma alternativa considerada satisfatória para os critérios estabelecidos. Além disso, este modelo propõe a partir da determinação de políticas integradas, onde a decisão referente a um critério, como, por exemplo, o AOQ pode ter consequências em outros critérios como custo, dar ênfase a questão de decisões integradas que é tão importante para a indústria atual e que pode se tornar ainda mais fundamental com o desenvolvimento de novas tecnologias que pretende aprimorar as decisões existentes entre diversas áreas dentro de uma cadeia de suprimentos.

6 CONCLUSÕES

Determinar políticas de manutenção em um ambiente industrial, de modo a manter a condição do equipamento, reduzindo a sua degradação ao longo do tempo e o consequente aumento de itens defeituosos produzidos não é uma decisão fácil para o gestor, principalmente porque estabelecer tais decisões traz consequências em outras áreas da organização, como o custo e a qualidade do item final produzido. Neste contexto, esta pesquisa propôs um modelo multicritério para auxiliar a tomada de decisão do gestor de manutenção ao considerar a avaliação das consequências das políticas de manutenção para os critérios AOQ e custo em uma cadeia de suprimentos.

A abordagem multicritério sob o uso do modelo aditivo com veto mostrou-se adequada a minimização do custo e a maximização do AOQ nesta pesquisa. Além disso, a função de veto permitiu aplicar uma penalidade para alternativas com desempenho abaixo do aceitável pelo decisor em algum dos critérios avaliados, permitindo assim que o decisor priorize apenas alternativas que atendam a um determinado limiar de custo de produção e qualidade dos itens produzidos denominado item bom.

Neste contexto as características do método aditivo com veto mostraram-se condizentes as características restritivas impostas para a inserção ou permanência das indústrias nas cadeias de suprimentos, onde a conformidade dos itens produzidos e os seus respectivos custos devem encontrar-se em determinados limiares para o pleno funcionamento da cadeia.

Os resultados da análise numérica do modelo proposto indicaram uma política de manutenção considerada satisfatória para o decisor de acordo com as suas preferências para os critérios estabelecidos. Demonstrando assim que é possível amenizar o conflito existente entre o critério custo e a qualidade média de saída dos produtos ao se estabelecer políticas de manutenção.

Além disso, foi realizado uma análise de sensibilidade no modelo que concluiu através de variações realizadas na ordem de preferência do decisor a consistência dos resultados propostos. Portanto, pode-se afirmar que o modelo proposto é condizente com a realidade e, portanto, pode ser utilizado para apoiar a tomada de decisão gerencial em problemas reais envolvendo políticas integradas entre manutenção e sistemas de produção imperfeito ou em contextos similares.

REFERÊNCIAS

- AGHEZZAF, E. H.; KHATAB, A.; LE TAM, P. Optimizing production and imperfect preventive maintenance planning's integration in failure-prone manufacturing systems. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 145, p. 190–198, 2016.
- AL-SALAMAH, M. Economic production quantity with the presence of imperfect quality and random machine breakdown and repair based on the artificial bee colony heuristic. *Applied Mathematical Modelling*, v. 63, p. 68–83, 2018.
- AZADEH, A. et al. Joint quality control and preventive maintenance strategy: a unique taguchi approach. *International Journal of Systems Assurance Engineering and Management*, v. 8, n. 1, p. 123–134, 2017.
- BARZOKI, M. R.; JAHANBAZI, M.; BIJARI, M. Effects of imperfect products on lot sizing with work in process inventory. *Applied Mathematics and Computation*, v. 217, n. 21, p. 8328–8336, 2011.
- BEHESHTI FAKHER, H.; NOURELFATH, M.; GENDREAU, M. A cost minimisation model for joint production and maintenance planning under quality constraints. *International Journal of Production Research*, v. 55, n. 8, p. 2163–2176, 2017.
- BEN-DAYA, M.; DUFFUAA, S. O. Maintenance and quality : the missing link. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 1, n. 1, p. 20–26, 2008.
- BEN-DAYA, M.; RAHIM, A. Optimal lot-sizing , quality improvement and inspection errors for multistage production systems. *International Journal of Production Research*, v.41, n.1, p. 65–79, 2003.
- BEN-DAYA, M. The economic production lot-sizing problem with imperfect production processes and imperfect maintenance. *International Journal of Production Economics*, v. 76, n. 3, p. 257–264, 2002.
- BETTAYEB, B.; BRAHIMI, N.; LEMOINE, D. Integrated dynamic single item lot-sizing and quality inspection planning. *International Journal of Production Research*, v. 56, n.7, p. 2611–2627, 2018.
- BISWAS, P.; SARKER, B. R. Optimal batch quantity models for a lean production system with in-cycle rework and scrap. *International Journal of Production Research*, v. 46, n.23, p. 6585–

6610, 2008.

BOUSLAH, B.; GHARBI, A.; PELLERIN, R. Joint optimal lot sizing and production control policy in an unreliable and imperfect manufacturing system. *International Journal of Production Economics*, v. 144, n. 1, p. 143–156, 2013.

BOUSLAH, B.; GHARBI, A.; PELLERIN, R. Joint production and quality control of unreliable batch manufacturing systems with rectifying inspection. *International Journal of Production Research*, v. 52, n. 14, p. 4103–4117, 2014.

BOUSLAH, B.; GHARBI, A.; PELLERIN, R. Integrated production, sampling quality control and maintenance of deteriorating production systems with AOQL constraint. *Omega*, v. 61, p. 110–126, 2016.

BOUSLAH, B.; GHARBI, A.; PELLERIN, R. Joint production, quality and maintenance control of a two-machine line subject to operation-dependent and quality-dependent failures. *International Journal of Production Economics*, v. 195, p. 210–226, 2018.

CHAKRABORTY, T.; GIRI, B. C. Joint determination of optimal safety stocks and production policy for an imperfect production system. *Applied Mathematical Modelling*, v. 36, n. 2, p. 712–722, 2012.

CHAKRABORTY, T.; GIRI, B. C. Lot sizing in a deteriorating production system under inspections, imperfect maintenance and reworks. *Operational Research*, v. 14, n. 1, p. 29–50, 2014.

CHAKRABORTY, T.; GIRI, B. C.; CHAUDHURI, K. S. Production lot sizing with process deterioration and machine breakdown under inspection schedule. *Omega*, v. 37, n.2, p. 257–271, 2009.

CHAKRABORTY, T.; GIRI, B. C.; CHAUDHURI, K. S. Production lot sizing with process deterioration and machine breakdown. *European Journal of Operational Research*, v. 185, n. 2, p. 606–618, 2008.

CHAN, G.K.; ASGARPOOR, S. Optimum maintenance policy with Markov processes. *Electric Power Systems Research*, v. 76, n. 6–7, p. 452–456, 2006.

CHANG, C.C. Optimum preventive maintenance policies for systems subject to random working times, replacement, and minimal repair. *Computers and Industrial Engineering*, v. 67, n. 1, p. 185–194, 2014.

- CHANG, C.T.; OUYANG, L.Y. An Arithmetic-Geometric Mean Inequality Approach for Determining the Optimal Production Lot Size With Backlogging and Imperfect Rework. *Journal of Applied Analysis and Computation*, v. 7, n. 1, p. 224–235, 2017.
- CHEN, T.H. Optimizing pricing , replenishment and rework decision for imperfect and deteriorating items in a manufacturer-retailer channel. *International Journal of Production Economics*, v. 183, p. 539–550, 2017.
- CHEN, Y.C. Optimal inspection and economical production quantity strategy for an imperfect production process. *International Journal of Systems Science*, v. 37, n. 5, p. 295–302, 2006.
- CHEN, Y.C. An optimal production and inspection strategy with preventive maintenance error and rework. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 32, n. 1, p. 99–106, 2013.
- CHEN, Y.; DING, Y.; CEGLAREK, D. Integration of Process-Oriented Tolerancing and Maintenance Planning in Design of Multistation Manufacturing Processes. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, v. 3, n. 4, p. 440–453, 2006.
- CHENG, G. Q.; ZHOU, B. H.; LI, L. Integrated production, quality control and condition-based maintenance for imperfect production systems. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 175, p. 251–264, 2018.
- CHIU, S. W; CHEN, K.K; YANG, J.C. Optimal replenishment policy for manufacturing systems with failure in rework, backlogging and random breakdown. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, v. 15, n. 3, p. 255-274, 2009.
- CHIU, Y.S. P.; CHANG, H. H. Optimal run time for EPQ model with scrap , rework and stochastic breakdowns : A note. *Economic Modelling*, v. 37, p. 143–148, 2014.
- CHIU, Y.S. P.; LIN, H.D.; CHANG, H.H. Engineering Mathematical modeling for solving manufacturing run time problem with defective rate and random machine breakdown. *Computers and Industrial Engineering*, v. 60, n. 4, p. 576–584, 2011.
- DARWISH, M. A. Imperfect production systems with imperfect preventive maintenance, inflation, and time value of money. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, v. 23, n. 1, p. 89–105, 2006.
- DARWISH, M. A.; BEN-DAYA, M. Effect of inspection errors and preventive maintenance on a two-stage production inventory system. *International Journal of Production Economics*, v. 107, n. 1, p. 301–313, 2007.

- DAS, D.; ROY, A.; KAR, S. A volume flexible economic production lot-sizing problem with imperfect quality and random machine failure in fuzzy-stochastic environment. *Computers and Mathematics with Applications*, v. 61, n. 9, p. 2388–2400, 2011.
- DE ALMEIDA, A. T. Additive-Veto Models For Choice and Ranking. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, v. 30, n. 6, p. 1350026, 2013.
- DE ALMEIDA, A. T. et al. A systematic literature review of multicriteria and multi-objective models applied in risk management. *IMA Journal of Management Mathematics*, v. 28, n.2, p. 153–184, 2017.
- DE LIMA, M. A. X.; CLEMENTE, T.R.N.; DE ALMEIDA, A.T. Electrical Power and Energy Systems Prioritization for allocation of voltage regulators in electricity distribution systems by using a multicriteria approach based on additive-veto model. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, v. 77, p. 1–8, 2016.
- DELLAGI, S.; CHELBI, A.; TRABELSI, W. Joint integrated production-maintenance policy with production plan smoothing through production rate control. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 42, p. 262–270, 2017.
- DO, PHUC et al. A proactive condition-based maintenance strategy with both perfect and imperfect maintenance actions. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 133, p. 22–32, 2015.
- DHOUIB, K.; GHARBI, A.; AZIZA, M.N.B. Joint optimal production control/preventive maintenance policy for imperfect process manufacturing cell. *International Journal of Production Economics*, v. 137, n. 1, p. 126–136, 2012.
- DRIESSEN, J. P. C.; PENG, H.; VAN, H. G. J. Maintenance optimization under non-constant probabilities of imperfect inspections. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 165, p. 115–123, 2017.
- EL-FERIK, S. Economic production lot-sizing for an unreliable machine under imperfect age-based maintenance policy. *European Journal of Operational Research*, v. 186, n. 1, p. 150–163, 2008.
- FAKHER, B. H.; NOURELFATH, M.; GENDREAU, M. Integrating production , maintenance and quality : A multi-period multi-product profit-maximization model. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 170, n. , p. 191–201, 2018.

- GIRI, B. C.; CHAKRABORTY, T. Optimal production , maintenance , and warranty strategies for item sold with rebate combination warranty. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, v. 221,n.4, p. 257–264, 2007.
- GIRI, B. C.; DOHI, T. Inspection Scheduling for Imperfect Production Processes Under Free Repair Warranty Contract. *European Journal of Operational Research*, v. 183, n. 1, p. 238-252, 2007.
- GIRI, B. C.; MOON, I.; YUN, W. Y. Scheduling Economic Lot Sizes in Deteriorating Production Systems. *Naval Research Logistics*, v. 50, n. 6, p. 650-661, 2003.
- GLAWAR, R. et al. An Approach for the Integration of Anticipative Maintenance Strategies within a Production Planning and Control Model. *Procedia CIRP*, v. 67, p. 46–51, 2018.
- GOOSSENS, A. J. M.; BASTEN, R. J. I. Exploring maintenance policy selection using the Analytic Hierarchy Process; An application for naval ships. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 142, p. 31–41, 2015.
- GOUIAA-MTIBAA, A. et al. Integrated Maintenance-Quality policy with rework process under improved imperfect preventive maintenance. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 173, p. 1–11, 2018.
- HU, F.; ZONG, Q. Optimal production run time for a deteriorating production system under an extended inspection policy. *European Journal of Operational Research*, v. 196, n. 3, p. 979–986, 2009.
- HU, J.; ZHANG, L.; LIANG, W. Opportunistic predictive maintenance for complex multi-component systems based on DBN-HAZOP model. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 90, n. 5, p. 376–388, 2012.
- HUANG, Y.S.; LIN, Y.J.; HO, J.W. A study on negative binomial inspection for imperfect production systems. *Computers & Industrial Engineering*, v. 65, n. 4, p. 605-613, 2013.
- KENNEY, R. L.; RAIFFA, H. Decision with multiple objectives: preferences and value trade-offs. New York, John Wiley, 1976.
- JABER, M. Y. Lot sizing for an imperfect production process with quality corrective interruptions and improvements, and reduction in setups. *Computers and Industrial Engineering*, v. 51, n. 4, p. 781–790, 2006.
- KAHRAMAN, C.; KAYA, I. A fuzzy multicriteria methodology for selection among energy

- alternatives. *Expert Systems With Applications*, v. 37,n.9, p. 6270–6281, 2010.
- KANG, K.; SUBRAMANIAM, V. Integrated control policy of production and preventive maintenance for a deteriorating manufacturing system. *Computers & Industrial Engineering*, v. 11, p. 266–277, 2018a.
- KANG, K.; SUBRAMANIAM, V. Joint control of dynamic maintenance and production in a failure-prone manufacturing system subjected to deterioration. *Computers and Industrial Engineering*, v. 119, p. 309–320, 2018b.
- KAVEH, M.; DALFARD, V. M. A Study on the Effect of Inflation and Time Value of Money on Lot Sizing in Spite of Reworking in an Inventory Control Model. *Tehnički Vjesnik*, v. 19, n. 4, p. 819–826, 2012.
- KHAN, M.; JABER, M. Y; BONEY,M. An economic order quantity (EOQ) for items with imperfect quality and inspection errors. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, v. 133, n. 1, p. 113–118, 2011.
- KHARA, B.; DEY, J. K.; MONDAL, S. K. An inventory model under development cost-dependent imperfect production and reliability- dependent demand. *Journal of Management Analytics*, v. 4, n. 3, p. 258–275, 2017.
- KITCHENHAM, B. Procedures for Performing Systematic Reviews. *Keele, UK, Keele University*, v. 33, p. 1-26, 2004.
- KLEIJNEN, J. P. C. et al. Sampling for Quality Inspection and Correction: AOQL performance Criteria. *European Journal of Operational Research*, v. 62, p. 372–379, 1992.
- LANDRY, M; MALOUIN, J-L; ORAL, M. Model validation in operations research. *European Journal of Operational Research*, v. 14, n. 3, p. 207–220, 1983.
- LEE, H.; CHA, J. H. New stochastic models for preventive maintenance and maintenance optimization. *European Journal of Operational Research*, v. 255, n. 1, p. 80–90, 2016.
- LI, N. et al. An EPQ Model for Deteriorating Production System and Items with Rework. *Mathematical Problems in Engineering*, v. 2015, 2015.
- LI, N. et al. A Stochastic Production-Inventory Model in a Two-State Production System With Inventory Deterioration , Rework Process , and Backordering. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, v. 47, n. 6, p. 916-926, 2016.
- LIAO, G.L. Optimum policy for a production system with major repair and preventive

- maintenance. *Applied Mathematical Modelling*, v. 36, n. 11, p. 5408–5417, 2012.
- LIAO, G.L. Optimal economic production quantity policy for randomly failing process with minimal repair, backorder and preventive maintenance. *International Journal of Systems Science*, v. 44, n. 9, p. 1602–1612, 2013.
- LIAO, G.L. Joint production and maintenance strategy for economic production quantity model with imperfect production processes. *Journal of Intelligent Manufacturing*, v. 24, n. 6, p. 1229–1240, 2013.
- LIAO, G.L. Production and maintenance policies for an EPQ model with perfect repair, rework, free-repair warranty, and preventive maintenance. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, v. 46, n. 8, p. 1129–1139, 2015.
- LIAO, G. L.; CHEN, Y. H.; SHEU, S. H. Optimal economic production quantity policy for imperfect process with imperfect repair and maintenance. *European Journal of Operational Research*, v. 195, n. 2, p. 348–357, 2009.
- LIAO, G. L.; SHEU, S.H. Economic production quantity model for randomly failing production process with minimal repair and imperfect maintenance Production run. *International Journal of Production Economics*, v. 130, n. 1, p. 118–124, 2011.
- LIN, C.S.; CHEN, C.H; KROLL, D. E. Integrated production-inventory models for imperfect production processes under inspection schedules. *Computers and Industrial Engineering* v. 44, n.4, p. 633–650, 2003.
- LIN, G. C.; KROLL, D. E. Economic lot sizing for an imperfect production system subject to random breakdowns. *Engineering Optimization*, v. 38, n. 1, p. 73-92, 2006.
- LIN, Y.H. A.; CHEN, J.M.; CHEN, Y.C. The impact of inspection errors, imperfect maintenance and minimal repairs on an imperfect production system. *Mathematical and Computer Modelling*, v. 53, n. 9–10, p. 1680–1691, 2011.
- LOPES, R. Integrated model of quality inspection, preventive maintenance and buffer stock in an imperfect production system. *Computers & Industrial Engineering*, v. 126, p. 650-656, 2018.
- MANNA, A. K.; DEY, J. K.; MONDAL, S. K. Imperfect production inventory model with production rate dependent defective rate and advertisement dependent demand. *Computers and Industrial Engineering*, v. 104, p. 9–22, 2017.

- MARTINOD, R. M. et al. Maintenance policy optimisation for multi-component systems considering degradation of components and imperfect maintenance actions. *Computers and Industrial Engineering*, v. 124, p. 9–22, 2017.
- MEHDI, R.; NIDHAL, R.; ANIS, C. Integrated maintenance and control policy based on quality control. *Computers and Industrial Engineering*, v. 58, n. 3, p. 443–451, 2010.
- MOHAMMADI, B. et al. Optimizing integrated manufacturing and products inspection policy for deteriorating manufacturing system with imperfect inspection. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 37, p. 299–315, 2015.
- MOULIN, H. The proportional veto principle. *Review of Economic Studies*, v. 48, p. 407–416. 1981.
- MOUSSAWI-HAIDAR, L.; SALAMEH, M.; NASR, W. Production lot sizing with quality screening and rework. *Applied Mathematical Modelling*, v. 40, n.4, p. 3242–3256, 2016.
- NOURELFATH, M.; NAHAS, N.; BEN-DAYA, M. Integrated preventive maintenance and production decisions for imperfect processes. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 148, p. 21–31, 2016.
- PAL, B.; SANA, S. S.; CHAUDHURI, K. Maximising profits for an EPQ model with unreliable machine and rework of random defective items. *International Journal of Systems Science*, v. 44, n. 3, p. 582-594, 2013.
- PAL, B.; SANA, S. S.; CHAUDHURI, K. A mathematical model on EPQ for stochastic demand in an imperfect production system. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 32, n. 1, p. 260–270, 2013.
- PALMARINI, R. et al. A systematic review of augmented reality applications in maintenance. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v. 49, p. 215–228, 2018.
- PANDEY, D.; KULKARNI, M. S.; VRAT, P. A methodology for joint optimization for maintenance planning, process quality and production scheduling. *Computers and Industrial Engineering*, v. 61, n. 4, p. 1098–1106, 2011.
- PANDEY, D.; KULKARNI, M. S.; VRAT, P. A methodology for simultaneous optimisation of design parameters for the preventive maintenance and quality policy incorporating Taguchi loss function. *International Journal of Production Research*, v. 50, n. 7, p. 2030–2045, 2012.
- PARDALOS, P. M.; SISKOS, Y.; ZOPOUNIDIS, C. Advances in multicriteria analysis.

Kluwer Academic Publishers, 1995.

PINTELON, L. M.; GELDERS, L. F. Maintenance management decision making. *European Journal of Operational Research*, v. 58, n. 3, p. 301–317, 1992.

POPPE, J. et al. Numerical study of inventory management under various maintenance policies. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 168, p. 262–273, 2017.

PRAKASH, O.; ROY, A. R.; GOSWAMI, A. Stochastic manufacturing system with process deterioration and machine breakdown. *International Journal of Systems Science*, v. 45, n. 12, p. 2539–2551, 2014.

RAD, M. A; KHOSHALHAN, F.; GLOCK, C. H. Optimizing inventory and sales decisions in a two-stage supply chain with imperfect production and backorders. *Computers and Industrial Engineering*, v. 74, p. 219–227, 2014.

RADHOUI, M.; REZG, N.; CHELBI, A. Joint quality control and preventive maintenance strategy for imperfect production processes. *Journal of Intelligent Manufacturing*, v. 21, n. 2, p. 205–212, 2010.

ROY, B. Multicriteria Methodology for Decision Aiding. v. 12, n. 0, p. 6221, 1996.

ROY, M. DAS.; SANA, S. S.; CHAUDHURI, K. An economic production lot size model for defective items with stochastic demand , backlogging and rework. *IMA Journal of Management Mathematics*, v.25, p. 159–183, 2014.

RUSCHEL, E.; SANTOS, E. A. P; LOURES, E. DE F. R. Industrial maintenance decision-making : A systematic literature review. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 45, p. 180–194, 2017.

SAGASTI, F. R; MITROFF, I. I. Operations Research from the Viewpoint of General Systems Theory. *Omega*, v. 1, n. 6, p. 695–709, 1973.

SALAMEH, M. K.; JABER, M. Y. Economic production quantity model for items with imperfect quality. *International Journal of Production Economics*, v. 64, p. 59–64, 2000.

SANA, S. S. A production – inventory model in an imperfect production process. *European Journal of Operational Research*, v. 200, n. 2, p. 451–464, 2010a.

SANA, S. S. An economic production lot size model in an imperfect production system. *European Journal of Operational Research*, v. 201, n. 1, p. 158–170, 2010b.

SANA, S. S. Preventive maintenance and optimal buffer inventory for products sold with

- warranty in an imperfect production system. *International Journal of Production Research*, v. 50, n. 23, p. 6763–6774, 2012.
- SANA, S. S.; CHAUDHURI, K. An EMQ model in an imperfect production process. *International Journal of Systems Science*, v. 41, n. 6, p. 635–646, 2010.
- SANA, S. S.; GOYAL, S.K.; CHAUDHURI, K. An imperfect production process in a volume flexible inventory model. *International Journal of Production Economics*, v. 105, p. 548–559, 2007.
- SARKAR, B.; SANA, S.S.; CHAUDHURI, K. An imperfect production process for time varying demand with inflation and time value of money - An EMQ model. *Expert Systems with Applications*, v. 38, n. 11, p. 13543–13548, 2011.
- SARKAR, B. An inventory model with reliability in an imperfect production process. *Applied Mathematics and Computation*, v. 218, n. 9, p. 4881–4891, 2012.
- SARKAR, B.; MANDAL, P.; SARKAR, S. An EMQ model with price and time dependent demand under the effect of reliability and inflation. *Applied Mathematics and Computation*, v. 231, p. 414–421, 2014.
- SARKAR, B.; MOON, I. An EPQ model with inflation in an imperfect production system. *Applied Mathematics and Computation*, v. 217, n. 13, p. 6159–6167, 2011.
- SARKAR, B.; SANA, S. S.; CHAUDHURI, K. An imperfect production process for time varying demand with inflation and time value of money - An EMQ model. *Expert Systems with Applications*, v. 38, n. 11, p. 13543–13548, 2011.
- SARKAR, B.; SAREN, S. Product inspection policy for an imperfect production system with inspection errors and warranty cost. *European Journal of Operational Research*, v. 248, n. 1, p. 263–271, 2016.
- SARKAR, M.; SARKAR, B. An economic manufacturing quantity model with probabilistic deterioration in a production system. *Economic Modelling*, v. 31, n. 1, p. 245–252, 2013.
- SARKAR, B.; SETT, B. K.; SARKAR, S. Optimal production run time and inspection errors in an imperfect production system with warranty. *Journal of Industrial and Management Optimization*, v. 14, n. 1, p. 267–282, 2018.
- SEYEDI, I. et al. An inventory model with reworking and setup time to consider effect of inflation and time value of money. *Journal of Engineering Science and Technology*, v. 11, n. 3,

p. 416–430, 2016.

SHAFIEE, M.; FINKELSTEIN, M. An optimal age-based group maintenance policy for multi-unit degrading systems. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 134, p. 230–238, 2015.

SHAFIEE, M.; PATRIKSSON, M.; CHUKOVA, S. An optimal age-usage maintenance strategy containing a failure penalty for application to railway tracks. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, v. 230, n. 2, p. 407–417, 2016.

SHEU, S.H.; CHEN, J.A. Optimal lot-sizing problem with imperfect maintenance and imperfect production. *International Journal of Systems Science*, v.35, n.1, p. 69–77, 2004.

SETT, B. K; SARKAR, S; SARKAR, B. Optimal buffer inventory and inspection errors in an imperfect production system with preventive maintenance. *The International International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 90, n. 1–4, p. 545–560, 2017.

SHIH, N.H.; LIAO, Y.S.; WANG, C-H. Determining an economic production quantity under a zero defects policy. *Journal of the Operational Research Society*, v. 69, n.8, p. 1309-1317, 2018.

SHIH, N.H.; WANG, C.H. An Extended Production and Inspection Model with Nonrigid Demand. *The Scientific World Journal*, v. 2013, 2013.

SHIH, N.H.; WANG, C.H. Determining an optimal production run length with an extended quality control policy for an imperfect process. *Applied Mathematical Modelling*, v. 40, n.4, p. 2827–2836, 2016.

SITORUS, F.; CILLIERS, J. J.; BRITO-PARADA, P. R. Multi-criteria decision making for the choice problem in mining and mineral processing : Applications and trends. *Expert Systems With Applications*, v. 121, p. 393–417, 2018.

SULIMAN, S. M.; JAWAD, S. H. Optimization of preventive maintenance schedule and production lot size. *International Journal of Production Economics*, v. 137, n. 1, p. 19–28, 2012.

TAHERI.T, J.; MIRZAZADEH, A.; JOLAI, F. An inventory model for imperfect items under inflationary conditions with considering inspection errors. *Computers and Mathematics with Applications*, v. 63, n. 6, p. 1007–1019, 2012.

TAI, A. H. Economic production quantity models for deteriorating/imperfect products and

- service with rework. *Computers and Industrial Engineering*, v. 66, n. 4, p. 879–888, 2013.
- TALEIZADEH, A. A. A constrained integrated imperfect manufacturing-inventory system with preventive maintenance and partial backordering. *Annals of Operations Research*, v. 261, n. 1-2, p. 303–337, 2018.
- TALEIZADEH, A. A.; CÁRDENAS-BARRÓN, L. E.; MOHAMMADI, B. A deterministic multi product single machine EPQ model with backordering, scraped products, rework and interruption in manufacturing process. *International Journal of Production Economics*, v. 150, p. 9–27, 2014.
- TSAO, Y.T. C. Combined production-maintenance decisions in situations with process deterioration. *International Journal of Systems Science*, v. 44, n. 9, p. 1692–1700, 2013.
- ULLAH, M.; KANG, C. W. Effect of rework , rejects and inspection on lot size with work-in-process inventory. *International Journal of Production Research*, v.52, n.8, p. 2448–2460, 2014.
- VINCKE, P. Multicriteria decision-aid. [s.l.] Wiley, 1992.
- WAEYENBERGH, G.; PINTELON, L. A framework for maintenance conceptual development. *Internaltional Journal for Production Economics*, v. 77, n. 3, p. 299–313, 2002.
- WANG, C.H. The impact of a free-repair warranty policy on EMQ model for imperfect production systems. *Computers & Operations Research*, v. 31, n.12, p. 2021–2035, 2004.
- WANG, C.H. Integrated production and product inspection policy for a deteriorating production system. *International Journal of Production Economics*, v. 95, p. 123–134, 2005.
- WANG, C.H.; SHEU, S.H. Simultaneous determination of the optimal production-inventory and product inspection policies for a deteriorating production system. *Computers and Operations Research*, v. 28, n. 11, p. 1093–1110, 2001.
- WANG, C.H.; SHEU, S.H. Fast Approach to the Optimal Production / PM Policy. *Computers & Mathematics with Applications*, v. 40, n. 10-11, p. 1297-1314, 2000.
- WANG, C.H.; SHEU, S. H. Determining the optimal production – maintenance policy with inspection errors : using a Markov chain. *Computers and Operation Research*, v. 30, n.1, p. 1–17, 2003.
- WANG, C.H.; HUEI, R. Utilizing an approximative solution to obtain the real optimal solution for a production and inspection model. *Applied Mathematical Modelling*, v. 33, n. 10, p. 3769–

3775, 2009.

WANG, C. H.; YEH, R.H.; WU, P. Optimal production time and number of maintenance actions for an imperfect production system under equal-interval maintenance policy. *Journal of the Operational Research Society*, v.57, p. 262–270, 2006.

WANG, H. A survey of maintenance policies of deteriorating systems. *European Journal of Operational Research*, v. 139, n. 3, p. 469–489, 2002.

WANG, L.; CHU, J.; WU, J. Selection of optimum maintenance strategies based on a fuzzy analytic hierarchy process. *International Journal of Production Economics*, v. 107, n. 1, p. 151–163, 2007.

WANG, P. C. et al. An optimal production lot-sizing problem for an imperfect process with imperfect maintenance and inspection time length. *International Journal of Systems Science*, v. 40, n. 10, p. 1051–1061, 2009.

WANG, W. C.; SHIH, N.H; WANG, C.H. The effects of inspection delay and restoration cost on the optimal inspection and production policy. *Opsearch*, p. 1–9, 2018.

WANG, W.Y. Optimum production and inspection modeling with minimal repair and rework considerations. *Applied Mathematical Modelling*, v. 37, n. 4, p. 1618–1626, 2013

WEN, Da. et al. An economic production quantity model for a deteriorating system integrated with predictive maintenance strategy. *Journal of Intelligent Manufacturing*, v. 27, n. 6, p. 1323–1333, 2016.

YEDES, Y.; CHELBI, A.; REZG, N. Quasi-optimal integrated production, inventory and maintenance policies for a single-vendor single-buyer system with imperfect production process. *Journal of Intelligent Manufacturing*, v. 23, n. 4, p. 1245–1256, 2012.

YEH, R. H.; CHEN, T.Z. Optimal lot size and inspection policy for products sold with warranty. *European Journal of Operational Research*, v. 174, p. 766–776, 2006.

YOO, S. H.; KIM, D.; PARK, M-S. Economic production quantity model with imperfect-quality items, two-way imperfect inspection and sales return. *International Journal of Production Economics*, v. 121, n. 1, p. 255–265, 2009.

ZEQUEIRA, R. I.; PRIDA, B.; VALDÉS, J. E. Optimal buffer inventory and preventive maintenance for an imperfect production process. *International Journal of Production Research*, v. 42, n. 5, p. 959–974, 2004.

ZEQUEIRA, R. I.; VALDES, J. E.; BERENGUER, C. Optimal buffer inventory and opportunistic preventive maintenance under random production capacity availability. *International Journal of Production Economics*, v. 111, n. 2, p. 686-696, 2008.