

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EM GESTÃO E TECNOLOGIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DO
CAMPUS SOROCABA

SAMANTA DE LIMA ALONSO

**AVALIAÇÃO DE POLÍTICAS DE GESTÃO DA MANUTENÇÃO BASEADAS NA
MITIGAÇÃO DE RISCOS CONSIDERANDO CRITÉRIOS DE DISPONIBILIDADE
E PRODUTIVIDADE**

Sorocaba

2022

SAMANTA DE LIMA ALONSO

**AVALIAÇÃO DE POLÍTICAS DE GESTÃO DA MANUTENÇÃO BASEADAS NA
MITIGAÇÃO DE RISCOS CONSIDERANDO CRITÉRIOS DE DISPONIBILIDADE
E PRODUTIVIDADE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientação: Prof. Dr. João Eduardo Azevedo Ramos da Silva

Sorocaba

2022

Alonso, Samanta de Lima

Avaliação de políticas de gestão da manutenção baseadas na mitigação de riscos considerando critérios de disponibilidade e produtividade / Samanta de Lima Alonso -- 2022.
99f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba
Orientador (a): João Eduardo Azevedo Ramos da Silva
Banca Examinadora: Milton Vieira Junior, Ricardo Coser Mergulhão
Bibliografia

1. Manutenção. 2. Análise de riscos. 3. Simulação a eventos discretos. I. Alonso, Samanta de Lima. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano -
CRB/8 6979



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

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

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Samanta de Lima Alonso, realizada em 06/06/2022.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. João Eduardo Azevedo Ramos da Silva (UFSCar)

Prof. Dr. Milton Vieira Junior (UNIMEP)

Prof. Dr. Ricardo Coser Mergulhão (UFSCar)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

RESUMO

Os sistemas de produção foram transformados pelos avanços das Revoluções Industriais. A fim de acompanhar os progressos tecnológicos e atingir os níveis de produtividade desejados, a gestão da manutenção se tornou um fator chave para as organizações. Uma vez que todo sistema produtivo está propenso à ocorrência de falhas em seus equipamentos, impactando diretamente na redução da capacidade fabril, faz-se necessário utilizar adequadamente as políticas de manutenção para manter um sistema em boas condições operacionais. Nesse sentido, entende-se que quanto maior a disponibilidade dos equipamentos, maior será a produtividade do sistema. Assim, o presente trabalho objetiva incorporar a mitigação de riscos aplicada em conjunto com a modelagem e simulação de eventos discretos como ferramentas de apoio à tomada de decisão por políticas de manutenção que acarretem aumento da disponibilidade e da produtividade fabril. Para isso, um sistema industrial propenso a falhas de máquina e pertence à administração pública foi analisado. No caso estudado, os cenários propostos consideraram que a inclusão de políticas de manutenção preventiva com frequência bimestral ou trimestral projeta tanto um aumento no Tempo Médio entre Falhas da manutenção corretiva quanto uma redução do Tempo Médio para Reparo da manutenção preventiva devido à antecipação de procedimentos administrativos previamente planejados. As estações de trabalho (ETs) submetidas a tais propostas foram ET A, ET B e ET E, definidas de acordo com a matriz de riscos resultante da relação entre a Frequência Anual de Falhas e o Impacto da Indisponibilidade de Máquina. No caso da produtividade, houve um ganho de 10,4% em peças dos produtos simulados e um ganho de 6,2% em subconjuntos. Já no caso da disponibilidade, houve um ganho de 50% na disponibilidade na ET A, 62% na disponibilidade na ET B e 41% na disponibilidade na ET E. Portanto, esta pesquisa preenche uma lacuna da literatura ao aplicar a modelagem e simulação de eventos discretos em uma abordagem de análise de riscos associada à gestão da manutenção. Dessa forma, conclui-se que foi possível desenvolver um *ranking* de prioridades de ETs e tipos de falha a serem incluídos nas propostas de políticas de manutenção preventiva, resultando em ganhos de disponibilidade e de produtividade para o sistema produtivo estudado.

Palavras-chave: manutenção; análise de riscos; produtividade; disponibilidade; simulação a eventos discretos.

ABSTRACT

Production systems were transformed by the advances of the Industrial Revolutions. In order to keep up with technological progress and achieve desired productivity levels, maintenance management has become a key factor for organizations. Since every production system is prone to failures in its equipment, directly impacting the reduction of manufacturing capacity, it is necessary to properly use maintenance policies to keep a system in good operating condition. In this sense, it is understood that the greater the availability of equipment, the greater the productivity of the system. Thus, the present work aims to incorporate risk mitigation applied together with the modeling and simulation of discrete events as tools to support decision-making for maintenance policies that lead to increased availability and manufacturing productivity. For this, an industrial system prone to machine failures and belongs to the public administration was analyzed. In the case studied, the proposed scenarios considered that the inclusion of preventive maintenance policies with a bimonthly or quarterly frequency projects both an increase in the Mean Time Between Failures of corrective maintenance and a reduction of the Mean Time to Repair of preventive maintenance due to the anticipation of administrative procedures previously planned. The workstations submitted to such proposals were Workstation A, Workstation B and Workstation E, defined according to the risk matrix resulting from the relationship between the Annual Frequency of Failures and the Impact of Machine Unavailability. In the case of productivity, there was a gain of 10.4% in parts of the simulated products and a gain of 6.2% in subsets. In the case of availability, there was a gain of 50% in availability in Workstation A, 62% in availability in Workstation B and 41% in availability in Workstation E. Therefore, this research fills a gap in the literature by applying the modeling and simulation of discrete events in a risk analysis approach associated with maintenance management. In this way, it was possible to develop a ranking of workstations priorities and types of failure to be included in preventive maintenance policy proposals, resulting in availability and productivity gains for the studied production system.

Keywords: maintenance; risk assessment; productivity; availability; discrete event simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura do Estudo	19
Figura 2 - Evolução da Manutenção	22
Figura 3 - Fases para a execução de um modelo de simulação a eventos discretos	32
Figura 4 - Passos de um roteiro de projeto de simulação	36
Figura 5 - Relação da Validação e Verificação na Modelagem	38
Figura 6 - Levantamento e Critérios de Exclusão de Artigos Acadêmicos	41
Figura 7 - Distribuição das publicações por ano	44
Figura 8 - Países das pesquisas	44
Figura 9 - Exemplo de Matriz de Riscos	54
Figura 10 - Matriz de Riscos	60
Figura 11 - Percentual de Frequência de Parada por Tipo de Falha	61
Figura 12 - Percentual da Duração das Falhas Mecânicas por ET	62
Figura 13 - Variação da Produtividade Total com relação ao <i>baseline</i>	65
Figura 14 - Dispersão da Produtividade Total	67
Figura 15 - Variação da Produtividade de Subconjuntos com relação ao <i>baseline</i>	68
Figura 16 - Dispersão da Produtividade de Subconjuntos	70
Figura 17 - Situação da Estação de Trabalho A	71
Figura 18 - Situação da Estação de Trabalho B	72
Figura 19 - Situação da Estação de Trabalho E	74

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparação de critérios de manutenção por geração	22
Quadro 2 - Síntese dos artigos selecionados.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Periódicos de publicação	45
Tabela 2 - Citações por autor	45
Tabela 3 - Resultados da Amostra Piloto	50
Tabela 4 - MTBF e MTTR das manutenções corretivas	57
Tabela 5 - Relação da Frequência de Falhas	58
Tabela 6 - Relação do Impacto da Indisponibilidade de Máquina	59
Tabela 7 - <i>Ranking</i> de Falha por ET	60
Tabela 8 - Síntese dos Resultados em Produtividade	70
Tabela 9 - Síntese dos Resultados em Disponibilidade	75

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.....	27
Equação 2.....	28
Equação 3.....	29
Equação 4.....	50
Equação 5.....	51
Equação 6.....	52
Equação 7.....	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAMAN	Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos
CBM	<i>Condition Based Maintenance</i>
CNC	<i>Computer Numeric Control</i>
DES	<i>Discrete Event Simulation</i>
ETs	Estações de Trabalho
IoT	<i>Internet of Things</i>
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i>
MTTR	<i>Mean Time To Repair</i>
NBR	Norma Técnica Brasileira
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i>
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos
WoS	<i>Web of Science</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	13
1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA	15
1.3 PROBLEMA DE PESQUISA	16
1.4 OBJETIVOS	17
1.5 ESTRUTURA METODOLÓGICA	18
1.6 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	20
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	21
2.1 MANUTENÇÃO	21
2.1.1 Histórico e Definição	21
2.1.2 Políticas de Manutenção	23
2.1.2.1 Manutenção Corretiva.....	24
2.1.2.1 Manutenção Preventiva.....	25
2.1.2.1 Manutenção Preditiva	25
2.1.3 Indicadores da Manutenção	26
2.1.3.1 MTBF.....	27
2.1.3.2 MTTR.....	28
2.1.3.3 Disponibilidade (D)	28
2.2 SIMULAÇÃO	29
2.2.1 Definições e Evolução	29
2.2.2 Simulação a Eventos Discretos	30
2.2.3 Vantagens e Desvantagens.....	33
2.2.4 Projeto de Simulação	35
2.3 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	39
3 METODOLOGIA	46
3.1 COLETA DE DADOS	47
3.2 ANÁLISE DOS DADOS	48
3.3 TEMPO TRANSIENTE, DURAÇÃO DA SIMULAÇÃO E REPLICAÇÕES	49
3.4 MATRIZ DE RISCOS	51
3.5 IMPACTOS DA POLÍTICA DE MANUTENÇÃO NO MTBF E MTTR	54
4 ESTUDO DE CASO.....	56
4.1 CENÁRIO BASE.....	56
4.2 RESULTADOS DA MATRIZ DE RISCOS	58
4.3 DADOS GERAIS	61
4.4 CENÁRIOS PROPOSTOS.....	62

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
5.1 PRODUTIVIDADE	64
5.2 DISPONIBILIDADE	71
6 CONCLUSÃO	77
REFERÊNCIAS	79
APÊNDICE A - Produtividade de Peça Base por Replicação	86
APÊNDICE B - Produtividade de Peça Topo por Replicação	88
APÊNDICE C - Produtividade Total por Replicação	90
APÊNDICE D - Produtividade de Subconjuntos por Replicação	92
APÊNDICE E - Disponibilidade da ET A por Replicação	94
APÊNDICE F - Disponibilidade da ET B por Replicação	96
APÊNDICE G - Disponibilidade da ET C por Replicação	98

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Os sistemas de produção evoluíram ao longo do tempo. O marco inicial se deu com a invenção da máquina a vapor na chamada Primeira Revolução Industrial, ou indústria 1.0. Com o surgimento da eletricidade e sua incorporação ao ambiente produtivo, deu-se início à Segunda Revolução Industrial, ou indústria 2.0, elevando ainda mais os níveis de produção. A junção da eletrônica com o suporte de sistemas de automação propiciou a Terceira Revolução Industrial, ou indústria 3.0. Já na Quarta Revolução Industrial, ou indústria 4.0, há conexões físicas cibernéticas que fazem os processos produtivos serem ainda mais confiáveis (ALTUNTAS, DERELI & KUSIAK, 2016; BILGIC *et al.*, 2019; SHROUF, ORDIERES & MIRAGLIOTTA, 2014).

Para acompanhar os avanços e manter a fabricação no nível de produtividade desejado, a gestão da manutenção emergiu e também passou por transformações. Segundo Jasiulewicz-Kaczmarek, Legutko e Kluk (2020), na Manutenção 1.0 as máquinas eram mais lentas, de *design* simples e aplicava-se a política de manutenção corretiva, sendo os consertos realizados pelos próprios operadores com base em falhas que já haviam acontecido anteriormente. Para os autores, com o aumento da complexidade das máquinas, surge a Manutenção 2.0 com o objetivo de realizar uma política de manutenção preventiva, a partir de verificações periódicas e substituições de peças gastas, a serem executadas por um departamento de manutenção.

A automação fomentou a Manutenção 3.0 e as intervenções passaram a ser fundamentadas pela política de manutenção baseada no monitoramento e na análise das condições do equipamento. As características dessa fase incluem maior disponibilidade e confiabilidade do maquinário, melhor qualidade do produto, vida útil do equipamento mais longa e melhor custo-benefício. Com a Quarta Revolução Industrial surge a necessidade de desenvolver métodos e ferramentas inovadores para acompanhar a mudança de paradigma que a Indústria 4.0 trouxe para os sistemas de produção (JASIULEWICZ-KACZMAREK, LEGUTKO & KLUK, 2020).

A Manutenção 4.0 é entendida como um facilitador para a fábrica inteligente (PASSATH & MERTENS, 2019), com foco na aprendizagem e melhoria contínua da gestão de manutenção (KINZ, BERNERSTAETTER & BIEDERMANN, 2016). As intervenções se tornam mais fáceis e os sistemas mais confiáveis, pois o monitoramento ocorre em tempo real e viabiliza a notificação da equipe de manutenção antes da ocorrência da falha (CAKIR,

GUVENÇ & MISTIKOGLU, 2021). Ou seja, é possível prever uma avaria futura com a aplicação de técnicas avançadas em *big data* que auxiliam no diagnóstico sobre o desempenho de um ativo e, assim, desencadeiam ações em manutenção (KANS & GALAR, 2017).

A transformação digital facilitou o avanço das técnicas de monitoramento para previsão de falhas devido à precisão dos dados que descrevem o estado de um equipamento. Isso é possível por análises em tempo real, avanço dos algoritmos de redes neurais, computação em nuvem e inteligência artificial, facilitando a política de manutenção preditiva. O uso desses métodos avançados de análise de dados na Manutenção 4.0 permite não apenas prever a ocorrência de uma falha, mas também recomendar medidas para evitá-las, transformando essa atividade em uma ação proativa e inteligente (JASIULEWICZ-KACZMAREK, LEGUTKO & KLUK, 2020; MATYAS *et al.*, 2017).

O custo de se realizar essas políticas de manutenção é uma variável a ser considerada na tomada de decisão. O Documento Nacional da Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos (ABRAMAN, 2017) mapeou a situação do Brasil, informando que o custo total com reparos de máquinas e equipamentos representou 3% do faturamento bruto do setor metalúrgico. Dos gastos diretos relacionados às políticas de manutenção em máquinas e equipamentos do setor metalúrgico, 48% corresponderam a ações preventivas, 25% a ações corretivas, 7% a ações preditivas e 20% a outras atividades de manutenção.

É possível definir intervalos para a realização de inspeção de forma a minimizar os custos com essa atividade, ao passo em que se mantém o funcionamento dos componentes de um sistema. Isso é mostrado em um estudo voltado para o desenvolvimento de algoritmo de otimização que definiu intervalos ideais para intervenções, minimizando os custos totais com manutenção de equipamentos de mineração. A pesquisa sugere que há uma relação direta entre o aumento do intervalo entre paradas e a redução dos custos diretos de produção devido às menores perdas em unidades fabricadas, além de definir um intervalo ótimo que possibilita a redução do custo total para um equipamento em 6,2% (GÖLBAŞI & DEMIREL, 2017).

O planejamento adequado das intervenções impacta nos custos diretos de produção e, conseqüentemente, na lucratividade dos negócios, como é apresentado em um estudo realizado em uma indústria de celulose. A pesquisa conclui que o componente custo é o que mais afeta a escolha sobre políticas de manutenção. Nesse sentido, os critérios levantados pelos autores incluem custos com perda de produção, custos de compra ou fabricação de peças sobressalentes, dentre outros (DARESTANI, PALIZBAN & IMANNEZHAD, 2020).

Além dos custos diretos, existe ainda o custo de oportunidade da não utilização dos equipamentos. Essa relação é esclarecida no estudo realizado em uma concessionária de

energia elétrica com o objetivo de quantificar o impacto econômico que as falhas em transformadores representam sobre os custos totais de manutenção. A pesquisa conclui que dos custos totais de manutenção, 30% foram custos diretos e 70% representaram custos de oportunidade (PEIMBERT-GARCÍA, VÁZQUEZ-SERRANO & LIMÓN-ROBLES, 2021).

1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

Um sistema produtivo está propenso à ocorrência de falhas em seus equipamentos, o que impacta diretamente na redução da capacidade fabril. Isso faz com que seja necessário programar políticas de manutenção com o objetivo de aumentar a confiabilidade das máquinas (DAVOODI & AMELIAN, 2018). Djassemi e Seifoddini (2019) corroboram explicando que a necessidade de se destacar e se manter competitivo no mercado faz com que as indústrias busquem cada vez mais a confiabilidade das suas instalações e a previsibilidade dos seus recursos. Os autores desenvolveram um estudo de análise de sensibilidade em uma indústria de *layout* celular e concluíram que o aumento da confiabilidade das máquinas que apresentavam o menor tempo médio entre falhas resultou em melhoria na capacidade produtiva e no tempo médio de fabricação. Isto é, quanto mais confiável o maquinário se torna, mais o sistema estará disponível para os processos de fabricação, possibilitando ganhos em unidades produzidas.

No mesmo sentido, Gölbasi e Turan (2020) confirmam que a manutenção é uma atividade necessária para manter um sistema e seus equipamentos em boas condições operacionais de modo a atingir a produtividade desejada. Dessa forma, Lopes *et al.* (2016) comentam que para decidir sobre a aplicação de uma determinada política de manutenção, seja corretiva, preventiva ou preditiva, é necessário considerar não só fatores como gravidade da falha e custos associados, mas também os níveis de confiabilidade e de disponibilidade desejados.

A manutenção corretiva é aquela que mais gera perdas de produção devido ao tempo de inatividade do equipamento (LOPES *et al.*, 2016). Ao implementar políticas de manutenções preventivas periódicas é possível reduzir a quantidade de paradas para manutenções corretivas não planejadas, evitando o excesso de indisponibilidade desnecessária das máquinas (CONRADS *et al.*, 2017).

Já na manutenção preditiva, as ações de intervenção são monitoradas e programadas de forma proativa, pois há um maior entendimento da degradação do equipamento, assim como dos seus riscos associados, o que possibilita que a manutenção seja prevista e realizada

no melhor momento possível, minimizando ainda mais as interrupções e o tempo de inatividade quando comparada à manutenção preventiva planejada (NGU, PHILIP & SAHLAN, 2019).

Diante do exposto, entende-se que quanto maior a disponibilidade dos equipamentos, maior será a produtividade do sistema, o que torna a gestão da manutenção um fator estratégico para as organizações.

1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

Alabdulkarim, Ball e Tiwari (2013) levantaram as aplicações das técnicas de simulação de eventos discretos em estudos voltados aos problemas de manutenção no período de 1973 a 2011 e destacaram que a maior representatividade das publicações foi em torno de 30% de estudos que abordaram políticas de manutenção corretiva e preventiva em sistemas de fabricação, o que demonstra uma prática considerável desses dois tipos de intervenção. Entretanto, não foi identificado pelos autores nenhum estudo que incluía análise de riscos. Essa abordagem é relevante, pois permite abordar a relação entre o impacto e a probabilidade da ocorrência de falha de máquina.

A fim de verificar a persistência da lacuna de pesquisa, foram realizadas buscas em bases científicas para o período de 2012 a 2021 de modo a identificar publicações recentes de simulação de eventos discretos que tratem de questões de manutenção em ambiente fabril. Dentre os trabalhos selecionados, não foi encontrada nenhuma pesquisa que incluía gestão de riscos, o que confirma que as análises de impacto e de probabilidade da ocorrência de falhas de máquina não são estudadas em conjunto com a ferramenta de modelagem e simulação de eventos discretos e, por isso, essa abordagem carece de entendimento na área industrial.

Assim, este trabalho busca responder a seguinte questão de pesquisa: como a mitigação de riscos aplicada em conjunto com a modelagem e simulação de eventos discretos auxilia nas decisões por políticas de manutenção para o aumento da disponibilidade e produtividade fabril? Para isso, um sistema industrial propenso a falhas de máquina e com manutenções exclusivamente corretivas é representado e analisado, possibilitando incorporar a natureza dinâmica das situações reais e a comparação de cenários de inclusão de alternativas de políticas de manutenção.

Uma vez que a indústria estudada pertence à administração pública, as alternativas de políticas de manutenção a serem avaliadas tratarão da inclusão de intervenções preventivas e, conseqüentemente, redução de intervenções corretivas. Essa escolha se deve ao fato de a

manutenção não ser uma prioridade para o poder público (NKRUMAH *et al.*, 2017). Por isso, esse setor não acompanhou as transformações na gestão da manutenção, que já alcançou o patamar da Manutenção 4.0. Algumas razões que explicam esse fenômeno, segundo a literatura, são as limitações financeiras, a falta de mão de obra qualificada e a deficiência de políticas de manutenção adequadas e bem estruturadas (YINGHUA *et al.*, 2018; NKRUMAH *et al.*, 2017).

De acordo com Amponsah-Kwatiah, Owusu e Afranie (2021), a carência de uma boa cultura em manutenção é ainda mais percebida no setor público dos países em desenvolvimento, gerando uma grande preocupação dos gestores públicos com a necessidade de adotar medidas urgentes para reverter essa realidade. Para os autores, as instituições públicas devem priorizar desde a etapa de planejamento, antecipando-se ao surgimento da necessidade de manutenção, até a efetiva execução da atividade de intervenção.

Com isso, essa pesquisa contribui com uma melhor compreensão sobre o tema a partir da abordagem inédita de modelagem e simulação de eventos discretos em conjunto com a análise de matriz de riscos aplicadas à gestão da manutenção em um ambiente industrial do primeiro setor.

1.4 OBJETIVOS

Esta dissertação tem por objetivo geral avaliar a inclusão de políticas de manutenção preventiva e, conseqüentemente, a redução de políticas de manutenção corretiva, observando critérios de disponibilidade e de produtividade, a partir da mitigação dos riscos de falhas que causam paradas de máquina. A pesquisa utiliza-se de um estudo de caso aplicado a uma empresa de usinagem pertencente à Administração Pública, localizada no estado de São Paulo.

O estudo de caso único apoia-se, primeiramente, na possibilidade de se estudar com profundidade o caso em questão (VOSS, TSIKRIKTSIS & FROHLICH, 2002). Isso se torna viável devido à facilidade de acesso aos dados e à disponibilidade de tempo e de recursos necessários. Um segundo fator considerado é a particularidade da administração pública, com características comuns a todas as organizações desse setor, como as limitações orçamentárias e a exigência da legislação que define processos licitatórios para aquisição de bens e contratação de serviços.

Os objetivos específicos desta pesquisa contemplam:

- Desenvolver uma matriz de riscos para cálculo da relação de frequência de ocorrência com o impacto na indisponibilidade para as Estações de Trabalho (ETs) de usinagem por tipo de parada por falha de máquina. O resultado obtido apresenta um *ranking* de quais ETs e falhas devem ser priorizadas no estudo de cenários;
- Construir os modelos conceitual e computacional, por meio da simulação de eventos discretos, a fim de representar o comportamento do sistema industrial analisado, incorporando estatísticas de paradas por falha de máquina e de manutenções;
- Analisar alternativas de cenários variando políticas de manutenção preventiva, representando tanto o aumento do tempo médio entre falhas (MTBF) das políticas de manutenção corretivas quanto a redução do tempo médio para reparo (MTTR) das preventivas programadas devido à antecipação de procedimentos administrativos. As decisões sobre quais ETs e tipos de falhas avaliadas nos cenários são embasadas pelo *ranking* obtido com a matriz de riscos.

1.5 ESTRUTURA METODOLÓGICA

Este estudo é baseado em uma revisão da literatura e uma pesquisa empírica, conforme ilustrado na Figura 1.

FIGURA 1 - Estrutura do Estudo



Fonte: Elaborado pela autora

A primeira fase, revisão da literatura, aborda uma investigação técnico-científica a partir de artigos, livros e trabalhos acadêmicos visando compreender como a ferramenta de modelagem e simulação de eventos discretos auxilia nas decisões por políticas de manutenção. De acordo com Gil (2008), o objetivo dessa etapa é obter uma visão geral com relação à revisão da literatura no tema proposto.

Dessa forma, são apresentados, inicialmente, os conceitos de manutenção, suas principais políticas e seus indicadores. Em seguida a ferramenta de modelagem e simulação é explicada, bem como as vantagens e desvantagens do seu uso. Por fim, trabalhos científicos que aplicaram a simulação no contexto da manutenção industrial são analisados a fim de se realizar uma revisão sistemática da literatura, confirmando a ausência da mitigação de riscos para a tomada de decisão no contexto avaliado.

Já na segunda fase, pesquisa empírica, observa-se a teoria em um contexto prático, realizando um estudo de caso no qual há a representação e análise de um sistema industrial real e complexo. Para isso são desenvolvidos os modelos conceitual e computacional, representativos do sistema em estudo, e as alternativas de políticas de manutenção são estudadas por meio desses modelos. Assim, a partir dos resultados obtidos, é possível avaliar comparativamente os cenários de decisões e, conseqüentemente, realizar recomendações para o sistema em questão.

1.6 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em seis capítulos. O capítulo 1 possui caráter introdutório e abrange contextualização, justificativa e relevância, descrição do problema de pesquisa, objetivos, estrutura metodológica e organização do texto.

O capítulo 2 apresenta a revisão de literatura, contemplando o referencial teórico dos tópicos centrais, necessários para o desenvolvimento da pesquisa, isto é, manutenção e simulação. Dessa forma, obtém-se um levantamento de estudos aplicados ao tema abordado, indicando o aprendizado de outros autores em trabalhos correlatos.

O capítulo 3 descreve a metodologia de pesquisa adotada, englobando caracterização metodológica do estudo, formas de coleta e de análise dos dados, determinação do tempo transiente e da duração da simulação, procedimentos utilizados para a construção da matriz de riscos e discussão dos impactos nas variáveis MTBF e MTTR devido à alteração da política de manutenção.

O capítulo 4 aborda o estudo de caso para o modelo de simulação desenvolvido, mostra os resultados da matriz de riscos para o caso aplicado, discute os dados de manutenção utilizados e define os critérios de seleção para a proposição de cenários.

O capítulo 5 discute os resultados em produtividade e disponibilidade obtidos em cada cenário, desde o cenário atual até os cenários propostos, por meio da modelagem e simulação.

O capítulo 6 apresenta as conclusões da pesquisa, bem como as considerações finais relacionadas às limitações da pesquisa e sugestões de trabalhos futuros na área.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 MANUTENÇÃO

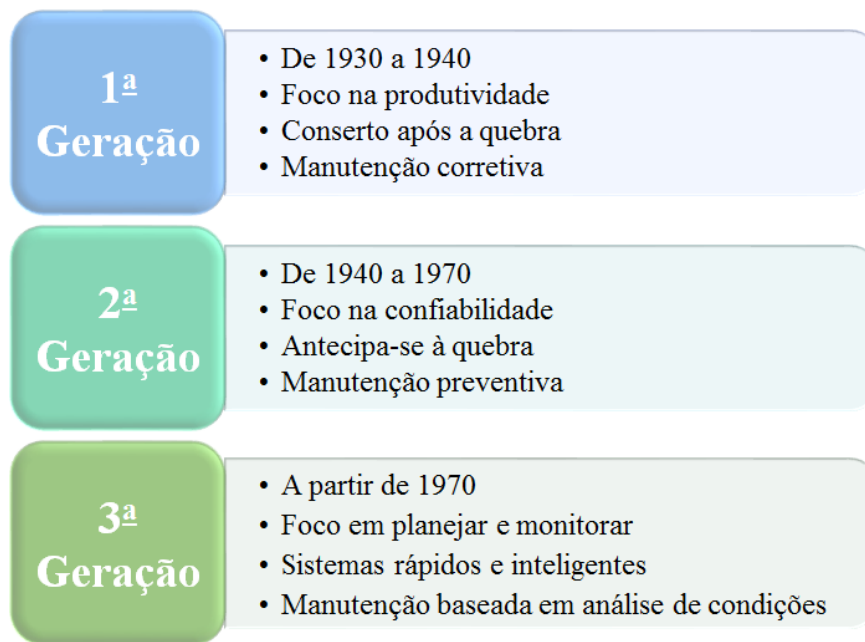
2.1.1 Histórico e Definição

De acordo com Silva (2017), a organização da manutenção está diretamente associada ao estágio de desenvolvimento industrial de um país, já que, com o processo de obsolescência dos equipamentos e instalações de um parque industrial faz-se necessário o uso de técnicas e procedimentos de manutenção. Ainda segundo o autor, como os países europeus foram pioneiros na Revolução Industrial e, conseqüentemente, os primeiros a apresentarem desgastes em suas máquinas, estes foram os criadores do termo manutenção.

Sousa (2018) classifica a evolução da manutenção em três gerações distintas. A primeira delas abrange o período de 1930 a 1940, caracterizado pelo surgimento da produção em série, idealizada por Henry Ford, na qual se iniciaram os primeiros controles e metas de produção e, conseqüentemente, a necessidade de rápidos reparos nas máquinas com falhas para que as paradas não impactassem consideravelmente na produtividade. De acordo com o autor, nessa geração a manutenção foi meramente corretiva, com o conserto do equipamento após a ocorrência de uma falha. Ainda segundo o autor, a segunda geração compreende o período de 1940 a 1970 e tem como principal característica a necessidade de se obter uma produção mais ágil e confiável, a fim de acompanhar o surgimento dos primeiros computadores e o alcance da globalização. Dessa forma, as intervenções corretivas já não eram mais suficientes, dando espaço ao surgimento da manutenção preventiva, com o objetivo de evitar a ocorrência de falhas. Nessa geração houve uma maior disponibilidade e vida útil dos equipamentos devido às intervenções preventivas.

Já a terceira geração vai desde 1970 até a atualidade e aborda o período após a Terceira Revolução Industrial, relacionando a manutenção como parte integrante das funções básicas de um negócio. Nessa geração há um aumento da disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos, entendimento da relação custo e benefício da manutenção, intervenções planejadas baseadas em condição, estudo de risco da falha para a tomada de decisão, controle dos riscos para segurança e saúde do trabalhador, preocupação com o meio ambiente, equipes multitarefas e avanços tecnológicos significativos que viabilizam melhores condições de monitoramento (SOUSA, 2018). Um resumo das gerações é ilustrado na Figura 2.

FIGURA 2 - Evolução da Manutenção



Fonte: Elaborado pela autora

Outros autores explicam que a terceira geração sofreu modificações com o advento da Quarta Revolução Industrial, ou indústria 4.0, surgindo a quarta geração. A Internet das Coisas, do inglês *Internet of Things* (IoT), e a Computação em Nuvem possibilitaram um aumento representativo em termos de levantamento, armazenamento e processamento de dados, o que facilita as decisões em manutenção, além de promover análises eficazes de dados para os fornecedores dos equipamentos e uma compreensão mais aprofundada para o operador sobre o funcionamento da máquina (JASIULEWICZ-KACZMAREK, LEGUTKO & KLUK, 2020).

O Quadro 1 compara as práticas em manutenção nas suas diferentes gerações.

Quadro 1 - Comparação de características de manutenção por geração

Critério / Geração	1ª Geração ou Manutenção 1.0	2ª Geração ou Manutenção 2.0	3ª Geração ou Manutenção 3.0	4ª Geração ou Manutenção 4.0
Fonte de dados	Experiência do operador	Supervisor e o equipamento	Operador, supervisor, equipamento e informações em sistemas computacionais	Operador, supervisor, equipamento, informações em sistemas e fabricante
Coleta de dados	Manual	Manual	Semiautomática via sensores	Automática via IoT

Critério / Geração	1ª Geração ou Manutenção 1.0	2ª Geração ou Manutenção 2.0	3ª Geração ou Manutenção 3.0	4ª Geração ou Manutenção 4.0
Armazenamento de dados	Memória do operador	Documentos escritos	Banco de dados	Computação em nuvem
Análise de dados	Arbitrária	Teoria de confiabilidade	Algoritmos para identificação de evidências	Lógica <i>Fuzzy</i> e redes neurais usadas para planejamento
Transferência de dados	Comunicação verbal	Documentos escritos	Arquivos digitais	Arquivos digitais
Gestão de dados	-	Operador	Sistemas de Informação	Inteligência artificial, <i>Big Data</i> e computação em nuvem

Fonte: Adaptado de Jasiulewicz-Kaczmarek, Legutko e Kluk (2020)

A NBR 5462 (ABNT, 1994) trata a manutenção como uma prática que envolve ações técnicas e administrativas com o objetivo de manter a capacidade de um determinado componente em desempenhar a sua função esperada. No mesmo sentido, Viana (2013) define manutenção como o conjunto de atividades que visam manter os bens de produção em perfeito estado de funcionamento. Em abordagem complementar, Oliveira (2013) conceitua o termo como a gestão de um bem, envolvendo aspectos técnicos e econômicos, a fim de não apenas mantê-lo, mas também elevar o seu ciclo de vida.

Para obter tal aumento no ciclo de vida dos bens de produção, é preciso que um plano de manutenção seja aplicado. Este, segundo Campos e Belhot (1994), deve estar condizente com a estratégia do negócio e ser composto por políticas de manutenção adequadas para a realização de reparo, substituição e recondicionamento dos sistemas e componentes. Tais políticas são explicadas a seguir.

2.1.2 Políticas de Manutenção

A literatura classifica a manutenção em alguns tipos distintos. Deve-se compreender a diferença entre cada um deles para decidir qual das opções é a mais adequada em cada momento. Inicialmente, a NBR 5462 (ABNT, 1994) define a manutenção como o reparo após a ocorrência de uma falha, com foco em realizar intervenções corretivas. Esse conceito evolui e passa a buscar antecipar-se à quebra de máquina, visando manter a confiabilidade do equipamento e realizar intervenções preventivas. Em seguida, entende-se que o termo é ainda mais amplo, devendo-se buscar um maior controle a partir do planejamento e monitoramento

do sistema produtivo em diversos aspectos, realizando a manutenção preditiva, também conhecida como manutenção baseada na análise de condições. A seguir são apresentadas as três políticas básicas de manutenção: corretiva, preventiva e preditiva.

2.1.2.1 Manutenção Corretiva

Para Silva (2017) a manutenção corretiva é utilizada para corrigir falhas que ocorrem por avarias ou desgastes. Analogamente, Espinosa e Cea (2004) afirmam que consiste na prática de quebrar e consertar na sequência. A NBR 5462 (ABNT, 1994) define esse tipo de manutenção como a realização de reparos após a ocorrência de uma pane, sendo o objetivo principal readequar um equipamento às condições em que foi projetado a funcionar, isto é, tem como fim corrigir qualquer problema em uma máquina de modo que ela cumpra o seu papel pré-estabelecido no processo produtivo.

Segundo Kardec e Nascif (2013), a manutenção corretiva nem sempre deve ser tratada como urgente e imediata, já que há casos de intervenção para corrigir um desempenho abaixo do esperado. Entretanto, essa abordagem é restritiva, sendo adequado levar em consideração outros aspectos. Nesse sentido, Viana (2002) considera que essa manutenção deve ser realizada imediatamente, a fim de que não ocorram complicações para a segurança do trabalhador, ao ambiente ou às máquinas.

Silva (2017) ainda elucida que se deve levar em consideração a obsolescência tecnológica dos equipamentos. Isso porque o constante avanço e atualização da tecnologia faz com que haja uma rápida substituição dos maquinários fabris, os quais apresentam ciclos de vida cada vez mais curtos. Dessa forma, deve-se estar atento à viabilidade econômica da intervenção, pois a obsolescência pode ser mais rápida do que a vida útil do bem, sendo mais interessante o conserto para a substituição de componentes por outros mais modernos do que apenas para reparos pontuais. Assim, não apenas corrige-se o problema, como também atualiza-se o parque industrial.

Para exemplificar, nota-se a necessidade da manutenção corretiva em automóveis para reparos de falha no freio, falha na bateria, aquecimento do motor, pane elétrica, ruído ao trocar de marcha, dentre outros reparos. As intervenções ocorrem de forma inesperada e são impeditivos para o funcionamento correto do veículo.

2.1.2.1 Manutenção Preventiva

Conforme a NBR 5462 (ABNT, 1994) apresenta, a manutenção preventiva é aquela realizada em intervalos de tempo certos ou segundo critérios previamente definidos, com o objetivo de diminuir a chance de um equipamento falhar ou do seu funcionamento sofrer degradação. Sendo assim, é a ação destinada a prevenir falhas, panes ou quebras de máquina, elevando sua disponibilidade e confiabilidade. Dantas (2019) afirma que esse tipo de intervenção é realizado anteriormente a uma parada não prevista do equipamento, podendo ocorrer ainda por meio do *input* do fabricante.

Para que a manutenção preventiva aconteça, deve-se estabelecer um plano prévio que identifique intervalos de tempo para sua execução. Por isso, o desafio desse tipo de manutenção é estimar adequadamente o momento de sua realização de modo que haja a substituição de um componente antes do término de sua vida útil, evitando-se uma parada inesperada. Silva (2017) comenta que essa problemática advém da dificuldade em estimar o período entre as manutenções preventivas, pois caso ele seja subestimado, o custo será elevado e os componentes serão repostos muito antes do necessário. Por outro lado, caso esse período seja superestimado, há grande risco de falha repentina.

Zaions (2003) apresenta algumas vantagens do uso dessa política de manutenção, são elas: o funcionamento do equipamento de forma contínua, só sendo interrompido para reparos previamente programados, em datas conhecidas; e o alto grau de confiabilidade, o qual garante a continuidade da produção e viabiliza o atingimento das metas produtivas dentro do prazo estipulado e da qualidade exigida.

Para exemplificar, nota-se a presença da manutenção preventiva em automóveis nas ações de revisão e vistoria de freios, pneus, óleo, correia dentada, radiador, alinhamento e balanceamento, dentre outras ações. As intervenções são parametrizadas para ocorrer em intervalos fixos de tempo ou a cada vez que o veículo rodar determinada quilometragem previamente especificada. Isto é, a intervenção é realizada de acordo com parâmetros como ciclo de vida e tempo de uso.

2.1.2.1 Manutenção Preditiva

A NBR 5462 (ABNT, 1994) define que a manutenção preditiva garante a qualidade desejada para um serviço ao aplicar um conjunto de técnicas de análise, as quais permitem reduzir ao mínimo as manutenções preventivas, além de reduzir as manutenções corretivas.

Ou seja, ela viabiliza a análise da situação real de um equipamento, encontrando potenciais falhas em estágio ainda inicial através do acompanhamento das condições identificadas.

Carvalho (2016) afirma que essa manutenção é baseada em um monitoramento que busca prever condições de falha antes da sua ocorrência. Bristot (2012) explica que o *input* para a manutenção é o estado da máquina, identificado por meio da medição de variáveis, com a máquina em funcionamento, as quais possibilitam analisar sintomas ou condições fora dos parâmetros ditos como adequados. Para Silva (2017), as medições avaliam, dentre outros fatores, vibração, temperatura, nível de ruído, pressão e análises químicas.

Ao realizar tal avaliação, o resultado encontrado é comparado ao valor padrão estipulado, sendo possível antever a ocorrência de falha e tendo tempo suficiente para programar a manutenção correta, de acordo com a condição identificada no equipamento. Por isso, é comum usar como sinônimo o termo “Manutenção Baseada em Condição”.

Segundo Viana (2013), é possível definir de forma assertiva o momento da ocorrência da intervenção, evitando paradas desnecessárias e utilizando os recursos até o máximo da sua vida útil. Analogamente, Ngu, Philip e Sahlan (2019) comentam ser possível entender a criticidade, os riscos e o nível de degradação de um equipamento, possibilitando evitar interrupções não programadas.

Silva (2017) identifica como principais objetivos da manutenção preditiva: redução de acidentes, redução de paradas inesperadas, aumento da disponibilidade dos equipamentos, não reposição de peças sobressalentes antecipadamente, aquisições desses itens sobressalentes com maior prazo e menor custo, antever as avarias que deverão ser corrigidas, reduzindo tempo e custo da intervenção, aumentar a vida útil e a confiabilidade do equipamento.

Para exemplificar, nota-se a presença da manutenção preditiva em automóveis nas ações de diagnóstico do desgaste de uma peça a partir da análise de vibrações, análise visual do estado geral das peças e análise estrutural, na qual é possível identificar trincas, vazamentos, rachaduras e ressecamentos. O *input* para essas intervenções pode se dar pela observação do motorista quanto à trepidação no volante ou à existência de barulho anormal.

2.1.3 Indicadores da Manutenção

Com a evolução da política de manutenção corretiva para preventiva, fez-se necessário desenvolver alguns indicadores especificamente para acompanhamento, mensuração e planejamento de intervenções, principalmente as preventivas. Tais indicadores são amplamente divulgados e utilizados por serem bons parâmetros para a análise da viabilidade e

desempenho de um equipamento dentro de um parque industrial. Os principais deles são apresentados a seguir.

2.1.3.1 MTBF

MTBF, do inglês *Mean Time Between Failures*, representa o tempo médio entre a ocorrência de falhas. Zeng, Shao e Hao (2021) definem MTBF como um índice usado para medir a vida média de manutenção em um sistema, a partir do qual uma máquina pode vir a retomar o seu funcionamento normalmente, nas mesmas condições de quando era nova, após a realização de cada conserto que se fizer necessário. Para os autores, um equipamento passível de reparo possui N tempos de parada e t horas de trabalho entre falhas. Assim, Zeng, Shao e Hao (2021) estabelecem a seguinte expressão para o cálculo do MTBF, onde T é o tempo total de trabalho do maquinário:

$$MTBF = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i = \frac{T}{N} \quad \text{Equação 1}$$

De acordo com Cerveira e Sellitto (2015), este é um dos mais importantes indicadores para a área da manutenção. Isso porque, conforme explicado por Mengue e Sellitto (2013), se após a realização de uma intervenção o valor do MTBF aumentar, entende-se que houve uma melhoria na qualidade dos processos e, conseqüentemente, um aumento na confiabilidade dos equipamentos. Mendes e Ribeiro (2014) complementam afirmando que ao se elevar o MTBF haverá redução da quantidade de ocorrência de falhas e do tempo gasto com os devidos reparos, o que favorece um melhor aproveitamento da capacidade produtiva de um sistema.

Oleghe e Salonitis (2019) explicam que quanto menor for o MTBF, maior será a frequência de falha e, por isso, menor será o rendimento produtivo. Os autores também comentam que ao deixar de reparar muitas avarias que não causam a parada total da máquina, ou seja, ao manter o equipamento em funcionamento com defeitos a serem corrigidos, maior será o MTBF. Para manter-se competitivo, deve-se buscar um aumento do MTBF, como também as melhores tratativas para cada ocorrência de falha, de modo a fazer os consertos adequadamente, evitando uma quantidade elevada de paradas por completo do equipamento.

2.1.3.2 MTTR

MTTR, do inglês *Mean Time To Repair*, representa o tempo médio para reparo. Ele possui uma relação direta com o termo Manutenibilidade, que é a capacidade de receber uma manutenção ou a probabilidade de duração de tal intervenção, geralmente do tipo corretiva. Dantas (2019) explica que esse índice indica a média dos tempos que a equipe responsável pela manutenção gasta desde o momento da avaria até a conclusão do conserto, colocando o equipamento em condições para retomar suas atividades normalmente.

Zeng, Shao e Hao (2021) indicam que o MTTR é determinado pela densidade de probabilidade de reparo, sendo a relação entre o total de horas demandadas para a manutenção corretiva e o número total de falhas. Para os autores, o indicador descreve o valor médio de horas necessárias para transformar um equipamento que se encontra em falha para um estado normal de funcionamento, considerando para o cálculo apenas o tempo despendido com intervenção direta, sem a inclusão de tempos com esperas.

Assim, Zeng, Shao e Hao (2021) estabelecem a seguinte expressão para o cálculo do MTTR, onde t indica horas demandadas para reparo e n é o número de vezes em que aconteceram reparos:

$$MTTR = \sum_{i=1}^N \frac{t_i}{n} \quad \text{Equação 2}$$

Mendes e Ribeiro (2014) comentam que um menor MTTR é indicativo de que os problemas que vierem a ocorrer nos processos terão soluções mais rápidas, o que indica uma maior eficiência. Os autores complementam que quanto menor for o tempo gasto com manutenções corretivas, maior será o tempo em que o sistema permanecerá disponível. Inevitavelmente, há um aumento da produtividade devido à maior disponibilidade.

2.1.3.3 Disponibilidade (D)

Esse indicador representa o tempo no qual um equipamento está disponível para uso, sem que ele esteja apresentando qualquer falha. Kumar e Kumar (2021) definem como disponibilidade de um sistema passível de consertos a probabilidade de que este esteja operando dentro das condições esperadas por um período especificado. Segundo Zeng, Shao e Hao (2021), a melhora da taxa de disponibilidade gera uma redução nos custos de

manutenção.

Os autores também afirmam que o índice é calculado em função do tempo médio entre falhas e do tempo médio para reparo, ou seja, é expresso pela proporção de MTBF para o somatório do MTBF com o MTTR, todos parâmetros considerados especificamente por equipamento, conforme apresentado a seguir:

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad \text{Equação 3}$$

2.2 SIMULAÇÃO

2.2.1 Definições e Evolução

A simulação é a aplicação de um conjunto de métodos com o objetivo de imitar o comportamento real de um sistema (LAW, 2013). Esse comportamento pode ser representado tanto de forma simplificada quanto detalhada, devendo expressar as interações existentes entre os componentes do sistema, conforme expõem Chwif e Medina (2015). A representação proposta por um modelo possibilita desenvolver uma história artificial da realidade e pela sua observação é possível tirar conclusões a respeito das características operacionais do sistema simulado, de acordo com Banks *et al.* (2010).

Para Istokovic *et al.* (2020), a aplicação da modelagem e simulação permite o desenvolvimento de modelos para a representação de sistemas produtivos, com a possibilidade de incluir incertezas, como falhas de máquina e tempos de espera, analisando os resultados sem a necessidade de intervenções reais. A partir da interpretação dos resultados é possível buscar soluções para os problemas reais representados pelos modelos. Prado (2010) reforça que simular é utilizar técnicas para resolver dificuldades pela análise de um modelo que descreve o comportamento de um sistema.

Chwif e Medina (2015) explicam o que não é considerado como simulação:

- Não é uma técnica a ser utilizada quando todas as demais técnicas falharem;
- Não prevê o futuro e sim o comportamento de um sistema;
- Não visa otimização e sim análise de alternativas de cenários;
- Não é um modelo matemático por não haver uma expressão fechada.

O avanço tecnológico foi fundamental para a evolução das técnicas utilizadas em modelagem e simulação. Maurício (2015) afirma que antes da disseminação do computador,

os sistemas eram estudados por meio de modelos físicos. Silva (2006) confirma que a simulação física aborda a experimentação diretamente por objetos reais. Por outro lado, Maurício (2015) explica que o desenvolvimento dos computadores possibilitou a disseminação da tecnologia como ferramenta de gestão para a tomada de decisão em problemas de produção de bens e serviços.

A partir do uso do computador como facilitador para a modelagem e simulação, o uso da experimentação por objetos reais passa a não ser a única opção possível, surgindo então a simulação matemática. Dessa forma, é possível perceber a interface da ferramenta com a Pesquisa Operacional. Silva (2006) afirma que nessa simulação as relações observadas em um sistema são explicadas a partir de expressões matemáticas, podendo ser dividida em simulação matemática analítica e simulação matemática numérica. Segundo o autor, a primeira resulta em uma solução única a ser considerada como ótima, enquanto a segunda foca na análise do comportamento do sistema e no estudo das possibilidades de cenários a serem implementados. Analogamente, Maurício (2015) afirma que a simulação matemática analítica visa a otimização de um critério de desempenho, enquanto Carvalho (2016) pondera que ela apresenta muitas limitações pela necessidade de diversas simplificações da realidade, o que distancia a fidedignidade das características presentes nas situações do mundo real. Para Chwif e Medina (2015), apesar de não refletir a complexidade da realidade, suas vantagens estão na obtenção de solução exata, de forma rápida e, por vezes, ótima.

Há ainda uma divisão da simulação matemática numérica em determinística e estocástica, conforme Silva (2006). Para o autor, a primeira utiliza valores fixos para seus parâmetros estudados, já a segunda permite variação desses parâmetros a partir do uso de distribuições de probabilidade. Assim, para Chwif e Medina (2015), a modelagem matemática permite representar com precisão a complexidade de um sistema real, com a sua natureza dinâmica e aleatória, reproduzindo no computador o que ocorreria no mundo real se ele estivesse sujeito às condições simuladas.

2.2.2 Simulação a Eventos Discretos

A simulação a eventos discretos é objeto de estudo dessa pesquisa. Law (2013) explica que a partir do avanço temporal em instantes discretos, ocorrem situações que mudam o estado do sistema. De acordo com Alrabghi e Tiwari (2016), ela determina uma sequência de eventos a ocorrer em intervalo de tempo discreto. Dessa forma, segundo os autores, a simulação depende de eventos pré-determinados, que podem incluir a chegada de uma peça,

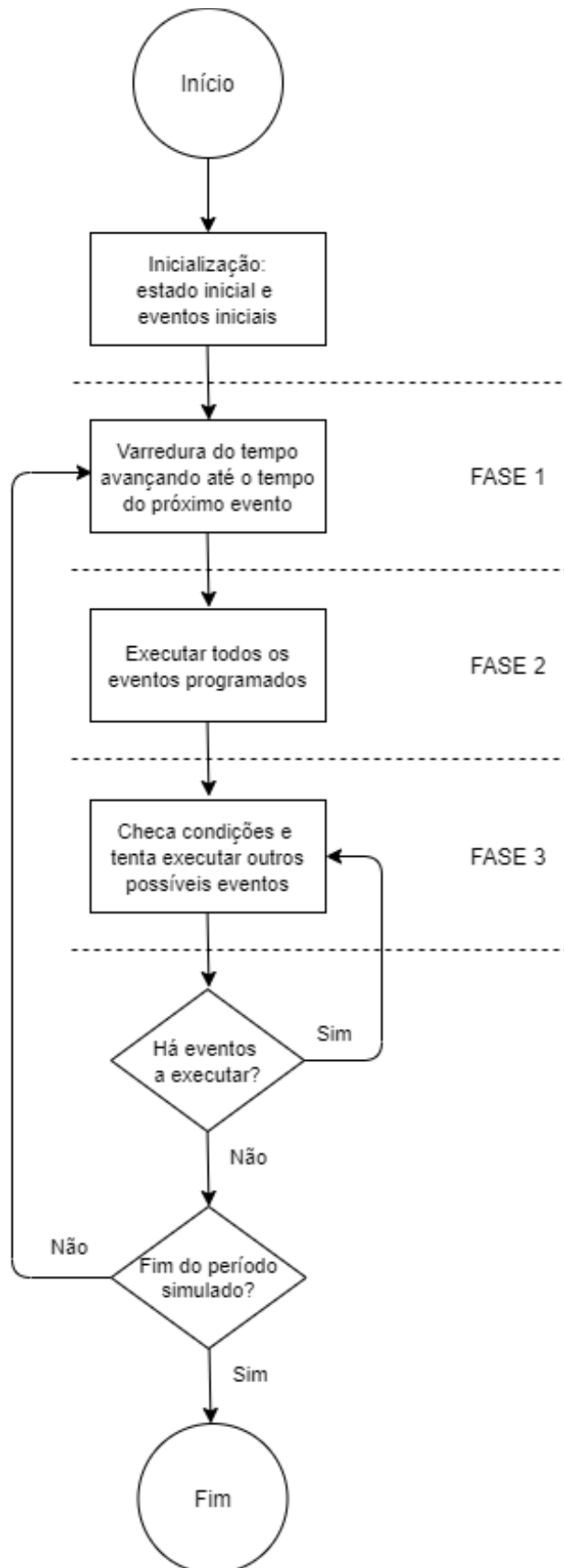
início e término dos ciclos nas máquinas ou a ocorrência de falhas a serem reparadas.

Robinson (2004) aborda a DES, do inglês *Discrete Event Simulation*, como a representação daqueles momentos em que há alteração do estado do sistema. Essa modificação no estado do modelo se dá por eventos ou ocorrências capazes de modificar as variáveis simuladas, de acordo com Freitas Filho (2001). A origem do nome DES é devido ao fato de tais alterações acontecerem em instantes discretos do tempo, conforme explica Taha (2008).

Uma vez que a simulação a eventos discretos não busca atingir a otimização e sim avaliar o comportamento de um sistema simulado, Ingalls (2002) afirma que a sua vantagem é viabilizar a análise e a observação de alternativas de cenários de forma que a modelagem represente a dinâmica vivenciada nas situações reais. Conforme Negahban e Smith (2014), é preciso destacar a flexibilidade do uso desse tipo de simulação, pois proporciona avaliar diferentes opções de configuração de sistemas e estratégias de operação.

Robinson (2004) aborda a DES em três fases, conforme apresentado na Figura 3. A fase 1 identifica-se em uma lista de eventos qual o instante da próxima ocorrência que alterará o estado do sistema e, uma vez identificado esse tempo, a simulação avançará para esse momento. Na sequência, na fase 2, executa-se todos os eventos programados para esse momento em que a simulação avançou pela fase 1. Na fase 3 verifica-se todas as possibilidades de eventos condicionais, os quais são realizados caso tais condições sejam atendidas. Uma vez que todos os eventos condicionais foram executados, a simulação poderá retornar à fase 1 ou ser finalizada.

FIGURA 3 - Fases para a execução de um modelo de simulação a eventos discretos



Fonte: Adaptado de Robinson (2004)

Santos (2017) identifica que a modelagem e simulação a eventos discretos apresenta uma dificuldade em representar um desempenho realista dos processos estudados. Isso é comum pois a ferramenta representa uma simplificação da situação estudada. Para o autor, essa problemática é minimizada com o uso de distribuições de probabilidade geradas para os dados coletados, o que traz ao modelo uma variabilidade que é comum nos sistemas de produção. Alguns exemplos citados pelo autor para o uso de distribuições de probabilidade são o tempo de processamento e a chegada de materiais.

2.2.3 Vantagens e Desvantagens

Chwif e Medina (2015) comentam as principais razões que levam ao uso da simulação. Para os autores, a ferramenta apresenta as seguintes vantagens:

- Avaliar um novo sistema antes da sua efetiva implantação;
- Melhorar um sistema já operante;
- Melhor compreensão do funcionamento de um sistema;
- Melhorar a comunicação vertical entre os funcionários;
- Confrontar resultados;
- Medir eficiências.

Law e Kelton (2000) apresentam outras características positivas do uso da ferramenta: ser mais barato utilizar a simulação do que testar no sistema real; permitir simular longos períodos, desde horas, dias, meses e até anos, em um curto intervalo de tempo; possibilitar a replicação de diversos cenários alternativos distintos; e obter um maior controle dos parâmetros do experimento do que no mundo real. Silva (2006) também comenta como fator positivo do uso da ferramenta a adequação às complexidades dos sistemas reais.

Banks *et al.* (2010), Shannon (1998) e Maria (1997) elencam diversas vantagens para a simulação, sendo elas: facilidade de entendimento; credibilidade, uma vez que utiliza menos simplificações, incorporando mais características do sistema real; uso melhor justificável do que de modelos analíticos; facilidade em identificar os gargalos; em poucos minutos replica o comportamento de um sistema para longos períodos; alternativas para projetos e *layouts* serem testados sem a sua implementação real; permite a resposta para a pergunta: “E se?” através da análise de cenários; e identifica as variáveis de desempenho mais relevantes.

Da mesma forma, Law e Kelton (2000) também comentam a vantagem de poder testar o comportamento do sistema com a modificação de equipamentos, *layouts* e transportes sem a necessidade de investir recursos para adquiri-los, além da possibilidade de localizar gargalos

que comprometem o fluxo de informações e materiais, os quais poderão ser tratados.

Por outro lado, existem algumas desvantagens no uso da ferramenta. Banks e Gibson (1997) alertam para os casos em que a simulação não deve ser realizada. São eles:

- Quando o problema é facilmente resolvido pelo senso comum;
- Quando o problema pode ser resolvido de forma analítica;
- Quando for fácil realizar experimentos no sistema real;
- Quando os custos forem maiores do que os ganhos a serem obtidos;
- Quando os recursos e a mão de obra são escassos;
- Quando o tempo for insuficiente para obter resultados úteis;
- Quando há falta de dados ou estes não puderem ser estimados;
- Quando o modelo não pode ser validado nem verificado;
- Quando o objetivo do projeto for inatingível;
- Quando o sistema for muito complexo ou indefinido.

Banks *et al.* (2010) e Shannon (1998) abordam a questão do longo tempo necessário para uso da ferramenta de simulação como uma desvantagem. Segundo os autores, desenvolver um modelo demanda tempo para adquirir as habilidades necessárias em modelagem e para a coleta confiável dos dados. Outra questão negativa comentada pelos autores é que a simulação não soluciona o problema de um sistema, já que não resulta em uma solução ótima, mas sim na reprodução e análise do seu comportamento.

Law e Kelton (2000) apresentam como limitações do uso da ferramenta: os custos altos; a dificuldade na interpretação dos resultados obtidos; a necessidade de sempre validar o modelo, ainda que a animação esteja coerente, pois os parâmetros também precisam ser adequados. Os autores também corroboram a necessidade de treinar recursos humanos no manuseio de um *software* de simulação ou em linguagem de programação como sendo uma limitação para o uso da técnica.

Com relação ao último item, devido aos avanços tecnológicos, Maurício (2015) explica que existem vários tipos de *software* voltados para a modelagem e simulação, os quais possuem requisitos que se adequam a diversas aplicações. Assim, o treinamento da mão de obra para utilização da ferramenta tende a se tornar cada vez mais facilitado com a evolução desse mercado. Isso faz com que o uso de linguagem de programação venha a ser menos utilizado, conforme comentado por Shannon (1998). Para o autor, o uso de pacotes de simulação traz facilidade, eficiência e efetividade de uso, além da maior facilidade para alterar o modelo, reduzindo a necessidade de programação e, conseqüentemente, gerando menos

erros no programa.

Pacotes de simulação são definidos por Maurício (2015) como ambientes onde os modelos são representados por recursos gráficos, com a movimentação de ícones pré-determinados por um menu e com o preenchimento de caixas de diálogo. Ou seja, é um sinônimo para *software* de simulação, onde há a existência de programações, porém o usuário considera o seu manuseio facilitado pela abordagem gráfica.

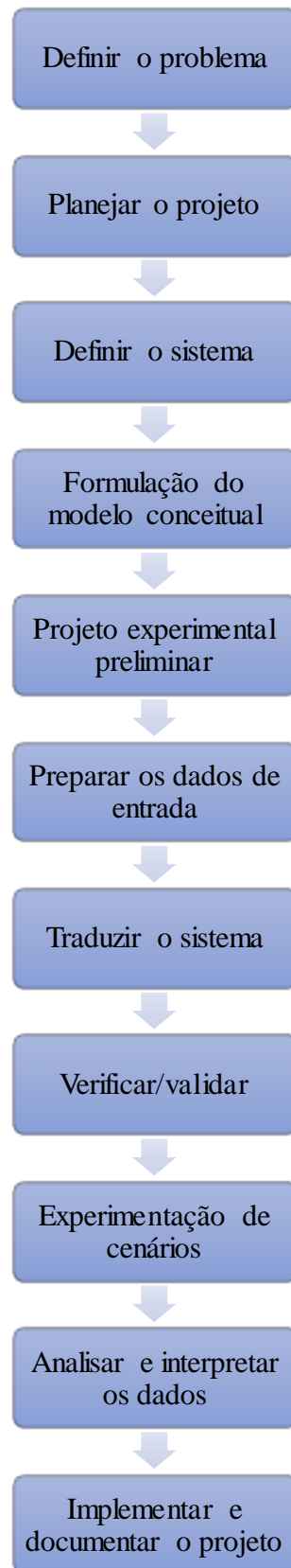
2.2.4 Projeto de Simulação

Silva (2006) agrupa os passos a serem seguidos para a elaboração de um projeto de simulação em três macro etapas, que são: conceituação e infraestrutura; modelagem; e simulação. Para o autor, a primeira abrange o entendimento do sistema a ser estudado e a estruturação da condução da simulação. Na sequência, há a concepção de um modelo computacional que detalha o sistema analisado. Por fim, a fase de simulação aborda a análise do projeto experimental, dos resultados obtidos e da implementação do projeto no sistema real.

O autor engloba três fases na primeira macro etapa de conceituação e infraestrutura: definir o problema; planejar o projeto; e definir o sistema. Já a segunda macro etapa é de modelagem, sendo composta por cinco fases, são elas: formulação do modelo conceitual; projeto experimental preliminar; preparar os dados de entrada; traduzir o sistema; e verificar/validar. A terceira macro etapa é de simulação e possui três fases, que são: experimentação; analisar e interpretar os dados; e implementar e documentar o projeto.

As fases citadas são explicadas por Pegden, Sadowski e Shannon (1995) como passos sequenciais a serem seguidos em um roteiro de projeto de simulação, conforme apresentado na Figura 4. Para os autores, tais passos não se retroalimentam durante a execução do roteiro.

FIGURA 4 - Passos de um roteiro de projeto de simulação



Fonte: Adaptado de Pegden, Sadowski e Shannon (1995)

O primeiro passo, definir o problema, visa esclarecer a finalidade do trabalho e manter o foco no seu cumprimento. O segundo, planejar o projeto, define cronograma de execução e identifica recursos disponíveis de mão de obra, *software* e *hardware*. O passo seguinte, definir o sistema, é responsável por identificar como o sistema atua e quais são seus limites e restrições. Após, há a formulação do modelo conceitual, momento em que define os componentes do sistema e as interações existentes. Em seguida, há o projeto experimental preliminar, no qual se define como o desempenho será estipulado a partir do modelo. O próximo passo é preparar os dados de entrada, ou seja, identificar e coletar os dados de input. Após, deve-se traduzir o sistema a partir do desenvolvimento do sistema em linguagem de simulação. Na sequência, deve-se verificar/validar o modelo, o que consiste em confirmar se este representa fielmente a realidade e se atende às expectativas. O passo seguinte é o de experimentação, onde ocorre a execução da simulação com a geração dos dados desejados. Em seguida há a análise e interpretação dos dados, passo em que os resultados são analisados e interpretados, compreendendo-se quais parâmetros mais influenciam. Por fim, o último passo é o de implementar e documentar o projeto, isto é, colocar o projeto em prática no sistema real, registrando em documentos os procedimentos executados.

Chwif e Medina (2015) afirmam que ao desenvolver um modelo de simulação três etapas devem ser seguidas: concepção ou formulação do modelo, implementação e análise dos resultados. Todas corroboram a explicação de Pegden, Sadowski e Shamon (1995). A primeira, concepção ou formulação do modelo, contempla o entendimento do problema, a coleta dos dados e o desenvolvimento de um modelo conceitual. Dessa forma, há a criação de um modelo abstrato que representará o passo a passo dos processos estudado, geralmente registrados por meio de fluxogramas.

Ainda segundo os autores, para o desenvolvimento do modelo conceitual deve-se compreender alguns aspectos, que são:

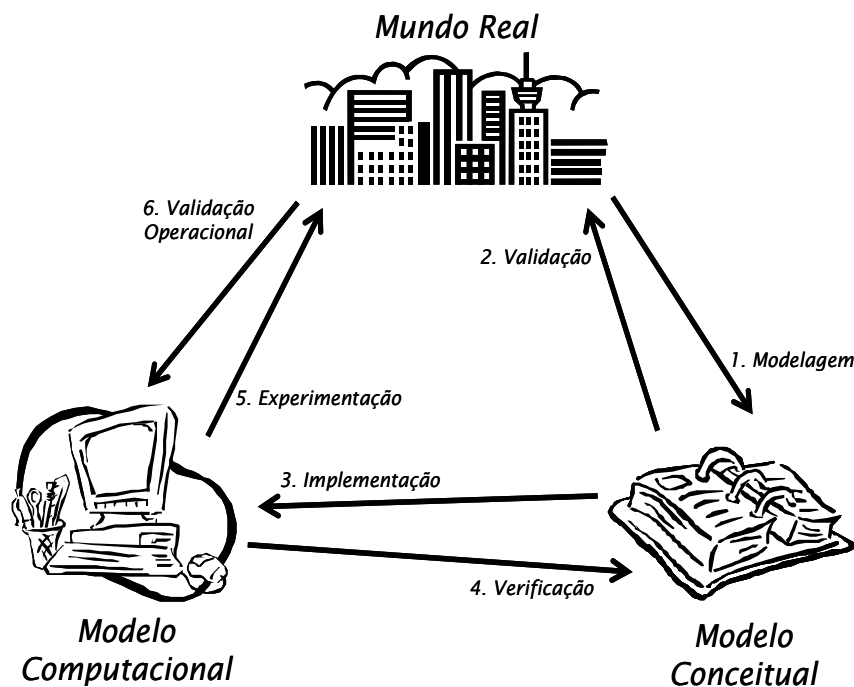
- Objetivos almejados para o problema estudado;
- Conteúdo: abrange escopo e nível de detalhamento;
- Entrada: parâmetros que alimentam a simulação;
- Saídas: medidas de desempenho do sistema;
- Hipóteses e simplificações necessárias;
- Definição dos cenários alternativos a serem avaliados.

Para os autores, em seguida, ocorre a conversão do modelo conceitual validado em um modelo computacional, na fase conhecida como implementação. Para isso pode ser utilizada

tanto a linguagem matemática e de programação quanto simuladores disponíveis no mercado com interfaces gráficas e recursos interativos que auxiliam na modelagem. Para a escolha do simulador mais adequado, Chwif e Medina (2015) apontam algumas características a serem observadas, como preço, animação, credibilidade, erros, travamentos, facilidade de uso e análises estatísticas de *inputs* e *outputs*.

Nessa etapa é necessário compreender a diferença entre validação e verificação. Validar é confirmar que as premissas e teorias assumidas estão condizentes, conforme Sargent (2004). Já verificar é buscar possíveis erros nos códigos de programação, corrigindo-os para que estes representem corretamente o modelo conceitual, de acordo com Kleijnen (1995). Esses conceitos são esquematizados na Figura 5.

FIGURA 5 - Relação da Validação e Verificação na Modelagem



Fonte: Chwif e Medina (2015)

Algumas técnicas de validação são apresentadas por Chwif e Medina (2015), são elas:

- Teste de Turing, ou seja, um conhecedor do sistema analisa dados reais e dados simulados. Caso não os diferencie, o modelo é válido. O indivíduo pode ser dispensável ao se comparar os resultados estatisticamente;
- Duplicar os modelos, ou seja, a elaboração de modelos por duas equipes distintas, os quais serão comparados;
- Comparar o modelo atual com outros simplificados ou desenvolvidos

anteriormente;

- Análise de sensibilidade, ou seja, identificar e dar maior atenção a parâmetros de entrada considerados críticos e de grande influência para os resultados;
- Validação entre o desenvolvedor do modelo e simulação e os especialistas do sistema real.

Chwif e Medina (2015) também esclarecem formas de verificação para a identificação de erros no modelo computacional, como: executar o modelo separadamente por módulos; utilizar a ferramenta depurador que permite avançar na simulação passo a passo; observar se a animação gráfica apresenta algum comportamento inexplicável; simular os valores com distribuições determinísticas, comparando com cálculos manuais; realizar a simulação manual para conferir a relação entre modelos conceitual e computacional; e delegar a revisão do modelo por outro indivíduo que não seja o elaborador do modelo, evitando vícios.

Por fim, os experimentos são executados e seus resultados são analisados. Deve-se atentar para as seguintes ações que ocorrem nessa etapa e são determinantes para os *outputs*, conforme Chwif e Medina (2015): a escolha do intervalo de confiança estatística e a precisão com que se pretende trabalhar; definir, de acordo com a observação do sistema real, o tempo de simulação; e determinar o número de replicações a serem realizadas.

2.3 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Uma revisão sistemática da literatura foi realizada para levantamento de publicações acadêmicas a partir de termos e expressões de busca nas bases de pesquisa Web of Science (WoS) e Scopus, e também no mecanismo Google Scholar. Nas duas primeiras a expressão ((maintenance* OR maintainability OR "equipment* failure*") AND simulat* AND "discrete event") foi buscada no título, resumo e palavra-chave. Já no Google Scholar a expressão (maintenance* (OR maintainability) AND equipment* AND failure AND "discrete events simulation") foi buscada em qualquer parte do texto.

A apuração nas três bases de busca contemplou o período de 2012 até novembro de 2021, resultando em 330 trabalhos que abordaram a aplicação da simulação a eventos discretos na manutenção ou falha de equipamentos. O primeiro critério de exclusão aplicado foi o de artigos duplicados, sendo 102 pesquisas excluídas por constarem tanto na base Scopus quanto na base WoS. Em seguida foram excluídos 10 trabalhos em formato diferente de artigo completo, 1 artigo no idioma coreano e 2 artigos no idioma mandarim, devido à

dificuldade de entendimento da língua e possibilidade de inconsistência do conteúdo na sua tradução. Assim, resultou-se em 215 artigos.

Desse total houve a leitura do título e do resumo para aplicação dos demais critérios de exclusão, que são:

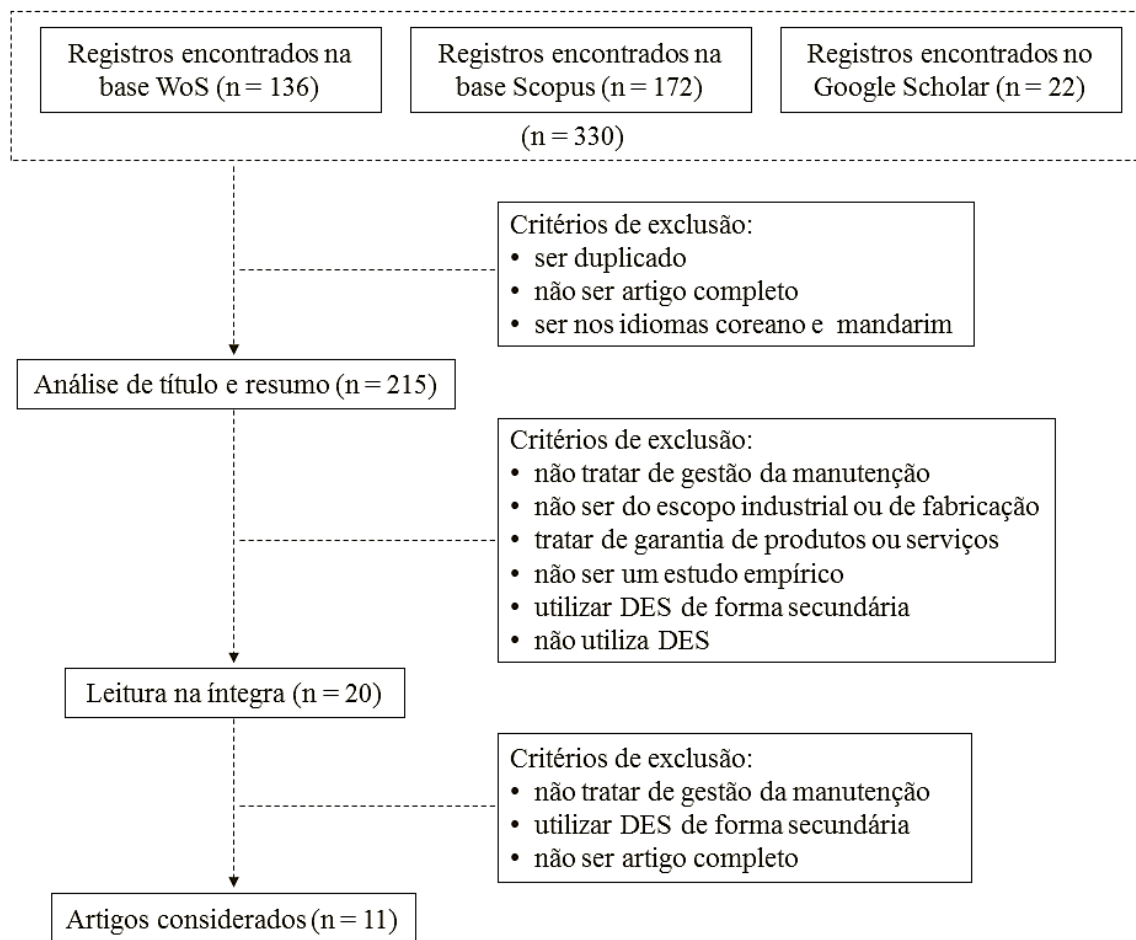
- Não tratar de gestão da manutenção. Ou seja, são casos em que não havia qualquer relação da palavra manutenção no sentido de assistência, conserto, reparo, preservação, conservação ou aspectos similares desse tipo de gestão.
- Não ser do escopo industrial ou de fabricação. Diversas pesquisas abordaram assuntos não relacionados ao ambiente das indústrias, sendo eles mineração, construção civil, parques eólicos *offshore*, terminais portuários, pavimentação de estradas e manutenção de satélite espacial.
- Tratar de manutenção focada na garantia de produtos ou serviços. Ou seja, são artigos que englobam políticas de assistência técnica ou garantia estendida para produtos remanufaturados, equipamentos médicos e produtos eletrônicos.
- Não ser um estudo empírico. Esse critério envolve estudos que relatam o estado da arte em otimização baseada em simulação para sistemas de manutenção, classificando sistematicamente a literatura publicada e descrevendo as principais tendências na modelagem e otimização de sistemas de manutenção.
- Combinar a técnica de simulação a eventos discretos de forma secundária com outras técnicas. Foram excluídas pesquisas que tinham como foco principal a utilização de técnicas de modelagem matemática e de otimização para minimização de custos, ou focavam na abordagem de Teoria das Filas. Para tanto, a DES foi abordada de forma superficial e secundária, sendo apenas um apoio para as demais técnicas tratadas.
- Não utilizar a técnica de simulação a eventos discretos. Esse critério inclui trabalhos com propostas de diretrizes para a melhoria da qualidade dos dados de *input* a serem inseridos em modelos de DES aplicados às empresas de manufatura. Também engloba a aplicação da simulação baseada em agentes, com a modelagem das interações de agentes individuais em um sistema.

Desse modo, 20 artigos atenderam aos critérios definidos, fornecendo uma amostra da literatura a ser interpretada nesta pesquisa. Esses artigos selecionados foram submetidos a uma leitura completa e aprofundada, a partir da qual decidiu-se excluir 6 pesquisas que

combinaram a técnica de simulação a eventos discretos de forma secundária com técnicas matemáticas para otimização, 2 pesquisas que não abordaram o tema manutenção e 1 publicação no formato de resumo e não de artigo completo.

Dessa forma, após a aplicação de todos os critérios de exclusão, resultou-se em 11 artigos selecionados, sendo as suas análises mostradas a seguir. A Figura 6 apresenta o procedimento completo de filtragem dos artigos.

FIGURA 6 - Levantamento e Critérios de Exclusão de Artigos Acadêmicos



Fonte: Elaborado pela autora

Com base no resultado da filtragem de artigos, entende-se que a literatura sobre a aplicação direta da ferramenta de simulação de eventos discretos como apoio na tomada de decisão em gestão da manutenção no contexto industrial pode ainda ser explorada. Uma visão estruturada dos trabalhos selecionados é sintetizada no Quadro 2.

Quadro 2 - Síntese dos artigos selecionados

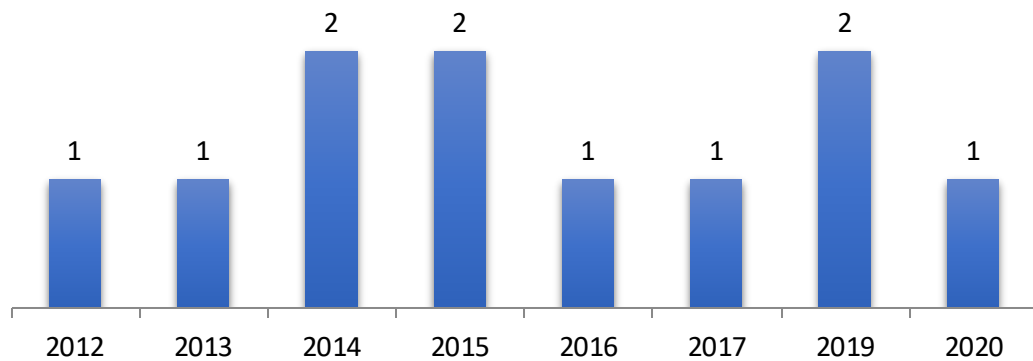
Autor (Ano)	Enfoque
ALABDULKARIM; BALL; TIWARI (2013)	Utiliza DES para examinar o comportamento de um processo de manutenção para diferentes tipos de monitoramento (reativo, diagnóstico e prognóstico) usando diferentes níveis de peças de reposição e disponibilidade de mão de obra como restrições do sistema, a fim de compreender os seus efeitos no desempenho geral do sistema. Os resultados mostram que um nível mais alto de monitoramento não garante necessariamente um melhor desempenho, pois depende de como as peças de reposição e unidades de trabalho são gerenciadas. Se as operações de manutenção não dispõem de um controle eficiente desses recursos, não há garantia de maior desempenho dos ativos.
AMELIAN; SAJADI; ALINAGHIAN (2015)	Estuda o comportamento de um sistema de manufatura por simulação dos níveis de estoque e das durações de manutenção preventiva. Esses parâmetros auxiliam na definição do custo total mínimo do sistema, do nível de estoque ideal e da duração recomendada para a manutenção preventiva. Algumas vantagens são considerar a quebra da máquina em função de sua idade e examinar níveis de demanda variáveis.
AZADEH; ASADZADEH; SEIF (2014)	O trabalho utiliza a simulação para avaliar a eficácia de diferentes políticas de Manutenção Baseada em Condição (CBM - <i>Condition Based Maintenance</i>) para o monitoramento e análise de óleo em maquinário. Os fatores discutidos nas alternativas incluem: equipamentos de monitoramento; sistemas de informação em gestão da manutenção; conhecimento e experiência dos especialistas. Orientações úteis foram extraídas dos resultados do estudo de caso para apoiar a tomada de decisão de gerentes e especialistas em manutenção.
BOLU (2013)	Usa a DES para estudar as práticas de manutenção em um sistema de fabricação, discutindo várias abordagens de medição e mostrando como a falha da planta e dos serviços de reparo impactam no aumento da produtividade. O estudo postula que: - um equipamento falha quando um número suficiente de defeitos se acumula nele; - os defeitos seguem dois fluxos: o de manutenção reativa (reparo de equipamentos com falha) e o de manutenção planejada (reparo proativo de equipamentos operáveis). Conforme os defeitos se acumulam, a chance de avaria aumenta. A avaria leva a uma manutenção mais reativa e, após o reparo, o equipamento retorna ao serviço. Da mesma forma, a manutenção programada pelo monitoramento do equipamento pode revelar a presença de defeitos latentes, os quais devem ser corrigidos antes que ocorra a avaria.
DJASSEMI; SEIFODDINI (2019)	A DES foi usada para investigar o efeito que a melhoria na confiabilidade da máquina gera na capacidade de produção e no tempo de processamento em células de manufatura. Os resultados sugerem que a melhoria da confiabilidade de qualquer conjunto de máquinas críticas em 10% a 30% resulta em um aumento de aproximadamente 3% a 5% na disponibilidade geral da máquina e uma redução de 5% a 9% no tempo médio de produção.
OLEGHE; SALONITIS (2019)	A DES é aplicada com a incorporação das operações de Manutenção Produtiva Total (TPM - <i>Total Productive Maintenance</i>) em uma fábrica de engarrafamento com desempenho de TPM abaixo do ideal estava afetando o desempenho de produção. Os resultados apontam uma dependência significativa das manutenções de rotina programadas, com base no histórico de defeitos da máquina.

RENNA (2012)	Investiga três políticas de manutenção: preventiva, corretiva e uma política dinâmica proposta. Os resultados da simulação mostram que as mudanças no <i>mix</i> de produção e a incerteza do tempo de trabalho possuem efeito significativo no desempenho do sistema de manufatura, gerando grandes benefícios quando uma política de manutenção preventiva é usada. A abordagem proposta melhora medidas de desempenho e reduz custos de manutenção. Nessa abordagem, o atraso é uma medida de desempenho do sistema de manufatura e o número de operações de manufatura e o tempo médio são índices dos custos da política de manutenção.
RENNA (2015)	Um ambiente de simulação é desenvolvido para testar e definir parâmetros de uma proposta de política de manutenção para estações de trabalho. Os cenários analisam diferentes níveis de degradação da máquina e os resultados permitem reduzir drasticamente o número de atividades de recuperação, mantendo um alto nível de desempenho sem aumentar os custos em relação ao caso <i>benchmark</i> onde não há qualquer política de manutenção. Essa proposta pode ser aplicada com um número diferente de estações de trabalho e em diferentes tipologias de sistemas de manufatura.
RENNA (2016)	Utiliza a DES para investigar o efeito de uma política híbrida de manutenção preventiva e corretiva em um sistema de manufatura. As ações preventivas dependem de duas condições: - a fila de peças esperando para processamento pela máquina estar vazia; e - transcorrer um período fixo desde a última manutenção periódica. As medidas de desempenho são comparadas a um modelo com política corretiva pura. Os resultados da simulação mostram que a política de manutenção híbrida proposta melhora significativamente o desempenho do sistema analisado.
SHENG; BASRI; KAMARUDDIN (2017)	Utiliza a DES para medir o desempenho dos parâmetros do chão de fábrica quando estes são afetados por ações de manutenção preventiva, política capaz de melhorar a produtividade e reduzir as perdas. Os cenários analisaram os seguintes parâmetros: taxa de transferência, utilização da máquina e utilização do técnico de manutenção. O melhor resultado apresentou a maior taxa de transferência (0,027 lotes por minuto), a maior utilização da máquina (69,67%) e a maior utilização do técnico de manutenção (19,63%).
WAKIRU <i>et al.</i> (2020)	Utiliza DES para modelar o monitoramento de óleo lubrificante no contexto da CBM. Outras políticas também aplicadas no sistema foram as corretivas e as preventivas. Nessa abordagem, as medidas analisadas são desempenho, disponibilidade, custos diretos de manutenção e custos de oportunidade com a inatividade. Os resultados evidenciam a importância do lubrificante como um item monitorável e substituível.

Fonte: Elaborado pela autora

Quando se analisa o ano de publicação dos 11 artigos submetidos a uma leitura aprofundada, não é possível concluir nenhuma tendência de aumento ou redução progressiva ao longo dos anos no número de trabalhos publicados. Os anos de 2014, 2015 e tiveram 18% dos trabalhos publicados em cada ano, aproximadamente. Já os anos de 2012, 2013, 2016, 2017 e 2020 tiveram 9% dos trabalhos publicados em cada ano, aproximadamente. Esses dados são mostrados na Figura 7.

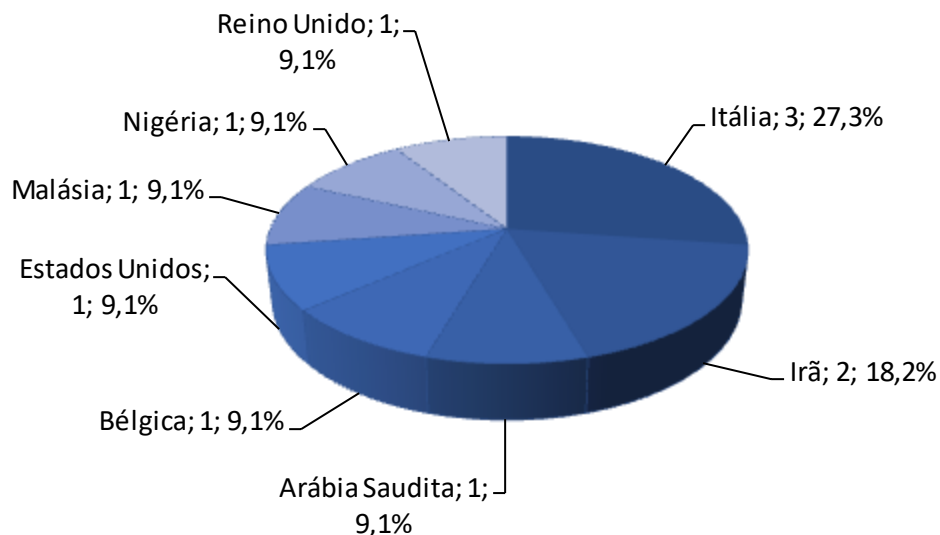
Figura 7 - Distribuição das publicações por ano



Fonte: Elaborado pela autora

Ao fazer o levantamento dos países onde os estudos foram realizados, oito origens foram identificadas: Arábia Saudita, Bélgica, Estados Unidos, Irã, Itália, Malásia, Nigéria e Reino Unido. A Itália se destacou com três artigos, indicando 27% dos artigos, aproximadamente. Já o Irã é representado por dois artigos, indicando 18% dos estudos, aproximadamente. Os demais países tiveram um estudo, representando 9% cada, aproximadamente. Esses dados são observados na Figura 8.

Figura 8 - Países das pesquisas



Fonte: Elaborado pela autora

Com relação à frequência de periódicos, as pesquisas estão distribuídas em 10 periódicos, o que indica que não há predominância de periódico dentre os estudos analisados. Do total de artigos, apenas 2 foram publicados no mesmo periódico, International Journal of

Computer Integrated Manufacturing. Os demais 9 artigos foram publicados em 9 periódicos distintos. Essas informações são ilustradas na Tabela 1.

Tabela 1 - Periódicos de publicação

Periódico	Frequência
International Journal of Computer Integrated Manufacturing	2
Business Process Management Journal	1
International Journal of Industrial and Systems Engineering	1
International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering	1
International Journal of Production Research	1
International Journal of Services and Operations Management	1
Journal of Industrial Engineering and Management	1
Journal of Quality in Maintenance Engineering	1
Pertanika Journal of Science and Technology	1
Reliability Engineering and System Safety	1

Fonte: Elaborado pela autora

As 11 pesquisas analisadas foram desenvolvidas por 23 autores. Assim como na questão dos periódicos, não há uma predominância de autor e nem de combinação de autores. Paolo Renna, realizou três estudos individualmente, ou seja, sendo o único autor. Todos os demais autores realizaram um estudo cada.

A Tabela 2 apresenta o total de citações por autores, com destaque para Paolo Renna que possui um total de 42 citações em seus três artigos selecionados nesta revisão sistemática.

Tabela 2 - Citações por autor

Autor (Ano)	Citações
RENNA (2012)	25
RENNA (2015)	13
AMELIAN; SAJADI; ALINAGHIAN (2015)	11
AZADEH; ASADZADEH; SEIF (2014)	10
ALABDULKARIM; BALL; TIWARI (2013)	6
RENNA (2016)	4
OLEGHE; SALONITIS (2019)	4
WAKIRU <i>et al.</i> (2020)	3
BOLU (2013)	2
DJASSEMI; SEIFODDINI (2019)	1
SHENG; BASRI; KAMARUDDIN (2017)	0

Fonte: Elaborado pela autora

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta, primeiramente, a caracterização metodológica da pesquisa. Em seguida são detalhados os métodos adotados neste trabalho, a forma de coleta de dados e os critérios para análise dos resultados.

A natureza deste trabalho é classificada como pesquisa aplicada, pois visa contribuir academicamente sobre a disponibilidade e a produtividade fabril a partir de alternativas de políticas de gestão da manutenção corretiva e preventiva. De acordo com Gil (2008), esse tipo de pesquisa possui como característica principal o interesse na aplicação, na utilização e nas consequências práticas dos conhecimentos.

Quanto aos objetivos, a pesquisa é do tipo explicativa, com o intuito de avaliar o comportamento de máquinas voltadas à usinagem mecânica, as quais apresentaram os maiores riscos de falhas que causam paradas na produção, com relação a mudanças nas políticas de manutenção, tanto corretiva quanto preventiva, para esses equipamentos. Gil (2008) elucida que a pesquisa explicativa é a que mais aprofunda o conhecimento da realidade, já que explica a razão, o porquê das coisas. O autor afirma ainda que o conhecimento científico está assentado nos resultados obtidos por esse tipo de pesquisa.

Sobre a abordagem do problema, a pesquisa classifica-se como quantitativa, pois serão utilizados dados fornecidos por uma empresa parceira, a partir dos quais possibilitarão o uso de técnicas estatísticas como ferramenta de análise. Segundo Turrioni e Melo (2012), esse tipo de pesquisa traduz em números as opiniões e informações para classificá-las e analisá-las, em uma abordagem na qual tudo pode ser quantificável.

Já o método de pesquisa utilizado é a modelagem e simulação, possibilitando a representação de processos de um sistema real com o objetivo de compreender o seu comportamento. Assim, este trabalho modela uma operação de fabricação de componentes mecânicos em uma indústria de usinagem. Turrioni e Melo (2012) explicam que se utiliza a modelagem e simulação quando se deseja experimentar um sistema real a partir de um modelo, de forma a avaliar como este sistema se comportará com as modificações propostas.

Por fim, esta pesquisa é também classificada como um estudo de caso, pois parte de um caso específico e busca generalizações quanto aos resultados da inclusão de políticas de manutenção preventiva em ambientes industriais pertencentes ao poder público. Um estudo de caso é, conforme Gil (2008), a análise profunda e exaustiva de um ou poucos objetivos, a fim de se alcançar o seu conhecimento amplo e detalhado. No estudo de caso único a oportunidade de aprofundamento do caso é ainda maior do que no estudo de casos múltiplos

(VOSS, TSIKRIKTSIS & FROHLICH, 2002).

Para a realização de um estudo de caso, são utilizadas fontes de dados qualitativas, tais como: entrevistas, observações diretas e análises documentais (YIN, 2001; VOSS, TSIKRIKTSIS & FROHLICH, 2002). É recomendado por Yin (2001) que a fase de coleta de dados não seja limitada a apenas uma fonte de evidência, isto é, que os dados sejam levantados por múltiplas fontes qualitativas. Para o autor, essa premissa permite o encadeamento de evidências e a validação do *constructo*, objetivando estabelecer medidas operacionais corretas para os conceitos em estudo.

A seguir serão descritas as etapas de coleta e análise de dados, determinação do tempo transiente e da duração da simulação e elaboração da matriz de riscos.

3.1 COLETA DE DADOS

A etapa de coleta de dados iniciou-se pela observação direta proporcionada por visitas a campo na empresa analisada na pesquisa, a fim de compreender todas as etapas do processo de fabricação dos componentes mecânicos e o regime de turnos praticado para posterior construção do modelo de simulação. Nesses momentos houve contato com os funcionários responsáveis pela supervisão da fabricação, engenheiros, além de operadores de máquina e um comitê de especialistas em ações de intervenções em manutenção, o que viabilizou a realização da pesquisa documental por meio de registros em documentos escritos, além de bases de dados em planilhas eletrônicas.

Esse comitê de especialistas em manutenção é composto por três funcionários com mais de 10 anos na função. O primeiro realiza atividades de programação e controle da manutenção, que envolve levantamento de orçamentos para aquisição de peças e componentes, medições de indicadores, elaboração de relatórios gerenciais e distribuição de trabalho para a equipe executora da manutenção. O segundo realiza atividades técnicas de coordenação da execução das intervenções em manutenção *in loco* pela equipe de apoio. O terceiro é o gerente do setor de manutenção, responsável por atividades de coordenação dos recursos disponíveis, definição de metas estratégicas e reuniões com a diretoria para discussão dos resultados organizacionais.

Com relação aos documentos escritos, foi possível ter acesso ao tempo padrão de operação, roteiros de processo, desenhos técnicos e especificações das máquinas. Já as planilhas eletrônicas cedidas pela empresa parceira continham as seguintes informações: registro de tipo de falha para cada equipamento de usinagem, com histórico do funcionário

executante da operação no momento da parada e sua duração, isto é, desde o início da ocorrência até o término da manutenção; histórico de apontamento de horas por funcionário em cada operação; código e descrição da atividade; e nome do operador.

3.2 ANÁLISE DOS DADOS

Para tratamento e manipulação dos dados coletados foi utilizada uma planilha eletrônica complementar. Dessa forma, foram calculados a frequência anual por tipo de falha e o impacto em disponibilidade de máquina, informações que resultaram na matriz de riscos baseada na relação de frequência por impacto para as falhas do tipo elétrica, eletrônica, hidráulica e mecânica em cada um dos seis equipamentos correspondentes às estações de trabalho (ET) que executam operações de usinagem na empresa.

Os demais dados que especificam as operações do sistema também foram estruturados em planilha eletrônica e, em seguida, imputados no *software* de simulação de eventos discretos Arena® 16, versão acadêmica, com licença do Departamento de Engenharia de Produção de Sorocaba, da UFSCar, Campus Sorocaba. Assim, foi possível construir o modelo que analisa a disponibilidade e a produtividade fabril a partir de alternativas de políticas de gestão da manutenção corretiva e preventiva para as estações de trabalho de usinagem com maior representatividade na matriz de riscos, baseada na relação de frequência por impacto de falhas.

O modelo teve como *inputs* as distribuições teóricas de probabilidade calculadas com o auxílio da ferramenta *Input Analyzer* do *software* Arena®, responsável por tratar dados de entrada no modelo e auxiliar na determinação de distribuições de probabilidade que melhor se ajustem aos dados do sistema real. Essas distribuições foram calculadas para o tempo de chegada de matéria prima, o tempo de operação nas etapas de tratamento térmico, pré-usinagem, usinagens intermediárias, metrologia, limpeza química, soldagem e usinagem de acabamento, o tempo de deslocamento entre fábricas e a duração da manutenção por tipo de falha em cada estação de trabalho.

3.3 TEMPO TRANSIENTE, DURAÇÃO DA SIMULAÇÃO E REPLICAÇÕES

A partir da coleta e do tratamento dos dados foi desenvolvida a modelagem preliminar. Assim, foi possível realizar as etapas de: validação do modelo, confirmando que as premissas e teorias assumidas estão condizentes com a realidade; e verificação do modelo, corrigindo os códigos de programação para uma representação correta da situação analisada. A fase seguinte é a determinação de três parâmetros relevantes para se atingir resultados precisos na simulação, são eles: o período *warm-up*, também conhecido por tempo transiente ou período de aquecimento do sistema, o número de replicações e a duração da simulação (BARBOSA, 2020).

Para a definição do tempo transiente, é necessário diferenciar os sistemas terminais dos sistemas não terminais. Sistemas terminais são aqueles em que retornam a uma condição inicial fixa após o término de cada replicação simulada, havendo sempre um evento bem definido que determina a conclusão da simulação (PRADO, 2004), como, por exemplo, o horário diário de encerramento de atividades em um estabelecimento comercial. Por outro lado, nos sistemas não terminais inexistem tanto a condição fixa de início quanto o evento que determina o término da simulação, como um hospital ou uma empresa que opera de forma ininterrupta. Por essa razão, seu comportamento é contínuo, sendo necessário definir um tempo transiente suficiente para que o sistema opere por completo e para que as informações geradas forneçam um nível de significância estatística aceitável (TOMAZELA *et al.*, 2017).

Ao identificar adequadamente o tempo transiente evita-se a ocorrência de desvios de inicialização, isto é, quando um modelo é iniciado em um estado não realista, fazendo com que os dados coletados nos períodos iniciais da simulação sejam enganosos (HOAD, ROBINSON & DAVIES, 2010). Assim, desconsiderar possíveis desvios de inicialização é crucial para obter estimativas corretas com relação ao desempenho do modelo. Uma vez que essa pesquisa trata de um sistema não terminal, o método utilizado para evitar desvio da inicialização foi executar o modelo por um período muito longo, de modo a causar um efeito de polarização insignificante (ROBINSON, 2004).

Sendo assim, o modelo foi simulado pelo período de 10 anos, excluindo-se os dados referentes ao primeiro ano de simulação, tempo suficiente para que o sistema esteja operando em equilíbrio dinâmico. A determinação do *warm-up* de um ano e da duração da simulação de 10 anos está condizente com Chwif e Medina (2015), uma vez que os autores definem como usual a regra de considerar tempos de duração da simulação superiores a, no mínimo, 10 vezes o tempo transiente.

Com relação ao número de replicações, o critério escolhido baseia-se na análise de uma amostra piloto arbitrada em 30 replicações. De acordo com Freitas Filho (2001), a literatura sugere essa quantidade como suficiente para a estimativa da variabilidade e dos intervalos de confiança no entorno da média. Assim, garante-se a significância estatística dos resultados, visando alcançar um intervalo de confiança de 95% para a geração de números aleatórios conforme a variável de referência do sistema em análise definida pelo tempo médio de permanência de uma peça no sistema, dado por:

$$\left[\bar{x} - \frac{1,96 \sigma}{\sqrt{n}}, \bar{x} + \frac{1,96 \sigma}{\sqrt{n}} \right] \quad \text{Equação 4}$$

A Tabela 3 apresenta o tempo médio de permanência no sistema por peça transformada para as 30 replicações simuladas.

Tabela 3 - Resultados da Amostra Piloto

Replicação	Tempo Médio no Sistema (min)
1	104,2
2	78,5
3	97,6
4	76,7
5	79,1
6	85,1
7	89,1
8	92,3
9	109,2
10	81,1
11	73,4
12	80,7
13	66,0
14	84,9
15	76,9
16	86,0
17	73,9
18	82,6
19	80,4
20	92,3
21	88,1
22	91,9
23	108,4
24	88,9

Replicação	Tempo Médio no Sistema (min)
25	73,1
26	77,9
27	88,0
28	85,0
29	78,9
30	93,0
Média	85,4
Desvio Padrão	10,2

Fonte: Elaboradora pela autora

Segundo com Chwif e Medina (2015), o número de replicações necessárias é dado por:

$$\left[n^* = n \left(\frac{h}{h^*} \right)^2 \right] \quad \text{Equação 5}$$

onde n^* é o número necessário de replicações; n é o número de replicações da amostra piloto; h é a precisão da amostra; e h^* é a precisão desejada.

A partir da Equação 5 e dos dados obtidos com a amostra piloto, foi possível calcular que o número necessário de replicações para a confiança estatística de 95% para o tempo médio de permanência no sistema é de 49 replicações. De posse desse resultado, optou-se por padronizar a simulação tanto do cenário base (*baseline*) quanto dos cenários propostos em 50 replicações.

3.4 MATRIZ DE RISCOS

De modo a elaborar um *ranking* de criticidade que auxilie na decisão sobre quais ETs e quais tipos de falha devem ser incluídos nas propostas de políticas de manutenção preventiva, uma matriz de riscos foi desenvolvida. Os critérios para a elaboração dessa matriz incluem a Frequência Anual de Falhas e o Impacto da Indisponibilidade da Máquina.

Para a definição dos parâmetros de Frequência Anual de Falha é utilizada uma análise de Pareto, em uma abordagem semelhante à de Márquez *et al.* (2016). Inicialmente, os registros de ocorrência de parada de máquina são agrupados por categorias de falha e por ET da ocorrência. Em seguida, com o auxílio de planilhas eletrônicas, os dados de ocorrência por

categoria de falha e por ET são compilados a partir do somatório da sua frequência anual absoluta, em valores numéricos do total de vezes no ano que determinada ET apresentou determinado tipo de falha, e ordenados de forma decrescente. Após, ainda com o auxílio de planilhas eletrônicas, calcula-se o fator de frequência, que representa a frequência anual relativa acumulada, isto é, o percentual do total de vezes no ano que determinada ET apresentou determinado tipo de falha.

O próximo passo é a definição da criticidade. Márquez *et al.* (2016) realizaram o agrupamento das frequências de falha de acordo com a sua importância, classificando-as em: muito alta, alta, média e baixa. O comitê de especialistas em manutenção estabeleceu como níveis de criticidade essas quatro classificações apresentadas pelos autores, com a seguinte distribuição: 20% da frequência anual de falha classificadas como criticidade muito alta e 80% da frequência anual de falha classificadas como criticidade alta, média e baixa, sendo: alta para fator de frequência entre 21% e 50%; média para fator de frequência entre 51% e 90%; e baixa para fator de frequência acima de 90%.

Posteriormente, calcula-se a frequência média por criticidade a partir da média simples dos dados de frequência anual, baseada no levantamento de dados de tipo de falha por ET, para cada um dos quatro níveis de criticidade observados. Por fim, deve-se calcular o vetor fator de frequência. Esse cálculo é realizado da seguinte maneira (MÁRQUEZ *et al.*, 2016):

$$f_z = \frac{af_z}{af_1}, \text{ para } z = 1,2,3,4 \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

f_z = Vetor fator de frequência por categoria de criticidade z [ocorrências]

af_z = Frequência Média por categoria de criticidade z [ocorrências]

af_1 = Frequência Média na categoria de criticidade baixa [ocorrências]

z = Categoria de criticidade [$z = 1$ para muito alta; $z = 2$ para alta; $z = 3$ para moderada; $z = 4$ para baixa]

De forma análoga, foi utilizada uma abordagem semelhante à de Márquez *et al.* (2016) também para o critério Impacto da Indisponibilidade de Máquina. Inicialmente, os registros de duração da parada de máquina são agrupados por categorias de falha e por ET da ocorrência. Em seguida, com o auxílio de planilhas eletrônicas, os dados de duração da indisponibilidade por categoria de falha e por ET são compilados a partir do somatório, em dias, da duração absoluta da inatividade por motivos de manutenção, e ordenados de forma

decrecente, sendo este parâmetro denominando de impacto anual. Após, ainda com o auxílio de planilhas eletrônicas, calcula-se o fator de indisponibilidade, que representa a duração anual acumulada da inatividade por motivos de manutenção.

O próximo passo é a definição da criticidade. Márquez *et al.* (2016) realizaram o agrupamento do Impacto da Indisponibilidade de acordo com a sua importância, denominando a classificação em: muito alta, alta, média e baixa. O comitê de especialistas em manutenção estabeleceu como níveis de criticidade essas quatro classificações apresentadas pelos autores, com o seguinte agrupamento: muito alta para fator de indisponibilidade até 70%; alta para fator de indisponibilidade entre 71% e 80%; média para fator de indisponibilidade entre 81% e 95%; e baixa para fator de indisponibilidade acima de 95%.

Posteriormente, calcula-se a indisponibilidade média por criticidade a partir da média simples dos dados de impacto para cada um dos quatro níveis de criticidade observados. Por fim, deve-se calcular o vetor fator de indisponibilidade. Esse cálculo é realizado da seguinte maneira (MÁRQUEZ *et al.*, 2016):

$$I_z = \frac{aI_z}{aI_1}, \text{ para } z = 1,2,3,4 \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

I_z = Vetor fator de indisponibilidade por categoria de criticidade z [dias]

aI_z = Indisponibilidade Média por categoria de criticidade z [dias]

aI_1 = Indisponibilidade Média na categoria de criticidade baixa [dias]

z = Categoria de criticidade [$z=1$ para muito alta; $z=2$ para alta; $z=3$ para moderada; $z=4$ para baixa]

A matriz de riscos é resultante da relação entre a Frequência Anual de Falhas e o Impacto da Indisponibilidade de Máquina e está estruturada de acordo com Braglia, Gabbrielli e Marrazzini (2020). As falhas são representadas pelas linhas e as colunas fazem referência à ET. Cada elemento da matriz corresponderá ao valor associado de Frequência Anual de Falha descrita na linha de referência pelo Impacto da Indisponibilidade na Máquina descrita na coluna de referência. Assim como os autores, a representação dos elementos da matriz se dará pelas cores verde, amarelo e vermelho, de acordo com a significância observada, sendo o verde atribuído à baixa prioridade, o amarelo à média prioridade e o vermelho à alta prioridade.

A fim de exemplificar, a Figura 9 mostra a matriz resultante do estudo de Braglia,

Gabbrielli e Marrazzini (2020). As situações de falha são expostas nas linhas e os locais de ocorrência são expostos nas colunas, sendo o valor de RPN, do inglês *Risk Priority Number*, definido pela prioridade a ser tratada.

Figura 9 - Exemplo de Matriz de Riscos

		System																			
		Subsystem 1				...				Subsystem k				...				Subsystem K			
		Comp. 1	...	Comp. j	...	Comp. n1	...	Comp. 1	...	Comp. nj	...	Comp. 1	...	Comp. nk							
Failure Mode	Failure mode 1			540				560				300									
	...																				
	Failure mode i			800				600		64											
	...																				
	Failure mode I			64				300				240		400							

Fonte: Braglia, Gabbrielli e Marrazzini (2020)

Nesta pesquisa, o intervalo de nível de risco para cada cor foi definido pelo comitê de especialistas em ações de intervenções em manutenção da fábrica estudada, onde:

Verde: $0 < \text{Frequência Anual de Falha} \times \text{Impacto da Indisponibilidade na Máquina} < 5$

Amarelo: $5 \leq \text{Frequência Anual de Falha} \times \text{Impacto da Indisponibilidade na Máquina} < 10$

Vermelho: $\text{Frequência Anual de Falha} \times \text{Impacto da Indisponibilidade na Máquina} \geq 10$

O resultado da matriz de riscos possibilita a elaboração de um *ranking* ordenado de forma decrescente conforme o resultado da relação Frequência Anual de Falha X Impacto da Indisponibilidade na Máquina, isto é, os valores são dispostos em ordem decrescente, seguindo a sequência das cores: vermelho, amarelo e verde, sucessivamente. Assim, é visualmente listada a ordem de prioridade na tomada de decisão sobre quais potenciais cenários deverão ser simulados visando à modificação da política vigente de manutenção corretiva por uma política alternativa de manutenção preventiva.

3.5 IMPACTOS DA POLÍTICA DE MANUTENÇÃO NO MTBF E MTTR

A variável MTBF das manutenções corretivas é diretamente impactada pela inclusão de manutenções preventivas em um sistema. A proporção dessa relação de variação é encontrada no estudo de caso desenvolvido por Wannawiset e Tangjitsicharoen (2019), onde

um conjunto de falhas semelhantes às observadas nesta pesquisa é analisado por meio de um Diagrama de Pareto, sendo alguns exemplos falhas em motor, em sensor, em válvulas e ocorrências hidráulicas. A partir da incorporação de uma política de manutenção preventiva com periodicidade que varia entre diária, semanal, quinzenal e mensal, de acordo com a classificação da máquina com relação ao seu risco de falha, os autores aumentaram em 47,6% o MTBF de um equipamento CNC (do inglês *Computer Numeric Control*) utilizado na produção de papel em escala industrial na Tailândia. Essa melhoria significa que as quebras na máquina que anteriormente ocorriam a cada 21 horas de operação passaram a ocorrer a cada 31 horas.

Prass e Nunes (2019) estudaram os impactos da implantação de um plano de manutenção preventiva na disponibilidade de um centro de usinagem CNC em uma indústria moveleira. Devido à coleta de dados por meio de um diário de bordo do equipamento foi proposto um plano que lista ações preventivas com periodicidade que variam entre diária, semanal, quinzenal, mensal, bimestral e trimestral de acordo com a complexidade das intervenções, que podem ser desde verificar as condições dos interruptores de segurança e observar o desgaste das pás até limpeza, lubrificação dos rolamentos e dos dispositivos de movimentação nos eixos X, Y e Z, troca de filtro de ar de bomba a vácuo, análise do mandril elétrico e de ferramentas, dentre outras ações. Como resultado foi observado que as quebras na máquina que anteriormente ocorriam a cada 22,47 horas de operação passaram a ocorrer a cada 37,05 horas. Isso representa um aumento em 64,9% do MTBF no equipamento estudado.

Outra variável diretamente impactada pela inclusão de manutenções preventivas em um sistema é a duração do MTTR nesse tipo de intervenção. De acordo com o comitê de especialistas da empresa estudada, com a determinação de um cronograma para a realização da manutenção preventiva é possível reduzir esse indicador com a antecipação de alguns procedimentos administrativos e burocráticos que não agregam valor à atividade de manutenção, porém são necessários para a sua execução.

Dessa forma, o estudo de caso apresentado a seguir visa avaliar alterações em produtividade e disponibilidade a partir da proposta de cenários que incluam políticas de manutenções preventivas, o que possibilitará a redução tanto no MTBF das intervenções corretivas quanto no MTTR das intervenções preventivas.

4 ESTUDO DE CASO

O estudo foi realizado em uma empresa parceira localizada no interior do estado de São Paulo, a qual forneceu o acesso aos dados de tempos de usinagem fabril e históricos de paradas de máquinas por tipo de ocorrência de falha e suas respectivas intervenções com ações de manutenção exclusivamente do tipo corretiva. Os dados levantados são referentes ao período de fevereiro de 2019 a março de 2021. Nesse intervalo de tempo não houve impacto relevante das ações de contingenciamento devido à pandemia, não havendo comprometimento dos dados.

As operações realizadas desde a chegada da matéria prima até a conclusão da fabricação dos componentes mecânicos abrangem: abastecimento de matéria prima, tratamento térmico, pré-usinagem, usinagens intermediárias, metrologia, limpeza química, soldagem, usinagem de acabamento, deslocamentos nas etapas de execução dos componentes, aguardando troca de turno, aguardando mão de obra, aguardando recurso maquinário, manutenção corretiva e manutenção preventiva. Também foram coletados os registros de tempo de início e de fim de cada operação realizada.

4.1 CENÁRIO BASE

Um modelo de simulação foi elaborado considerando duas plantas industriais responsáveis por etapas complementares de fabricação de produtos processados no sistema estudado. A fábrica F1 é responsável pelas operações de tratamento térmico da matéria prima, seguida de pré-usinagem e, após, metrologia para inspeção e aprovação das peças em acordo com as especificações técnicas. As peças aprovadas são deslocadas para a fábrica F2, onde ocorrem as etapas de limpeza química e soldagem, respectivamente. Na sequência há o deslocamento para a fábrica F1, onde acontecem novas operações de tratamento térmico, usinagem intermediária e metrologia, sequencialmente. As peças aprovadas são redirecionadas à fábrica F2, onde ocorrem novas etapas de limpeza química e, posteriormente, de soldagem. Por fim, as peças retornam à fábrica F1, onde há a usinagem de acabamento e, por fim, a metrologia das peças finalizadas.

Os produtos modelados são formados por dois componentes que, quando finalizados, se transformam em um subconjunto. Esses componentes serão tratados pela nomenclatura produto topo e produto base. As etapas de fabricação desde a chegada da matéria prima até a última usinagem de acabamento e metrologia final são processos similares para ambos,

havendo variação nas ETs de execução e nos seus respectivos tempos de operação.

Os deslocamentos entre as fábricas e as movimentações das peças no percurso entre F1 e F2 podem ser visualizados por meio do recurso de animação disponível no *software* Arena®. Esses recursos gráficos auxiliam na aproximação entre o modelo simulado e o sistema real, além de indicar de forma visual e simultânea o acompanhamento de filas e a movimentação de entidades processadas pelos recursos.

Para a elaboração do modelo foi considerado um período equivalente a dez anos de produção, sendo esse período replicado 50 vezes em cada cenário da simulação. Com relação à jornada de trabalho, considerou-se uma hora diária para refeições, sem revezamento entre funcionários, e a lógica para controle de troca de turno, sendo o regime vigente de dois turnos, sendo o primeiro período (diurno) com 8,5 horas úteis trabalhadas e o segundo período (noturno) com 7,75 horas úteis trabalhadas.

A representação da situação real pelo cenário base considera distribuições de probabilidade de MTBF e MTTR para intervenções em manutenções do tipo corretiva conforme levantamento realizado com o comitê de especialistas. Esses dados são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 - MTBF e MTTR das manutenções corretivas

Falha	ET	MTBF (minutos)	MTTR (minutos)
Mecânica	A	TRIA (15844, 24375, 32906)	TRIA (13943, 21450, 28958)
Mecânica	B	TRIA (16731, 21450, 26813)	TRIA (12168, 15600, 19500)
Hidráulica	B	TRIA (111930, 159900, 191880)	TRIA (22523, 32175, 38610)
Elétrica	B	TRIA (504212, 646425, 904995)	TRIA (15971, 20475, 28665)
Mecânica	C	TRIA (147420, 184275, 221130)	TRIA (6240, 7800, 9360)
Eletrônica	D	TRIA (7800, 9750, 11700)	TRIA (6240, 7800, 9360)
Mecânica	D	TRIA (214110, 237900, 380640)	TRIA (21938, 24375, 39000)
Hidráulica	D	TRIA (353925, 707850, 920205)	TRIA (390, 780, 1014)
Mecânica	E	TRIA (116854, 137475, 178718)	TRIA (44753, 52650, 68445)
Eletrônica	E	TRIA (122948, 189150, 208065)	TRIA (102034, 156975, 172673)
Eletrônica	F	TRIA (8775, 14625, 21938)	TRIA (3803, 4875, 7312,5)

Nota: TRIA (a, b, c) representa a distribuição de probabilidade triangular, onde a é o valor mínimo; b é a moda; e c é o valor máximo.

Fonte: Elaborado pela autora

Como resultado da simulação foi identificado que a produtividade dos produtos estudados no modelo foi de 1.236 peças do produto base e 1.414 peças do produto topo.

Sendo assim, é possível atender uma demanda de 1.236 subconjuntos. Os resultados obtidos no cenário base está coerente com a realidade, de acordo com o comitê de especialistas.

4.2 RESULTADOS DA MATRIZ DE RISCOS

As falhas observadas foram agrupadas e classificadas em quatro tipos: elétrica, eletrônica, hidráulica e mecânica. Dessa forma foi possível agrupar as diversas falhas registradas de acordo com os dados levantados na fase de coleta de dados. São exemplos desses registros: vazamento de óleo, colisão da torre com a placa, ruído no motor, ruído na bomba de refrigeração, iluminação fraca, falha no sensor de rotação da placa e falha no sensor de velocidade da placa.

Essas falhas ocasionaram interrupção no funcionamento dos seis equipamentos de usinagem estudados, nomeados nesta pesquisa por estação de trabalho (ET) A, B, C, D, E e F. Como os dados coletados compreendem um intervalo de tempo de 788 dias, fez-se necessário converter as informações de parada de máquina coletadas para a unidade de medida anual, devido ao horizonte de referência do modelo de simulação.

Para o parâmetro de criticidade, houve o agrupamento das ocorrências em quatro categorias: muito alta, alta, moderada e baixa. O comitê de especialistas em ações de intervenções em manutenção da fábrica estudada corroborou com a validação dessa definição.

A Tabela 5 mostra o resultado da metodologia aplicada com relação à Frequência Anual de Falhas.

Tabela 5 - Relação da Frequência de Falhas

Falha	ET	Freq Anual (qtd)	Fator de Frequência	Critici- dade	Frequência Média por Criticidade	Vetor Fator de Frequência
Mecânica	B	7,4	9%	Muito alta	7,2	15,5
Mecânica	A	6,9	18%			
Eletrônica	D	4,6	27%	Alta	3,2	7,0
Eletrônica	F	2,8	36%			
Mecânica	E	2,3	45%			
Hidráulica	B	1,9	55%	Média	1,5	3,3
Eletrônica	E	1,4	64%			
Mecânica	C	1,4	73%			
Mecânica	D	1,4	82%			
Elétrica	B	0,5	91%	Baixa	0,5	1,0
Hidráulica	D	0,5	100%			
Elétrica	A	-				
Elétrica	C	-				
Elétrica	D	-				
Elétrica	E	-				
Elétrica	F	-				

Falha	ET	Freq Anual (qtd)	Fator de Frequência	Critici- dade	Frequência Média por Criticidade	Vetor Fator de Frequência
Eletrônica	A	-				
Eletrônica	B	-				
Eletrônica	C	-				
Hidráulica	A	-				
Hidráulica	C	-				
Hidráulica	E	-				
Hidráulica	F	-				
Mecânica	F	-				

Fonte: Elaborado pela autora

A partir da análise dos dados constantes na Tabela 5 é possível identificar a Frequência Anual de Falhas por categoria de criticidade de acordo com o agrupamento por ocorrência de tipo de falha em cada ET responsável pelas operações de usinagem. Já a Tabela 6 mostra o resultado da metodologia aplicada com relação ao Impacto da Indisponibilidade de Máquina.

Tabela 6 - Relação do Impacto da Indisponibilidade de Máquina

Falha	ET	Impacto (dias)	Fator de Indisponibilidade	Critici- dade	Indisp. Média por Criticidade	Vetor Fator de Indisponibilidade
Eletrônica	E	228,4	9%			
Eletrônica	F	115,8	18%			
Eletrônica	D	68,7	27%			
Mecânica	C	64,7	36%	Muito alta	93,4	116,8
Mecânica	B	62,1	45%			
Mecânica	A	61,7	55%			
Mecânica	E	52,7	64%			
Hidráulica	B	31,6	73%	Alta	31,6	39,4
Elétrica	B	21,1	82%	Média	21,1	26,3
Mecânica	D	21,0	91%			
Hidráulica	D	0,8	100%	Baixa	0,8	1,0
Elétrica	A	-				
Elétrica	C	-				
Elétrica	D	-				
Elétrica	E	-				
Elétrica	F	-				
Eletrônica	A	-				
Eletrônica	B	-				
Eletrônica	C	-				
Hidráulica	A	-				
Hidráulica	C	-				
Hidráulica	E	-				
Hidráulica	F	-				
Mecânica	F	-				

Fonte: Elaborado pela autora

A partir da análise dos dados constantes na Tabela 6 é possível identificar o Impacto da Indisponibilidade de Máquina por categoria de criticidade de acordo com o agrupamento por ocorrência de tipo de falha em cada ET responsável pelas operações de usinagem.

Por fim, a partir dos dados apresentados nas Tabelas 5 e 6, foi possível desenvolver a matriz de riscos resultante da relação entre a Frequência Anual de Falhas e o Impacto da Indisponibilidade de Máquina, conforme apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Matriz de Riscos

FALHA	ESTAÇÃO DE TRABALHO					
	A	B	C	D	E	F
Elétrica		2				
Eletrônica				12	8	12
Hidráulica		6		1		
Mecânica	16	16	8	4	12	

Legenda: Verde: $0 < FxI < 5$; Amarelo: $5 \leq FxI < 10$; Vermelho: $FxI \geq 10$

Fonte: Elaborado pela autora

Dessa forma, foi possível obter um *ranking* de quais ETs e tipos de falha devem ser priorizadas no estudo de cenários que visem à modificação da atual política de manutenção corretiva por uma política alternativa que combina manutenção preventiva e corretiva. Portanto, como resultado da matriz de riscos, a decisão por quais potenciais cenários serão simulados é embasada pela sequência de prioridades apresentada na Tabela 7.

Tabela 7 - *Ranking* de Falha por ET

Prioridade	Falha	ET
1	Mecânica	A
	Mecânica	B
2	Eletrônica	D
	Mecânica	E
	Eletrônica	F
3	Mecânica	C
	Eletrônica	E
4	Hidráulica	B
5	Mecânica	D
6	Elétrica	B

Prioridade	Falha	ET
7	Hidráulica	D

Fonte: Elaborado pela autora

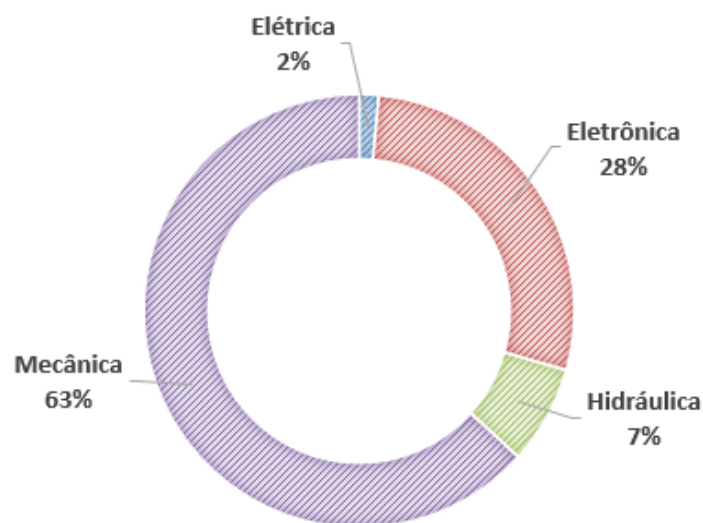
Assim, nota-se que o estudo de cenários para alternativas de manutenção é dado pelas ETs que resultaram em alta criticidade de acordo com a Frequência Anual de Falha e o Impacto da Indisponibilidade na Máquina.

4.3 DADOS GERAIS

Nesta subseção são apresentados o tratamento e as respectivas análises dos dados de paradas de máquinas e seus reparos por meio de manutenções corretivas realizadas período de fevereiro de 2019 a março de 2021. Desse modo, foram contabilizadas as quantidades e a duração média das ocorrências por ano, bem como a representatividade percentual por tipo de falha e por ET para o período estudado, além do cálculo das estatísticas de manutenção: MTBF, MTTR e Disponibilidade.

Para compreender o comportamento das paradas que geraram indisponibilidade nas ETs, foram elaborados os gráficos de Percentual da Frequência de Paradas por Tipo de Falha e Percentual da Duração das Falhas Mecânicas por ET, conforme o levantamento de dados. Esses gráficos são mostrados respectivamente nas Figuras 11 e 12.

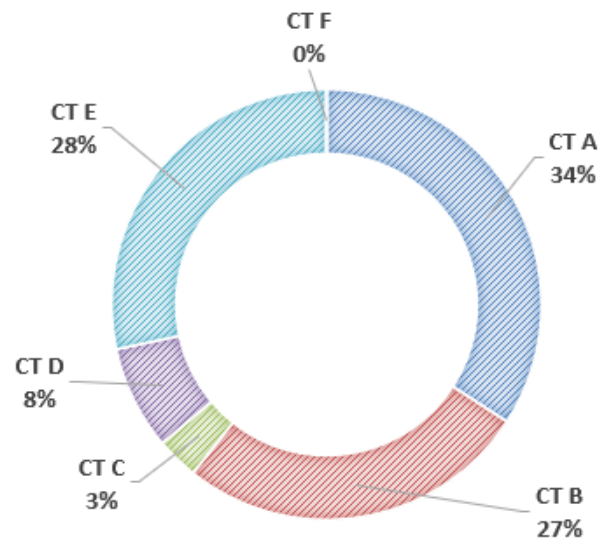
Figura 11 - Percentual de Frequência de Parada por Tipo de Falha



Fonte: Elaborado pela autora

Na Figura 12, independentemente da ET, é possível observar uma predominância das ocorrências de parada de máquina para a falha mecânica, com 63% das intervenções, seguida pela falha eletrônica, com 28%, hidráulica, com 7%, e, por fim, elétrica, com 2%. Já na Figura 10 nota-se que a ET com maior duração em paradas causadas por falha mecânica foi a ET A, com 34%, seguido pelas ET E, com 28%, ET B, com 27%, ET D, com 8%, e ET C, com 3%.

Figura 12 - Percentual da Duração das Falhas Mecânicas por ET



Fonte: Elaborado pela autora

As Figuras 11 e 12 corroboram a decisão sobre quais ETs por tipo de falha devem ser priorizados no estudo de cenários que visem a modificação da atual política de manutenção corretiva por uma política alternativa de manutenção preventiva. Portanto, a análise combinada do resultado da matriz de riscos, associado às figuras apresentadas resulta na escolha da simulação de cenários para as falhas do tipo mecânica na ET A, na ET B e na ET E devido ao maior percentual de indisponibilidade.

4.4 CENÁRIOS PROPOSTOS

Os cenários com políticas de manutenção a serem propostos consideraram um aumento padrão de 50% no MTBF das manutenções corretivas simuladas no modelo, ou seja, o equipamento estará 50% mais disponível entre as intervenções corretivas não planejadas.

Já no caso das propostas de manutenção preventiva, o comitê de especialistas estima

que a periodicidade do MTBF seja bimestral ou trimestral. Uma vez que a equipe de apoio que executa as manutenções é limitada, sugere-se que haja uma prática diária do próprio operador da ET em observar as condições gerais de funcionamento e desgastes da máquina, sendo de sua responsabilidade reportar as ocorrências observadas no banco de dados.

Com relação ao MTTR, este será análogo ao do cenário base para as intervenções em manutenções corretivas, conforme levantamento das distribuições estatísticas pelo comitê de especialistas. Já para as manutenções preventivas propostas, o comitê de especialistas estima uma redução de 2.925 minutos no MTTR com a antecipação de procedimentos administrativos necessários para a execução da manutenção.

Tais procedimentos incluem: a solicitação de autorização para o acesso da equipe de manutenção ao local da ocorrência; o transporte das peças e instrumentos necessários, o contato com o fabricante do equipamento para autorização de montagem e desmontagem de peças, quando se está no prazo de garantia; o registro da ordem de serviço no sistema eletrônico; e a distribuição dos recursos, tanto da mão de obra quanto da separação física de materiais e instrumentos a serem utilizados.

Dessa forma, serão propostos quatro cenários distintos a serem simulados. Para o cenário 1 considera-se a prioridade 1 do *Ranking* de Falha por ET, ou seja, o MTBF das manutenções mecânicas nas ETs A e B é aumentado em 50% devido à inclusão de uma política de manutenção preventiva com periodicidade bimestral para os ETs A e B, e MTTR com redução correspondente a 2.925 minutos.

Já o cenário 2 considera as prioridades 1 e 2 do *Ranking* de Falha por ET, ou seja, o MTBF das manutenções mecânicas nas ETs A, B e E é aumentado em 50% devido à inclusão de uma política de manutenção preventiva com periodicidade bimestral para as ETs A, B e E, e MTTR com redução correspondente a 2.925 minutos.

No cenário 3 considera-se a prioridade 1 do *Ranking* de Falha por ET, ou seja, o MTBF das manutenções mecânicas nas ETs A e B é aumentado em 50% devido à inclusão de uma política de manutenção preventiva com periodicidade trimestral para as ETs A e B, e MTTR com redução correspondente a 2.925 minutos.

Por fim, o cenário 4 considera as prioridades 1 e 2 do *Ranking* de Falha por ET, ou seja, o MTBF das manutenções mecânicas nos ETs A, B e E é aumentado em 50% devido à inclusão de uma política de manutenção preventiva com periodicidade trimestral para as ETs A, B e E, e MTTR com redução correspondente a 2.925 minutos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados em produtividade e disponibilidade para os quatro cenários alternativos de inclusão de política de manutenção preventiva por meio do modelo de simulação. Para isso, observa-se o comportamento das variáveis ao longo das 50 replicações do modelo para cada um dos cenários. Dessa forma, são avaliadas as possibilidades de ganhos comparativamente ao cenário base (*baseline*).

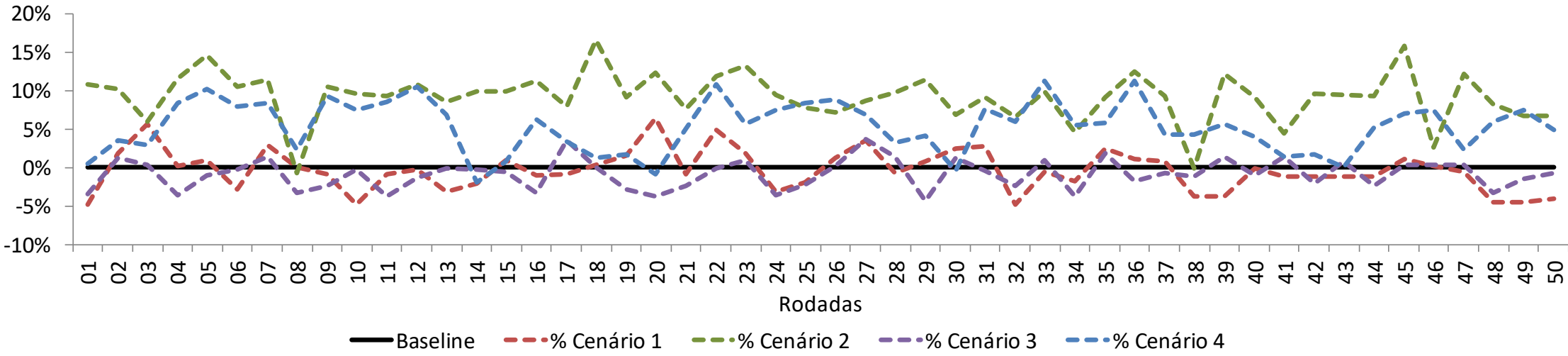
Para a análise de produtividade, os resultados são verificados em duas perspectivas: a primeira toma por base o total de peças fabricadas, isto é, o volume total de produtos topo e produtos base; a segunda considera os pares de subconjuntos formados, ou seja, o menor volume dentre produtos topo e produtos base. Os valores detalhados de Produtividade por peça Base, Produtividade por peça Topo, Produtividade Total e Produtividade por Subconjunto, para cada uma das 50 replicações, são mostrados nos Apêndices A, B, C e D.

Já para a análise de disponibilidade, os resultados são mostrados por ET que obteve a inclusão de política de manutenção preventiva, ou seja, ET A, ET B e ET C. Os valores detalhados de Disponibilidade da ET A, Disponibilidade da ET B e Disponibilidade da ET E, para cada uma das 50 replicações, são mostrados nos Apêndices E, F, e G.

5.1 PRODUTIVIDADE

Com relação à produtividade total de produtos topo e produtos base, a Figura 13 mostra a variação dos quatro cenários com relação ao *baseline*, indicando ganhos ou perdas ao comparar os dados por replicação de simulação.

Figura 13 - Variação da Produtividade Total com relação ao *baseline*



Fonte: Elaborado pela autora

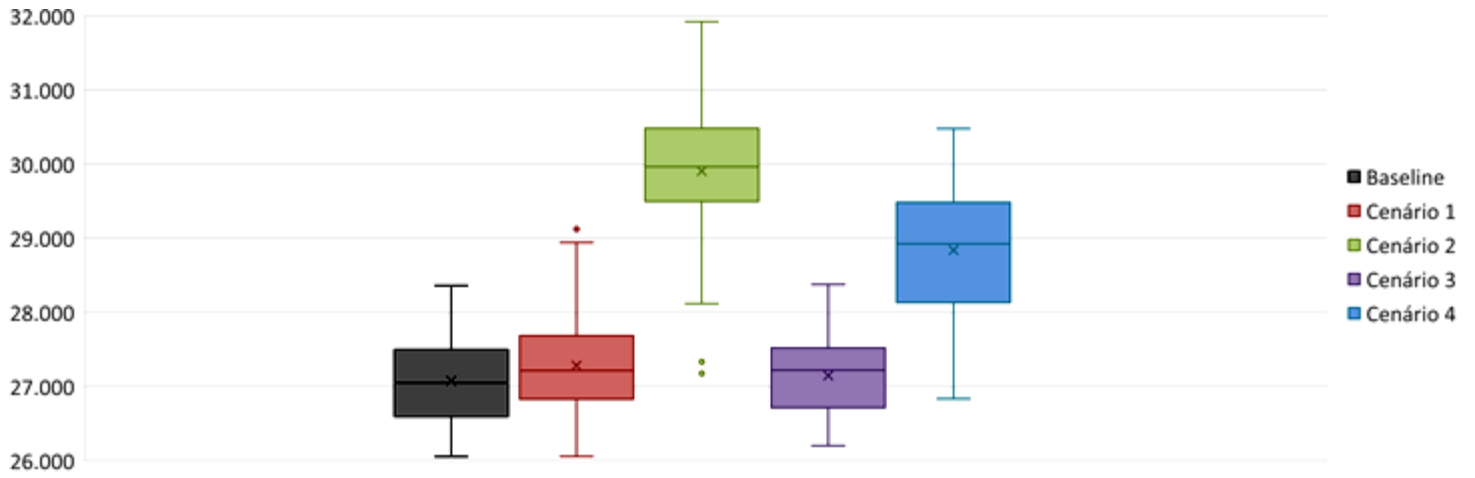
A partir da análise gráfica, observa-se que o cenário 2 apresentou os melhores resultados, mantendo sua produtividade total superior ao do *baseline* em praticamente todas as replicações, atingindo o ganho máximo de 16,6% na replicação 18. As exceções não são expressivas e ocorrem na replicação 8, com resultado inferior ao *baseline* em 0,72%, e na replicação 38, com resultado inferior ao *baseline* em 0,15%. Em média, o cenário 2 representa um ganho em produtividade total de 10,4% com relação ao resultado do *baseline*, comparando-se as médias das 50 replicações.

Nota-se que o cenário 4 também obteve produtividade total superior ao do *baseline* na maioria das replicações, atingindo o ganho máximo de 11,3% na replicação 33. As exceções não são expressivas e ocorrem na replicação 14, com resultado inferior ao *baseline* em 1,97%, na replicação 20, com resultado inferior ao *baseline* em 0,84%, e na replicação 30, com resultado inferior ao *baseline* em 0,45%. Em média, o cenário 4 representa um ganho em produtividade total de 6,5% com relação ao resultado do *baseline*, comparando-se as médias das 50 replicações.

Os cenários 1 e 3 não obtiveram uma variação da produtividade total tão significativa com relação ao *baseline*, mas ainda assim apresentaram ganhos. Em média, o ganho em produtividade total com relação ao resultado do *baseline* foi de 0,8% para o cenário 1 e de 0,3% para o cenário 3, comparando-se as médias das 50 replicações.

A Figura 14 corrobora a definição do cenário 2 como o de melhor resultado em produtividade total. Isso porque este cenário apresenta o valor máximo de 31.926 peças, sendo o seu valor mínimo, 28.122 peças, superior aos valores de média do cenário 1, 27.286 peças, mediana do cenário 1, 27.218 peças, média do cenário 3, 27.151 peças, e mediana do cenário 3, 27.223 peças. Além disso, a dispersão dos dados do cenário 2, representada pela diferença do intervalo interquartil, é menor do que a dispersão dos dados do cenário 4. Tanto o cenário 2 quanto o cenário 4 representam intervenções no máximo de ETs simuladas com a inclusão de políticas de manutenção preventiva. Percebe-se também que o conjunto de dados resultantes do cenário 2 possui a distribuição mais simétrica dentre os quatro cenários propostos, isto porque a sua mediana está graficamente posicionada de maneira mais centralizada.

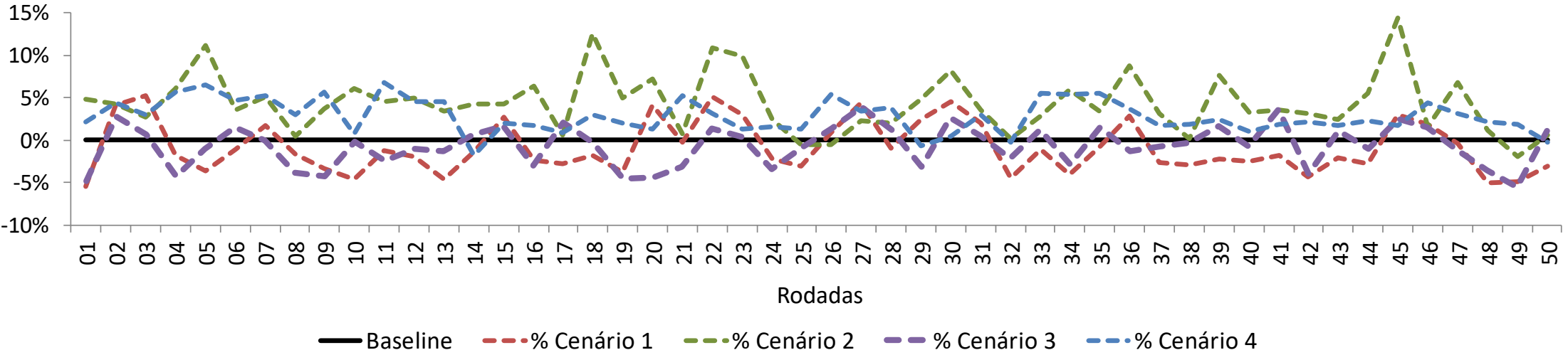
Figura 14 - Dispersão da Produtividade Total



Fonte: Elaborado pela autora

Já com relação à produtividade de subconjuntos, formados pelos pares de produto base com produto topo, a Figura 15 mostra a variação dos quatro cenários com relação ao *baseline*, indicando ganhos ou perdas ao comparar os dados por replicação de simulação.

Figura 15 - Variação da Produtividade de Subconjuntos com relação ao *baseline*



Fonte: Elaborado pela autora

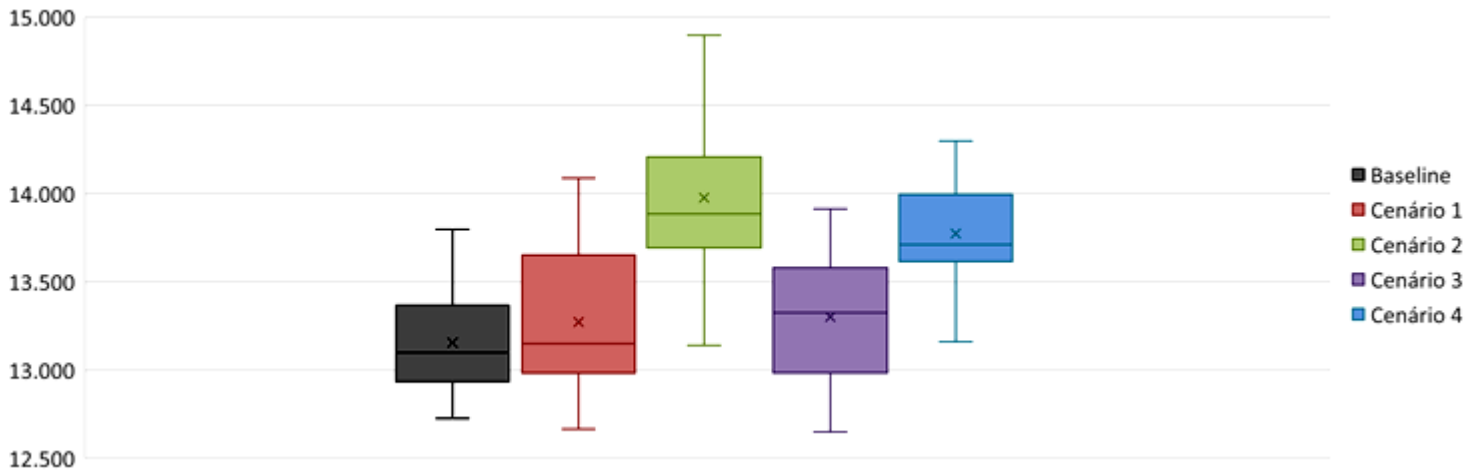
A partir da análise gráfica, observa-se que o cenário 2 apresentou os melhores resultados, mantendo sua produtividade de subconjuntos superior ao do *baseline* em praticamente todas as replicações, atingindo o ganho máximo de 14,4% na replicação 45. As exceções não são expressivas e ocorrem na replicação 25, com resultado inferior ao *baseline* em 0,46%, na replicação 26, com resultado inferior ao *baseline* em 0,49%, e na replicação 49, com resultado inferior ao *baseline* em 1,9%. Em média, o cenário 2 representa um ganho em produtividade de subconjuntos de 6,2% com relação ao resultado do *baseline*, comparando-se as médias das 50 replicações.

Nota-se que o cenário 4 também obteve produtividade de subconjuntos superior ao do *baseline* na maioria das replicações, atingindo o ganho máximo de 6,77% na replicação 11. As exceções não são expressivas e ocorrem na replicação 14, com resultado inferior ao *baseline* em 1,72%, na replicação 29, com resultado inferior ao *baseline* em 0,7%, na replicação 32, com resultado inferior ao *baseline* em 0,22%, e na replicação 50, com resultado inferior ao *baseline* em 0,29%. Em média, o cenário 4 representa um ganho em produtividade de subconjuntos de 4,7% com relação ao resultado do *baseline*, comparando-se as médias das 50 replicações.

Os cenários 1 e 3 não obtiveram uma variação da produtividade de subconjuntos de forma tão significativa com relação ao *baseline*, mas ainda assim apresentaram ganhos. Em média, o ganho em produtividade de subconjuntos com relação ao resultado do *baseline* foi de 0,9% para o cenário 1 e de 1,1% para o cenário 3, comparando-se as médias das 50 replicações.

A Figura 16 corrobora a escolha do cenário 2 como o de melhor resultado em produtividade de subconjuntos com relação ao resultado do *baseline*. Isso porque este cenário apresenta o valor máximo de 14.897 subconjuntos, sendo o seu valor no primeiro quartil, 13.693 subconjuntos, superior aos valores no terceiro quartil do cenário 1, 13.652 subconjuntos, e do cenário 3, 13.580 subconjuntos. Além disso, a dispersão dos dados do cenário 2, representada pela diferença do intervalo interquartil, é menor do que a dispersão dos dados dos cenários 1 e 3. Percebe-se também que a média do cenário 2, 13.977 subconjuntos, é superior à média do cenário 4, 13.774 subconjuntos. De forma análoga, a mediana do cenário 2, 13.885 subconjuntos, é superior à mediana do cenário 4, 13.711 subconjuntos.

Figura 16 - Dispersão da Produtividade de Subconjuntos



Fonte: Elaborado pela autora

Para sintetizar os resultados em produtividade para os cenários propostos, a Tabela 8 foi elaborada de modo a facilitar as percepções de cada cenário em relação ao cenário atual (*baseline*).

Tabela 8 - Síntese dos Resultados em Produtividade

Cenário	Política de Manutenção	Periodicidade da Preventiva	ET com Preventiva	Produto Base (un.)	Produto Topo (un.)	Total (un.)	Subconjuntos (un.)	Ganho em Peças	Ganho em Subconjuntos
<i>Baseline</i>	Apenas Corretiva	-	-	13.896	13.185	27.081	13.156	-	-
1	Preventiva e Corretiva	Bimestral	A e B	14.005	13.282	27.287	13.273	0,8%	0,9%
2	Preventiva e Corretiva	Bimestral	A, B e E	14.013	15.898	29.910	13.977	10,4%	6,2%
3	Preventiva e Corretiva	Trimestral	A e B	13.827	13.325	27.152	13.301	0,3%	1,1%
4	Preventiva e Corretiva	Trimestral	A, B e E	13.828	15.016	28.844	13.774	6,5%	4,7%

Fonte: Elaborado pela autora

Os resultados podem ser analisados pelo volume total de produtos topo e produtos base fabricados. A produção média total foi de 27.287, 29.910, 27.152 e 28.844 peças correspondentes aos cenários 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Quando comparados ao cenário atual, cujo volume total fabricado foi de 27.081 peças, nota-se um aumento da produtividade em todos os cenários. Esse ganho é acentuado quando ocorre a inclusão de manutenções

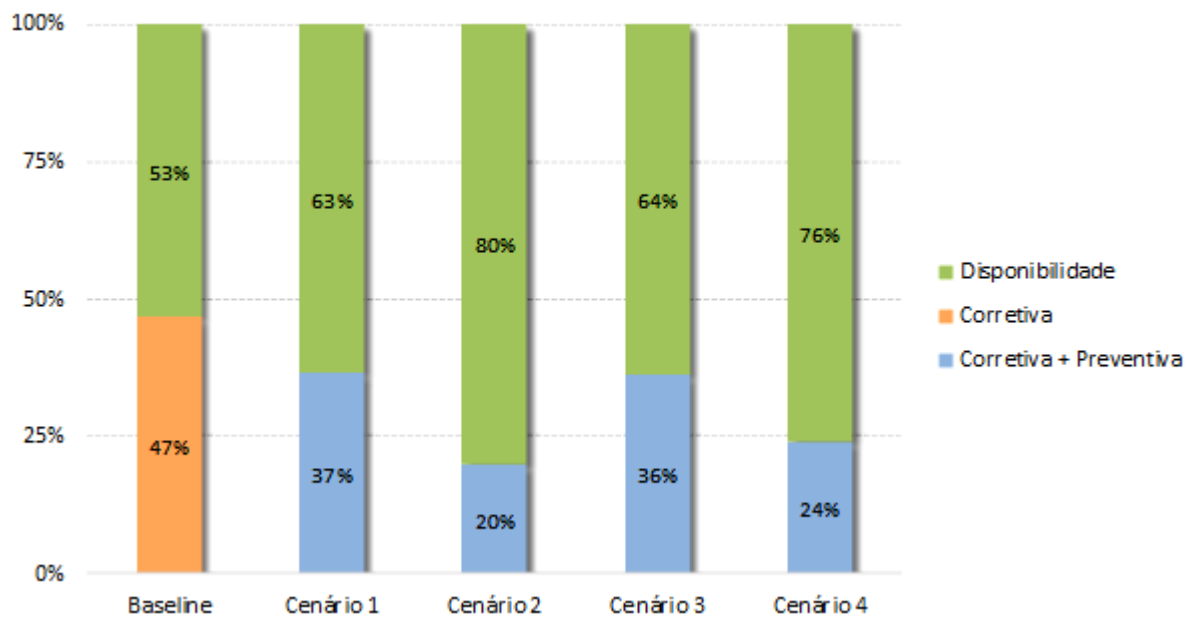
preventivas na ET E (cenários 2 e 4) e pode ser explicado pelo fato deste equipamento executar operações de usinagem exclusivamente do produto topo, impulsionando os resultados fabris desse tipo de peça.

Outra perspectiva considera a média do total de subconjuntos, ou seja, o menor volume dentre produtos topo e produtos base. Os resultados para os cenários 1, 2, 3 e 4 foram 13.273, 13.977, 13.301 e 13.774 subconjuntos, respectivamente, frente a 13.156 subconjuntos da situação atual. Assim, nota-se um aumento da produtividade em todos os cenários simulados para essa perspectiva. Portanto, nota-se que o cenário 2, aquele em que as manutenções preventivas são programadas bimestralmente nas ETs A, B e E, apresenta o melhor desempenho não somente no total de peças fabricadas como também no total de subconjuntos.

5.2 DISPONIBILIDADE

Com relação à disponibilidade, os resultados são mostrados por Estação de Trabalho onde houve a inclusão de uma política de manutenção preventiva. A Figura 17 apresenta o comportamento da disponibilidade da ET A.

Figura 17 - Situação da Estação de Trabalho A



Fonte: Elaborado pela autora

A partir da análise da Figura 17, conclui-se que o cenário 2 apresentou os melhores

resultados para a disponibilidade da ET A. Isso porque houve uma redução de 57% no tempo dedicado às atividades de manutenção da ET A, já que esta reduziu de 47% para 20%, em comparação ao *baseline*. Dessa forma, houve um aumento de 50% na disponibilidade na ET A, que passou de 53% para 80%, em comparação ao *baseline*.

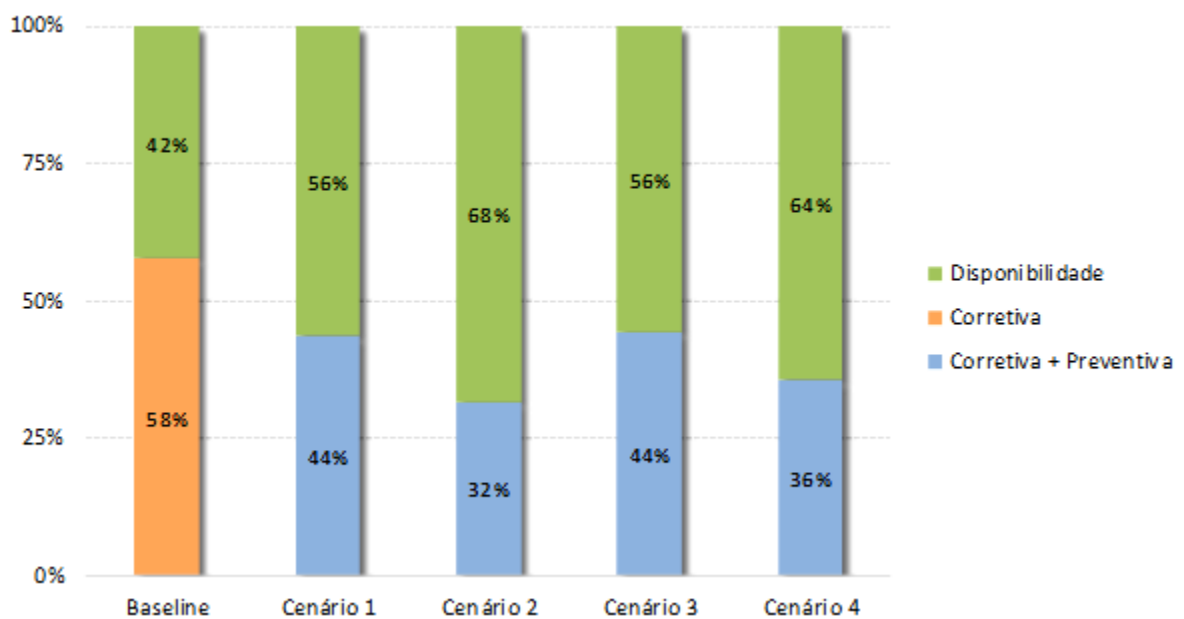
O cenário 4 também apresentou resultados satisfatórios expressivos. Neste caso, houve uma redução de 48% no tempo dedicado às atividades de manutenção da ET A, já que esta reduziu de 47% para 24%, em comparação ao *baseline*. Dessa forma, houve um aumento de 42% na disponibilidade na ET A, que passou de 53% para 76%, em comparação ao *baseline*.

O cenário 1 apresentou resultados satisfatórios, porém menos expressivos do que os cenários 2 e 4. Neste caso, houve uma redução de 22% no tempo dedicado às atividades de manutenção da ET A, já que esta reduziu de 47% para 37%, em comparação ao *baseline*. Dessa forma, houve um aumento de 19% na disponibilidade na ET A, que passou de 53% para 63%, em comparação ao *baseline*.

Já o cenário 3 apresentou resultados satisfatórios e ligeiramente superiores ao cenário 1, porém menos expressivos do que os cenários 2 e 4. Neste caso, houve uma redução de 23% no tempo dedicado às atividades de manutenção da ET A, já que esta reduziu de 47% para 36%, em comparação ao *baseline*. Dessa forma, houve um aumento de 20% na disponibilidade na ET A, que passou de 53% para 64%, em comparação ao *baseline*.

A Figura 18 apresenta a comportamento da disponibilidade da ET B.

Figura 18 - Situação da Estação de Trabalho B



Fonte: Elaborado pela autora

A partir da análise da Figura 18, conclui-se que o cenário 2 apresentou os melhores resultados para a disponibilidade da ET B. Isso porque houve uma redução de 45% no tempo dedicado às atividades de manutenção da ET B, já que esta reduziu de 58% para 32%, em comparação ao *baseline*. Dessa forma, houve um aumento de 62% na disponibilidade na ET B, que passou de 42% para 68%, em comparação ao *baseline*.

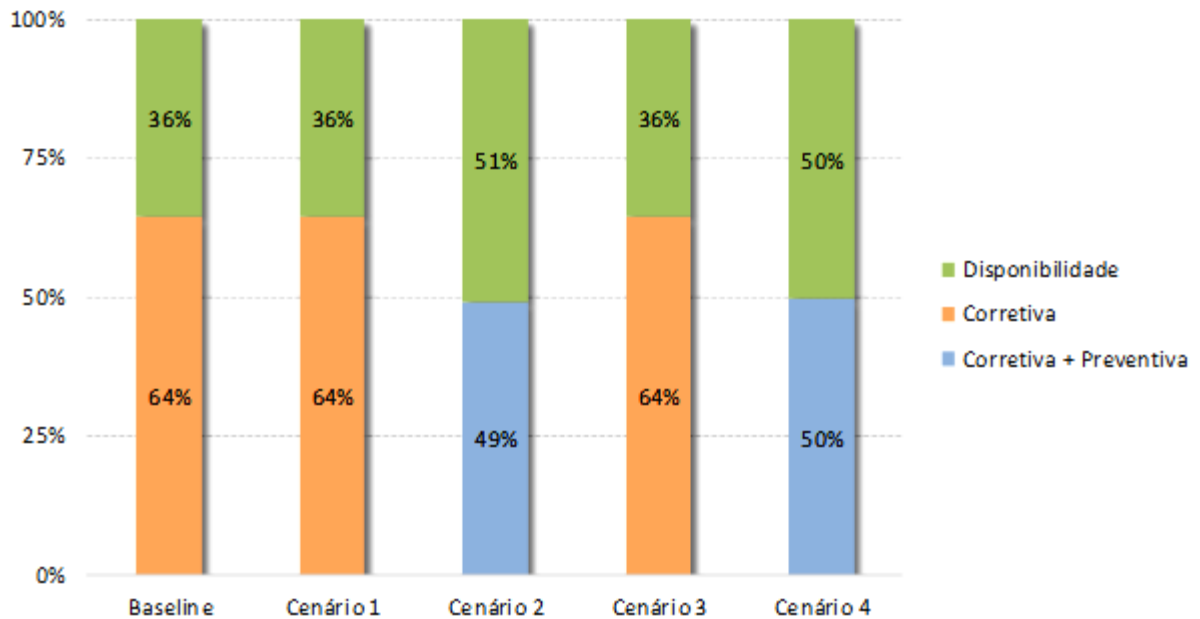
O cenário 4 também apresentou resultados satisfatórios expressivos. Neste caso, houve uma redução de 38% no tempo dedicado às atividades de manutenção da ET B, já que esta reduziu de 58% para 44%, em comparação ao *baseline*. Dessa forma, houve um aumento de 52% na disponibilidade na ET B, que passou de 42% para 64%, em comparação ao *baseline*.

O cenário 1 apresentou resultados satisfatórios, porém menos expressivos do que os cenários 2 e 4. Neste caso, houve uma redução de 24% no tempo dedicado às atividades de manutenção da ET B, já que esta reduziu de 58% para 43,5%, em comparação ao *baseline*. Dessa forma, houve um aumento de 33% na disponibilidade na ET B, que passou de 42% para 56,5%, em comparação ao *baseline*.

Já o cenário 3 apresentou resultados satisfatórios e próximos aos do cenário 1, porém menos expressivos do que os cenários 2 e 4. Neste caso, houve uma redução de 23% no tempo dedicado às atividades de manutenção da ET B, já que esta reduziu de 58% para 44,4%, em comparação ao *baseline*. Dessa forma, houve um aumento de 31% na disponibilidade na ET B, que passou de 42% para 55,6%, em comparação ao *baseline*.

A Figura 19 apresenta o comportamento da disponibilidade da ET E.

Figura 19 - Situação da Estação de Trabalho E



Fonte: Elaborado pela autora

A partir da análise da Figura 19, conclui-se que não houve modificação na disponibilidade dos cenários 1 e 3, uma vez que não se incluiu nenhuma política de manutenção preventiva para a ET E nesses cenários. Nota-se que os resultados obtidos para os cenários 2 e 4 foram muito similares, não havendo predominância quando se analisa a disponibilidade da ET E.

No cenário 2 houve uma redução de 23% no tempo dedicado às atividades de manutenção da ET E, já que esta reduziu de 64% para 49%, em comparação ao *baseline*. Dessa forma, houve um aumento de 41% na disponibilidade na ET E, que passou de 36% para 51%, em comparação ao *baseline*.

Com resultados semelhantes, o cenário 4 mostrou uma redução de 22% no tempo dedicado às atividades de manutenção da ET E, já que esta reduziu de 64% para 50%, em comparação ao *baseline*. Dessa forma, houve um aumento de 40% na disponibilidade na ET E, que passou de 36% para 50%, em comparação ao *baseline*.

A fim de sintetizar os resultados em disponibilidade para os cenários propostos, a Tabela 10 foi elaborada de modo a facilitar as percepções de cada cenário em relação ao cenário base (*baseline*).

Tabela 9 - Síntese dos Resultados em Disponibilidade

Cenário	Política de Manutenção	Periodicidade da Preventiva	ET com Preventiva	Disponibilidade ET A (%)	Disponibilidade ET B (%)	Disponibilidade ET E (%)
<i>Baseline</i>	Apenas Corretiva	-	-	53,3%	42,3%	35,6%
1	Preventiva e Corretiva	Bimestral	A e B	63,4%	56,5%	35,6%
2	Preventiva e Corretiva	Bimestral	A, B e E	80,2%	68,5%	50,7%
3	Preventiva e Corretiva	Trimestral	A e B	63,9%	55,6%	35,6%
4	Preventiva e Corretiva	Trimestral	A, B e E	75,9%	64,5%	50,3%

Fonte: Elaborado pela autora

Os resultados da Tabela 9 mostram que houve aumento da disponibilidade em todas as ETs simuladas nos quatro cenários propostos, sendo uma consequência da inclusão de política de manutenção preventiva. Uma exceção é verificada no caso da disponibilidade da ET E para os cenários 1 e 3, que pode ser explicado pelo fato dessas simulações considerarem a inclusão de política de manutenção preventiva exclusivamente nas ETs A e B.

Portanto, nota-se que o cenário 2, aquele em que as manutenções preventivas são programadas bimestralmente nas ETs A, B e E, apresenta o melhor desempenho em disponibilidade para todas as estações de trabalho analisadas: ET A, ET B e ET E.

Os resultados obtidos tanto para o critério Produtividade quanto para o critério Disponibilidade indicam que os cenários 2 e 4 são mais beneficiados com a inclusão de políticas de manutenção preventiva, em comparação aos cenários 1 e 3. Isso pode ser explicado devido à maior diversidade de ETs que tiveram redução nas manutenções corretivas para o tipo de falha mecânica, que são: ET A, ET B e ET E.

A partir dos resultados é possível inferir que uma política de manutenção híbrida, em comparação a uma política de manutenção exclusivamente corretiva, melhora significativamente o desempenho do sistema de manufatura, de forma análoga aos resultados obtidos por Renna (2016), no qual a simulação de eventos discretos foi usada para investigar o efeito de uma política híbrida que combina manutenção preventiva e corretiva. Em outra abordagem, Sheng, Basri e Kamaruddin (2017) utilizaram a DES para medir o desempenho dos parâmetros do chão de fábrica quando submetidos a ações de manutenção preventiva. Assim como os autores, esta pesquisa conclui que a política manutenção preventiva é capaz de melhorar a produtividade e promover uma maior utilização da máquina.

Nota-se ainda a confirmação de que a inclusão de políticas de manutenções

preventivas periódicas possibilita redução na quantidade de paradas para manutenções corretivas não planejadas, evitando a indisponibilidade desnecessária das máquinas, conforme abordado por Conrads *et al.* (2017). Ademais, o exposto por Djassemi e Seifoddini (2019) é ratificado nesta pesquisa, isto é, tornar um conjunto de máquinas críticas mais confiáveis acarreta aumento na disponibilidade da máquina.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho atingiu o objetivo geral de avaliar a inclusão de políticas de manutenção preventiva e, conseqüentemente, a redução de políticas de manutenção corretiva, observando critérios de disponibilidade e de produtividade, a partir da mitigação dos riscos de falhas que causam paradas de máquina. Dessa forma, esta pesquisa preenche uma lacuna da literatura ao aplicar a modelagem e simulação de eventos discretos em uma abordagem de análise de riscos associada à gestão da manutenção.

Para isso, foi desenvolvida, inicialmente, uma matriz de riscos obtida pela relação entre a Frequência Anual de Falhas e o Impacto da Indisponibilidade de Máquina, resultando em um *ranking* de ETs e falhas a serem priorizadas no estudo de cenários. Após, houve a construção dos modelos conceitual e computacional, por meio da simulação de eventos discretos, de modo a representar a situação vigente de um sistema industrial propenso a falhas de máquina e pertencente à Administração Pública. Por fim, foram propostos cenários que consideraram o aumento de 50% no MTBF das manutenções corretivas com a periodicidade bimestral ou trimestral no MTBF das manutenções preventivas, além da redução de 2.925 minutos nas distribuições estatísticas referentes ao MTTR das manutenções preventivas devido à antecipação de procedimentos administrativos.

Os principais resultados mostram que a produtividade total, em média, foi de 27.287, 29.910, 27.152 e 28.844 peças correspondentes aos cenários 1, 2, 3 e 4, respectivamente, o que representa aumento da produtividade total em todos os cenários, frente a 27.081 peças da situação atual. Isso representa os seguintes ganhos, em média, com relação ao *baseline*: 0,8% no cenário 1; 10,4% no cenário 2; 0,3% no cenário 3; e 6,5% no cenário 4. Já a produtividade de subconjuntos foi, em média, de 13.273, 13.977, 13.301 e 13.774 subconjuntos correspondentes aos cenários 1, 2, 3 e 4, respectivamente, o que representa aumento da produtividade de subconjuntos em todos os cenários, frente a 13.156 subconjuntos da situação atual. Isso representa os seguintes ganhos, em média, com relação ao *baseline*: 0,9% no cenário 1; 6,2% no cenário 2; 1,1% no cenário 3; e 4,7% no cenário 4.

Outra perspectiva analisada foi a de disponibilidade das ETs A, B e E. No caso da ET A, com disponibilidade de 53% no *baseline*, os seguintes ganhos foram observados: aumento de 19% no cenário 1, passando a estar 63% disponível; aumento de 50% no cenário 2, passando a estar 80% disponível; aumento de 20% no cenário 3, passando a estar 64% disponível; e aumento de 42% no cenário 4, passando a estar 76% disponível. Para a ET B, com disponibilidade de 42% no *baseline*, os seguintes ganhos foram observados: aumento de

33% no cenário 1, passando a estar 56,5% disponível; aumento de 62% no cenário 2, passando a estar 68% disponível; aumento de 31% no cenário 3, passando a estar 55,6% disponível; e aumento de 52% no cenário 4, passando a estar 64% disponível. Já na ET E, com disponibilidade de 36% no *baseline*, a inclusão de política de manutenção preventiva nessa ET foi simulada exclusivamente para os cenários 2 e 4. Dessa forma, os seguintes ganhos foram observados: aumento de 41% no cenário 2, passando a estar 51% disponível; e aumento de 40% no cenário 4, passando a estar 50% disponível.

Diante dos resultados obtidos, nota-se que o cenário 2, aquele em que as manutenções preventivas são programadas bimestralmente nas ETs A, B e E, apresenta o melhor desempenho em produtividade total, produtividade de subconjuntos e disponibilidade para as três estações de trabalho analisadas. Dessa forma, conclui-se que quanto maior a disponibilidade dos equipamentos, maior será a produtividade do sistema, ratificando que a gestão da manutenção representa um fator estratégico para as organizações, o que fornece um entendimento da teoria a partir da prática de um estudo de caso.

Apesar dos cuidados teóricos e metodológicos, o estudo possui algumas limitações. Com relação aos dados utilizados, o período de coleta foi restrito, de fevereiro de 2019 a março de 2021, pois o sistema utilizado para os registros de apontamentos das operações é recente, fornecendo um banco de dados ainda pequeno. Além disso, reconhece-se a possibilidade de variabilidade nos registros devido ao entendimento pessoal de cada operador. Outro fator limitante corresponde às diferentes decisões de priorização das ações em manutenção, uma vez que os recursos para a execução das intervenções são limitados.

Como sugestão de estudos futuros, é possível avaliar também as demais ETs e suas respectivas falhas levantadas no *ranking* da matriz de riscos e, ainda, replicar a metodologia aplicada neste trabalho para outras operações, além da usinagem, que fazem parte do sistema estudado, por exemplo, o tratamento térmico e a soldagem. Ademais, pode-se realizar um estudo de *performance* financeira, a fim de avaliar os prejuízos acarretados pelo volume de peças e de subconjuntos não produzidos devido à indisponibilidade dos equipamentos.

REFERÊNCIAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462: Confiabilidade e Manutenibilidade**. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

ABRAMAN. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MANUTENÇÃO E GESTÃO DE ATIVOS. **Documento Nacional de 2017: O Road Map da Manutenção no Brasil**. 2017. Disponível em: <http://storage.ning.com/topology/rest/1.0/file/get/2275490110?profile=original>. Acesso em: 26 jun. 2021.

ALABDULKARIM, Abdullah A.; BALL, Peter D.; TIWARI, Ashutosh. Applications of simulation in maintenance research. **World Journal of Modelling and Simulation**, v. 9, n. 1, p. 14-37, 2013.

ALRABGHI, Abdullah; TIWARI, Ashutosh. A novel approach for modelling complex maintenance systems using discrete event simulation. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 154, p. 160-170, 2016.

ALTUNTAS, Serkan; DERELI, Turkey; KUSIAK, Andrew. Assessment of corporate innovation capability with a data-mining approach: industrial case studies. **Computers & Industrial Engineering**, v. 102, p. 58-68, 2016.

AMELIAN, S.; SAJADI, S.M.; ALINAGHIAN, M. Optimal production and preventive maintenance rate in a failure-prone manufacturing system using discrete event simulation. **International Journal of Industrial and Systems Engineering**, v. 20, n. 4, p. 483-496, 2015.

AMPONSAH-KWATIAH, Kofi; OWUSU, Seth Anim; AFRANIE, Isaac. An evaluative study of public property maintenance practices in a tertiary institution in Ghana. **Property Management**, 2021.

AZADEH, Ali; ASADZADEH, Seyed Mohammad; SEIF, Javad. An integrated simulation-analysis of variance methodology for effective analysis of CBM alternatives. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 27, n. 7, p. 624-637, 2014.

BANKS, Jerry; GIBSON, Randall R. Don't simulate when: 10 rules for determining When simulation is not appropriate, **IEE Solutions**, v. 29, n. 9, p. 30-33, 1997.

BANKS, J.; CARSON II, J.S.; NELSON, B.L.; NICO, D.M., **Discrete-event system simulation**. 5 ed. Upper Saddle River: Person Prentice Hall, 2010.

BARBOSA, Rui Mário Martinho. **Análise de uma metodologia de apoio à decisão na seleção de parâmetros de simulação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2020.

BILGIC, Hasan Huseyin; GUVENC, Mehmet Ali; CAKIR, Mustafa; MISTIKOGLU, Selcuk. A study on prediction of surface roughness and cutting tool temperature after turning for S235JR steel. **Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi**, v. 7, p. 966-974, 2019.

BOLU, Christian A. Modeling Maintenance Productivity Measurement. *In: Integrated Models for Information Communication Systems and Networks: Design and Development*. IGI Global, 2013. p. 149-164.

BRAGLIA, Marcello; GABBRIELLI, Roberto; MARRAZZINI, Leonardo. Risk Failure Deployment: A novel integrated tool to prioritize corrective actions in failure mode and effects analysis. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 37, n. 2, p. 433-450, 2020.

BRISTOT, Vilson Menegon. **Estudo para implementação de sistemas de gestão de manutenção em indústrias de conformação de revestimentos cerâmicos**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

CAKIR, Mustafa; GUVENC, Mehmet Ali; MISTIKOGLU, Selcuk. The experimental application of popular machine learning algorithms on predictive maintenance and the design of IIoT based condition monitoring system. **Computers & Industrial Engineering**, v. 151, p. 106948, 2021.

CAMPOS, Fernando Celso de; BELHOT, Renato Vairo. Gestão de manutenção de frotas de veículos: uma revisão. **Gestão & Produção**, v. 1, n. 2, p. 171-188, 1994.

CARVALHO, Fabricio Baroni de. **Simulação Computacional na Análise da Manutenção das Viaturas Blindadas Piranha do Corpo de Fuzileiros Navais**. 2016. Dissertação (Mestrado em Energia de Produção) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

CERVEIRA, Diego Santos; SELLITTO, Miguel Afonso. Manutenção centrada em confiabilidade (MCC): análise quantitativa de um forno elétrico a indução. **Revista Produção Online**, v. 15, n. 2, p. 405-432, 2015.

CHWIF, Leonardo; MEDINA, Afonso C. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria e Aplicações**. 4 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

CONRADS, A. *et al.* Assessing maintenance strategies for cutting tool replacements in mechanized tunneling using process simulation. **Journal of Simulation**, v. 11, n. 1, p. 51-61, 2017.

DANTAS, Igor dos Santos. **Importância e Benefícios do Planejamento de Gestão de Manutenção**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.

DARESTANI, Soroush Avakh; PALIZBAN, Tahereh; IMANNEZHAD, Rana. Maintenance strategy selection: a combined goal programming approach and BWM-TOPSIS for paper production industry. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, 2020.

DAVOODI, S.M.R.; AMELIAN, S. Production and preventive maintenance rates control in a failure-prone manufacturing system using discrete event simulation and simulated annealing algorithm. **International Journal of Manufacturing Technology and Management**, v. 32, n. 6, p. 552-564, 2018.

DJASSEMI, M.; SEIFODDINI, H. Analysis of critical machine reliability in manufacturing cells. **Journal of Industrial Engineering and Management**, v. 12, n. 1, p. 70-82, 2019.

ESPINOSA, F.; CEA, R. Diseño de un Programa Computacional para Evaluar la Gestión de Mantenimiento Basado en la Seguridad de Funcionamiento. **Información tecnológica**, v. 15, n. 6, p. 71-78, 2004.

FREITAS FILHO, Paulo José. **Introdução à modelagem e simulação de sistemas: com aplicações em Arena**. Florianópolis: Visual Books, 2001.

GIL, Antonio Carlos. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GÖLBAŞI, Onur; DEMIREL, Nuray. A cost-effective simulation algorithm for inspection interval optimization: An application to mining equipment. **Computers & Industrial Engineering**, v. 113, p. 525-540, 2017.

GÖLBAŞI, O.; TURAN, M.O. A discrete-event simulation algorithm for the optimization of multi-scenario maintenance policies. **Computers and Industrial Engineering**, v. 145, 2020.

HOAD, Kathryn; ROBINSON, Stewart; DAVIES, Ruth. Automating warm-up length estimation. **Journal of the Operational Research Society**, v. 61, n. 9, p. 1389-1403, 2010.

INGALLS, R. G. Introduction to Simulation. *In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2002, San Diego, California, USA. Proceedings [...].* San Diego, California, USA, 2002. p. 7-16.

ISTOKOVIC, D. *et al.* Minimizing Total Production Cost in a Hybrid Flow Shop: A Simulation-optimization Approach. **International Journal of Simulation Modelling**, v. 19, n. 4, p. 559-570, 2020.

JASIULEWICZ-KACZMAREK, Małgorzata; LEGUTKO, Stanislaw; KLUK, Piotr. Maintenance 4.0 technologies—new opportunities for sustainability driven maintenance. **Management and Production Engineering Review**, v. 11, 2020.

KANS, Mirka; GALAR, Diego. The Impact of Maintenance 4.0 and Big Data Analytics within Strategic Asset Management. *In: Maintenance, Performance, Measurement & Management (MPMM 2016)*. Suécia. Luleå tekniska universitet, 2017, p. 96-103.

KARDEC, Allan.; NASCIF, Julio. **Manutenção - Função estratégica**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2013.

KINZ, Alfred; BERNERSTAETTER, Robert; BIEDERMANN, Hubert. Lean Smart Maintenance—Efficient and Effective Asset Management for Smart Factories. *In: Proceedings of the 8th International Scientific Conference Management of Technology—Step to Sustainable Production*. 2016.

KLEIJNEN, Jack P. C. Verification and validation of simulation models. **European journal of operational research**, v. 82, n. 1, p. 145-162, 1995.

- KUMAR, Pardeep; KUMAR, Amit. Tripod Turnstile Machines Performance Analysis for the System Safety and Security without Considering Simultaneous Failures using Reliability Approach. **International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences**, v. 6, n. 1, p. 383-395, 2021.
- LAW, Averill M.; KELTON, W. David. **Simulation modeling and analysis**. New York: McGraw-Hill, 2000.
- LAW, Averill M. **Simulation modeling and analysis**. 5. ed. Tucson: McGraw-Hill, 2013.
- LOPES, Isabel; SENRA, Patrícia; VILARINHO, Sandrina; SÁ, Vera; TEIXEIRA, Catarina; LOPES, João; ALVES, Anabela; OLIVEIRA, José A.; FIGUEIREDO, Manuel. Requirements specification of a computerized maintenance management system – a case study. **Procedia CIRP**, v. 52, p. 268-273, 2016.
- MATYAS, Kurt; NEMETH, Tanja; KOVACS, Klaudia; GLAWAR, Robert. A procedural approach for realizing prescriptive maintenance planning in manufacturing industries. **CIRP Annals**, v. 66, n. 1, p. 461-464, 2017.
- MARIA, A. Introduction to Modeling and Simulation. *In*: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1997, Atlanta, Georgia, USA. **Proceedings** [...]. Atlanta, Georgia, USA, 1997. p. 7-13.
- MÁRQUEZ, Adolfo Crespo *et al.* Criticality Analysis for Maintenance Purposes: A Study for Complex In-service Engineering Assets. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 32, n. 2, p. 519-533, 2016.
- MAURÍCIO, Gabriel Campos. **Análise de cenários em indústrias de processo usando simulação discreta: uma aplicação em uma indústria de nutrição animal**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2015.
- MENDES, Angélica Alebrant; RIBEIRO, José Luis Duarte. Estabelecimento de um plano de manutenção baseado em análises quantitativas no contexto da MCC em um cenário de produção JIT. **Production**, v. 24, n. 3, p. 675-686, 2014.
- MENGUE, Denis Carlos; SELLITTO, Miguel Afonso. Estratégia de manutenção baseada em funções de confiabilidade para uma bomba centrífuga petrolífera. **Revista Produção Online**, v. 13, n. 2, p. 759-783, 2013.
- NEGAHBAN, A.; SMITH, J. S. Simulation for manufacturing system design and operation: Literature review and analysis. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 33, p. 241-261, 2014.
- NGU, Kie Ming; PHILIP, Nicholas; SAHLAN, Shafishuhaza. Proactive and predictive maintenance strategies and application for instrumentation & control in oil & gas industry. **International Journal of Integrated Engineering**, v. 11, n. 4, 2019.
- NKRUMAH, Edmund Nana Kwame; STEPHEN, Tindi; TAKYI, Lydia; ANABA, Oswin Aganda. Public infrastructure maintenance practices in Ghana. **Review of Public**

Administration and Management, v. 5, n. 3, p. 1-9, 2017.

OLEGHE, Omogbai; SALONITIS, Konstantinos. The application of a hybrid simulation modelling framework as a decision-making tool for TPM improvement. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 25, n. 3, p. 476-498, 2019.

OLIVEIRA, José Carlos Souza. Análise de indicadores de qualidade e produtividade da manutenção nas indústrias brasileiras. **Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas**, Bauru, v. 9, n. 3, p. 53-69, 2013.

PASSATH, Theresa; MERTENS, Katharina. Decision making in lean smart maintenance: criticality analysis as a support tool. **IFAC-PapersOnLine**, v. 52, n. 10, p. 364-369, 2019.

PEGDEN, C. Dennis; SADOWSKI, Randall P.; SHANNON, Robert E. **Introduction to simulation using SIMAN**. 2 ed. New York: McGraw-Hill, Inc., 1995.

PEIMBERT-GARCÍA, Rodrigo E.; VÁZQUEZ-SERRANO, Jesús Isaac; LIMÓN-ROBLES, Jorge. The impact of early failures on maintenance costs: an empirical study in Latin America. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, 2021.

PRADO, Darci. **Teoria das filas e da simulação**. 2ª ed. Belo Horizonte: Editora de Desenvolvimento Gerencial, 2004.

PRADO, Darci. **Usando o Arena em simulação**. 2 ed. Nova Lima: INDG-Tecnologia e Serviços, 2010.

PRASS, Leandro C.; NUNES, Fabiano Lima. Implantação da manutenção preventiva em um centro de usinagem CNC de uma indústria moveleira. **Produção em Foco**, v. 9, n. 2, p. 43-73, 2019.

RENNA, Paolo. Influence of maintenance policies on multi-stage manufacturing systems in dynamic conditions. **International Journal of Production Research**, v. 50, n. 2, p. 345-357, 2012.

RENNA, P. Deteriorating job scheduling problem in a job-shop manufacturing system by multi-agent system. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 28, n. 9, p. 936-945, 2015.

RENNA, P. Maintenance policy in job-shop manufacturing systems with reminder cell. **International Journal of Services and Operations Management**, v. 24, n. 4, p. 459-483, 2016.

ROBINSON, Stewart. **Simulation: The practice of model development and use**. England: John Wiley & Sons, 2004.

SANTOS, William Rodrigues dos. **Proposta de uma abordagem para modelagem e simulação de eventos discretos integrada com simulação baseada em agentes: aplicação em uma linha de montagem**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2017.

SARGENT, Robert G. Validation and verification of simulation models. *In: WINTER SIMULATION CONFERENCE*, 2004, Washington, USA. **Proceedings** [...]. Washington: IEEE, 2004. p. 17-28.

SHANNON, R. E. Introduction to the Art and Science of Simulation. *In: WINTER SIMULATION CONFERENCE*, 1998, Washington, USA. **Proceedings** [...]. Washington: IEEE, 1998. p. 7-14.

SHENG, L.W.; BASRI, E.I.; KAMARUDDIN, S. Analysis on the effect of shop floor parameters on the effectiveness of preventive maintenance through discrete event simulation. **Pertanika Journal of Science and Technology**, v. 25, n. 1, p. 1-16, 2017.

SHROUF, Fadi; ORDIERES, Joaquin; MIRAGLIOTTA, Giovanni. Smart factories in Industry 4.0: A review of the concept and of energy management approached in production based on the Internet of Things paradigm. *In: 2014 IEEE international conference on industrial engineering and engineering management*. IEEE, 2014. p. 697-701.

SILVA, João Eduardo Azevedo Ramos da. **Desenvolvimento de um modelo de simulação para auxiliar o gerenciamento de sistemas de corte, carregamento e transporte de cana-de-açúcar**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.

SILVA, Marcos Antônio Alves da. **Desenvolvimento de um aplicativo para gerenciamento da manutenção do sistema elétrico de potência da UFRN, utilizando o Código QR como ferramenta de acesso ao plano de manutenção**. 2017. Dissertação (Mestrado em Energia Elétrica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

SOUSA, Rui Alberto Lopes de. **TPM (Total Productive Maintenance) numa indústria de componentes**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial) – Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, Instituto Politécnico de Viseu, Viseu, 2018

TAHA, Hamdy A. **Pesquisa Operacional**. 8 ed. São Paulo: Pearson, 2008.

TOMAZELA, Maria das Graças J. M.; LEANDRO, Cláudio Roberto; OLIVEIRA, Maria Célia; CAMPOS, Fernando Celso de. Simulação de eventos discretos na avaliação de um processo de corte, carregamento e transporte de cana-de-açúcar. **Revista Espacios**, v. 38, n. 21, p. 41-53, 2017.

TURRIONI, J. B.; MELLO, C. H. P. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção: estratégias, métodos e técnicas para condução de pesquisas quantitativas e qualitativas**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, MG: UNIFEI, 2012.

VIANA, Herbet Ricardo Garcia. **PCM - Planejamento e Controle da Manutenção**. 1 ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

VIANA, Herbert Ricardo Garcia. **Fatores de sucesso para gestão da manutenção de ativos: um modelo para elaboração de um plano diretor de manutenção**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

VOSS, C.; TSIKRIKTSIS, N.; FROHLICH, M. Case research in operations management. *International Journal of Operations & Production Management*, v. 22, n. 2, p. 195-219, 2002.

WAKIRU, James et al. Towards an innovative lubricant condition monitoring strategy for maintenance of ageing multi-unit systems. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 204, p. 107200, 2020.

WANNAWISSET, S.; TANGJITSITCHAROEN, S. Paper Machine Breakdown Reduction by FMEA and Preventive Maintenance Improvement: A Case Study. *In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, Penang, Malaysia. **Proceedings** [...]. Penang: IOP Publishing, 2019. p. 012051.

YIN, R., K. **Estudo de caso – planejamento e métodos**. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

YINGHUA, Chen; SYLVESTER, Agyemang Prempeh Fredua; BONSU, Mandella Osei-Assibey; MINKAH, Andrews Yan. Practice of maintenance management of infrastructures on sports stadia in Ghana. *Journal of Public Administration and Governance*, v. 8, n. 4, p. 1-14, 2018.

ZAIONS, Douglas Roberto. **Consolidação da Metodologia de Manutenção Centrada na Confiabilidade em uma Planta de Celulose e Papel**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

ZENG, Pengfei; SHAO, Weiping; HAO, Yongping. Study on Preventive Maintenance Strategies of Filling Equipment Based on Reliability-Centered Maintenance. *Technical Gazette*, v. 28, n. 2, p. 689-697, 2021.

APÊNDICE A - PRODUTIVIDADE DE PEÇA BASE POR REPLICAÇÃO

<i>Baseline</i> (un)	Cenário 1 (un)	Cenário 2 (un)	Cenário 3 (un)	Cenário 4 (un)
13.986	13.394	14.042	13.707	13.847
13.778	13.938	13.963	13.962	13.976
13.318	14.857	15.263	14.016	13.796
13.392	14.284	14.208	13.601	14.154
14.045	14.724	14.897	13.836	14.264
14.233	13.353	13.880	13.593	14.017
14.217	14.543	14.075	14.374	14.099
14.078	14.215	13.724	13.578	13.800
14.512	14.188	13.891	13.881	14.159
14.446	13.302	14.211	13.921	13.500
12.969	13.928	14.005	13.297	14.299
14.097	14.175	14.053	13.769	13.998
13.918	13.756	13.861	14.122	13.995
14.998	13.594	13.968	13.480	13.677
13.842	13.764	13.960	13.607	13.667
14.682	14.018	14.247	13.508	13.633
13.326	14.143	13.484	14.669	13.512
14.062	14.319	15.071	14.050	13.918
13.005	14.910	14.054	13.819	14.191
13.790	15.183	14.364	13.564	13.578
13.648	13.798	13.488	13.762	14.092
13.917	14.649	14.847	13.789	13.805
13.370	14.090	14.717	14.210	13.562
14.471	13.408	13.712	13.473	13.610
14.161	13.865	13.330	13.481	13.568
14.338	14.191	13.326	13.845	14.108
13.808	14.365	13.704	14.467	13.847
13.281	13.919	13.662	14.204	13.911
14.029	13.887	14.043	13.229	13.298
14.822	14.008	14.492	13.743	13.796
13.265	14.462	13.872	13.820	13.797
13.463	13.268	13.413	13.606	13.362
14.385	13.968	13.783	14.089	14.129
13.903	14.066	14.191	13.346	14.121
13.759	14.766	13.847	14.308	14.135
13.806	13.770	14.565	13.688	13.893
14.652	14.558	13.810	13.902	13.627
13.455	13.374	13.422	13.733	13.645
13.747	13.256	14.419	14.149	13.729
14.075	14.277	13.828	13.807	13.525
13.708	13.928	13.880	13.886	14.135
14.303	14.254	13.813	13.947	13.680

<i>Baseline</i> (un)	Cenário 1 (un)	Cenário 2 (un)	Cenário 3 (un)	Cenário 4 (un)
13.714	13.945	13.725	14.066	13.758
13.326	14.045	14.133	13.487	13.694
14.011	13.875	15.319	13.722	13.618
13.500	13.649	13.601	13.589	13.982
13.416	13.876	14.310	14.228	14.194
13.853	13.458	13.544	13.557	13.684
13.874	13.406	13.141	14.317	13.652
14.061	13.280	13.469	13.539	13.353

APÊNDICE B - PRODUTIVIDADE DE PEÇA TOPO POR REPLICAÇÃO

<i>Baseline</i> (un)	Cenário 1 (un)	Cenário 2 (un)	Cenário 3 (un)	Cenário 4 (un)
13.392	12.667	16.288	12.741	13.677
13.278	13.970	16.195	13.766	14.391
13.758	14.088	13.755	13.478	14.382
13.199	13.147	16.352	12.816	15.518
13.657	12.908	16.465	13.251	15.917
13.088	13.246	16.388	13.707	15.544
13.115	13.632	16.444	13.381	15.563
12.944	13.175	13.456	12.889	14.215
13.797	12.947	16.386	12.830	15.776
13.120	12.774	15.817	13.380	15.936
13.311	13.226	15.920	13.070	15.432
13.694	13.138	16.282	13.266	16.258
13.129	12.773	15.856	13.220	15.260
13.316	13.206	16.126	13.833	13.161
13.071	13.899	16.147	13.633	13.940
12.886	13.078	16.235	12.988	15.460
12.731	13.015	16.088	13.680	14.804
13.001	13.153	16.855	13.346	13.804
13.404	12.882	15.848	12.783	13.666
13.458	13.944	16.406	12.803	13.569
12.957	13.354	15.985	12.968	14.667
12.881	14.077	15.802	13.579	16.522
13.365	13.788	16.293	13.438	15.370
13.064	13.106	16.259	12.942	15.831
12.903	12.978	16.182	13.279	16.119
13.139	13.521	16.003	13.584	15.691
12.792	13.983	16.072	13.914	15.410
12.967	13.273	16.372	13.554	14.346
13.661	13.725	16.463	12.976	15.239
13.543	14.036	14.753	13.984	13.459
13.015	13.663	16.018	13.458	15.665
12.831	12.798	15.786	13.116	15.663
13.348	13.250	16.300	13.555	16.354
13.587	12.845	14.443	13.006	14.780
12.783	13.281	16.028	13.596	14.851
13.373	13.912	16.232	13.213	16.572
13.031	13.034	16.101	13.305	14.933
13.067	12.999	13.916	13.351	14.902
13.229	13.089	16.310	13.624	15.197
12.887	13.069	16.071	13.288	14.945
12.868	13.147	14.715	13.894	13.641
13.435	12.807	16.210	12.864	14.183

<i>Baseline</i> (un)	Cenário 1 (un)	Cenário 2 (un)	Cenário 3 (un)	Cenário 4 (un)
13.478	13.122	16.241	13.544	13.628
13.135	13.019	15.785	13.263	15.124
12.773	13.794	16.377	13.739	15.670
13.740	13.771	14.521	13.891	15.451
13.306	13.343	16.411	13.247	13.818
12.727	12.711	16.094	12.913	15.348
12.902	12.740	16.067	12.650	15.779
13.089	12.986	15.774	13.659	15.390

APÊNDICE C - PRODUTIVIDADE TOTAL POR REPLICAÇÃO

<i>Baseline</i> (un)	Cenário 1 (un)	Cenário 2 (un)	Cenário 3 (un)	Cenário 4 (un)
27.378	26.061	30.330	26.448	27.524
27.056	27.908	30.158	27.728	28.367
27.076	28.945	29.018	27.494	28.178
26.591	27.431	30.560	26.417	29.672
27.702	27.632	31.362	27.087	30.181
27.321	26.599	30.268	27.300	29.561
27.332	28.175	30.519	27.755	29.662
27.022	27.390	27.180	26.467	28.015
28.309	27.135	30.277	26.711	29.935
27.566	26.076	30.028	27.301	29.436
26.280	27.154	29.925	26.367	29.731
27.791	27.313	30.335	27.035	30.256
27.047	26.529	29.717	27.342	29.255
28.314	26.800	30.094	27.313	26.838
26.913	27.663	30.107	27.240	27.607
27.568	27.096	30.482	26.496	29.093
26.057	27.158	29.572	28.349	28.316
27.063	27.472	31.926	27.396	27.722
26.409	27.792	29.902	26.602	27.857
27.248	29.127	30.770	26.367	27.147
26.605	27.152	29.473	26.730	28.759
26.798	28.726	30.649	27.368	30.327
26.735	27.878	31.010	27.648	28.932
27.535	26.514	29.971	26.415	29.441
27.064	26.843	29.512	26.760	29.687
27.477	27.712	29.329	27.429	29.799
26.600	28.348	29.776	28.381	29.257
26.248	27.192	30.034	27.758	28.257
27.690	27.612	30.506	26.205	28.537
28.365	28.044	29.245	27.727	27.255
26.280	28.125	29.890	27.278	29.462
26.294	26.066	29.199	26.722	29.025
27.733	27.218	30.083	27.644	30.483
27.490	26.911	28.634	26.352	28.901
26.542	28.047	29.875	27.904	28.986
27.179	27.682	30.797	26.901	30.465
27.683	27.592	29.911	27.207	28.560
26.522	26.373	27.338	27.084	28.547
26.976	26.345	30.729	27.773	28.926
26.962	27.346	29.899	27.095	28.470
26.576	27.075	28.595	27.780	27.776
27.738	27.061	30.023	26.811	27.863

<i>Baseline</i> (un)	Cenário 1 (un)	Cenário 2 (un)	Cenário 3 (un)	Cenário 4 (un)
27.192	27.067	29.966	27.610	27.386
26.461	27.064	29.918	26.750	28.818
26.784	27.669	31.696	27.461	29.288
27.240	27.420	28.122	27.480	29.433
26.722	27.219	30.721	27.475	28.012
26.580	26.169	29.638	26.470	29.032
26.776	26.146	29.208	26.967	29.431
27.150	26.266	29.243	27.198	28.743

APÊNDICE D - PRODUTIVIDADE DE SUBCONJUNTOS POR REPLICAÇÃO

<i>Baseline</i> (un)	Cenário 1 (un)	Cenário 2 (un)	Cenário 3 (un)	Cenário 4 (un)
13.392	12.667	14.042	12.741	13.677
13.278	13.938	13.963	13.766	13.976
13.318	14.088	13.755	13.478	13.796
13.199	13.147	14.208	12.816	14.154
13.657	12.908	14.897	13.251	14.264
13.088	13.246	13.880	13.593	14.017
13.115	13.632	14.075	13.381	14.099
12.944	13.175	13.456	12.889	13.800
13.797	12.947	13.891	12.830	14.159
13.120	12.774	14.211	13.380	13.500
12.969	13.226	14.005	13.070	14.299
13.694	13.138	14.053	13.266	13.998
13.129	12.773	13.861	13.220	13.995
13.316	13.206	13.968	13.480	13.161
13.071	13.764	13.960	13.607	13.667
12.886	13.078	14.247	12.988	13.633
12.731	13.015	13.484	13.680	13.512
13.001	13.153	15.071	13.346	13.804
13.005	12.882	14.054	12.783	13.666
13.458	13.944	14.364	12.803	13.569
12.957	13.354	13.488	12.968	14.092
12.881	14.077	14.847	13.579	13.805
13.365	13.788	14.717	13.438	13.562
13.064	13.106	13.712	12.942	13.610
12.903	12.978	13.330	13.279	13.568
13.139	13.521	13.326	13.584	14.108
12.792	13.983	13.704	13.914	13.847
12.967	13.273	13.662	13.554	13.911
13.661	13.725	14.043	12.976	13.298
13.543	14.008	14.492	13.743	13.459
13.015	13.663	13.872	13.458	13.797
12.831	12.798	13.413	13.116	13.362
13.348	13.250	13.783	13.555	14.129
13.587	12.845	14.191	13.006	14.121
12.783	13.281	13.847	13.596	14.135
13.373	13.770	14.565	13.213	13.893
13.031	13.034	13.810	13.305	13.627
13.067	12.999	13.422	13.351	13.645
13.229	13.089	14.419	13.624	13.729
12.887	13.069	13.828	13.288	13.525
12.868	13.147	13.880	13.886	13.641
13.435	12.807	13.813	12.864	13.680

<i>Baseline</i> (un)	Cenário 1 (un)	Cenário 2 (un)	Cenário 3 (un)	Cenário 4 (un)
13.478	13.122	13.725	13.544	13.628
13.135	13.019	14.133	13.263	13.694
12.773	13.794	15.319	13.722	13.618
13.500	13.649	13.601	13.589	13.982
13.306	13.343	14.310	13.247	13.818
12.727	12.711	13.544	12.913	13.684
12.902	12.740	13.141	12.650	13.652
13.089	12.986	13.469	13.539	13.353

APÊNDICE E - DISPONIBILIDADE DA ET A POR REPLICAÇÃO

<i>Baseline</i> (%)	Cenário 1 (%)	Cenário 2 (%)	Cenário 3 (%)	Cenário 4 (%)
53,92	46,04	64,19	52,41	64,14
53,39	46,6	63,25	51,06	63,82
53,29	47,37	62,24	52,56	63,83
52,4	47,27	63,65	52,06	65,15
52,76	48,48	63,31	51,71	64,92
53,99	47,88	64,66	52,02	63,1
54,22	47,14	63,66	51,48	64,12
53,55	47,14	64,29	51,68	64,71
53,22	44,99	62,05	52,75	62,77
53,24	45,51	63,3	51,47	63,28
52,5	48,93	63,95	51,67	63,82
54,32	47,26	63,82	50,62	63,98
53,02	45,87	62,95	50,95	64,5
53,51	46,46	63,69	51,62	64,52
52,74	46,66	62,99	53,31	64,6
54,22	46,21	63,05	51,49	64,6
53,63	45,7	63,9	51,91	63,99
53,86	46,46	63,62	51,35	63,57
53,31	46,6	64,24	51,78	64,21
52,94	46,54	63,77	52,29	64,88
53,84	46,7	64,14	51,54	63,35
52,56	47,29	62,94	51,44	63,92
53,1	48,65	63,01	51,12	64,1
53,61	47,05	63,67	51,62	64,9
53,27	46,38	63,54	51,86	63,31
52,4	47,56	64,64	52,67	63,44
53,81	47,44	63,29	52,14	64,2
53,08	47,43	63,5	51,77	63,33
53,33	47,01	63,67	51,16	63,6
53,17	46,85	64,05	52,06	64,7
53,55	46,77	62,41	52,24	64,72
53,32	46,96	61,83	52,65	63,73
53,57	45,33	63,73	51,29	64,51
53,6	47,25	62,76	50,58	63,32
53,22	45,88	63,82	51,98	64,02
53,16	47,55	63,81	53,46	63,61
53,21	47,75	63,38	52,3	64,34
53,34	46,46	64,47	52,36	63,23
53,41	47,85	63,91	52,16	64,49
53,37	47,25	63,8	52,21	63,86
52,96	47,45	62,27	52,55	63,25
53,07	46,71	63,59	51,37	63,81

<i>Baseline</i> (%)	Cenário 1 (%)	Cenário 2 (%)	Cenário 3 (%)	Cenário 4 (%)
53,63	47,48	63,19	51,6	62,83
53,7	49,24	63,24	52,15	64,38
53,78	47,06	63,87	51,98	64,53
52,99	46,13	63,34	52,38	62,85
52,98	46,96	62,84	51,73	64,31
52,12	45,56	64,64	52,21	63,77
52,82	46,12	63,56	53,44	63,91
54,01	47,43	63,76	52,38	63,51

APÊNDICE F - DISPONIBILIDADE DA ET B POR REPLICAÇÃO

<i>Baseline</i> (%)	Cenário 1 (%)	Cenário 2 (%)	Cenário 3 (%)	Cenário 4 (%)
41,56	43,99	55,88	46,77	55,49
42,11	43,68	56,73	47,56	54,7
41,55	44,33	56,49	44,78	56,12
41,56	43,87	56,7	45,66	55,46
41,88	43,69	55,13	47,1	56,09
42,12	42,18	55,28	46,4	55,26
43,52	43,54	56,96	46,65	55,57
42,05	44,83	55,41	46,35	55,42
43,43	44,37	57,04	46,2	55,05
41,49	43,12	55,71	47,22	55,3
42,29	43,56	56,32	46,59	55,36
41,09	44,3	55,94	46,88	55,91
41,98	42,82	55,13	48,07	56,01
42,37	42,64	56,31	46,02	56,38
41,82	41,65	57,29	46,8	54,21
42,72	44,17	55,6	47,4	55,99
42,83	43,67	55,57	46,93	56,59
43,02	43,95	55,88	46,55	55,88
42,32	43,45	56,45	46,73	56,47
43,13	43,74	56,78	47,76	55,5
41,84	42,24	55,9	47,25	55,73
42,89	44,21	56,7	47,84	55,84
41,36	44,13	56,09	47,98	56,12
43,17	42,45	55,96	46,99	57,05
42,31	43,76	55,99	47,68	56,1
42,35	44,72	54,94	47,65	56,01
43,03	43,46	56,81	47,26	55,28
41,65	42,75	55,41	46,19	55,77
43,3	43,03	55,74	47,79	55,27
42,03	42,85	56,36	47,1	54,69
41,62	44,89	55,54	47,6	54,78
40,78	44,48	56,66	47,09	56,09
42,65	43,48	56,09	46,7	56,51
43,35	44,05	56,83	46,69	56,1
41,76	45,55	55,34	47,52	57,01
41,77	43,67	57,02	47,18	55,61
42,09	43,5	55,51	46,6	55,85
43,05	43,24	55,58	46,13	56,15
42,06	42,4	56,31	47,31	55,11
43,34	44,16	55,3	47,25	55,69
42,43	43,8	56,58	46,03	56,34
41,91	43,17	57,2	45,67	55,33

<i>Baseline</i> (%)	Cenário 1 (%)	Cenário 2 (%)	Cenário 3 (%)	Cenário 4 (%)
43,21	43,54	56,15	46,14	55,34
43,88	43,52	56,31	47,58	55,17
41,56	42,16	55,68	47,21	55,32
41,63	44,26	56,65	47,18	55,92
42,88	43,59	56,59	48,8	56,46
41,15	42,41	56,45	47,36	55,95
42,41	43,85	55,39	46,4	56,28
43,05	44,11	54,15	47,49	55,94

APÊNDICE G - DISPONIBILIDADE DA ET C POR REPLICAÇÃO

<i>Baseline</i> (%)	Cenário 2 (%)	Cenário 4 (%)
35,31	25,72	28,32
35,32	23,22	26,26
32,78	21,73	24,43
34,85	23,07	26,4
36,46	24,19	24,15
34,86	21,75	26,47
36,07	20,79	29,5
34,24	22,95	28,04
35,67	24,61	26,6
36,23	24,17	29,04
34,56	22,81	26,99
34,56	23,84	29,41
36,69	24,63	26,89
36,61	22,86	26,75
36,3	22,58	26,77
33,09	24,95	26,47
34,77	23,06	28,68
34,56	21,54	26,75
35,18	22,41	27,5
36,99	24,21	26,49
35,18	21,64	27,29
35,02	24,87	28,04
34,7	24,48	26,95
36,72	23,31	25,66
35,14	23,11	29,38
35,88	26,47	27,7
35,7	22,05	27,84
37,54	25,88	26,95
36,62	26,14	27,58
35,34	22,89	27,49
35,7	22,75	28,93
33,31	24,84	28,06
38,64	23,11	28,28
35,26	23,17	27,74
37,19	23,3	25,46
35,15	24,24	27,82
35,92	20,41	28,22
35,64	24,32	28,17
34,43	24,9	27,88
36,07	23,58	27,41
36,57	22,53	27,06
34,67	24,07	28,69

<i>Baseline</i> (%)	Cenário 2 (%)	Cenário 4 (%)
36,53	23,93	28,05
35,84	24,1	26,08
33,76	25,44	29,01
35,94	24,94	30,12
34,66	21,96	26,91
36,7	22,81	28,33
35,94	22,45	28,67
35,21	26,05	29,31