

Ailson Renan Santos Picanço

R-TPM

Uma abordagem híbrida entre
a Manutenção Produtiva Total
e a Manutenção Centrada em
Confiabilidade para ambientes
industriais

Ailson Renan Santos Picanço

R-TPM

Uma abordagem híbrida entre
a Manutenção Produtiva Total
e a Manutenção Centrada em
Confiabilidade para ambientes
industriais

Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Camila Alves de Cremona

Ellen Andressa Kubisty

Luiza Alves Batista

Nataly Evilin Gayde

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Luiza Alves Batista

2023 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2023 Os autores

Copyright da edição © 2023 Atena

Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo do texto e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva do autor, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos ao autor, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná

Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia

Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará

Profª Drª Glécilla Colombelli de Souza Nunes – Universidade Estadual de Maringá

Profª Drª Iara Margolis Ribeiro – Universidade Federal de Pernambuco

Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense

Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande

Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá

Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora

Profª Drª Maria José de Holanda Leite – Universidade Federal de Alagoas

Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Prof. Dr. Milson dos Santos Barbosa – Universidade Tiradentes

Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte

Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Nilzo Ivo Ladwig – Universidade do Extremo Sul Catarinense

Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas

Profª Dr Ramiro Picoli Nippes – Universidade Estadual de Maringá

Profª Drª Regina Célia da Silva Barros Allil – Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí

Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Uma abordagem híbrida entre a manutenção produtiva total e a manutenção centrada em confiabilidade para ambientes industriais

Diagramação: Ellen Andressa Kubisty
Correção: Maiara Ferreira
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: O autor
Autor: Ailson Renan Santos Picanço

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)	
P585	<p>Picanço, Ailson Renan Santos</p> <p>Uma abordagem híbrida entre a manutenção produtiva total e a manutenção centrada em confiabilidade para ambientes industriais / Ailson Renan Santos Picanço. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2023.</p> <p>Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-65-258-1638-8 DOI: https://doi.org/10.22533/at.ed.388232807</p> <p>1. Manutenção industrial. I. Picanço, Ailson Renan Santos. II. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDD 620.58</p>
Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166	

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná – Brasil
Telefone: +55 (42) 3323-5493
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

DECLARAÇÃO DO AUTOR

O autor desta obra: 1. Atesta não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao conteúdo publicado; 2. Declara que participou ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certifica que o texto publicado está completamente isento de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirma a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhece ter informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autoriza a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.

A minha mãe Claudina por ser o meu tronco forte de formação pessoal e profissional.

A meu avô Francisco Jorge por me ensinar os caminhos a seguir.

A meu Tio Anibal por permitir e garantir que eu tenha êxito na pesquisa.

A meu Tio/Primo Giancarlo Pessoa por ser decisivo em orientação nessa trajetória.

Agradecer a Deus, por me iluminar, guiar e abençoar nessa trajetória.

A minha mãe Claudina por me amparar nas horas difíceis, educar e contribuir decisivamente para a minha formação.

Ao meu avô Francisco Jorge (in memoriam) pelos ensinamentos e sabedoria na minha formação como pessoa.

Ao meu tio Aníbal por sempre acreditar no meu potencial e me conceder a oportunidade de crescimento profissional.

Aos meus familiares e parentes que me auxiliaram nessa caminhada

Ao meu Tio Giancarlo por me alinhar e orientar em diversos momentos dessa trajetória.

Ao meu orientador Alessandro pela paciência, sapiência e conhecimentos passados. Ao meu corientador Paulo Ignácio por seu senso crítico e ensinamentos em ciência. Aos amigos Lucas, Gláucia, Taka e Dean decisivamente nessa conquista.

Aos professores Aníbal, Leonardo, Torrezan, Morini, Ieda e Edmundo por contribuírem de forma essencial nesse processo.

A todos os meus amigos e colegas que ajudaram nesse percurso de luta e aprendizagem.

Bath-tub Curve	Modelo da curva da banheira para a lei de vida dos equipamentos
Gemba	Termo de origem japonesa que representa o chão de fábrica, o próprio ambiente produtivo. Trata-se do local de trabalho aonde é agregado valor.
Kobetsu Kaizen	Melhoria contínua focalizada ao equipamento
MTBF	Tempo médio entre avarias
MTTF	Tempo médio até a avaria
MTTR	Tempo médio de reparo
OEE	Indicador de eficiência global do equipamento utilizado, sobretudo, na gestão do TPM
PDCA	Ferramenta de gestão que visa controlar e melhorar continuamente processos e produtos por meio de quatro passos cíclicos (Planejar- Fazer- Checar-Agir)
RCM	Manutenção Centrada em Confiabilidade
TPM	Manutenção Produtiva Total

RESUMO	1
ABSTRACT	2
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	3
Apresentação do tema de pesquisa	3
Objetivos	5
Justificativa.....	5
Estrutura do Trabalho.....	7
Escopo do trabalho e limitações da pesquisa	8
CAPÍTULO 2 - MÉTODOS E PROCEDIMENTOS	9
Metodologia da Pesquisa.....	9
Processo de modelagem	10
Simulação do Modelo de Manutenção	11
Pesquisa Bibliográfica	12
Construção do sistema híbrido	15
Etapas de implementação	15
Aplicação do Modelo	15
CAPÍTULO 3 - GESTÃO DE MANUTENÇÃO	16
Manutenção	16
Indicadores de gestão para a função manutenção	19
CAPÍTULO 4 - MANUTENÇÃO PRODUTIVA TOTAL - TPM.....	21
Fundamentos	21
Pilares do TPM	22
Manutenção Autônoma	22
Manutenção Planejada.....	23
Educação e Treinamento	24
Melhoria Específica.....	24
Controle Inicial	24

OEE e a mensuração de perdas	25
Ferramentas da Produção Enxuta aplicadas ao TPM	26
Os 5S (<i>Seiri, Seiton, Seisou, Seiketsu e Shitsuke</i>)	26
Poka Yoke	27
SMED (<i>Single Minute Exchange of Die</i>)	28
Ferramentas da qualidade aplicadas ao TPM	29
Implementação do TPM em ambientes industriais	30
Consolidação da implementação do TPM	31
CAPÍTULO 5 - MATUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE - RCM...	34
.....	
Fundamentos	34
Estudo de confiabilidade	36
Teste de Laplace	39
Modelo Duane	40
Análise de Modo e Efeito de Falha - FMEA	40
Implementação do RCM em ambientes industriais.....	41
Consolidação do RCM.....	43
CAPÍTULO 6 - DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS	45
Desenvolvimento	45
Análise crítica e lacunas observadas nos dois modelos de gestão de manuten- ção	45
Comparação entre as abordagens de TPM e RCM	47
Abordagem Híbrida R-TPM	48
Planejamento	51
Análise e execução	53
Controle	61
Ação	62
Análise de aplicabilidade	64

Discussões	79
Avaliação conceitual dos principais indicadores	83
Discussão sobre a implementação	84
CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	86
Conclusões	86
Meios de divulgação da pesquisa	88
Considerações Finais	88
REFERÊNCIAS	89
APÊNDICES.....	94

RESUMO

Na indústria a função manutenção tem grande impacto em relação à eficiência operacional, previsão e minimização de avarias. Dois sistemas de gestão de manutenção possuem amplo destaque na literatura: o TPM (*Total Productive Maintenance*), de origem japonesa, alinhado a mentalidade enxuta que atua diretamente na redução e eliminação de perdas e o RCM (*Reability Centered Maintenance*), que se debruça na eficiência econômica da tomada de decisões. Perante a importância da manutenção para a indústria, essa pesquisa tem por objetivo desenvolver um sistema híbrido de gestão de manutenção entre o TPM e o RCM em processos industriais. O trabalho verifica as dificuldades de integração dos dois sistemas de gestão, levanta e explicita os métodos e procedimentos quantitativos e qualitativos adequados para a implantação do sistema de manutenção e finalmente define os indicadores que devem ser utilizados para monitorar a função manutenção no sistema híbrido. Neste trabalho, são discutidos os aspectos complementares e divergentes entre os dois sistemas, as possibilidades de implementação aglutinada de RCM e TPM na indústria e o impacto que a adoção de um sistema ocasiona no outro. Trata-se de uma pesquisa principalmente quantitativa, com o uso de indicador de eficiência global de sistemas e métodos de minimização, previsão e gerenciamento de avarias. A proposta híbrida é um modelo teórico-conceitual, obtida a partir da revisão na literatura sistemática dos conceitos das duas abordagens e da consolidação de implementação dos dois sistemas apresentados. Assim, os resultados do trabalho são as etapas de implementação da abordagem proposta, a definição das ferramentas a serem utilizadas, que enquadra um modelo original de programação linear inteira para definição das escolhas de manutenção preventiva e a consolidação dos indicadores de desempenho.

PALAVRAS-CHAVE: Manutenção. Confiabilidade. Eficiência Operacional. Manufatura Enxuta.

ABSTRACT

In the industry field, maintenance function has a great impact on issues related to operational efficiency, failures forecasting and damage minimization. Two maintenance management systems have been extensively highlighted in the literature. The TPM (Total Productive Maintenance), of Japanese origin, linked to lean thinking, that acts straight on the reduction and elimination of losses, and the RCM (Reability Centered Maintenance), which focuses on economic efficiency of decision-making processes. Given the importance of maintenance for the industry, this research aims to develop a hybrid approach to maintenance management merging TPM and RCM for industrial applications. It finds out the difficulties of integrating the two policies, surveying and explaining the methods, and so pointing both quantitative and qualitative procedures suitable for the implementation of a maintenance system, including the definition of indicators to be used to monitor the maintenance function in the hybrid approach. In this study, the concurrent and divergent aspects between the two systems is discussed, as well as the implementation possibilities bonded RCM and TPM in the industry and the impact that the adoption of a system causes to the other. This is primarily classified as a quantitative study, using overall efficiency indicator systems and minimization methods, prediction and management of failures. The hybrid approach is a theoretical model, obtained after the systematic literature review of both conceptual approaches and implementation procedures that strengthens the two classical approaches presented. Thus, this work offers the implementation steps of the proposed approach, and the definition of the tools to be used, which frames an original model of integer linear programming to define the preventive maintenance choices and the consolidation of performance indicators.

KEYWORDS: Maintenance. Reliability. Operational efficiency. Lean Manufacturing.

INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados o tema de pesquisa e a justificativa com a relevância tanto para a academia, quanto para a aplicação na indústria. São declarados os objetivos, geral e específicos, bem com a delimitação da pesquisa, a abordagem metodológica e a condução dada aos próximos capítulos.

1.1 Apresentação do tema de pesquisa

As novas necessidades dos mercados, cada vez mais globais, tem forçado as organizações a desenvolverem suas operações continuamente em três esferas: qualidade, custo e nível de serviço. Para se manter competitivas, as empresas, a nível operacional, têm investido continuamente na promoção de ganhos de eficácia e eficiência dos seus métodos de produção e gestão. Assim, as empresas têm buscado operar a nível de desempenho classe mundial (*word-class*), por meio de melhoria contínua de produtos e processos (Aspinwall and Elgharib, 2013; Heo et al., 2014; Sharma et al., 2006; Singh et al., 2013a)

O cenário de elevada competitividade entre as indústrias provocou o surgimento de diversos conceitos e metodologias globais com o objetivo de nortear o conceito de melhoria contínua focalizada de processos (*Kobetsu Kaizen*) pregada pela produção enxuta. Com os constantes avanços tecnológicos, a manufatura necessita, cada vez mais, de suporte para manter a eficiência dos seus ativos. A função manutenção nos ambientes corporativos tem o grande desafio de acompanhar esse avanço por meio do conhecimento e da utilização de ferramentas modernas de gestão (Arca and Prado, 2008; Assis, 2010; Igba et al., 2013).

O setor de manutenção teve a sua concepção alterada no último século, passando de um setor de suporte para uma área estratégica, uma vez que influencia diretamente nos três pilares de competitividade (qualidade, custo e nível de serviço). Para o sistema de produção atuar sem desperdícios e ser rentável o sistema de manutenção deve operar eficientemente, para garantir o funcionamento de equipamentos e seus subsistemas de produção (Bartz et al., 2014)

Mendes and Ribeiro (2011) destacam que no ambiente operacional o consciente coletivo aponta que as falhas, e portanto grande parte das perdas de disponibilidade de equipamentos, está atrelado ao desgaste natural dos equipamentos (lei de vida). Entretanto apenas 11% das falhas ocorrem devido às condições naturais. No intuito de estudar e minimizar as demais causas das perdas, insere-se no contexto operacional políticas de gestão de manutenção. Entre as políticas de manutenção consagradas nas últimas décadas estão a Manutenção Produtiva Total (*Total Productive Maintenance - TPM*) e a Manutenção Centrada na Confiabilidade (*Reliability Centered Maintenance - RCM*).

Segundo Assis (2010), o TPM é um sistema de Manutenção de equipamentos que

envolve todos os trabalhadores de várias áreas da companhia, especialmente engenharia, manutenção e operação. Tem como duplo objetivo alcançar zero falhas e zero defeitos. Como consequência da eliminação das falhas e defeitos consegue-se aumentar a disponibilidade dos equipamentos, reduzir custos, minimizar inventários e aumentar a produtividade do trabalho.

Já o RCM é definido por Moubray and Network (1997) como um processo usado para determinar o que deve ser feito para assegurar que qualquer item físico continue a desempenhar as funções requeridas pelos seus usuários em seu atual contexto operacional. Fogliatto e Ribeiro(2009) complementam destacando os esforços necessários no estudo da lei de vida de máquinas, curva de degeneração dos equipamentos e previsão das falhas por meio de cálculos probabilísticos. O RCM nasceu com uma abordagem qualitativa, o que tem se modificado com a introdução de métodos probabilístico para estudo de falhas e análise de custos e riscos associados a avaria de equipamentos e a perda de disponibilidade (Selvik and Aven, 2011).

Se por um lado o TPM é uma extensão da filosofia japonesa de eliminação de perdas direcionado à área de manutenção; por outro, conforme apresenta o guia da NASA and Space (2000), o RCM utiliza métodos e análise quantitativos no intuito de aumentar a probabilidade de um componente ou sistema físico funcionar, conforme projetado em seu ciclo de vida e com o mínimo de Manutenção necessária (Alebrant Mendes and Duarte Ribeiro, 2014; Ireland and Dale, 2001).

As duas abordagens não devem ser compreendidas como políticas de manutenção mutuamente exclusivas, uma vez que se debruçam sobre a otimização da disponibilidade de recursos e redução de perdas. Diante da hipótese de que os sistemas de gestão de manutenção TPM e RCM podem ser aplicados de forma conjugada, aproveitando o que cada um possui de mais representativo nasce a proposta do trabalho.

Por se desenvolverem em escolas distintas, o RCM nos Estados Unidos e o TPM no Japão, eram vistas como duas propostas diferentes para o gerenciamento de manutenção. Alebrant Mendes and Duarte Ribeiro (2014) destacam que os dois sistemas no início eram vistos, inclusive, como concorrentes.

Os sistemas para a função manutenção apresentam diferenças significativas. Enquanto o TPM é direcionado para a geração de uma cultura organizacional pautada em seus pilares, para o desenvolvimento e participação de todo os colaboradores, e para a prática de melhoria contínua por meio da utilização de ferramentas da qualidade total e do *Lean Manufacturing*; por outro lado o RCM apresenta uma tratativa mais tecnicista e se desenvolve no âmbito do controle a partir do uso de métodos quantitativos e acompanhamento da confiabilidade dos ativos físicos.

Na pesquisa são apresentadas lacunas verificadas tanto no TPM quanto no RCM.

O primeiro, carece de uma abordagem quantitativa em seu escopo para fundamentar seus pilares de desenvolvimento, destaca a importância do gerenciamento da manutenção

planejada, mas não dá suportes para a tomada de decisão de itens a serem contemplados com manutenção preventiva, preditiva e corretiva, dimensionamento de sobressalentes e a periodicidade da manutenção. O segundo, apesar de apresentar um escopo de métodos robustos, por ter uma estratégia *top-down*, onde as decisões são tomadas por um corpo de engenharia especializado, pode gerar conflitos na implementação e aspectos destoantes com a condição real de trabalho, haja vista que os colaboradores operacionais possuem pouco ou nenhum espaço nas tomadas de decisões e no projeto de gestão de Manutenção.

Das limitações observadas em cada sistema, nasce a motivação para propor um sistema híbrido que aglutine as melhores práticas observadas em cada sistema, bem como sintetize o processo de implementação em ambientes industriais. A proposta híbrida, nomeada como R-TPM, pretende desenvolver uma abordagem, que pontue as lacunas observadas em cada sistema de gerenciamento de manutenção, e busque maneiras e métodos de responder satisfatoriamente a essas lacunas, por meio da reunião das práticas, modelos e métodos utilizados no TPM e no RCM.

1.2 Objetivos

O objetivo central da pesquisa é propor sistema híbrido estruturado de gestão de manutenção que utilize de forma integrada os fundamentos das políticas de manutenção TPM e RCM para ambientes industriais, orientado na reunião das melhores práticas de cada filosofia de manutenção.

Para além do objetivo central foram definidos os seguintes objetivos específicos da pesquisa:

1. Definir quais os pontos congruentes e conflitantes dos sistemas de manutenção TPM e RCM.
2. Levantar e explicar os métodos e procedimentos quantitativos e qualitativos adequados para a implantação do sistema de manutenção.
3. Definir os indicadores para monitorar a função manutenção no sistema híbrido.

1.3 Justificativa

Até meados do século XX, quando se pensava em manutenção, automaticamente se remetia a custo e à oneração da produção. Este conceito está atrelado ao pensamento que liga falhas e quebras de equipamentos a sua degeneração natural, sem levar em consideração os custos e perdas referentes que paradas não programadas acarretavam para os sistemas produtivos. A partir da década 1970, percebe-se o fator imprescindível que a gestão de manutenção possui no cenário extremamente competitivo. A ausência de manutenção planejada, para a maioria dos casos, reduz a vida útil dos equipamentos e a sua disponibilidade, diminuindo portanto, a carga da fábrica.

A principal contribuição da pesquisa está assentada na interface gerada entre os dois sistemas de gestão de manutenção. O pioneirismo do trabalho não está na ideia de integração entre as políticas de manutenção, mas está pautado no desenvolvimento sistematizado de técnicas e procedimentos necessários para pôr em prática o sistema híbrido pretendida.

De Souza(2004), já discutiu a interação entre o RCM e o pilar “Manutenção planejada” do TPM de forma teórica; Pinto (2008) pesquisou a possibilidade de implementação do RCM em um ambiente de TPM para ganho de competitividade em termos de gestão de recursos e Lobo (2013) também discutiu de forma introdutória a implantação agregada de TPM e RCM em casos onde o TPM é insuficiente para expor as diretrizes de manutenção planejada. A premissa das três pesquisas é a aplicação do RCM em um ambiente de TPM, em áreas e focos específicos. Esta pesquisa, entretanto, busca a integração plena das duas políticas, validado em uma célula industrial piloto. A integração almejada tem foco na eliminação de perdas a partir do diagnóstico, gestão e predição de avarias (Tabela 1.1) .

Autores	Proposta de integração
Nasa (2000)	Noção de perdas produtivas aplicado à implementação do RCM
Souza(2004)	Intera_c_ao do RCM com o pilar “Manutenção Planejada” do TPM
Pinto (2008)	RCM aplicado em um ambiente de TPM
Moubray <i>et al</i> (1997)	Indicadores de desempenho do RCM aplicados à gestão do TPM
Lobo (2013)	RCM mais eficaz para quantificar e direcionar a manutenção planejada do TPM

Tabela 1.1: Integração das filosofias de Manutenção

Do ponto de vista teórico, o TPM e o RCM nascem de duas escolas (japonesa e americana, respectivamente) distintas que ao longo dos anos entregam a indústria soluções e sistemas de Manutenção industrial. Parte-se da hipótese de que as duas políticas de Manutenção não são mutualmente excludentes, dessa forma pretende-se estudar os pontos em que elas podem ser complementares, no intuito de gerar maior eficiência e eficácia para o gerenciamento da manutenção industrial. Espera-se que o sistema a ser desenvolvido esclareça o impacto que a prática de técnicas e procedimentos do RCM ocasione no OEE (*Overall Equipment Effectiveness*), principal indicador de eficiência e eficácia de uma planta industrial em um ambiente de TPM.

O trabalho da Nasa (2000) insere ao contexto do RCM a noção de perdas produtivas. O escopo do trabalho é um dos principais manuais de diretrizes desenvolvida para o setor aeroespacial em termos de manutenção de ativos. Em sua abordagem mostra que a confiabilidade pode incidir diretamente na geração de perdas e no risco associado aos

equipamentos. Entretanto, o trabalho não se adensa em explicar de que maneira o estudo de confiabilidade pode ser usado para fins gerenciais de manutenção e tomada de decisão em relação a custos, disponibilidade e grau de aversão ao risco do processo produtivo.

Souza (2004) verifica uma lacuna no TPM relativo a implementação do pilar Manutenção Planejada, onde este sistema não especifica a estratégia a ser adotada pela Manutenção planejada. No trabalho, o autor utiliza um estudo de caso para propor a integração do RCM a este pilar do TPM, aplicando o primeiro em uma empresa em que o TPM já está implantado e consolidado. Nesse sentido, o trabalho não trata os dois sistemas gerenciais em mesmo nível, trata o TPM como uma base macro, enquanto o RCM é entendido como método para utilização em um pilar específico. Da mesma forma o trabalho de Pinto (2008), insere o RCM em ambiente de TPM consolidado. O autor utiliza o RCM como técnica para outro pilar do TPM, o de melhoria específica de ativos.

Os trabalhos de Moubray et al (1997) e de Lobo (2013) tratam da integração entre os dois sistemas do ponto de vista gerencial, pela percepção de indicadores de desempenho para a tomada de decisão em manutenção em ambientes industriais. O primeiro aplica indicadores básicos do RCM, como MTBF e MTTR ao contexto do TPM, entretanto não se aprofunda na forma em que esses indicadores devem ser utilizados no contexto da Manutenção autônoma e da manutenção planejada. O segundo trabalho, de Lobo (2013), enfatiza que o RCM é mais eficaz para quantificar e direcionar a manutenção planejada. Desenvolve mais que o trabalho de Souza (2004), por apresentar modelos iniciais para a construção do sequenciamento da manutenção planejada a partir do estudo de confiabilidade. Entretanto o trabalho, não define quais itens devem ser contemplados à manutenção preventiva, preditiva ou corretiva, com base em análise de risco.

Assim, esta pesquisa avança no processo de implementação ao colocar os dois sistemas em mesmo nível de comparação. A proposta híbrida é plena na aglutinação das melhores práticas. Utiliza as principais métricas do RCM de forma ativa no pilar de manutenção planejada, na tomada de decisão de variáveis relativas a fazer preventiva ou corretiva, bem como na definição da periodicidade da manutenção autônoma. A decisão de manutenção preventiva é tomada a partir de uma análise de risco. Adiante é abordado o uso de ferramentas próprias do TPM, com variáveis e procedimentos do RCM, como o estudo de disponibilidade a partir dos indicadores MTBF e MTTR.

1.4 Estrutura do Trabalho

O texto é apresentada em 07 (sete) capítulos, nomeadamente: Introdução; Métodos e Procedimentos; Gestão de Manutenção; Manutenção Produtiva Total - TPM; Manutenção Centrada em Confiabilidade - RCM; Desenvolvimento e Resultados; e Conclusões e Considerações Finais . Cada capítulo se inicia com considerações, onde se esclarece o que pretende ser desenvolvido em cada capítulo.

No Capítulo 1, Introdução, é apresentado o tema, e o problema de pesquisa, considerando a contribuição acadêmica e a contribuição para a indústria brasileira. Neste capítulo são definidos os objetivos geral e específicos do trabalho e a metodologia da pesquisa adotada para se atingir os objetivos traçados. Finalmente é elencada a estrutura do trabalho, seu escopo e as limitações da pesquisa.

No Capítulo 2, Métodos e Procedimentos, são apresentados e explicados todos os métodos e procedimentos utilizados para desenvolver a pesquisa bibliográfica e o estudo de caso exploratório. Apresenta o sequenciamento da construção das bases teóricas a serem apresentadas nos capítulos subsequentes

Nos Capítulos 3, 4 e 5 levanta-se na literatura aspectos referentes a gestão de manutenção, seu histórico, conceitos apresentados por diferentes autores. Estuda-se ainda as duas filosofias de gestão de manutenção que fundamentam esta pesquisa: a Manutenção Produtiva Total (*Total Productive Maintenance* - TPM) e a Manutenção Centrada em Confiabilidade (*Reliability Centered Maintenance* - RCM). Será dado um destaque a fundamentação teórica de cada filosofia e como elas têm sido implementadas, isto é, qual os passos e procedimentos de implementação assertiva para cada uma delas.

O Capítulo 6, Desenvolvimentos e Resultados, apresenta os principais conceitos desenvolvidos para o sistema híbrido, compara as filosofias, estuda e verifica os aspectos complementares e aqueles que são divergentes, em prol da reunião das melhores práticas para o sistema híbrido. Neste capítulo se estuda, sobretudo as etapas de implementação dos dois sistemas de manutenção, com o objetivo de definir o escopo de implementação do R-TPM, cuja aplicação é ilustrada por meio de um estudo de caso exploratório.

Finalmente, no Capítulo 7, Conclusões e Considerações Finais, é feita a análise final dos ganhos esperados com o sistema híbrido, bem como é apresentado o procedimento consolidado de implementação desta abordagem. São ainda discutidos aspectos oportunos para a validação do modelo e para pesquisas futuras.

1.5 Escopo do trabalho e limitações da pesquisa

A pesquisa está delimitada (condições de contorno) ao desenvolvimento de um sistema híbrido de manutenção à luz das políticas TPM e RCM (delimitação de escopo) para ambientes industriais (delimitação de seguimento).

Para fins de validação, parte das técnicas (Modelo de Programação Linear, periodicidade de Manutenção preventiva, programa de educação e treinamento, determinação do escopo do sistema híbrido) e etapas propostas serão aplicadas a um contexto industrial piloto, por meio de um estudo de caso exploratório realizado em um Terminal Logístico de Açúcar no Estado de São Paulo.

MÉTODOS E PROCEDIMENTOS

Neste capítulo a metodologia da pesquisa é descrita e os procedimentos e métodos são destacados, a destacar o processo de modelagem do sistema híbrido, que culmina com um modelo conceitual híbrido para implantação em ambientes industriais.

2.1 Metodologia da Pesquisa

Segundo Lakatos e Marconi (2009) uma pesquisa pode ser considerada um constructo quando ela rompe a fronteira de aplicação de conceitos consolidados cientificamente e propõe uma nova abordagem ou novo conceito. Neste sentido, esta pesquisa é caracterizada por um constructo, por trazer uma abordagem nova com a aglutinação de duas metodologias consagradas de gestão de manutenção em uma terceira abordagem que busca reunir as melhores práticas voltadas para arranjos industriais com práticas de manutenção planejada em estágios iniciais de desenvolvimento.

Para Gil (2010) o trabalho científico pode ser caracterizado como uma pesquisa básica ou aplicada. Como a pesquisa propõe um constructo direcionado para a aplicação na indústria esta pesquisa é caracterizada como aplicada.

Do ponto de vista dos objetivos Sampieli et al (2013) caracteriza-os em exploratório, que indagam a partir de uma nova perspectiva; descritivo, em que são medidos conceitos e determinados variáveis; correlacional, que oferecem prognósticos e relações entre conceitos; e explicativos ou causais, que explicam fenômenos mediante a evidências. Por ser um constructo, os objetivos se enquadram como exploratórios, além disso é fundamental descrever os procedimentos e variáveis, sendo, portanto descritivos. Além disso, também podem ser caracterizados como correlacionais pois relacionam e aglutinam conceitos de TPM e RCM.

Para Marconi e Lakatos (2009), a pesquisa pode ser diferenciada em quantitativa, qualitativa ou híbrida entre os dois primeiros tipos, quanto a sua abordagem. Os autores definem uma pesquisa quantitativa como aquela que utiliza de variáveis quantitativas para expressar seus resultados e procedimentos. Por outro lado a pesquisa qualitativa traz aspectos cognitivos ou incapazes de ser expressos em variáveis quantificáveis. A pesquisa híbrida, quantitativa e qualitativa, aborda aspectos quantificáveis e incapazes de quantificação.

Diante disto, a proposta de trabalho possui uma abordagem quantitativa e qualitativa, uma vez que o sistema de manutenção proposto apresenta características mensuráveis, sobretudo na abordagem de confiabilidade de sistemas reparáveis, mas também qualitativas, como no processo de implementação dos pilares do TPM.

Por meio da literatura, sabe-se da existência de inúmeras técnicas de pesquisa a destacar a pesquisa bibliográfica; quando se revisa na literatura conceitos inerentes

a temática proposta e propõe uma reflexão teórica ou a sua aplicação; a pesquisa documental; quando se utiliza de documentos e arquivos governamentais ou da iniciativa privada para coleta de dados; ação; quando o pesquisador se insere na pesquisa e passa a ser parte decisiva para a sua construção; a pesquisa participante quando o objeto de estudo participa e tem a capacidade de alterar os resultados; e o estudo de caso quando utiliza casos concretos, experimentais, para desenvolver ou aplicar um conceito, sobretudo quando o pesquisador têm pouco controle sobre os eventos e quando o foco se encontra em fenômenos inseridos na dinâmica da sociedade (Gil, 2002; Sampieri, R. H.; Collado, C. F.; Lúcio, 2013; Yin, 2005).

A proposta de abordagem combinada do TPM com o RCM pode ser enquadrada quanto as técnicas de pesquisa bibliográfica. É bibliográfica por requerer uma profunda revisão em conceitos de gestão de manutenção e nas metodologias de implementação das filosofias de manutenção industrial estudadas e, a partir do apresentado na literatura, servir de base para a construção do modelo técnico-conceitual do sistema híbrido.

Yin (2005) ressalta que os estudos de casos geralmente representam a estratégia preferida quando se colocam questões do tipo “como” e “por que”, quando o pesquisador têm pouco controle sobre os eventos e quando o foco se encontra em fenômenos inseridos na dinâmica da sociedade. Nesta pesquisa, o estudo de caso se debruça sobre a primeira questão: “como implementar o sistema híbrido? como realizar a simulação dos resultados esperados?”. A ocorrência de falha em equipamentos está fora do controle do pesquisador, neste sentido é coerente verificar como os modelos propostos reagem à um cenário estocástico.

2.2 Processo de modelagem

Trata-se de um estudo multimétodos. Entende-se que o sistema híbrido para a gestão de manutenção industrial precisa ser modelada, com a definição do seu escopo, etapas e métodos necessários para a implementação. O diagrama da Figura 2.1 , extraído de Arenales et al (2007) sintetiza o processo de modelagem, que serve para todos os métodos quantitativos, simulações e modelos matemáticos apresentados, bem como para a estruturação do sistema híbrido enquanto um modelo operacionalizável.

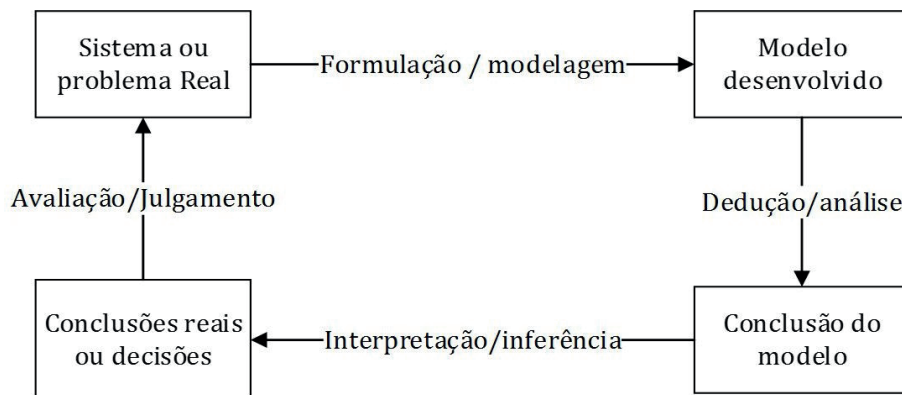


Figura 2.1: Processo de construção do modelo

Fonte: Arenales et al. (2007)

O modelo desenvolvido para o sistema híbrido é obtido a partir de um problema real: a necessidade de desenvolvimento da gestão de manutenção em indústrias brasileiras e a oportunidade de integração das duas filosofias. A construção do modelo se dá com as etapas de implementação, métodos utilizados e uma análise comparativa da implementação do TPM e do RCM, levantando os aspectos complementares e os pontos divergentes, que servem de subsídios para a construção da abordagem proposta. Este processo de modelagem foi utilizado para a construção do modelo de programação linear inteira utilizado para terminar quais itens devem ser contemplados com o programa de manutenção preventiva.

2.2.2 Simulação do Modelo de Manutenção

Uma importante etapa do trabalho desenvolvido é o processo de simulação do modelo, por meio da modelagem as ocorrências de falhas nos equipamentos estudados no estudo de caso. Primeiramente, deve-se simular a ocorrência de falhas, com elevado componente de aleatoriedade dos equipamentos, seguindo o plano de manutenção atual, dito corretivo. O que deve ser comparado com a manutenção preventiva plena em todos os equipamentos e o modelo de PLI desenvolvido para o modelo híbrido.

Os modelos desenvolvidos são estocásticos, com componentes probabilísticos, com variáveis contínuas. Nele, a probabilidade de falha está associada ao tempo e a taxa de avarias. A execução de uma manutenção corretiva, provoca uma restauração parcial do ativo, que tem a sua probabilidade de falha reduzida após este evento (Figura 2.2). Birolini (2014) aponta que em sistemas mecânicos uma intervenção de manutenção, seja corretiva ou preventiva, produz uma recuperação no equipamento de 15 a 25% em relação ao seu estado atual na lei de vida. Essa abordagem é utilizada para estudar o comportamento das falhas ao longo do trabalho em um cenário estocástico.

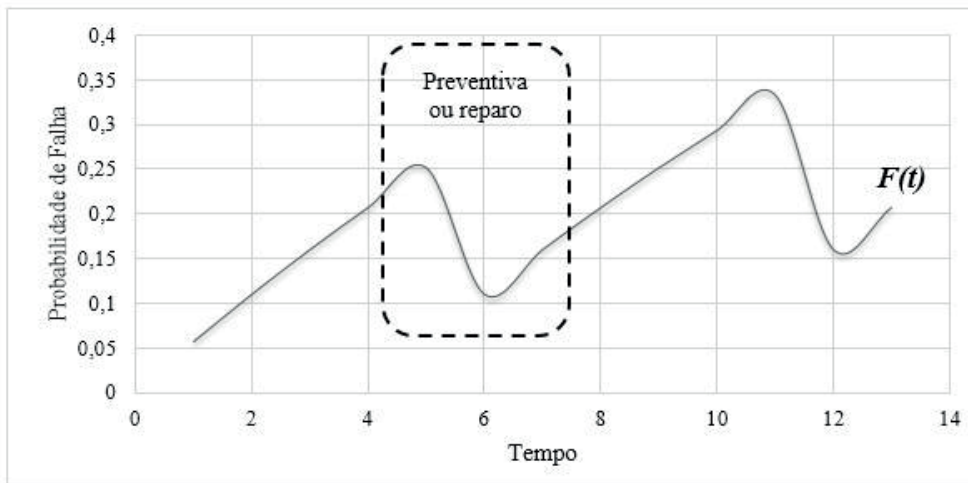


Figura 2.2: Comportamento da probabilidade de falha no tempo Fonte: Adaptado de Birolini (2014)

Em um sistema puramente pautado em manutenção corretiva, a redução de probabilidade de falha está atrelado a ocorrência de falha, que provoca o conserto e a regeneração do ativo. Em sistemas que consideram a manutenção preventiva essa redução está atrelada tanto ao conserto como a atividade preventiva realizada no equipamento.

2.3 Pesquisa Bibliográfica

A pesquisa bibliográfica explora os pontos necessários que servem de base para a pesquisa, a citar:

1. Conceitos fundamentais da engenharia de manutenção
2. Caracterização e fundamentos dos sistemas de gestão de manutenção estudados
3. Revisão na literatura do processo de implementação dos sistemas de manutenção
4. Técnicas e ferramentas que servirão de base para o modelo híbrido.

Para construir o sistema híbrido utilizou-se como base o TPM e o RCM, por serem as abordagens mais difundidas e consolidadas em termos de manutenção industrial. Para serem comparados, suas etapas de implementação precisaram estar bem concatenadas, o que não pôde ser observado na literatura. Cada modelo de implementação, apesar de flutuar sobre a mesma abordagem, apresentavam maneiras distintas de implementação.

Artigos foram analisados e suas etapas de implementação são descritas no trabalho, para consolidar o processo de implementação dos programas clássicos de gestão de manutenção.

O processo de revisão bibliográfica se deu pesquisando textos inerentes a três eixos temáticos: gestão de manutenção, Manutenção Produtiva Total e Manutenção Centrada em Confiabilidade. Inicialmente, a pesquisa se desenvolveu nas bases Emerald, ScienceDirect e Elsevier, somando um total de 186 textos, dos quais são 157 artigos, 18 livros e 11 textos técnicos (normas, conferências internacionais e produção técnica industriais), datados de 1988 a 2015, onde 153 destes são de 2008 a 2015. Foi utilizado software Mendeley para guardar e sistematizar os textos.

Nesse sentido, foi realizada uma pesquisa de artigos científicos que dissertassem sobre implementação de RCM ou TPM seguindo os seguintes requisitos:

1. Apresentassem as etapas de implementação descrita no trabalho
2. Tivessem uma implementação completa de um dos sistemas estudados

Para a construção dos fundamentos e procedimentos consolidados, priorizou-se a utilização de artigos pertinentes e livros seminais na área, com destaque para algumas referências: Moubray and Network (1997); Nakajima (1988,8); NASA and Space (2000); Suzuki (1994); e Smith and Hinchcliffe (2003).

Os manuscritos pesquisados foram organizados dentro dos eixos temáticos. A construção dos capítulos 3, 4 e 5 se deu a partir da construção dos temas propostos com base na literatura estudada. O capítulo 3 disserta sobre conceitos fundamentais da manutenção. Os capítulos 4 e 5 apresentam similaridade na sua orhanização e apresentam a Manutenção Produtiva Total e a Manutenção Centrada em Confiabilidade, respectivamente.

Os capítulos 4 e 5, para cada um dos sistemas, foram estruturados em 5 divisões:

1. A primeira parte apresenta os conceitos fundamentais de cada sistema de manutenção.
2. A segunda trata do processo de implementação adotado pelos artigos.
3. A terceira parte apresenta as ferramentas fundamentais utilizadas durante a implementação de cada sistema
4. A quarta faz uma análise comparativa dos artigos selecionados no processo de implementação e traz a consolidação das etapas para o respectivo sistema de manutenção,
5. A quinta parte apresenta uma análise crítica referente ao sistema apresentado.

O processo de revisão bibliográfica e construção da análise comparativa entre o TPM e o RCM segue conforme apresentado no fluxograma:

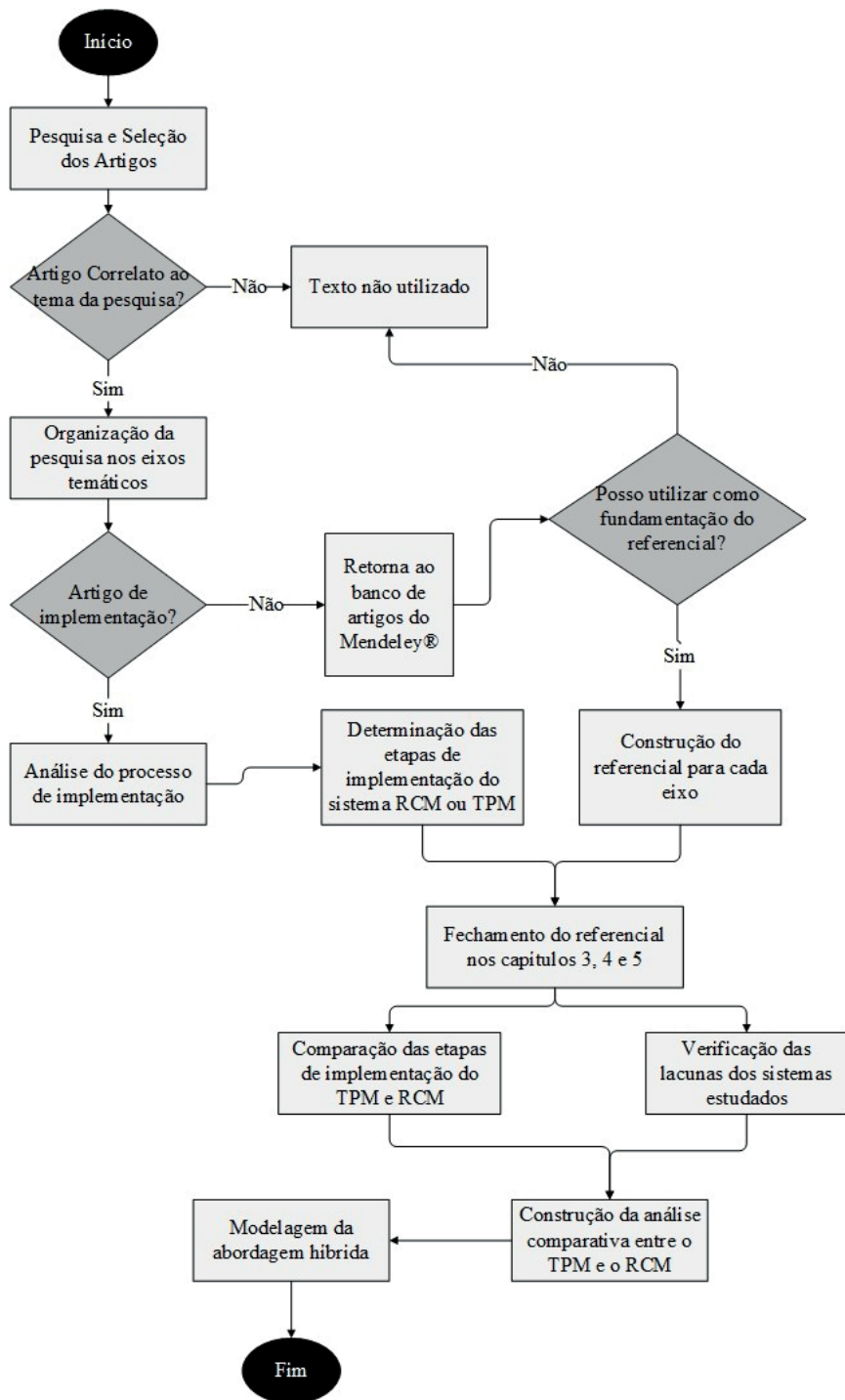


Figura 2.3: Fluxograma do processo de revisão bibliográfica e construção da análise comparativa entre o TPM e o RCM

No fluxograma (Tabela 2.3) é apresentado o processo de pesquisa e a sistematização básica desenvolvida para apresentar os capítulos 3, 4 e 5, que dissertam sobre manutenção, TPM e RCM.

2.4 Construção do sistema híbrido

2.4.1 Etapas de implementação

As etapas de implementação do sistema híbrido proposta teve como base as 4 etapas macro do Ciclo PDCA : planejar, executar, checar e agir. Esta escolha aconteceu considerando que os sistemas, com suas peculiaridades apresentavam as etapas do PDCA nas respectivas implementações, sendo portando um encaminhamento coerente a se seguir.

2.4.2 Aplicação do Modelo

A aplicação do modelo R-TPM é realizado por meio de um estudo de caso exploratório que apresenta o escopo da proposta de implementação em um Terminal Logístico de Açúcar no Estado de São Paulo. São utilizados dados e informações deflatadas, isto é, modificadas masque mantêm a integridade e as características dos mesmos.

A aplicação se inicia com a caracterização do processo produtivo do terminal, que vai da entrada das cargas em carretas à saída nos vagões de trem. Em seguida é desenvolvido a primeira etapa do sistema híbrido: Planejamento. Nela são definidos os objetivos, com o alinhamento dos objetivos do programa aos objetivos organizacionais; o escopo, que define a área de abrangência, equipamentos, custos e tamanho da equipe de trabalho; metas afins aos objetivos traçados; indicadores iniciais a serem implementados; e a construção da equipe de trabalho.

Em termos da segunda etapa é desenvolvido o FMEA para os equipamentos contemplados no escopo; é feita a aplicação do modelo de PLI, contemplando os custos de manutenção preventiva, custos dos consertos leves e graves e o custo das paradas não- programadas; é realizada uma simulação estocástica da probabilidade de falha, comparando o desempenho do modelo atual da empresa, com o modelo de manutenção preventiva plena e o modelo R-TPM; finalmente é apresentado um plano de treinamentos que norteia o desenvolvimento de toda a etapa.

Com os resultados simulados, os indicadores são avaliados com base nas metas estipuladas. É feita uma análise de vulnerabilidades considerando possíveis metas que não foram atingidas, onde é levantado as possíveis causas. Cabe a este momento, ainda, a avaliação sistemática dos indicadores implementados.

Finalmente, são levantadas oportunidades de melhorias e possíveis ações a serem desenvolvidas em um segundo ciclo, por meio de um plano de ação.

GESTÃO DE MANUTENÇÃO

Neste capítulo é apresentado a fundamentação teórica que norteia a gestão de manutenção. São apresentados os principais conceitos de manutenção preventiva, corretiva e preditiva bem como os fundamentos do gerenciamento de manutenção nas organizações.

3.1 Manutenção

A necessidade de acompanhamento e reparo de equipamentos, máquinas e sistemas acompanha a história da humanidade. Na Mesopotâmia, os sumérios à 2000 a.C já se preocupavam, ainda que de forma intuitiva em manter equipes de artesãos para executar consertos em ferramentas e sistemas mecânicos simples. No período das grandes navegações as expedições possuíam pelo menos um responsável em executar pequenos reparos e atividades de emergência nas naus portuguesas e espanholas. Nas casas de ofício muitos artesões eram especializados em consertar utensílios e equipamentos, bem como realizar reparos em armas de guerras. Mas é com a revolução industrial que a função manutenção se desenvolve exponencialmente (Assis, 2010; Ireland and Dale, 2001; M´arquez, 2007; Selvik and Aven, 2011).

Fernández and Márquez (2012) definem manutenção como a combinação de todas as técnicas e ações gerenciais durante o ciclo de vida de um item, que garantam o seu pleno funcionamento para a função requerida. Verma et al. (2010) destacam que a função manutenção deve monitorar e manter instalações, equipamentos e ambientes de trabalho. Deve ainda arquitetar, organizar, executar e verificar o trabalho e garantir o funcionamento nominal do item durante períodos de trabalho e minimizar intervalos de parada causados por avarias ou pelos reparos resultantes.

O gerenciamento de manutenção, portanto, é a gestão adequada das falhas, disponibilidade e performance dos ativos físicos de uma organização, de forma que funcionem conforme os requisitos esperados dentro do seu ciclo de vida (Alebrant Mendes and Duarte Ribeiro, 2014; Cheng et al., 2008).

Segundo Bakri et al. (2012) as estratégias de manutenção são os diferentes tipos de tarefas incluindo ações, procedimentos, recursos e tempo. Estas atividades têm de ser realizadas em conformidade com os horários estabelecidos para garantir a manutenção dos ativos alvos.

Estratégias de manutenção e planejamento pode ser adequadamente atualizados com base nos dados extraídos de *feedback* das performances de itens. A configuração de um sistema de apoio para essas estratégias depende de muitos fatores, tais como a complexidade de tarefas de manutenção, a habilidade do pessoal, e disponibilidade das instalações, e é, portanto, um problema muito crítico na gestão de manutenção (Rodrigues

and Ha- takeyama, 2006).

Em sistemas de produção modernos, o produto ou o serviço, e os requisitos de manutenção são as principais saídas, isto é, em paralelo com a produção há o processo de manutenção. A manutenção é um sistema cujas atividades são realizadas em sinergia com os sistemas de produção. As atividades de manutenção são tão numerosas e complexas que requerem uma gestão eficaz e bem estruturada da organização (Lobo, 2013; McCarthy and Rich, 2015; Muchiri et al., 2011; Singh et al., 2013a).

O ponto de partida é o sincronismo do controle do sistema de produção que não envolve apenas equipamentos de monitoramento, mas também a manutenção, controle, planejamento e organização, com muitas subatividades. Além de realizar trabalhos de reparo e melhoria, a manutenção deve ter um lugar na arquitetura da gestão e no apoio à tomada de decisões na empresa. Por exemplo, isto aplica-se em peças de reposição, controle de custo, controle de qualidade e outras áreas Assis (2010).

Diversos autores destacam a importância das dimensões da engenharia de manutenção (Figura 3.1) para a compreensão das atividades a serem desenvolvidas, a destacar a manutenção corretiva, a manutenção preventiva e sua correlata, a predição de falhas, e o estudo de confiabilidade (Assis, 2010; Lobo, 2013; Pinto, 2008).

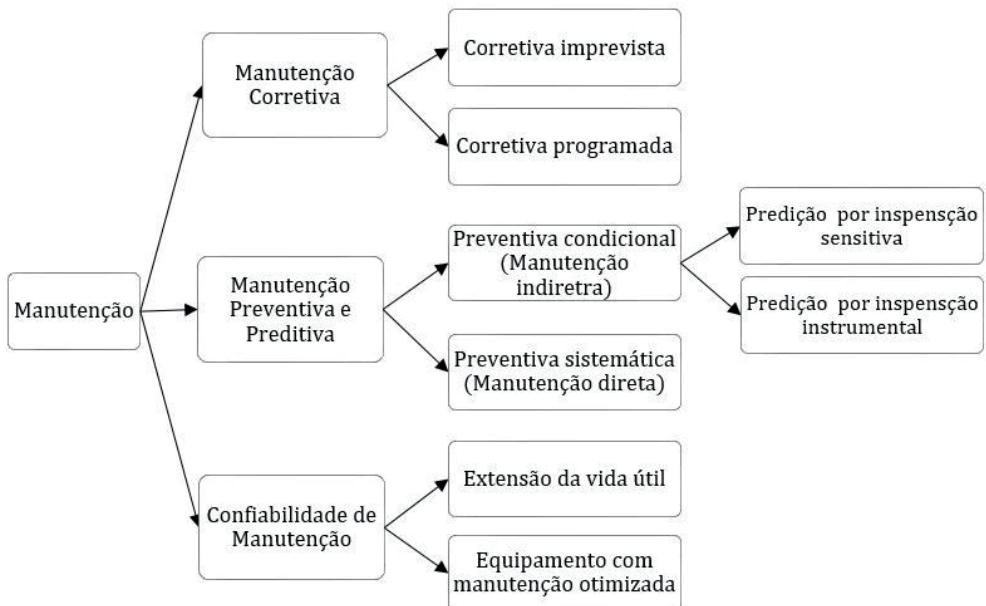


Figura 3.1: Extensões da Função Manutenção

Fonte: Lobo (2013)

A função manutenção pode ser compreendida em três grandes dimensões, a manutenção corretiva, com ações responsivas, isto é, com atuação após a ocorrência. Por

outro lado, a manutenção preventiva têm dimensão proativa, com intervenções programadas antes da ocorrência, sejam elas de cunho preditivo ou com abordagem sistemática ou a partir de um plano. Finalmente há a dimensão de confiabilidade, que trata da programação a partir de análise probabilística de falhas e noção de risco (Fogliatto and Ribeiro, 2009; Xenos, 2014).

A manutenção corretiva é toda intervenção realizada em máquinas, equipamentos e sistemas complexos após a ocorrência de avarias, logo, é uma modalidade reativa. Foi a modalidade que prevaleceu nas organizações até meados do século XX, isto porque, quando se observa apenas o setor de manutenção, é a de custo mais reduzido, entretanto, a partir de uma visão sistêmica da organização o custo de parada da produção pode acarretar em elevados prejuízos às empresas. É comum a confusão de manutenção corretiva, com manutenção não planejada, normalmente, em empresas pouco desenvolvidas nesse setor, a manutenção corretiva acaba sendo decorrente da falta de planejamento (corretiva imprevista), todavia, a manutenção pode ser corretiva e planejada, sobretudo quando a manutenção preventiva não é economicamente a mais viável (Alebrant Mendes and Duarte Ribeiro, 2014; Assis, 2010; de Souza, 2004; NASA and Space, 2000; Xenos, 2014).

A manutenção preventiva ganha evidencia após a segunda metade do século XX, quando a manutenção começa a incorporar uma função estratégica nas empresas. Essa modalidade de manutenção é planejada e apresenta um plano programado de manutenção periódica para os ativos físicos tangíveis. Ganha importância sobretudo com o advento da filosofia de produção enxuta japonesa, junto com técnicas e conceitos de gestão de qualidade. A manutenção preventiva é essencialmente proativa, com ações tomadas para prevenir falhas e manter, assim, o funcionamento dos equipamentos. Ela envolve algumas ações sistemáticas, tais como: inspeções, trocas de peças e reformas. O objetivo maior da manutenção preventiva é reduzir a frequência da ocorrência de falhas e a sua gravidade (Alsyounf, 2009; Igba et al., 2013; Kelly, 2006; Sharma et al., 2006).

Dentro da manutenção preventiva, surge a manutenção preditiva, com um viés condicional possível a partir do desenvolvimento da engenharia e do ramo de aprendizado de máquina (*“learning machine”*). A preditiva avalia sintomas dos equipamentos o que permite otimizar a troca de peças ou reforma dos componentes e estender o intervalo de manutenção, pois possibilita a avaliação e previsão de quando o componente estará próximo do seu limite de vida útil. É uma abordagem proativa e reativa, é proativa por partir de um plano de manutenção, mas reage a partir dos sintomas avaliados via predição por inspeção sensível ou via predição por inspeção instrumental (Aspinwall and Elgharib, 2013; Jain et al., 2014).

No fim do século XX, com o avanço aeroespacial, o estudo de confiabilidade passa a ser imprescindível para o gerenciamento da manutenção. Destaca-se sobretudo filosofias baseadas e centradas em confiabilidade que direcionam o foco para o estudo da lei de vida dos equipamentos e da otimização da manutenção a nível de dimensionamento de

equipamentos de reserva (sobressalentes), probabilidade de falhas, ensaios e testes via amostragem (Fogliatto and Ribeiro, 2009; Yssaad et al., 2014).

3.1.1 Indicadores de gestão para a função manutenção

É conveniente que o gerenciamento de manutenção encontre-se atrelado à gestão de operações de qualquer manufatura, buscando assegurar que o sistema de produção definido opere conforme as especificações pretendidas. Kaplan and Norton (1996) discutiram que não é possível gerenciar aquilo que não se pode medir, desta forma, a nível de indicadores é importante traçar os principais indicadores verificados na literatura para a função manutenção (Tabela 3.1).

Indicador	Literatura	Literatura	Fórmula de Cálculo
CTM - Custo Total de Manutenção [R\$]	Gupta et al. (2014)	Somatório dos custos totais de manutenção preventiva, corretiva e preditiva em um dado período	$CTM = C_{prev} + C_{cor} + C_{pred}$
C_{prev} - Custo de Manutenção Preventiva [R\$]	Zio and Compare (2013)	Somatório dos custos totais com manutenção preventiva em um dado período.	$C_{m_{prev}} = \sum C_{prev}$
C_{mcor} - Custo de Manutenção Corretiva [R\$]	Karanikas (2013)	Somatório dos custos totais de manutenção corretiva em um dado período.	$C_{m_{cor}} = \sum C_{cor}$
C_{mpred} - Custo de Manutenção Preditiva [R\$]	Van Horenbeek and Pintelon (2013)	Somatório dos custos totais com manutenção preditiva em um dado período.	$C_{m_{pred}} = \sum C_{pred}$
DCT - Distribuição dos Custos Totais [R\$]	Salonen and Bengtsson (2011)	Distribuição dos custos totais (C_t) entre manutenções preventivas, corretivas e preditivas (C_n).	$DCT = \left(\frac{C_n}{C_t} \right)$
CONP - Custo de Oportunidade (Produtividade) [R\$]	Silva et al (2008)	Custo das unidades não produzidas devido à interrupções de produção não planejadas.	$CONP = \sum C_{unit} \times n^o \text{ peças}$
OEE - Overall equipment effectiveness [%]	Muchiri et al. (2011); Salonen and Bengtsson (2011)	Indicador de efetividade que considera performance, disponibilidade e qualidade do equipamento	$OEE = I_{per} \times I_{disp} \times I_{qua}$
MTTF - Mean Time to Failure [h]	Kumar et. al (2014)	É o tempo estimado para o intervalo entre falhas de um componente não reparável	$MTTF = \frac{\sum t.paradas}{n.paradas}$

MTBF - <i>Mean Time between Failures</i> [h]	Karanikas (2013)	Tempo estimado para o intervalo entre falhas de um componente reparável.	$MTBF = \frac{\sum t.paradas}{n.paradas}$
I_{perf} - Índice de performance	Silva et al (2008)	Mede a eficiência do equipamento em termos de sua produtividade.	$I_{perf} = \frac{n^o peças}{t.decorrido \times t.ciclo.ideal}$

Tabela 3.1: Indicadores de desempenho para a função manutenção

Fonte: Vários autores (2015)

Indicador	Literatura	Descrição	Fórmula de Cálculo
I_{disp} - Índice de disponibilidade [%]	Muchiri et al. (2011); Salonen and Bengtsson (2011)	Métrica de efetividade atrelada à performance, disponibilidade e qualidade do equipamento	$I_{disp} = \frac{\sum horas.produtiva}{\sum horas.disp}$
I_{qual} - Índice de qualidade [%]	Bartz et al. (2014)	Taxa de conformidade dos processos realizados em um equipamento	$I_{qual} = \frac{produção.conformes}{produção.total}$
R_t - Índice de confiabilidade [%]	Assis (2010); Lobo (2013)	A confiabilidade do equipamento é complementar a probabilidade de falha $F(t)$.	$R(t) = 1 - F(t)$
MTBF _{inf} - Limite inferior do Mean Time between Failure [h]	Assis (2010); Lobo (2013)	Cálculo do limite inferior do MTBF. É obtido a partir da relação entre o dobro do tempo total da amostra (t_0) e o qui-quadrado (χ^2)	$MTBF_{inf} = \frac{2 \times t_0}{\chi^2}$
MTTR - Mean Time to Repair [h]	Muchiri et al. (2011)	Tempo médio decorrido para o reparo de um equipamento.	$DCT = \left(\frac{C_n}{C_t} \right)$
NERS - Número de equipamento reserva / sobressalentes	Assis (2010); Lobo (2013)	Número de equipamentos para suprir emergências e programações. A meta é obtida comparando a confiabilidade e os custos de manutenção	$NERS = n^o equip. reserva$
I_{efpl} - Índice de eficiência de planejamento [%]	Muchiri et al. (2011)	Tava de realização das atividades de manutenção planejadas	$I_{efpl} = \frac{atividades.realizadas}{atividades.realizadas}$
I_{trein} - Índice de treinamento [%]	Strenstrom et al. (2013)	Porcentagem de operadores que receberam determinado treinamento	$I_{trein} = \frac{operários.treinados}{n^o.operários} \times 100$

Tabela 3.1: Indicadores de desempenho para a função manutenção (continuação)

MANUTENÇÃO PRODUTIVA TOTAL - TPM

4.1 Fundamentos

A Manutenção Produtiva Total (*Total Productive Maintenance* - TPM) nasceu no Japão na década de 1970s, como derivação da filosofia enxuta para aplicação na gestão de manutenção. Apoiado nas correntes de manutenção corretiva e preventiva nas décadas de 1950s e 1960s o TPM tem como base a valorização do trabalho humano para a manutenção industrial. O objetivo central de qualquer programa de TPM é aumentar a produtividade, a qualidade e a disponibilidade dos equipamentos por meio do desenvolvimento de uma cultura de promoção dos funcionários e da sua satisfação no ambiente produtivo (de Souza, 2004; Jain et al., 2003).

Nakajima (1988) introduziu o conceito do TPM no Japão em 1971 como sendo a manutenção produtiva exercida por todos os funcionários por meio de atividades em pequenos grupos para garantir que o equipamento seja operado a 100% de capacidade, 100% do tempo. TPM é uma abordagem para manutenção que otimiza a eficácia do equipamento, busca a eliminação de avarias, e promove a manutenção autônoma pelo operador por meio de atividades do dia a dia, envolvendo toda a força de trabalho (Aspinwall and Elgharib, 2013; Chand and Shirvani, 2000; Marín-García and Martínez, 2013).

Souza (2004) destaca que o TPM é um dos conceitos mais mal entendidos e mal aplicados nas organizações contemporâneas. Não se trata apenas de um programa de manutenção ou plano de melhorias, mas uma filosofia operacional estratégica que envolve toda a organização. Tondato (2003) completa afirmando que o objetivo central do TPM é reestruturar a organização como um todo, como melhorias que devem ser incorporadas em equipamentos e pessoas.

Índex	Objetivos do TPM
1	Criar uma organização corporativa que maximize a eficácia dos sistemas de produção
2	Gerenciar a planta com uma organização que evite todos os tipos de perdas
3	Envolver a todos os departamentos administrativos na implantação do TPM, incluindo desenvolvimento de produto, vendas e administração
4	Envolver a todos, desde a alta direção até os operários da planta, em um mesmo projeto
5	Orientar as ações para a eliminação das perdas através das atividades dos pequenos grupos

Tabela 4.1: Os cinco objetivos do TPM
Fonte: Adaptado de Tondato (2003)

Tondato (2003) sistematiza 5 grandes objetivos diretos do TPM (Tabela 4.1) onde o principal é referente à criação de uma organização que maximize a eficácia dos sistemas de

produção, obtidos à partir da minimização de perdas e do envolvimento dos colaboradores, tanto operacionais, quanto de alta gestão no projeto de TPM.

4.2 Pilares do TPM

Nakajima (1988) organiza o TPM inicialmente em 5 pilares: Manutenção Autônoma; Manutenção Planejada; Educação e Treinamento; Melhoria Específica e Controle Inicial. Esta abordagem inicial, foi implementada em 1971 na empresa Nipondenso, com o objetivo de se obter eficiência operacional, o que ficou conhecido como “*Production TPM*” (Marín-García and Martínez, 2013). Em 1989 ocorre um aprimoramento teórico nos conceitos do TPM e surge o “*Company Wide TPM*”, que traz uma visão holística o TPM expandido para toda a organização (Chand and Shirvani, 2000; Marín-García and Martínez, 2013). São incorporados outros 3 pilares fundamentais: Manutenção da Qualidade; Segurança Higiene e Meio Ambiente; e Áreas Administrativas (Figura 4.1).

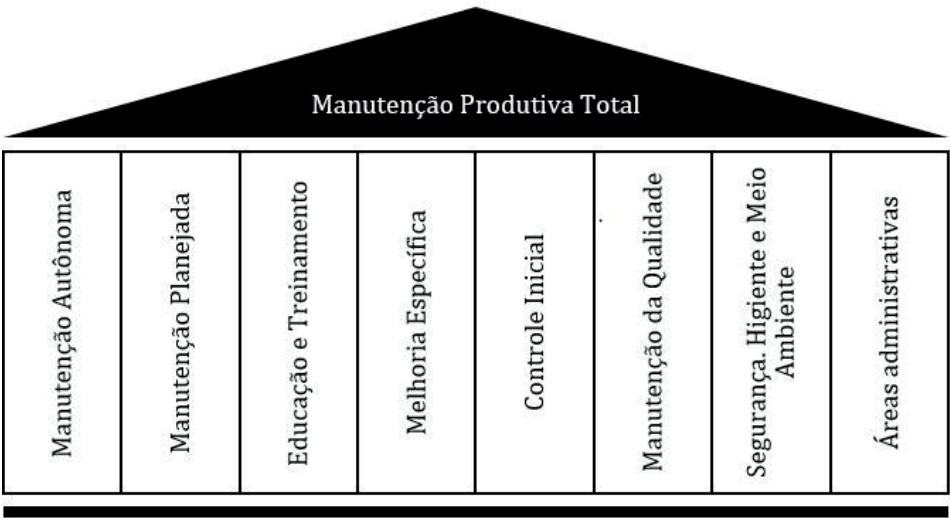


Figura 4.1: Os oito pilares do TPM

Fonte: Ahuja and Khamba (2008); Singh et al. (2013b)

4.2.1 Manutenção Autônoma

A participação dos colaboradores operacionais na implementação de um projeto de TPM é imprescindível, sobretudo no que tange o pilar Manutenção Autônoma. Este pilar tem como objetivo dar condições aos operários de desenvolverem rotinas de limpeza, inspeção e lubrificação, para que estes tenham capacidade de resolver as anomalias mais comuns nos equipamentos. Segundo Xenos (2014) para implementação da Manutenção Autônoma são necessárias algumas etapas a citar:

Etapa 0: Preparação.

Etapa 1: Limpar e inspecionar.

Etapa 2: Eliminar fontes de problemas e áreas inacessíveis.

Etapa 3: Preparar padrões de limpeza/ inspeção/ lubrificação.

Etapa 4: Realizar inspeções gerais.

Etapa 5: Realizar inspeções autônomas.

Etapa 6: Padronizar aplicando a gestão visual do lugar de trabalho.

Etapa 7: Implantação da gestão autônoma de equipamentos.

Em termos de cultura organizacional, o principal objetivo da Manutenção autônoma é que os funcionários sejam responsáveis pelas máquinas, assumindo-as como “filhas” ou “donos”. Isto cria um senso de responsabilidade e de valorização do trabalho realizado pelos funcionários (Nakajima, 1988).

1.1.1 Manutenção Planejada

O pilar manutenção planejada é essencialmente um dos pontos mais importantes de tomada de decisão quanto ao gerenciamento de manutenção. Segundo Nakajima (1989) manutenção planejada deve responder essencialmente a três questionamentos:

- I. Em quais equipamentos devemos executar manutenção preventiva? Quais devem ter tratamento corretivo? E quais os que devem ter acompanhamento preditivo?
- II. Qual a periodicidade da execução da manutenção preventiva e preditiva?
- III. Quais os recursos necessários para executar as intervenções?

A construção de um plano de manutenção deve levar em consideração esses três questionamentos. A primeira pergunta está atrelada diretamente a criticidade dos equipamentos para o processo produtivo e a custos de manutenção, o segundo à garantia de que os equipamentos terão baixa probabilidade de falha e o terceiro a capacidade de viabilizar as intervenções em manutenção.

Esse pilar é alvo de inúmeros estudos encontrados na literatura. Moghaddam (2013) propõe um modelo de programação multiobjetivo para programação de manutenção preventiva e reposição de suprimentos em sistemas de manufatura. Manzini et al. (2015) desenvolveram um modelo de planejamento de manutenção por meio de programação linear inteira mista para restrição de recursos. Ighravwe e Oke (2014) por sua vez, desenvolveram um modelo de programação não-linear para a otimização da alocação de mão de obra em manutenção. Gavranis and Kozanidis (2015) desenvolveram um algoritmo de solução inteira para a maximização da disponibilidade de recursos considerando a confiabilidade dos ativos físicos e os requisitos de manutenção em aeronaves. Wang (2012)

propôs um modelo baseado em confiabilidade para ressuprimento de peças e planejamento de manutenção baseada no tempo.

4.2.3 Educação e Treinamento

Segundo Seng et al. (2005) o pilar educação e treinamento é um dos fatores críticos ao sucesso de um programa de TPM pois é a base para a eficácia dos demais pilares para se atingir os dois objetivos fundamentais do TPM, zero falhas e zero desperdícios. Rodrigues e Hatakeyama (2006) completam que o sucesso na implementação está ligada a maneira que se gerencia as pessoas e se insere a cultura proposta pelo TPM nos colaboradores. Isto requer um processo de longo prazo por meio de treinamentos e educação organizacional. Os autores completam que o TPM deve ser compreendido como uma metodologia de iniciativa humana na fábrica.

4.2.4 Melhoria Específica

O pilar Melhoria Específica é definido por Nakajima (1989) como sendo o processo de restauração e limpeza dos ativos físicos avaliados e monitorados pela manutenção. Também conhecido como “*Kobetsu Kaizen*”, a melhoria específica é relativa ao plano de manutenção necessário para trazer o equipamento ao “estado zero” por meio de ferramentas da qualidade, sobre a monitoria dos resultados do OEE do equipamento.

A melhoria específica é imprescindível, sobretudo para os equipamentos críticos. Esse pilar é utilizado para eliminar as oito grandes perdas que reduzem a eficiência global do equipamento. Em geral requer investimentos financeiros e esforços de gestão direcionados ao equipamento foco para aumentar a sua disponibilidade e retardar o processo de degeneração natural, insto é, ampliando a sua vida útil Xenos (2014).

4.2.5 Controle Inicial

Este pilar está diretamente relacionado a projetos de aquisição de equipamentos, de novas plantas ou ampliação. Refere-se ao TPM na concepção. O pilar de controle inicial além de desenvolver o projeto com foco no equipamento, ele também visa a implantação de um novo projeto pensando na integração entre homem e máquinas, considerando a condição ambiental e condição de produção (Assis, 2010; Fogliatto and Ribeiro, 2009; Xenos, 2014)

Além dos 5 primeiros pilares há ainda outros três pilares oriundos de abordagens mais recentes do TPM: Manutenção da qualidade; Segurança. Higiene e Meio Ambiente e; TPM Office (áreas administrativas). O pilar Manutenção da Qualidade (*Hinshitsu Hozen*) pretende atuar na eliminação das perdas relativas à qualidade do equipamento, isto é, na sua performance assertiva, estabelecendo condições nos equipamentos que não produzam falhas ou defeitos no produto final. O segundo pilar está atrelado as condições

de segurança da máquina em relação a manipulação humana, bem como a emissão de poluentes e toda a preocupação com as questões ambientais. Finalmente, no século XXI, junto com o desenvolvimento do *Lean Office* têm se desenvolvido o TPM voltado para áreas administrativas, por meio da adoção do OEE voltado à questões administrativas (Ahuja and Khamba, 2008; Bartz et al., 2014; Prakas et al., 2012).

4.3 OEE e a mensuração de perdas

Na aplicação da política de TPM, um sistema de *feedback* é implementado a fim de mediar a avaliação do sistema. Tal ferramenta recebe o nome de OEE (Overall Equipment Effectiveness). O OEE (Equação 4.1) é um indicador que faz a avaliação da eficiência de determinada operação de manufatura relativo a um equipamento, que auxilia na busca precisa das áreas problemáticas dos processos, oferecendo as respostas para que possam aplicar as melhorias (Aspinwall and Elgharib, 2013).

$$OEE(\%) = disponibilidade(\%) \times desempenho(\%) \times qualidade(\%) \quad (4.1)$$

A disponibilidade é o tempo útil produtivo comparado com o tempo realmente aproveitado, descontando os tempos de parada programada e de falta de demanda produtiva. O desempenho está atrelado a cadência do equipamento e compara a cadência teórica, vazão produtiva dimensionada, com a cadência real, a vazão real que o equipamento consegue operar. Por sua vez a qualidade está relacionada a produção de itens conformes, comparado a todos os item produzidos (Fernández and Márquez, 2012).

De acordo com Ahmad et al. (2012), o OEE é um indicador que faz a medição do desempenho de uma maneira “tridimensional”, uma vez que considera o tempo útil da máquina disponível para produção, a eficiência demonstrada durante a produção e a qualidade que é obtida no produto após o procedimento do equipamento. O OEE procura apurar o impacto das 07 (sete) perdas principais elucidadas pela TPM, conforme apresenta a Figura 4.2:

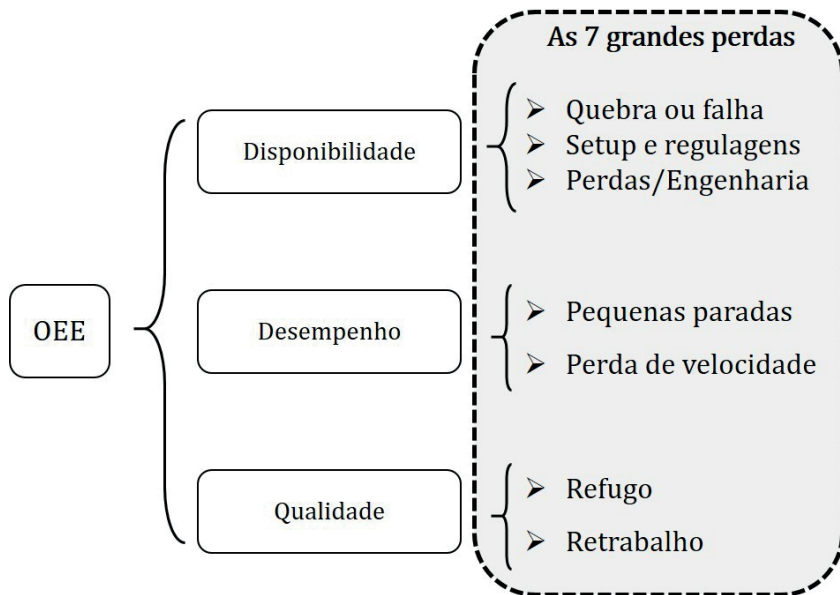


Figura 4.2: OEE e a mensuração das sete perdas fundamentais

Fonte: Adaptado de Assis (2010)

4.4 Ferramentas da Produção Enxuta aplicadas ao TPM

Para Scherrer-Rathje et al. (2009), a produção enxuta ou *lean* é uma filosofia focada na identificação e eliminação de desperdícios, por meio da análise do fluxo de valor do produto, não se limitando ao processo interno à organização mas estendendo a toda cadeia de suprimentos. Uma manufatura enxuta pode ser alcançada por meio de um conjunto de práticas, como o *just in time*, a gestão total da qualidade, a manutenção produtiva total, a melhoria contínua, o projeto voltado à manufatura, a gestão eficiente da cadeia de suprimentos e também a gestão eficiente dos recursos humanos.

Sundar et al. (2014) elencam inúmeras ferramentas da produção enxuta, a citar: *5S*; *Poka Yoke*; Trabalho-Padrão; *Just in Time*; *SMED*; e *Value Stream Map*. O TPM está diretamente relacionado ao lean no objetivo de eliminação dos desperdícios, elencada pelas perdas no TPM. Nesse sentido, algumas ferramentas do lean são utilizadas no projeto de implementação do TPM: *5S*; *Poka Yoke* e *SMED*.

4.4.1 Os 5S (*Seiri, Seiton, Seisou, Seiketsu e Shitsuke*)

Um programa de 5S está diretamente relacionado a organização e limpeza de um ambiente organizacional. A prática dos 5S é uma técnica usada para estabelecer e manter a qualidade do ambiente. É consequência da aplicação da cultura da melhoria contínua (*kaizen*) em ambientes organizacionais, sobretudo industriais (Jiménez et al., 2015).

A metodologia utilizada para a implementação 5S envolve duas etapas e vários

estágios para cada elemento do 5S, por isso é fundamental o relacionamento e o empenho de todos os envolvidos na implantação. A primeira fase, diz respeito ao processo de mudança do ambiente, enquanto o segundo, que é crítico, refere-se a manutenção e a criação de uma cultura organizacional orientada aos princípios dos 5S (Knechtges et al., 2013).

Jiménez et al. (2015) apresenta a descrição das etapas:

1. Seiri (organização). Deve-se remover todas as ferramentas e peças desnecessárias, passar por todos os instrumentos, materiais, e assim por diante na área de planta e trabalho. Deve-se manter apenas os itens essenciais.
2. Seiton (agilidade para manter o fluxo). Deve-se organizar o trabalho, trabalhadores, equipamentos, peças e instruções de um tal modo que o trabalho flua livre de ineficiências por meio do valor acrescentado, com a organização do trabalho com uma divisão necessária para atender a demanda.
3. Seiso limpeza). O espaço de trabalho e os equipamentos devem ser limpos e mantidos arrumados para o próximo usuário.
4. Seiketsu (padronização e controle visual). Diz respeito ao processo de procedimentação e gestão visual. Situações normais e anormais são distinguidos, usando regras visíveis e simples.
5. Shitsuke (disciplina e hábito). Trata-se do ponto crítico da implementação, por exigir disciplina e hábito dos colaboradores, tornando os 4S anteriores parte da cultura organizacional. Nesse momento, a manutenção dos princípios se dá pela adesão sistemática dos colaboradores por meio de treinamentos regulares e exemplos dados pela gerência, em prol de tornar vivo o sentimento do programa.

4.4.2 Poka Yoke

Dispositivos Poka-Yoke são utilizados no meio produtivo para evitar que falhas, sobretudo de origem humana, sejam propagadas a jusante no processo produtivo (Fogliatto and Ribeiro, 2009). Um programa de Poka-Yoke, normalmente está atrelado a implementação de TPM e/ou produção enxuta. Está diretamente ligado a não passar falhas e problemas para processos posteriores (Saurin et al., 2012) .

Frequentemente, um dispositivo de Poka-Yoke provoca modificações no processo produtivo e precisa ser avaliado do ponto de vista de automação e mecânica, bem como a nível financeiro, uma vez que, normalmente geram custos em sua implementação (Saurin et al., 2012).

Primeiramente são levantadas as possíveis falhas, suas causas e os agentes de risco. Em seguida é projetado algum dispositivo que, ou evite a falha, ou torne o defeito visualmente identificável. E por último, são definidos os requisitos de instalação, esta é efetuada e os operadores são treinados para desempenhar a função modificada, identificar e avaliar as não-conformidades (Werkema, 2012).

1.1.2 SMED (*Single Minute Exchange of Die*)

O SMED, do inglês “*Single Minute Exchange of Die*”, significa troca rápida, é uma das várias técnicas do *Lean Manufacturing* que objetiva reduzir desperdícios (Dave and Sohani, 2012). É uma técnica desenvolvida por Shingo (1985), com um conjunto de ferramentas e procedimentos que visam a realização de *setups* em menos de 10 minutos (McIntosh et al., 2000).

Todas as atividades que requerem a parada da máquina são chamadas de atividades internas, da mesma forma, as que podem ser realizadas sem a parada, são chamadas de atividades externas. Inicialmente (Figura 4.3), todas as atividades são internas, no primeiro estágio, separa-se as atividades que requerem a parada da máquina daquelas que não necessitam. Na segunda etapa, por meio de técnicas de padronização, organização e sistematização, pretende-se reduzir os tempos das atividades internas. Finalmente, na terceira e ultima etapa, pretende-se reduzir ainda mais os tempos das atividades internas e externas por meio da melhoria de processos (McIntosh et al., 2000; Moreira and Pais, 2011; Shingo, 1985).

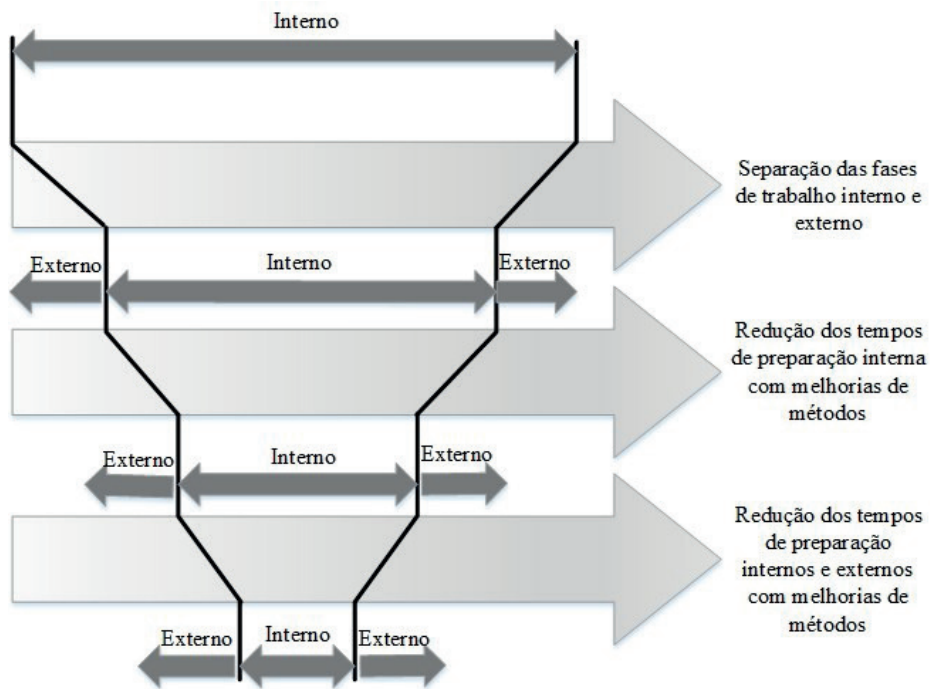


Figura 4.3: Etapas de aplicação do SMED

Fonte: Adaptado de Dave and Sohani (2012)

4.5 Ferramentas da qualidade aplicadas ao TPM

Lobo (2013) apresenta as principais ferramentas necessárias para aplicação do TPM em uma organização. Para o pilar Manutenção Autônoma destaca a necessidade de um programa robusto de 5S, onde, numa primeira fase deve-se criar uma base sólida para implementação do TPM, e num segundo momento, implementar a Manutenção autônoma. Sobre o pilar Manutenção Planejada o autor propõe o alinhamento estratégico inicial, a definição dos requisitos de inspeção e manutenção, a análise de perdas e o dimensionamento de itens sobressalentes.

<i>Ferramentas</i>	<i>O que é?</i>	<i>Qual a utilização na manutenção?</i>
Diagrama de Pareto	Gráfico de barras que ordena as ocorrências de forma decrescente, apresentando as porcentagens acumuladas.	Muito utilizado na análise do modo de falhas para determinar quais os principais tipos de falhas verificadas em um item, mediante o histórico analisado.
Diagrama de Ishikawa	Método que expressa a série de causas de um problema, relativo a falhas de método, máquina, medida, meio ambiente, material e mão-de-obra.	Utilizado na investigação das causas das avarias em equipamentos. Sua utilização pode gerar um memorial de causas que auxilia na manutenção autônoma, em relação a decisão a ser tomada pelo operador
Folha de Verificação	Planilha estruturada para coleta de dados e verificação de requisitos.	Utilizado no plano de manutenção planejada enquanto <i>checklist</i> de verificação em inspeções e para definição do escopo de intervenções autônomas
“5 Porquês”	Conjunto de perguntas discriminatórias realizadas para se chegar as causas elementares dos problemas	Utilizado junto ao FMEA para obter as causas das avarias. Técnica utilizada no pilar melhoria específica para criar o memorial do equipamento, enquanto requisitos e causas fundamentais de falhas.
Fluxograma	Utilizado para representar processos e procedimentos.	Utilizado na manutenção planejada para definir os equipamentos gargalo e sua criticidade no processo produtivo.
Brainstorm	É o conjunto de ideias ou sugestões criado pelos membros da equipe. É dividido em duas fases, a primeira criativa, de proposição de ideias, e a segunda seletiva, de refino.	É utilizado em todas as fases de implementação do TPM e em todos os pilares. Um dos princípios fundamentais da filosofia é ser orgânico, isto é, movido pela participação das pessoas, na geração de uma cultura organizacional de combate às perdas e desperdícios.
5W2H	É uma das formas de apresentar o plano de ações de forma sintetizada ao passo que identifica e caracteriza as ações e as responsabilidades de cada membro da equipe.	Utilizado na fase inicial de implementação de um programa de TPM, quando se define os objetivos e as ações prioritárias a serem desenvolvidas.
PDCA	O ciclo PDCA (<i>Plan, Do, Check, Act</i>) é um método gerencial de tomada de decisões que garantam o alcance das metas estipuladas, sob o espectro da melhoria contínua.	É utilizado, tanto a nível macro, relativo ao processo de melhoria contínua do programa de TPM, quanto a nível micro, no Kobetsu Kaizen

Tabela 4.2: Ferramentas da Qualidade

Fonte: He et al. (2002); Soković et al. (2009); Xenos (2014)

Inúmeras ferramentas da qualidade são utilizadas como base para a implementação do TPM orientado a seus pilares fundamentais. Entre elas destaca-se: *Brainstorm*; Diagrama de Pareto; 5W2H; 5 Porquês; Ciclo PDCA; Diagrama de Ishikawa e Fluxogramas (Tabela 4.2).

4.6 Implementação do TPM em ambientes industriais

A implementação de um sistema de TPM deve levar em considerações os seus pilares fundamentais Nakajima (1988). Entretanto o processo de implementação não é uniforme. Inúmeros trabalhos de vários autores apresentam o processo de implementação de TPM em ambientes fabris (Tabela 4.3).

Etapa	Chand and Shirvani (2000)	Seng et al. (2005)	Sharma et al. (2006)
1	Definição do sistema e da equipe de trabalho	Definição do sistema e da equipe de trabalho	Definição do sistema e da equipe de trabalho
2	Avaliação das perdas do processo inerentes à manutenção	Definição de uma estratégia de implementação: orientado as pessoas ou aos processos	Definição dos objetivos da implementação do TPM
3	Implementação do indicador OEE para os equipamentos.	Construção de uma política de treinamento em manutenção produtiva	Estudo de falhas dos equipamentos e mensuração de perdas
4	Definição do plano de melhorias baseado nos pilares do TPM	Programa de manutenção planejada	Implementação do indicador OEE para os equipamentos
5	Desenvolvimento dos pilares Educação e treinamento; e Manutenção autônoma	Implementação do OEE e avaliação das perdas de processo	Planejamento da implementação dos KAISEN orientado aos pilares do TPM
6	Definição do plano de manutenção	Planejamento da manutenção autônoma	Implementação do plano de manutenção planejada
7	Documentação e avaliação dos resultados	Projeto de POKA YOKE	Documentação e avaliação dos resultados
8		Utilização do SMED para equipamentos críticos	Processo de melhoria contínua
9		Planejamento de KOBETZU KAIZEN e priorização de equipamentos	
10		Avaliação dos resultados e giro do PDCA orientado à melhoria contínua	

Tabela 4.3: Implementação do TPM em ambientes industriais

Etapas	Aspinwall and Elgharib (2013)- Caso A	Aspinwall and Elgharib (2013)- Caso B	Singh et al. (2013b)	Bartz et al. (2014)
1	Definição do sistema e da equipe de trabalho	Definição do sistema e da equipe de trabalho	Definição do sistema e da equipe de trabalho	Definição do sistema e da equipe de trabalho
2	Definição dos indicadores de desempenho	Divisão em grupos menores para atuarem sobre pilares do TPM	Implementação do indicador OEE para os equipamentos.	Treinamento inicial em TPM e definição dos objetivos
3	Coleta de dados e início da mensuração do OEE	Desenvolvimento do pilar Educação e treinamento	Implantação de um programa de 5S	Definição dos objetivos do e construção do mapa de métodos
4	Definição dos pilares prioritários a se desenvolver	Projeto piloto para implementação dos pilares na produção	Desenvolvimento do pilar Manutenção autônoma	Implantação de um programa de 5S
5	Desenvolvimento do Pilar Manutenção Planejada	Implementação do sistema de Manutenção Autônoma	Construção do sistema de manutenção planejada	Implementação de melhoria contínua focalizada para os equipamentos críticos
6	Desenvolvimento do Pilar Melhoria específica nos gargalos	Implementação do indicador OEE para os equipamentos.	Realização de KAIZEN para melhoria específica	Treinamento em manutenção autônoma
7	Construção do plano de treinamento dos colaboradores	Desenvolvimento do plano de manutenção preventiva	Implantação do sistema de manutenção da qualidade	Implementação do sistema de manutenção autônoma
8	Avaliação dos resultados	Documentação do processo de implementação	Programa de treinamento em manutenção e TPM	Construção do plano de manutenção preventiva
9		Plano de auditoria para melhoria contínua	Extensão do TPM para o ambiente de escritórios	Implementação do indicador OEE para os equipamentos
10			Auditoria do processo de implementação do TPM	Auditoria do processo de implementação do TPM

Tabela 4.3: Implementação do TPM em ambientes industriais (Continuação)

4.7 Consolidação da implementação do TPM

O TPM, conforme já discutido, não apresenta suas etapas de implementação definidos, uma vez que é orientado à aplicação dos pilares. Por o TPM estar incorporado aos fundamentos da produção enxuta e da Qualidade Total, a consolidação da implementação será feita considerando as implementações apresentadas (Figura 4.3) e a metodologia de implementação do *Lean Six Sigma* que, conforme apresenta Tenera and Pinto (2014), segue as seguintes etapas: (1) Definição, (2) Mensuração, (3) Análise, (4) Melhoria e Desenvolvimento, (5) Controle. Desta forma a pesquisa consolida o TPM com as seguintes etapas (Figura 4.4):

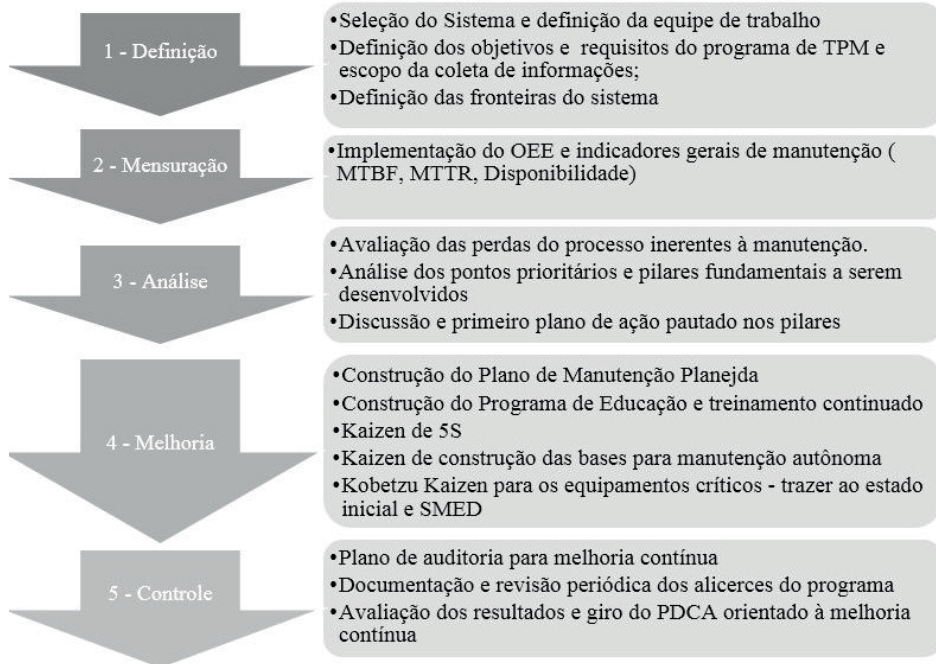


Figura 4.4: Consolidação da implementação do TPM

A primeira etapa diz respeito as definições inerentes ao processo produtivo aonde será implementado, a equipe responsável pela implementação e a definição do escopo do projeto do Programa de TPM. Nessa primeira etapa são delineados os objetivos e as métricas selecionadas para avaliação dos resultados do programa. São definidas as principais informações que devem ser coletadas para desenvolver o TPM e traçadas as estratégias de implementação dos pilares.

A segunda etapa é de mensuração dos indicadores fundamentais. Nesse momento são implementados os principais indicadores de desempenho de manutenção, com destaque para o OEE - a principal métrica utilizada pelo TPM. Como observado na Tabela 4.3 do capítulo de Revisão Bibliográfica, alguns autores propõem a mensuração do OEE nas últimas etapas de implantação do TPM, por acreditarem que primeiro deve-se desenvolver as bases do programa para depois introduzir as métricas de controle continuado. Entretanto, a maioria dos autores corrobora a implementação dos indicadores nos estágios iniciais, assim como o processo de implementação do *Lean Six Sigma*. É coerente a ideia de implementação em estágios iniciais, por gerar comparação instantânea da eficácia do programa, frente aos objetivos traçados e a condição inicial pré-implementação.

A terceira etapa é de análise e avaliação das condições iniciais. Nesta etapa são avaliados os impactos das perdas produtivas, a partir da avaliação e discriminação do OEE dos equipamentos e de cada etapa do processo produtivo estudado. Com isto, são

definidos os pilares prioritários a serem desenvolvidos no escopo do Programa de TPM. Orientado aos oito pilares fundamentais, é elaborado um primeiro plano de ação para iniciar o processo de implementação do TPM.

A quarta etapa de melhoria é referente ao processo de implementação do programa em si. Com base nos pilares e no processo de implementação estudado foram destacados os principais pontos: a construção de um plano de manutenção planejada, o programa de educação e treinamento contínuo e a realização de inúmeros Kaizen (5S, manutenção autônoma, SMED, *Poka-Yoke*, etc.).

O programa deve ser iniciado com os dois pilares fundamentais: o primeiro de manutenção planejada que traça as ações da função manutenção e o segundo pilar de educação e treinamento, que é o centro do programa: a participação e criação de uma cultura organizacional que subsidie a implementação do TPM, que é um sistema orgânico orientado à ação e ao desempenho humano e a evolução contínua.

Ainda no contexto de implementação, são desenvolvidos e aplicados os Kaizen no *gemba*. É consolidado em qualquer programa de *Lean Manufacturing* que o primeiro passo de implementação é a construção de um programa de 5S, que dá as bases para os próximos passos. Em seguida, as implementações estudadas apontam que devem-se desenvolver o plano de manutenção autônoma, que está estreitamente correlacionado ao programa de educação e treinamento; os colaboradores precisam ser treinados e educados para tomar decisão e executar intervenções simples de manutenção nos equipamentos. Os próximos passos são a introdução de SMED, para redução do tempo de *setup* e aumento da disponibilidade dos equipamentos e de *Poka-Yoke*, para aumentar a conformidade dos itens produzidos, reduzindo as taxas de refugo e retrabalho de produção.

Finalmente, a última etapa diz respeito ao controle. Nessa etapa são consolidados e avaliados os indicadores e métricas bem como, é desenvolvido um plano interno de auditoria do programa. É nesse momento que deve ser elaborado uma das ações mais importantes, o processo de documentação e registro da implementação, que, com o plano de melhoria contínuo deve ser revisado periodicamente.

MATUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE - RCM

5.1 Fundamentos

Desde o fim da Segunda Guerra mundial os Estados Unidos tem dominado duas questões no desenvolvimento industrial: (1) inovação tecnológica, que têm criado necessidades no mercado consumidor; e (2) volume de produção, devido ao adensamento da indústria norte americana nos mercados mundiais. Nesse sentido, a partir da década de 1960, a gestão de qualidade e a eficiência operacional têm ganhado destaque na pesquisa para sistemas industriais, seja para aumentar a disponibilidade dos ativos físicos, seja para aumentar a produtividade das linhas e células de produção (Lazzaroni, 2011).

A indústria aeroespacial se desenvolveu de forma significativa durante a guerra fria, e ainda na década de 1960 se iniciou o estudo de componentes voltado a determinação da taxa de avaria dos equipamentos, na indústria de aeronaves. Pode-se chamar de um prelúdio do sistema RCM (Smith and Hawkins, 2004).

O sistema de manutenção RCM é definido por Moubray and Network (1997) como, um processo usado para determinar o que deve ser feito para assegurar que, qualquer item físico continue a desempenhar as funções requeridas pelos seus usuários em seu atual contexto operacional.

Para isso, é necessário responder a sete questões básicas do item sob análise: (1) Quais são as funções e os padrões de desempenho dos itens em seu atual contexto operacional? (2) De que maneira eles falham em cumprir suas funções? (3) Quais são as causas de cada falha funcional? (4) O que acontece quando ocorre cada falha? (5) Quais são as consequências de cada falha? (6) O que pode ser feito para prever ou prevenir cada falha? (7) O que deve ser feito se não houver nenhuma tarefa preventiva apropriada? (Mendes and Ribeiro, 2011; Smith and Mobley, 2011).

O RCM é conhecido como uma "confiabilidade desde a concepção", abordagem está baseada e centrada em confiabilidade. Isto ocorre porque o programa visa alcançar a segurança e a confiabilidade inerente a capacidade de um equipamento ao mínimo custo. O objetivo fundamental do RCM é dar ao equipamento a oportunidade de alcançar o máximo nível de confiabilidade que seja consistente com a segurança, o ambiente e as metas operacionais, favorecendo o lucro da organização (Manzini et al., 2015).

Igba et al. (2013) completam que, isto é alcançado abordando as causas básicas de falhas do sistema, mitigando-as ou prevendo seus modos de falhas. Smith and Hinchliffe (2003) propõe que "o objetivo central do RCM é estabelecer um processo sistemático de análise que permita a definição de tarefas de manutenção de qualquer item físico, visando a garantia da confiabilidade e da segurança operacional ao menor custo possível". Isto é, preservar as funções do sistema, identificar os modos de falha, determinar a importância das falhas e selecionar as atividades de manutenção planejada mais eficazes e aplicáveis. Para o estabelecimento de tais objetivos, o autor propõe a aplicação de sete passos, con-

forme ilustrado na Figura 5.1:

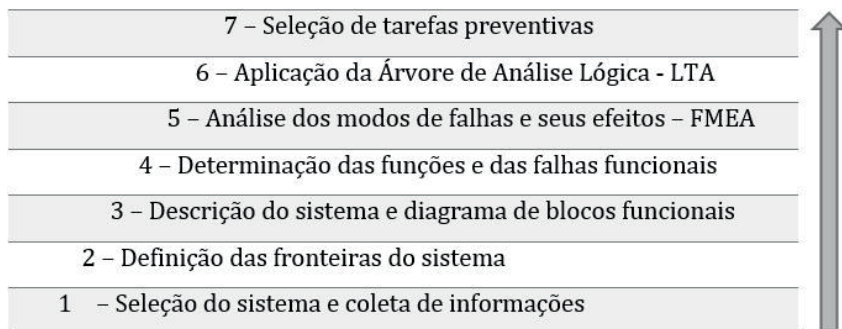


Figura 5.1: Os sete passos básicos para a aplicação da RCM

Fonte: Smith and Hawkins (2004)

Segundo Lazzaroni (2011) o RCM atua em diversas dimensões da gestão industrial, sobretudo no concernente a redução de custos durante o ciclo de vida (life-cycle cost) dos equipamentos. Este sistema atua diretamente ligado ao estudo e avaliação dos modos de falha de equipamentos, da capacidade (*“capability”*), isto é, funcionar regularmente com o mínimo de intervenção, e na previsão e estudo de avarias quanto a confiabilidade (*“reliability”*). A manutenção busca assegurar a qualidade dos produtos por meio da eficiência e correto funcionamento dos equipamentos. Para garantir a qualidade pretendida, as engenharias de confiabilidade e de manutenção possuem processos e maneiras de assegurá-la sob determinado nível de confiabilidade, sob a percepção do estágio no ciclo de vida em que cada equipamento se encontra.

Alebrant Mendes and Duarte Ribeiro (2014) inter-relacionam as ferramentas básicas utilizadas no RCM com o contexto da manutenção industrial. Parte-se da análise inicial do ciclo de vida do ativo físico. A engenharia da confiabilidade, o fator humano e o suporte logístico inter-relacionados visam assegurar a qualidade pretendida para o ativo. Cada área por sua vez dispõe de técnicas e procedimentos específicos para atuar na manutenção de forma econômica e eficaz.

Portanto, o RCM serve como um guia para identificar as atividades de manutenção com as respectivas frequências, amparando os elementos mais importantes do ambiente considerado. Este sistema não é uma fórmula matemática, o seu sucesso é baseado na análise funcional e das particularidades do cenário operacional realizada por uma equipe de revisão, cujo esforço permite a geração de um sistema de gestão de manutenção flexível, adaptado para as necessidades de manutenção real da organização (Smith and Hinchcliffe, 2003).

5.2 Estudo de confiabilidade

Segundo Fogliatto and Ribeiro (2009) definição de confiabilidade está atrelada a probabilidade de um item sobreviver até um tempo t de interesse. A definição matemática da probabilidade se dá pela modelagem dos tempos até a falha, que é o tempo transcorrido desde que o item inicia o seu funcionamento até a falha. Conhecendo-se a distribuição de probabilidade que melhor se ajusta aos dados de falha é possível calcular a probabilidade de falha - $F(t)$ e a sua complementar, a confiabilidade - $R(t)$, a partir de uma lei de vida $\phi(t)$.

$$F(t) = \int_0^t \phi(t)dt \quad (5.1)$$

$$R(t) = \int_t^{+\infty} \phi(t)dt \quad (5.2)$$

Vale ressaltar que as equações 5.1 e 5.2 são complementares sob uma distribuição de probabilidade de lei de vida (Figura 5.2). Nesse sentido os esforços críticos devem ser direcionados a obter a melhor curva que traduza os dados de falhas coletados Assis (2010).

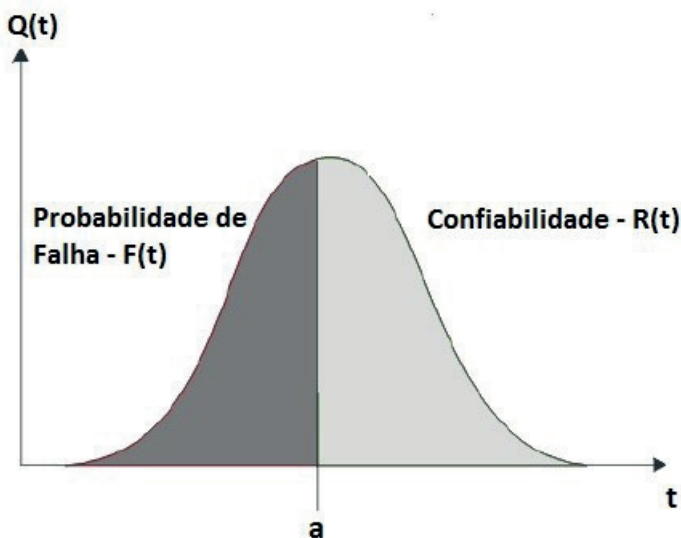


Figura 5.2: Probabilidade de falha e a confiabilidade na lei de vida dos componentes

Os conceitos de confiabilidade e de qualidade são constantemente confundidos. Fogliatto and Ribeiro (2009) diferencia os dois conceitos ao relatar que a confiabilidade incorpora a passagem do tempo, o que não ocorre com a qualidade, que consiste em uma

descrição estática de um item ou equipamento.

A função Weibull é muito utilizada na literatura devido a sua adaptabilidade na descrição do tempo de vida até a falha, isto é, ajusta-se aos dados de falha, mediante a modificação de seus parâmetros (Assis, 2010). A função de densidade de probabilidade da Weibull de três parâmetros tem a seguinte forma:

$$\phi(t) = \frac{\alpha}{\beta} \cdot \left[\frac{t - \gamma}{\beta} \right]^{\alpha-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\beta}\right)^\alpha} \quad (5.3)$$

Onde:

γ : parâmetro de localização, corresponde ao menor valor assumido por t .

α : parâmetro de forma, traduz o mecanismo de degradação. Quanto maior for o seu valor, mais a moda da função se desloca para a direita.

β : parâmetro de escala, corresponde ao valor característico de ajuste ou vida característica.

Os parâmetros da curva Weibull são obtidos por verossimilhança estatística, por meio das equações 5.4 e 5.5 para k dados suspensos (censurados) e r dados completos de falhas.

$$\frac{1}{\beta} = \frac{1}{r} \cdot \sum_{i=1}^r \ln t_i - \frac{\sum_{i=1}^r t_i^\beta \cdot \ln t_i - \sum_{j=1}^k c_i t_i^\beta \cdot \ln t_j}{\sum_{i=1}^r t_i^\beta \cdot \ln t_i - \sum_{j=1}^k c_i t_i^\beta} \quad (5.4)$$

$$\alpha = \left(\sum_{i=1}^r \frac{t_i^\beta}{r} + \sum_{j=1}^k \frac{c_i t_i^\beta}{r} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (5.5)$$

De Almeida et al. (2015); Fogliatto and Ribeiro (2009) apresentam alguns conceitos básicos para o estudo de confiabilidade: manutenibilidade ou manutenibilidade, tempo médio até avarias, tempo médio entre avarias, tempo médio de reparação, disponibilidade, função de risco e a curva de mortalidade ou sobrevivência:

1. Manutenibilidade ou manutenibilidade: é uma característica inerente a um projeto de sistema ou produto, e se refere à facilidade, precisão, segurança e economia na execução de ações de manutenção nesse sistema ou produto, isto é, a capacidade de realizar manutenção em um dado item .
2. Tempo médio até avarias (MTTF): este indicador, do inglês “*mean time to failure*”, pontua o intervalo de funcionamento de um item até a sua falha.
3. Tempo médio entre avarias (MTBF): este indicador, do inglês “*mean time between failure*”, assim como o , pontua o intervalo de funcionamento de um

item até a sua falha, mas é utilizado para sistemas reparáveis, isto é, aqueles item que, por meio de uma intervenção de manutenção, podem ser reparados.

4. Tempo médio de reparo (MTTR): este indicador, do inglês “*mean time to repair*”, é uma das principais métricas de manutenibilidade, e calcula o tempo médio de reparação de um item, a partir do histórico de intervenções de manutenção neste item.
5. Disponibilidade (A): a disponibilidade (“*availability*”) é a capacidade de um item desempenhar a sua função requerida em um instante ou período de tempo, considerando um plano de manutenção apropriado (2.6).

$$A = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad (5.6)$$

6. A função de risco - $h(t)$: pode ser interpretada como a quantidade de risco associada a uma unidade de tempo t , é a própria taxa de falhas, isto é, o número de avarias esperado no tempo, conforme Equação 2.7.

$$h(t) = \frac{\phi(t)}{R(t)} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)\Delta t} \therefore R(t) = \exp \left[- \int_0^t h(t)dt \right] \quad (5.7)$$

7. Curva de mortalidade ou sobrevivência: também é conhecida como “curva da banheira” (Figura 5.3), representa a curva de representação de $h(t)$. Nela, distingue-se três períodos característicos: período de *mortalidade infantil*, quando os componentes são novos e ainda passam por uma fase de ajustes, apresentam uma taxa de falhas elevada; período de *vida útil* ou *maturidade*, que é a fase de estabilidade dos componentes e se estende por parte significativa da vida do item; e o *envelhecimento* ou *degeneração*, quando a taxa de risco volta a crescer e aponta o momento de obsolescência do item.

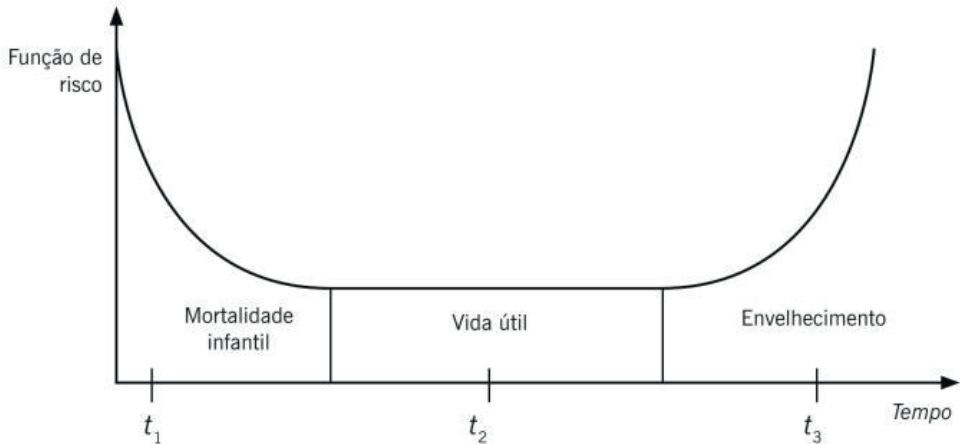


Figura 5.3: Representação da “curva da banheira

Fonte: Fogliatto and Ribeiro (2009, p.11)

5.2.1 Teste de Laplace

O estudo de confiabilidade pressupõe que os itens estudados se encontram na fase de “vida útil” da curva da banheira. Nela, as falhas são linearmente distribuídas, diferentemente da fase de “mortalidade infantil” onde as falhas tendem a ficar mais espacadas, e da fase de “envelhecimento” onde a frequência de avarias cresce continuamente (Birolini, 2014; Lazzaroni, 2011).

A literatura recomenda a utilização do Teste de Laplace para verificar se os dados são linearmente distribuídos, considerando o número de falhas N , os tempos t_i onde verifica-se a falha e o tempo total de ensaio t_o (Assis (2010)).

$$ET = \sqrt{12N} \cdot \left[\frac{\sum_{i=1}^N (T_i - \frac{T_0}{2})}{N \cdot T_0} - 0,5 \right], N \geq 4 \quad (5.8)$$

$$ET = \sqrt{12(N-1)} \cdot \left[\frac{\sum_{i=1}^{N-1} T_i}{(N-1) \cdot T_N} \right], N \geq 4 \quad (5.9)$$

Usa-se a Equação 5.8 quando o tempo de ensaio é balizado por um tempo estipulado, e a Equação 5.9, quando o tempo de ensaio é finalizado em uma determinada falha. Caso o módulo do ET calculado seja menor que o módulo de um valor crítico dado pela inversa da normal a um determinado nível de significância, então os dados são independentes e

linearmente distribuídos, ou seja, o item se encontra na sua vida útil e a confiabilidade pode ser ajustada por uma curva exponencial negativa, ao invés da distribuição Wei-bull. Neste caso o MTBF pode ser obtido pela razão simples entre o tempo de ensaio e o número de falhas verificado.

Caso não passe no teste, isto é, o módulo de ET calculado é maior que o módulo do valor crítico, então, vários autores sugerem a aplicação do Modelo Duane para ajuste da curva, de forma a minimizar o erro de cálculo do MTBF (Assis, 2010; Fogliatto and Ribeiro, 2009; Manzini, Riccardo; Regattieri, Alberto; Pham, Hoang; Ferrari, 2010).

5.2.2 Modelo Duane

É um modelo desenvolvido para ajustar os dados, de forma a tornar o cálculo do MTBF factível (Assis, 2010). Fernández and Márquez (2012) destacam que a utilização do Modelo Duane é dinâmica, uma vez que o item, ou tende a entrar na vida útil, ou tende a se degenerar completamente a ponto de ser substituído. O modelo segue os seguintes passos:

1. Realização prévia do Tésté de Laplace que aponte a hipótese de dados de falha não-linearmente distribuídos.
2. Inserção das taxas de falhas e do MTBF em uma escala de logaritmo natural
3. Construção de um modelo de regressão linear - linearização da curva
4. Determinação das taxas ajustadas e dos valores assumidos de MTBF

5.2.3 Análise de Modo e Efeito de Falha - FMEA

O FMEA (*"Failure Mode and Effects Analysis"*) é um método para analisar potenciais problemas de confiabilidade no ciclo de desenvolvimento do projeto, tornando mais fácil a tomada de medidas para superar essas questões, assim, revalorizar as confiabilidades através do design (Ebrahimipour et al., 2010).

É uma técnica que tem como objetivos: (I) reconhecer e avaliar as falhas potenciais que podem aparecer em um produto ou processo; (II) identificar ações que possam eliminar ou reduzir a chance de ocorrência dessas falhas; e (III) documentar o estudo e criar um referencial técnico de procedimentos e melhores práticas (Fogliatto and Ribeiro, 2009).

Entre as vantagens do uso do FMEA destaca-se o auxílio na identificação dos parâmetros a serem controlados para reduzir ou detectar a condição de falha, a ajuda na priorização dos modos potenciais de falha e na avaliação objetiva de alternativas, bem como a estruturação da documentação do trabalho para se estabelecer um referencial teórico e técnico (Arabian-Hoseynabadi et al., 2010; Fogliatto and Ribeiro, 2009).

Index	Etapas	Descrição
1	Definir o processo que será analisado	A partir de indicadores de produtividade e econômico-financeiros escolhe-se o processo que será objeto de estudo do FMEA.
2	Definir a equipe, priorizando os aspectos multidisciplinares	Considerando o processo escolhido, monta-se a equipe de trabalho, pautada na interdisciplinaridade e na necessidade de requisitos técnicos para a eficácia do FMEA
3	Definir a não conformidade (modo da falha)	São levantados os modos de falhas, isto é, as falhas-padrão e aquelas esporádicas para os equipamentos do processo estudado. Como fonte de coleta de dados utiliza o histórico de falhas dos equipamentos, com o qual se extrai a moda dos eventos.
4	Identificar seus efeitos	Nesse momento, com a identificação das falhas, são identificados os efeitos ao processo
5	Identificar sua causa principal e outras causas	Com uso de ferramentas da qualidade, são investigadas as causas das falhas.
6	Priorizar as falhas através do nível de risco	É calculado o nível de risco - R, por meio do produto entre os itens qualitativos (escala atribuída de 0 a 10) de severidade (S), ocorrência (O) e detecção (D).
7	Agir através de ações preventivas (detecção)	Por meio de um plano de ações preventivas, é o momento de agir com base no relatório gerado pelas ações anteriores. Ações que devem ser tomadas considerando o risco e a exequibilidade do grupo de trabalho, considerando fatores técnicos e financeiros.
8	Definir o prazo e o responsável pela ação preventiva	Monta-se o 5W2H, e é definido os prazos e os responsáveis pelas ações preventivas.

Tabela 5.1: Etapas do FMEA

Fonte: Adaptado de Assis (2010); Barends et al. (2012); Xenos (2014).

O FMECA é uma variação do FMEA original e leva em consideração a análise de risco por meio de probabilidade e cenários estocásticos (Yssaad et al., 2014). O FMECA, atualmente, é denominado de Military Standard MIL-STD-1629A e teve o seu início na indústria automobilística nos anos 1970. No FMECA há a fase de análise crítica, que lança mão de estudo de confiabilidade, deixando o FMEA tradicional com uma abordagem mais quantitativa (Mkandawire et al., 2015; Trafialek and Kolanowski, 2014).

5.3 Implementação do RCM em ambientes industriais

A implementação de um sistema de RCM apresenta etapas de implementação consolidada pela filosofia. Entretanto o processo de implementação não é uniforme. Inúmeros trabalhos de vários autores apresentam o processo de implementação de RCM em ambientes fabris (Tabela 4.3) e observa-se certo grau de variabilidade nas etapas de implantação.

Etapa	Carretero et al. (2003)	Smith and Hawkins (2004)	Márquez (2007)	Mendes and Ribeiro (2011)
1	Identificação dos sistemas a partir da análise de sistemas críticos	Seleção do Sistema e coleta de informações	Análise crítica dos requisitos e definição da equipe	Definição e capacitação da equipe de manutenção
2	Seleção do sistema e definição dos requisitos e dados a serem coletados	Definição das Fronteiras do sistema	Seleção do sistema	Listagem de componentes e classificação de suas funções
3	Análise Crítica dos itens do sistema e confiabilidade	Descrição do sistema e descrição dos blocos funcionais	Análise Crítica dos itens e descrição dos blocos funcionais	Classificação e análise de falhas
4	Avaliação do estado dos itens e a sua manutenibilidade	Determinação das funções e das falhas funcionais	Aplicação do FMEA	Classificação de componentes
5	Seleção das tarefas de manutenção	Análise da árvore de falhas e seus efeitos - FMEA	Aplicação da lógica do RCM	Classificação da abordagem de manutenção
6	Programação de Manutenção	Aplicação da Árvore de Análise Lógica - LTA	Definição do plano de manutenção preventiva	Programação da manutenção
7	Avaliação continuada da manutenção	Seleção de tarefas preventivas	Documentação e avaliação da aplicação	Dimensionamento de estoques
8				Monitoramento de indicadores

Tabela 5.2: Implementação do RCM em ambientes industriais

Etapas	Selvik and Aven (2011)	Igba et al. (2013)	Yssaad et al. (2014)	Mkandawire et al. (2015)
1	Seleção do sistema	Seleção do sistema	Seleção do sistema	Seleção do sistema por análise de risco
2	Definição do plano de manutenção preventiva a partir da gestão de risco	Identificação funcional das falhas	Definição dos requisitos para coleta de dados	Definição e análise do sistema
3	Definição dos intervalos de manutenção	Aplicação do FMECA	Descrição do sistema em blocos funcionais	Análise de confiabilidade dos itens do sistema
4	Identificação e aplicação das tarefas de manutenção	Seleção das tarefas de manutenção	Aplicação do FMECA	Aplicação do FMECA
5	Avaliação de incertezas e apresentação de resultados	Determinação dos intervalos de manutenção	Decisão de manutenção preventiva	Programação de manutenção

6	Revisão do sistema e consolidação do plano de manutenção preventiva	Análise comparativa de manutenção planejada e sua implementação	Identificação e aplicação das tarefas de manutenção	Avaliação do sistema
7		Retroalimentação do sistema de dados	Programação de Manutenção	
8			Melhoria do sistema e retroalimentação	

Tabela 5.2: Implementação do RCM em ambientes industriais (Continuação)

5.4 Consolidação do RCM

O RCM é um sistema que apresenta um escopo de implementação melhor definido, apesar das variantes registradas na Tabela 5.2 do capítulo Revisão Bibliográfica. Foram divididas as ações em quatro grandes etapas: (1) Definição; (2) Diagnóstico e Análise; (3) Implementação; e (4) Controle e Avaliação.

Apesar de apresentar algumas variantes, o escopo é similar ao processo de implementação do *Lean Six Sigma*, que por sua vez é orientado ao Ciclo PDCA.

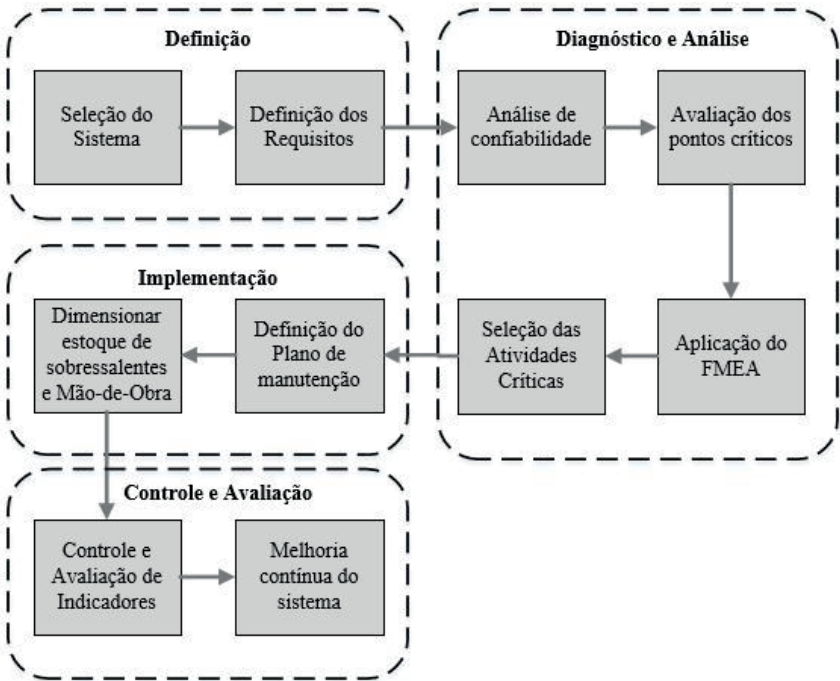


Figura 5.4: Consolidação da implementação do RCM

A etapa de definição contempla a Seleção do sistema e a definição dos requisitos,

isto é, é definido o escopo do projeto, as principais diretrizes e a definição da equipe de implementação. A definição dos requisitos compreende desde a alocação de colaboradores até o investimento necessário para implementar o RCM.

A segunda etapa é inerente ao diagnóstico e análise. O RCM dá um foco consistente direcionado a esta macro etapa. Todo o RCM é projetado com base nos diagnósticos obtidos a partir da coleta de informações e dados operacionais. A etapa engloba a avaliação dos pontos críticos, a análise de confiabilidade, tem termos de indicadores fundamentais de MTBF, MTTR, Confiabilidade, Probabilidade de falha, Função de Risco e Disponibilidade (A). Nela é aplicado o FMEA que dar´a subs´ídios para a Seleção das atividades críticas e dos equipamentos priorit´arios na implantação.

Na terceira etapa são definidos e implementados o plano de manutenção, considerando os itens que necessitam de manutenção preventiva, preditiva e/ou corretiva. É ainda dimensionado os estoque de materiais sobressalentes, rearranjos produtivos para redundâncias que melhorem a confiabilidade do sistema e a alocação de mão de obra necessária para por em prática o plano de manutenção.

Finalmente, na última fase de controle e avaliação, é feito a avaliação da implementação do sistema e dos indicadores definidos. É ainda desenvolvido um plano de melhoria contínua para reavaliação das metas dos indicadores.

DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS

Neste capítulo são traçados os fundamentos do sistema híbrido, com base na consolidação do TPM e do RCM. Para isto são discutidos os aspectos complementares e discordantes dos dois modelos gerenciais de manutenção, bem como é realizada a análise crítica a ambos. Dessa maneira são alinhadas as diretrizes da proposta híbrida de gerenciamento da manutenção industrial, orientado a`s duas filosofias com a utilização de práticas consolidadas de gestão para a função manutenção. O capítulo é dividido em três partes fundamentais: a primeira de desenvolvimento, onde são montadas as bases para a elaboração do modelo conceitual híbrido de gestão de manutenção, a segunda é a apresentação do modelo e o aprofundamento em suas etapas e a terceira são as discussões inerentes ao modelo proposto.

6.1 Desenvolvimento

6.1.1 Análise crítica e lacunas observadas nos dois modelos de gestão de manutenção

Análise Crítica à Manutenção Produtiva Total

A principal característica de um programa de TPM é o fato deste ser orgânico, isto é, pautado na iteração humana e no desenvolvimento contínuo do sistema, a partir da melhoria contínua proposta pelo *lean*. Rodrigues and Hatakeyama (2006) já discutiram que os principais motivos de fracasso na implementação de um programa desta natureza está diretamente relacionado ao desempenho e à adesão dos envolvidos na implementação e manutenção do Programa de TPM. Nakajima (1988), o pai do TPM, frisa de forma contínua a necessidade da adesão de todos os colaboradores da empresa para o sucesso do programa. Assim, o pilar Educação & Treinamento transpõe a importância dos demais, ganhando uma conotação estrutural e determinante.

Neste sentido, o TPM é orientado a pessoas e não a processos, é um sistema que incorpora os princípios fundamentais da produção enxuta: envolvimento das pessoas e foco na eliminação de desperdícios. Por possuir essa característica, pode muitas vezes, negligenciar os processos, a necessidade de técnicas e a observação de como por em prática o que cada um dos pilares se propõe.

Relativo ao pilar manutenção planejada, o TPM salienta a importância do planejamento, mas não se adensa com profundidade em questões fundamentais:

1. Quais equipamentos devem ter manutenção preventiva?
2. Qual a periodicidade de intervenções planejadas?
3. Quais as metas do pilar Manutenção Planejada?

4. Quais os ganhos frente a ausência de planejamento?

A resposta a essas perguntas transpõe as fronteiras do próprio TPM, e sua decisão e apuração frequentemente estão nas mãos dos gestores do programa, com base em seu histórico e no próprio conhecimento do processo. A carência de um arcabouço quantitativo mais sólido, no escopo do próprio programa, pode fazer com que as decisões tenham como base o empirismo, ao invés de métodos, modelos e técnicas mais robustas para a apuração.

Outro ponto observado é referente ao pilar de melhoria contínua especializada (Kobetsu Kaizen), que, no contexto da produção enxuta, entende que os equipamentos podem ser renovados ciclicamente, sem a necessidade contínua de substituição. Esta abordagem é bem coerente, pois se debruça sobre a necessidade real de aquisição de ativos: “preciso realmente deste novo equipamento?”, “recuperar o que já tenho não é mais vantajoso do que adquirir um novo?”. Frequentemente as decisões mais coerentes são orientadas para a recuperação e melhoria do ativo, o que fundamenta este pilar. Todavia, conforme apresentado no Capítulo 2, todo equipamento apresenta uma lei de vida que, frequentemente, segue ao modelo da Curva da Banheira.

Nesses princípios, deve-se levar em consideração que todo equipamento apresenta uma vida útil, bem como uma fase de degeneração natural. O pilar de melhoria específica é fundamental para o monitoramento, e também, expansão desta vida útil. Mas a degeneração é inevitável e, apenas com o uso de métodos quantitativos inerentes a taxa de avarias é possível medir e avaliar a possibilidade de troca, considerando, obviamente, aspectos econômicos e a probabilidade de falha desses ativos.

Em termos de indicadores de desempenho, o TPM, centraliza sua avaliação no OEE como métrica fundamental. É um indicador completo e pertinente, mas ele não cobre questões inerentes a aspectos financeiros, taxa de avarias, probabilidade de falhas e manutenibilidade.

Análise Crítica à Manutenção Centrada em Confiabilidade

O RCM é um programa, que inicialmente, mesmo com a proposta de se debruçar sobre a confiabilidade, tangenciava as técnicas e métodos quantitativos inerentes a engenharia de confiabilidade. A partir de meados da década de 1990 começou a ganhar uma conotação mais quantitativa em termos de análise e definição de requisitos. É um programa orientado e focado no processo e no comportamento dos equipamentos em sua lei de vida.

O RCM é muito mais um sistema gerencial do que operacional, por focar no processo, é menos direcionado às pessoas que o TPM. Apresenta uma estratégia clara do tipo *top-down*, em que a gerência define os requisitos e procedimentos para orientar e aplicar na operação. Requer mão de obra especializada e qualificada em termos de engenharia de confiabilidade, controle estatístico do processo e gestão de operações. A acuracidade, o

rigor nos limites de controle, a programação e o monitoramento continuado são oriundos da indústria em que o sistema nasceu, a aeroespacial.

Por ser orientado ao processo, a valorização dos colaboradores, sobretudo os operacionais pode ficar em uma escala secundária de importância, o que pode comprometer de forma decisiva no sucesso da implementação do RCM. Uma oportunidade de inclusão poderia ocorrer na implementação do FMEA, um dos passos fundamentais do RCM, mas as pontuações e avaliações normalmente são realizadas pelos gerentes responsáveis da área.

Nesse contexto, uma das principais críticas feitas ao RCM é que ele representa um excelente sistema para o controle da função manutenção, mas que tem lacunas relativas ao processo de melhorias no processo produtivo.

6.1.2 Comparação entre as abordagens de TPM e RCM

Com a análise crítica, torna-se mais claro que o foco e o meio dos dois sistemas estudados são distintos. O TPM é orientado a pessoas, enquanto o RCM tem foco no processo. Enquanto o TPM se debruça mais no campo filosófico, a nível de geração de uma cultura organizacional, o RCM se orienta mais em técnicas e ferramentas de apoio a tomada de decisão.

Ao se comparar as Figuras 4.4 e 5.4, nota-se que o processo de implementação segue uma mesma perspectiva lógica e organizada, com as seguintes macro etapas: (1) definição do sistema, da equipe e do escopo do projeto; (2) coleta de informações e análise; (3) implementação; (4) monitoramento e controle orientado a revisão de dados e melhoria contínua. Essa organização também apresenta aderência com os modelos clássicos Ciclo PDCA e o Ciclo DMAIC.

A necessidade de planejamento é tratada como ponto crítico na implementação de RCM e TPM. Enquanto o RCM traduz isto em um plano de manutenção preventiva sustentado pelo FMEA desenvolvido, o TPM tem no pilar manutenção planejada seu ponto de ataque a falta de planejamento. Nesse sentido, o TPM é muito criticado por orientar os equipamentos a terem manutenção preventiva, já o RCM leva em consideração o risco e os custos associados para decidir se o modelo mais coerente é a manutenção preventiva ou a corretiva, onde ambos se enquadram como manutenção planejada, ainda que seja corretiva.

O TPM nasceu na indústria japonesa, no escopo da filosofia de produção enxuta (*Lean Manufacturing*), e por isso tem seu foco direcionado para a gestão de pessoas, por entender que o sistema é orgânico e o seu sucesso está diretamente relacionado a aplicação de uma cultura organizacional orientada a eliminação de desperdícios. Isto, por meio da formação de uma equipe multidisciplinar com trabalho orientado e que agrega a participação dos níveis mais operacionais para a tomada de decisões, tendo portanto uma

estratégia de implementação do tipo *bottom-up*. A métrica fundamental de um sistema de TPM é o OEE, orientado ao objetivo de “zero desperdício”.

O RCM, por outro lado tem a sua origem calcada na indústria norte-americana, no setor aeroespacial, em pesquisa profundas de minimização de riscos e falhas. O foco de sua metodologia é orientado aos processos, por meio da aplicação de métodos quantitativos para controle de uma equipe especializada. A abordagem do trabalho é técnico- ferramental, isto é, tem a sua diretriz voltado às ferramentas aplicadas, em uma organização do DMAIC, enquanto etapas de implementação. O seu objetivo fundamental é “zero falhas” por meio do acompanhamento da confiabilidade dos ativos físicos.

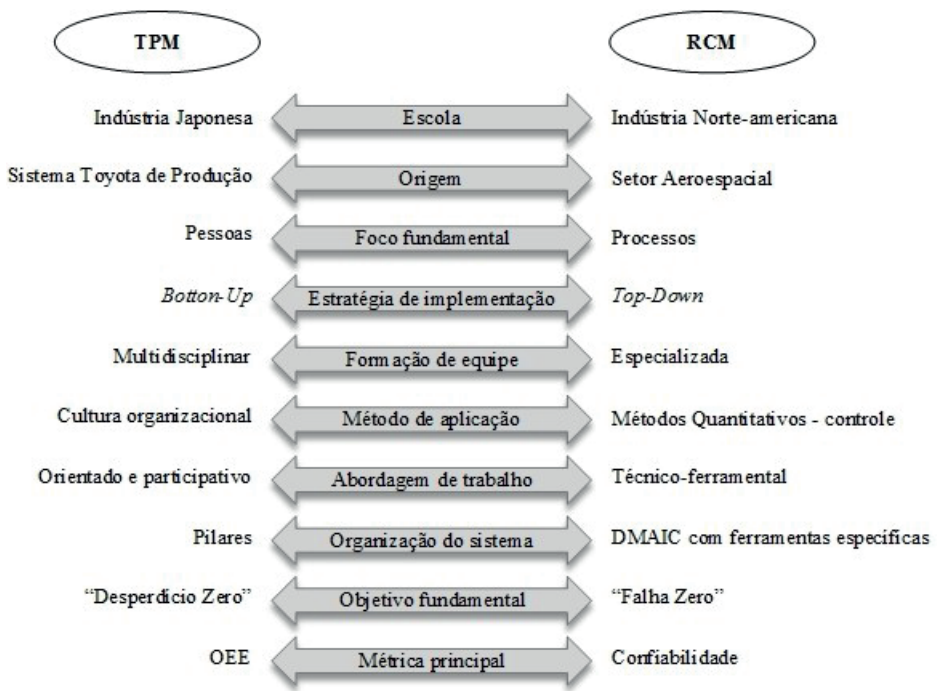


Figura 6.1: Comparação entre o TPM e o RCM

A Figura 6.1 sintetiza as diferenças fundamentais entre as duas abordagens clássicas de gestão de manutenção industrial. Ressalta-se que os objetivos fundamentais, embora orientados de forma diferentes, se convergem. Enquanto o TPM foca na eliminação de perdas, sobretudo aquelas que impactam no OEE. O RCM se debruça sobre a eliminação das falhas, por meio da redução da probabilidade de falhas dos ativos, o que reduz, consequentemente o risco associado.

6.2 Abordagem Híbrida R-TPM

A partir da análise crítica e da comparação entre a Manutenção Produtiva Total e a Manutenção Centrada em Confiabilidade, traca-se a proposta híbrida que tem em si os seguintes objetivos:

1. Prover a integração das duas abordagens clássicas de gestão de manutenção
2. Verificar as lacunas de cada abordagem e direcionar a uma técnica que preecha esta lacuna
3. Articular o proposta híbrida de forma sistemática, em etapas e com a definição de indicadores de gestão de manutenção

A estratégia para definição das etapas de implementação do sistema híbrido é baseada na lógica do Ciclo PDCA (Figura 6.2), por incorporar o aspecto cíclico e o fundamento da melhoria contínua. Diferentemente da abordagem do TPM, os fundamentos não serão elucidados em pilares ou princípios, uma vez que isto pode gerar uma falha no direcionamento para implementação. Portanto, as etapas definidas são projetadas com base na facilidade de implementação, execução das atividades e controle com acurácia.

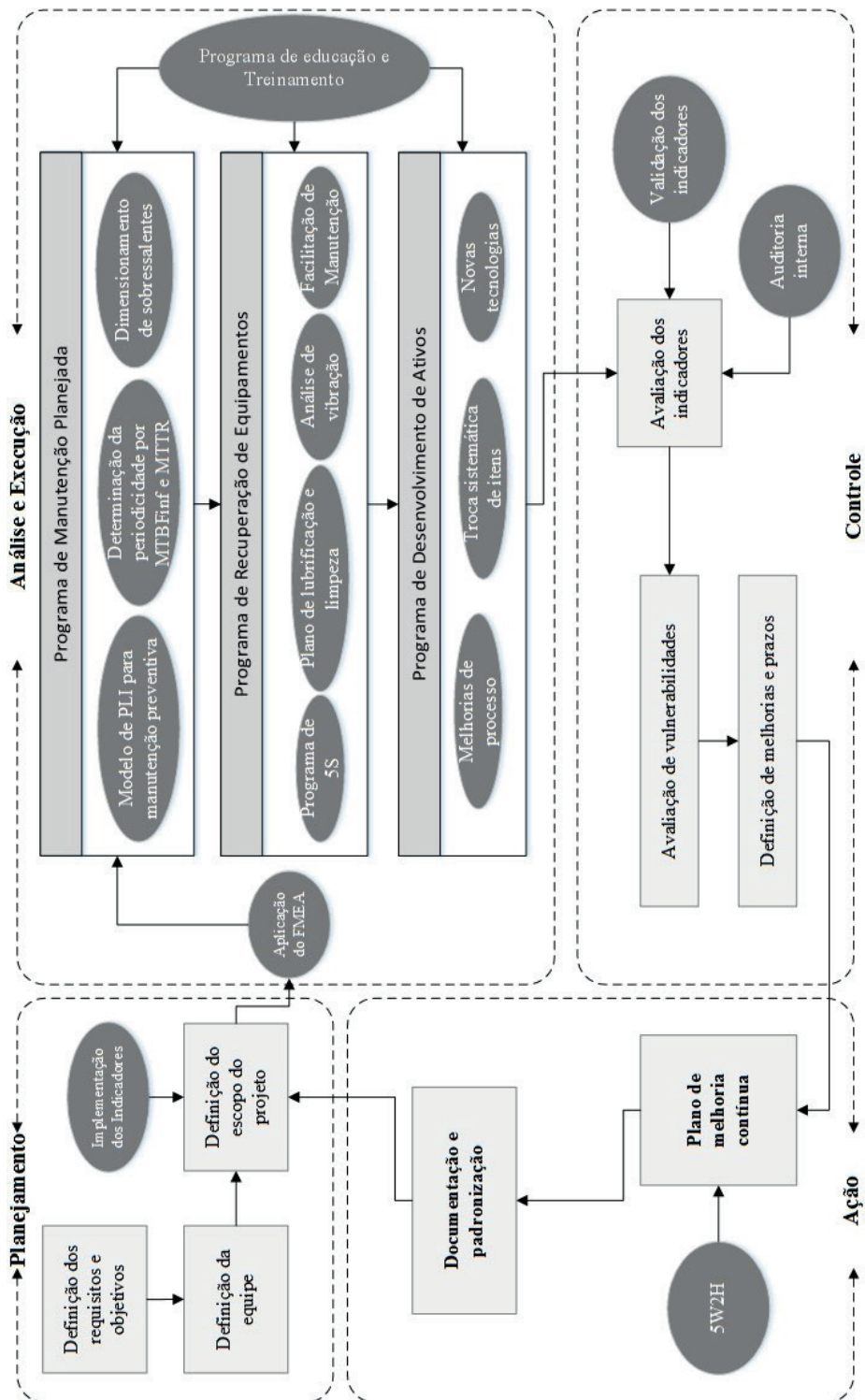


Figura 6.2: Etapas e atividades do sistema híbrido

6.2.1 Planejamento

O planejamento (Figura 6.3) é a etapa inicial do projeto de implementação do sistema híbrido. Em ambos os sistemas de manutenção estudados essa fase apresenta grande destaque. Nela, são definidos inicialmente os objetivos da implementação, aquilo que se pretende atingir e o que será impactado. Em sequência é montada a equipe de trabalho de caráter interdisciplinar, integrando vários colaboradores de funções e departamentos diferentes. A necessidade de um corpo técnico especializado como propõe o RCM é suplantado pela interdisciplinaridade e pela qualificação. o sistema híbrido impacta diversos setores da organização, sobre diferentes espectros por isso, a visão e a percepção de uma equipe interdisciplinar é valorizada.

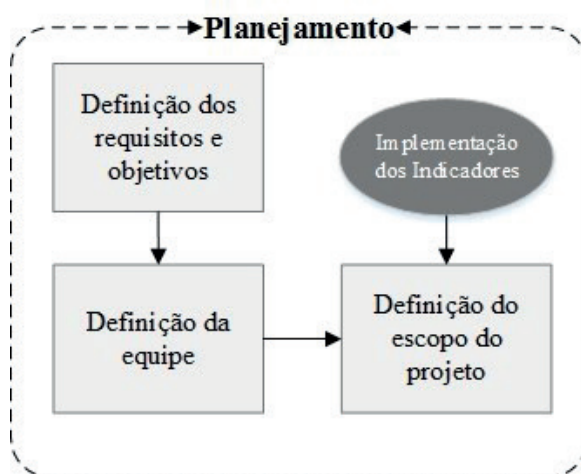


Figura 6.3: Etapa de Planejamento do sistema híbrido

Com a definição da equipe, é possível construir o escopo completo do trabalho. Este deve conter quais setores/departamentos irá abranger o projeto, quantos e quais funcionários serão envolvidos, quais os objetivos estratégicos inerentes a implementação do sistema híbrido feito de forma alinhada a estratégia e objetivos gerais da organização, as métricas para avaliação de desempenho e as respectivas metas, bem como os investimentos estimados da implantação do sistema híbrido para gestão de manutenção (Figura 6.4).

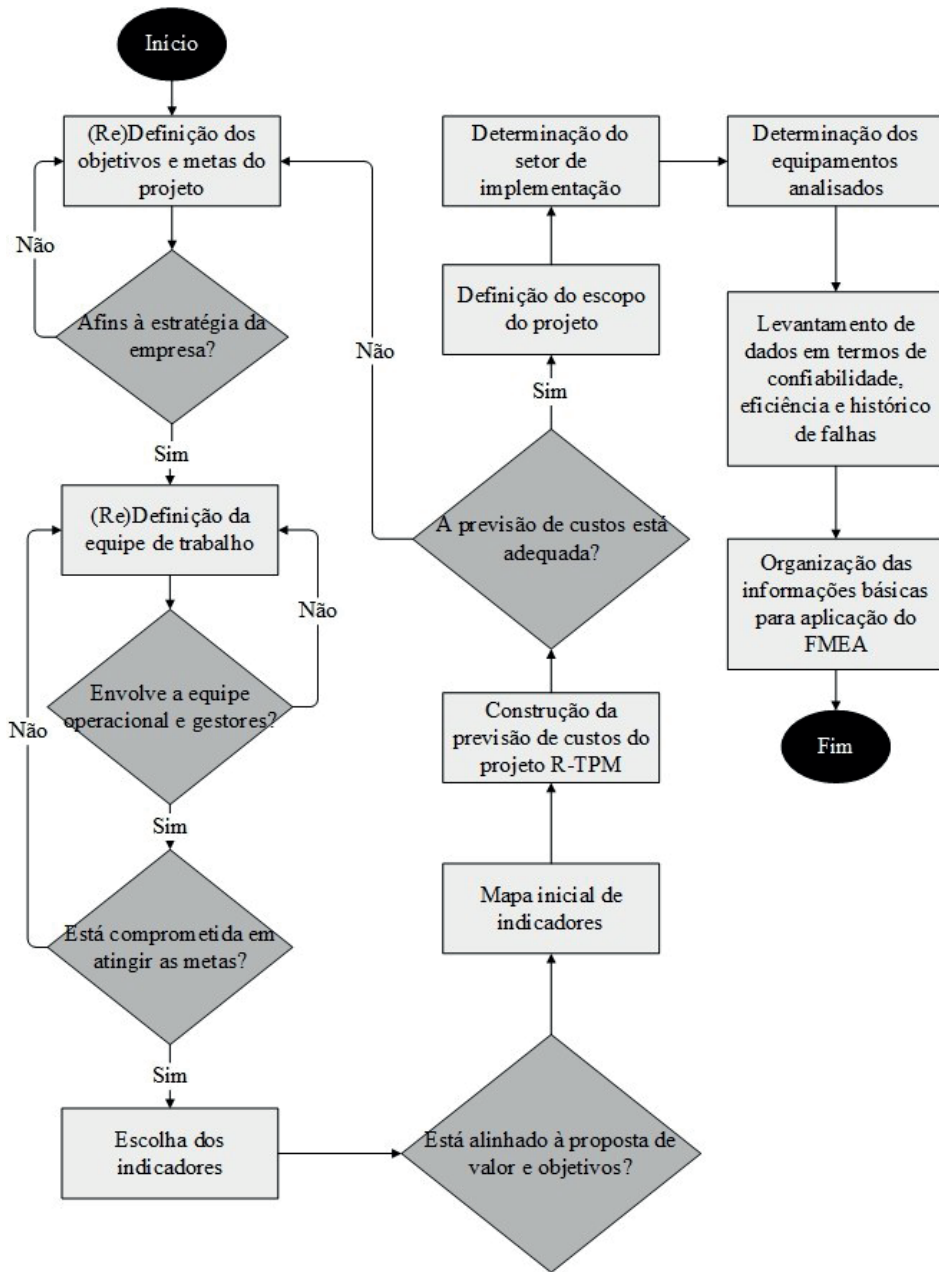


Figura 6.4: Fluxograma da etapa de planejamento do R-TPM

A descrição minuciosa do escopo da implementação é necessária para acompanhamento durante todo o projeto, por representar um detalhamento dos objetivos traçados. A definição de indicadores é uma atividade importante.

6.2.2 Análise e execução

Trata-se da etapa crítica de análise e execução. Inicialmente, sugere-se a aplicação do FMEA, que, a partir de sua metodologia de implementação dará um panorama do estado crítico dos ativos físicos contemplados no escopo ao analisar potenciais problemas de confiabilidade, causas e modos de falha.

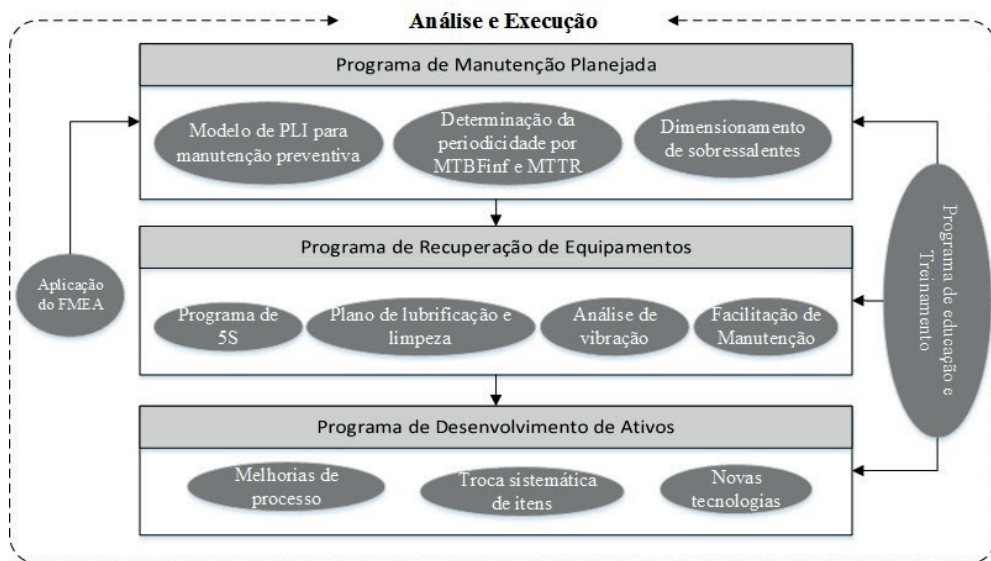


Figura 6.5: Etapa de Análise e Execução do sistema híbrido

A coleta de informações na etapa anterior contempla dados de confiabilidade, custos e todos os indicadores apresentados, que, junto com o FMEA dar a suporte para a aplicação do Plano de Manutenção Planejada. Este plano contempla o dimensionamento de sobressalentes e o plano de manutenção preventiva (com a preditiva, quando necessário, nesse escopo). Para isto, sugere-se um modelo de Programação Linear Inteira (PLI), conjugado com a determinação da periodicidade das intervenções de manutenção preventiva.

Este modelo foi desenvolvido tendo como base aspectos fundamentais do RCM a nível de risco, confiabilidade e custo. Ele pontua em um dos aspectos supracitados a respeito do TPM, uma tendência de orientar todos os equipamentos e demais itens a sofrerem manutenção preventiva. Este modelo auxilia na tomada de decisão com base em risco e custo e, a manutenção corretiva pode vir a ser o melhor tipo de intervenção de manutenção. Sobretudo para estes casos, o nível de estoque de itens sobressalentes deve ser bem dimensionado a partir de uma previsão de demanda, ou modelo de reposição contínua acurado. O fluxograma com o processo de implementação do programa de manutenção preventiva é descrito na Figura 6.6.

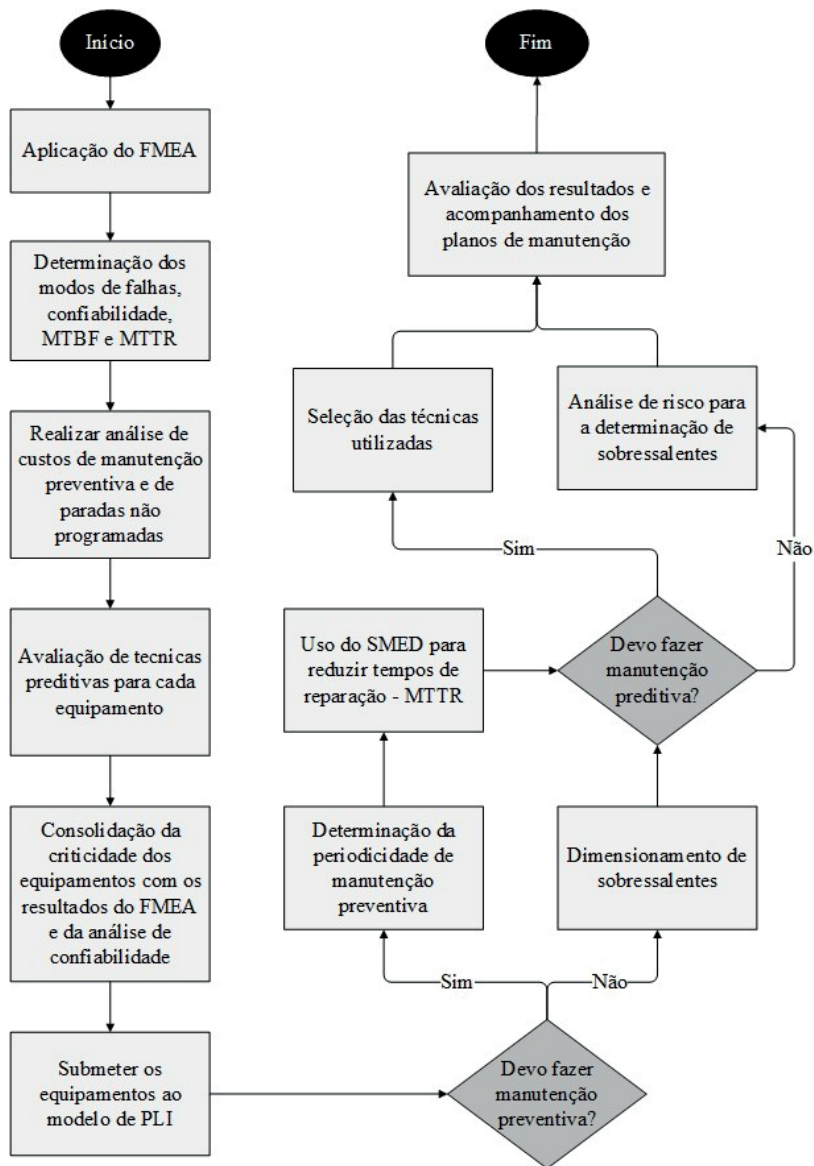


Figura 6.6: Fluxograma do programa de manutenção preventiva

O segundo programa, descrito no fluxograma da Figura 6.7, está diretamente relacionado a dois pilares abordados pelo TPM: Melhoria Específica e Controle Inicial. Trata-se de um programa de recuperação dos equipamentos, com prioridade para aqueles que são críticos ao processo produtivo ou aqueles que estão em condições precárias de funcionamento. Inicialmente, é desenvolvido um programa de 5S conjugado com a análise do layout para melhorias a nível de facilitação de manutenção e fluxo produtivo, em seguida é feita uma análise e acompanhamento no âmbito da engenharia mecânica, concernente

ao plano de lubrificação e limpeza periódica e análise de vibração.

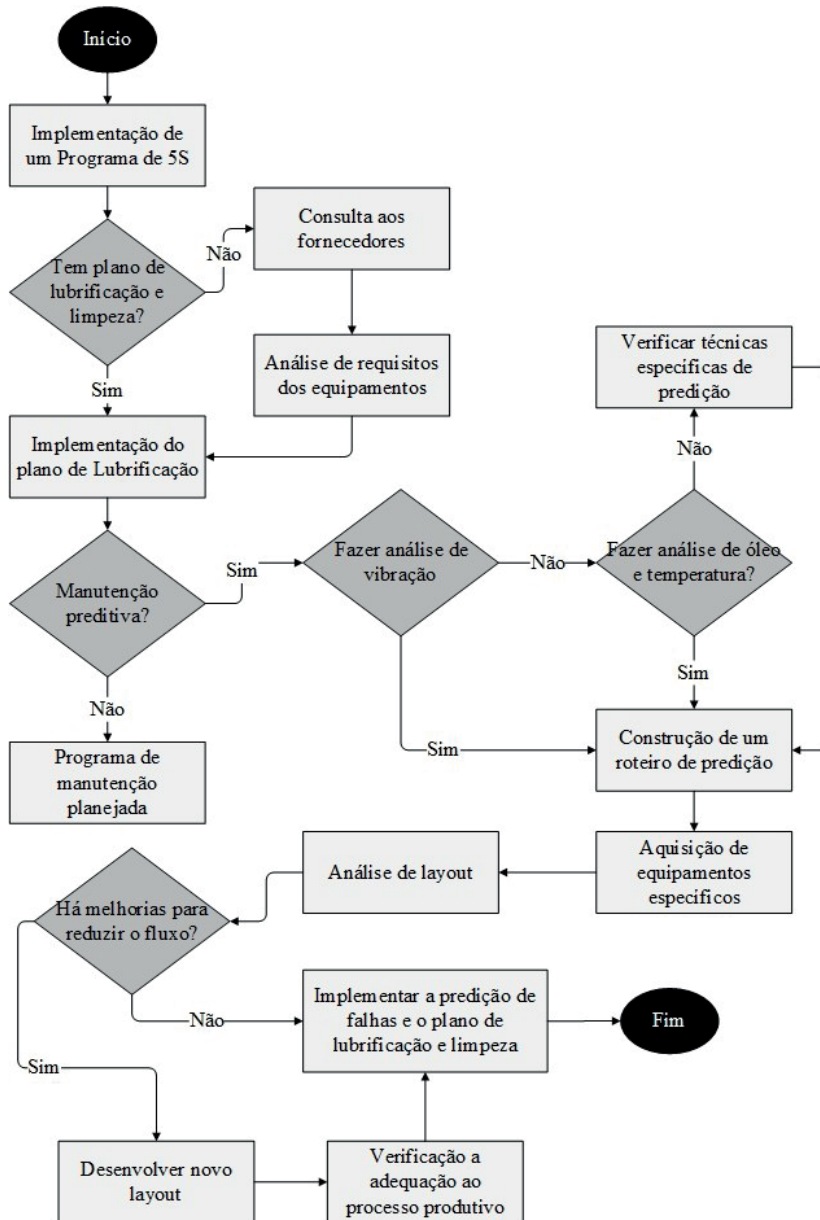


Figura 6.7: Fluxograma do programa de recuperação de equipamentos

O terceiro programa, descrito no fluxograma da Figura 6.8, é referente ao processo de melhoria contínua dos ativos físicos, em termos de melhoria do processo, troca sistemática de itens ou componentes de um determinado sistema e adoção de novas tecnologias com

impacto significativo no processo.

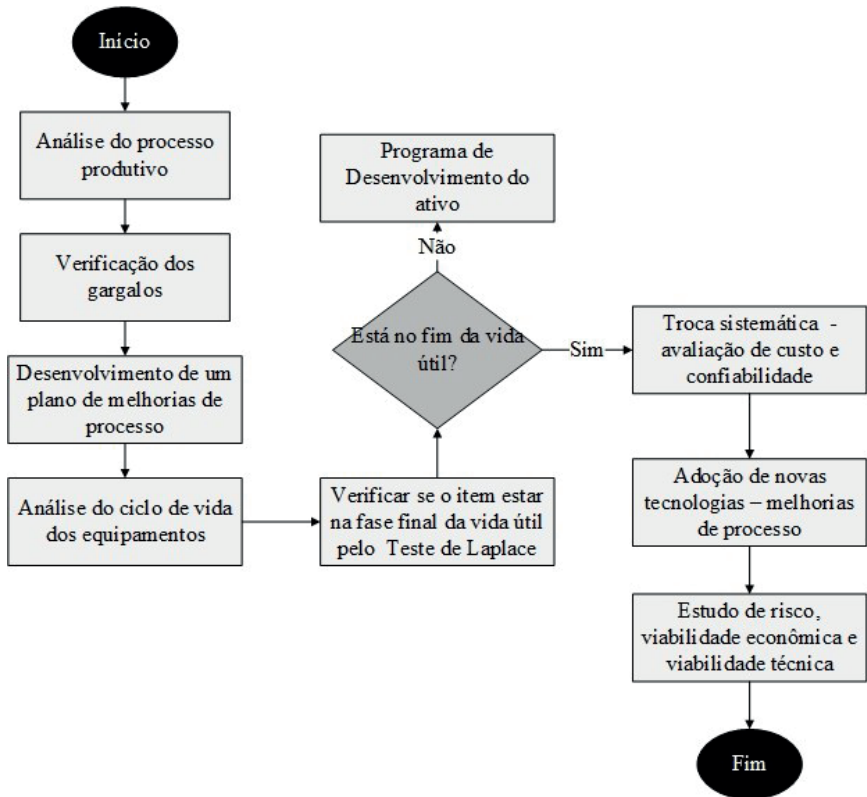


Figura 6.8: Fluxograma do programa de desenvolvimento de ativos

As ferramentas ilustradas (Figura 6.9) podem ser utilizadas para desenvolvimento dos processos e redução das perdas apontadas, sobretudo, pelo indicador OEE de cada equipamento. A troca sistemática de itens também deve ser analisada a partir da análise do valor esperado, sob uma perspectiva de árvore de risco, para responder a seguinte questão: “devo ou não trocar o item, do ponto de vista econômico e de sua disponibilidade?”. De Almeida et al. (2015, p.217) propõe um modelo matemático de minimização que pretende responder a essa questão, em específico.

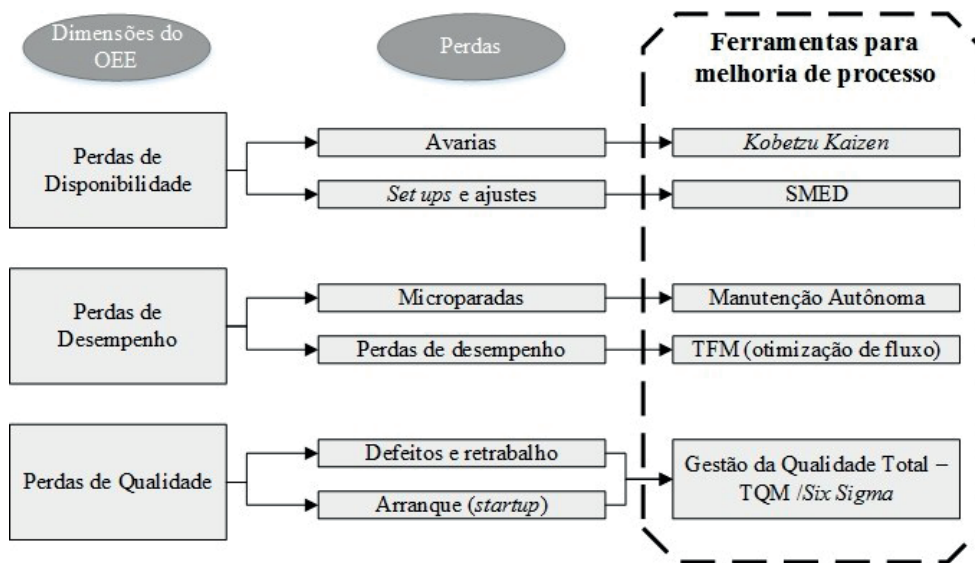


Figura 6.9: Melhorias de processo para mitigar as perdas

Fonte: Adaptado de(Assis, 2010)

Modelo de Programação Linear Inteira para determinação da manutenção preventiva

Considerando N ativos em uma lista de manutenção $L = \{1, 2, \dots, N\}$, para os quais deseja-se fazer uma manutenção preventiva para reduzir o risco do item falhar durante um período Q . Seja m_i o custo da manutenção preventiva no ativo i e suponha que dispõe-se de um capital $M < \sum_{i=1}^n m_i$, ou seja, não há recursos suficientes para dar manutenção em todos os itens. O problema é escolher em quais itens da lista devem ser feita a manutenção de forma a minimizar o prejuízo esperado com falhas (incluindo os custos de manutenção) sem ultrapassar o orçamento M .

Para cada item $i \in L$, vamos atribuir uma variável de decisão binária x_i , associada as seguintes ações:

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{fazer preventiva} \\ 0, & \text{não fazer} \end{cases}$$

Vamos considerar também três estados principais para cada item, cujas probabilidades de ocorrência são afetadas pela decisão x_i .

1. Estado OK – significa que o item funcionou perfeitamente durante o período considerado.
2. Estado FL – significa que o item sofreu uma falha leve, que pode ser consertada com um reparo rápido.

3. Estado FG – significa que o item sofreu uma falha grave, que necessitará de um reparo grave.

Na Figura 6.10 é apresentada uma árvore de possibilidades que ilustra a relação entre x_i e os estados de cada item.

Nesta árvore, β_i representa a probabilidade condicional de ocorrência de cada estado dado $x_i \in 0, 1$ e p_i representa o prejuízo associado a cada evento. Estes valores devem geralmente incluir custos com reparos e outros prejuízos operacionais em função da falha do item. Os valores de p_i devem ser parametrizados para cada aplicação, de acordo com relatórios prévios de manutenção.

Neste caso, β_1 representa a probabilidade do item i estar funcionando dado que não foi feita a manutenção preventiva e p_1 é o prejuízo associado, que na maioria dos casos práticos será igual a zero. De forma análoga, β_2 representa a probabilidade do item sofrer uma falha leve, dado que não foi feita uma manutenção preventiva, neste caso, o prejuízo é denotado por p_2 , enquanto que β_3 representa a probabilidade do item sofrer uma falha grave, dado que não foi feita uma manutenção preventiva, analogamente, o prejuízo neste caso é denotado por p_3 . O lado direito da árvore é simétrico, com a diferença de que a manutenção preventiva foi realizada.

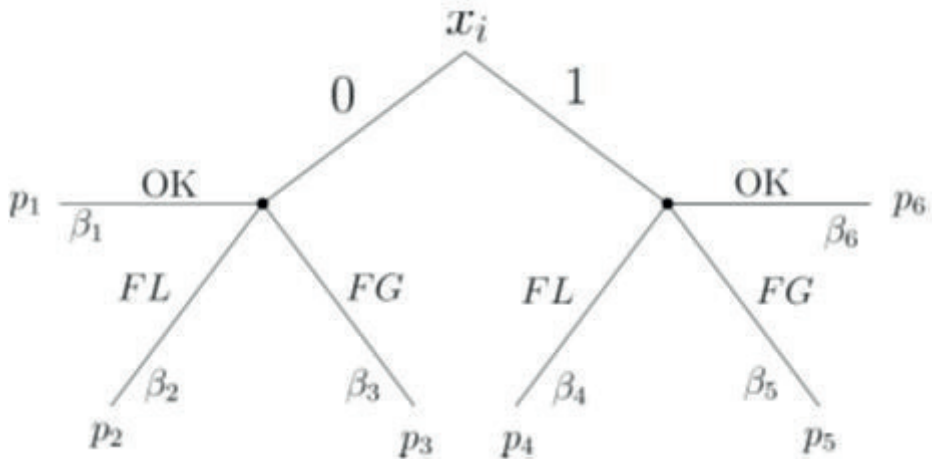


Figura 6.10: Árvore do modelo de PLI para manutenção

A função objetivo do problema (Equação 6.1), que descreve o valor esperado do prejuízo esperado com falhas, incluindo os custos de manutenção, pode ser escrita como:

$$E[P] = \sum_{i=1}^n (1 - x_i) \cdot (\beta_1 p_1 + \beta_2 p_2 + \beta_3 p_3) + x_i (m_i + \beta_4 p_4 + \beta_5 p_5 + \beta_6 p_6) \quad (6.1)$$

Assim, pode-se estabelecer o seguinte problema de programação binária:

Minimizar: $E[P]$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n x_i m_i \leq M$$

$$x_i \in 0, 1$$

Nota-se que o modelo proposto é um problema de programação linear com N variáveis binárias e apenas uma restrição o que pode ser resolvido de forma factível para situações de aplicabilidade real utilizando *solvers* convencionais como o GLPK e até mesmo o MS Excelr, o que pode ser uma grande vantagem em termos de usabilidade prática.

Determinação da periodicidade da manutenção preventiva por MTBFinf e MTTR

Dois direcionamentos podem ser dados para determinar a periodicidade da realização de manutenção preventiva. O mais habitual, sobretudo em implementação de TPM, leva em consideração as especificações dos equipamentos, o conhecimento dos operadores acerca dos equipamentos e as restrições orçamentárias. No sistema híbrido apresentada, propõe-se uma abordagem quantitativa levando em consideração essencialmente dois fatores interdependentes: (1) a criticidade do ativo e (2) a otimização da disponibilidade.

Esta etapa é complementar ao modelo matemático apresentado no item anterior, uma vez que juntos é possível construir com mais assertividade um plano de manutenção preventiva.

O processo de determinação da periodicidade se inicia com a coleta de dados em termos de histórico de falhas e tempo médio de reparo. Em um primeiro momento, estes dados tendem a ser escassos, por falta de padronização ou sensibilização na coleta. Em seguida, os dados são analisados e são retirados os *outliers*. Em sequência, é realizado o Teste de Laplace para verificar se as falhas são linearmente distribuídas, com o objetivo de determinar se o item encontra em sua vida útil ou não.

Caso o resultado seja positivo (passe no teste) é calculado o MTBF pelo método tradicional e o MTBF inferior, para em sequência calcular a probabilidade de falha e a confiabilidade, por meio de uma distribuição exponencial negativa. Entretanto, se não passar no teste, para determinar o MTBF, os dados são submetidos ao Modelo Duane e, a confiabilidade é calculada por meio da distribuição Weibull. Finalmente, é calculada a periodicidade (Figura 6.11)

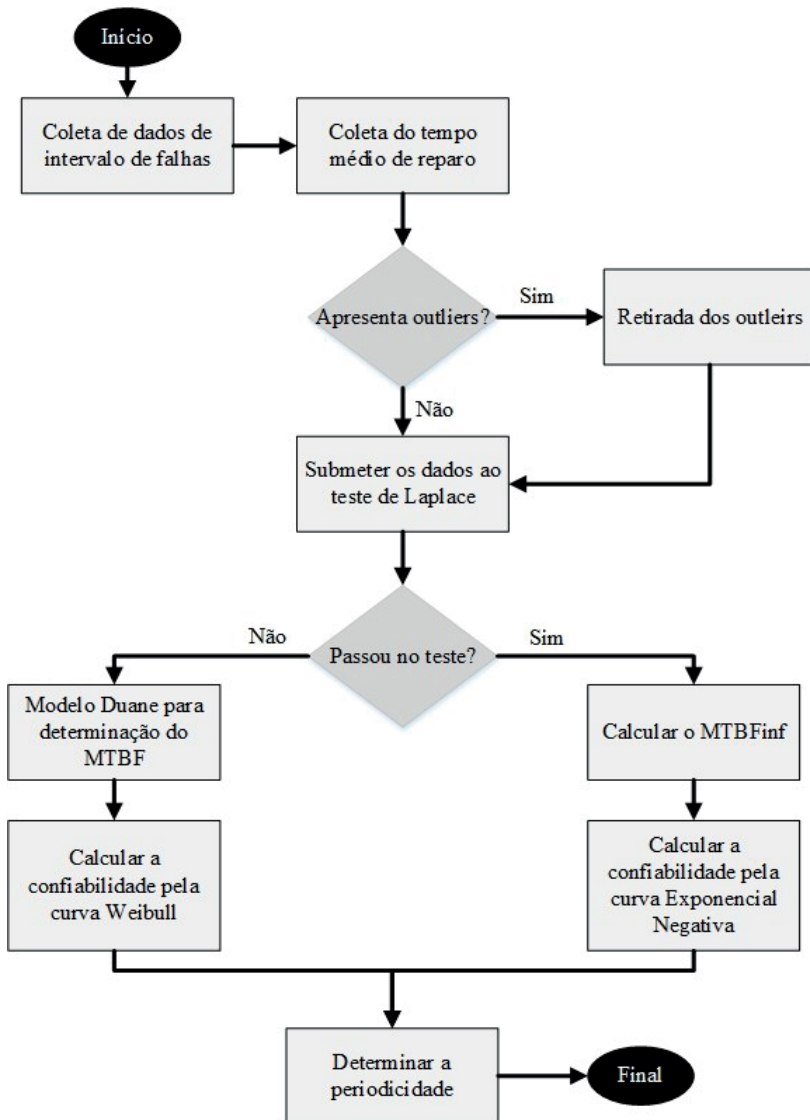


Figura 6.11: Processo de determinação da periodicidade da manutenção preventiva

Fonte: Baseado em Assis (2010)

Propõe-se a utilização de dois indicadores básicos da gestão de manutenção, em termos de confiabilidade: o $MTBF_{inf}$ e o $MTTR$. O primeiro, por enunciar o momento em que o item passa a ser suscetível a falha, sob um grau de significância estipulado. E o segundo, por estar diretamente atrelado a manutenibilidade, capacidade de executar manutenção.

$$P_i = MTBF_{inf}^i - MTTR_i \quad (6.2)$$

Desta forma, uma maneira simples e coerente é determinar a periodicidade (P_i) pela diferença entre o $MTBF_{inf}$ e o MTTR.

6.2.3 Controle

Na etapa de controle (Figura 6.12) é realizada, primeiramente, a avaliação dos indicadores, por meio de sua validação e ocorrência de uma auditoria interna regular. Com a apuração dos resultados são levantadas as vulnerabilidades encontradas e as oportunidades de melhorias, para em seguida definir o plano de melhorias e estipular os prazos necessários para tomada de ações e reavaliação dos indicadores.

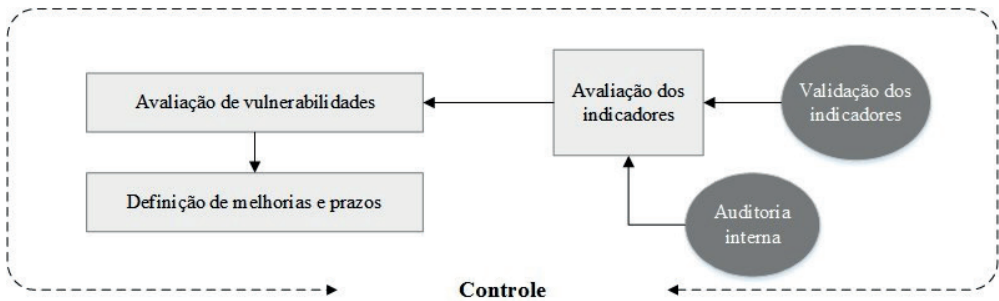


Figura 6.12: Etapa de Controle do sistema híbrido

A qualidade dos indicadores e avaliação das metas devem ser reavaliadas periodicamente, com base no planejamento traçado na primeira etapa. É fundamental a sensibilidade necessária para o acompanhamento e designação de metas. Em termos de manutenção há orientações distintas para diferentes tipos e nichos de negócios.

Enquanto na manufatura, por exemplo, o foco tende a ser a eliminação de desperdícios, para redução de custos e aumento da eficiência operacional; para outros segmentos, como serviços hospitalares e indústria aeronáutica, o foco está direcionado e minimização da ocorrência de falhas, riscos operacionais e aumento da disponibilidade.

A etapa de controle é escrita no fluxograma da Figura 6.13:

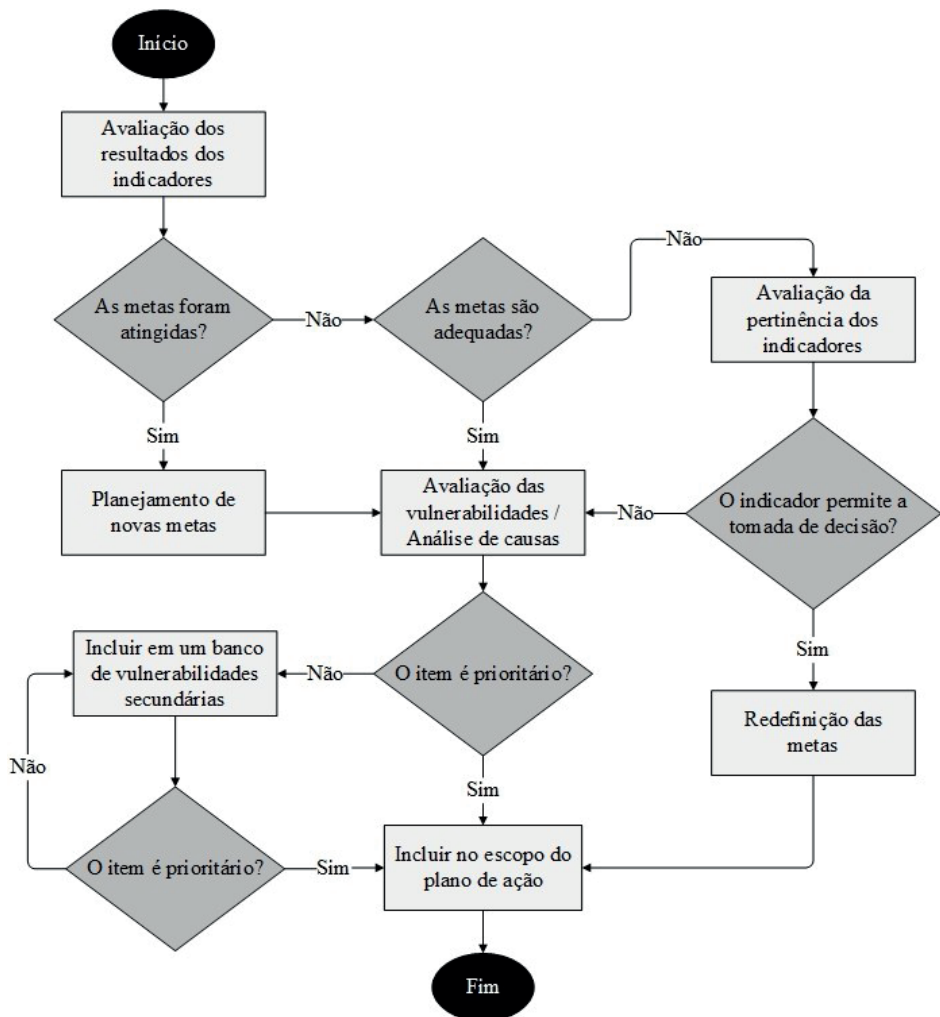


Figura 6.13: Fluxograma da etapa de controle

6.2.4 Ação

Finalmente, a última etapa diz respeito a ações posteriores à avaliação e controle. Nesse momento, constrói-se um plano de melhoria contínua, tendo como base a ferramenta 5W2H, para geração de um plano de ações. Inicia-se também o processo de documentação e padronização das atividades já validadas e atualizadas, que servirá de base para um novo escopo de melhoria contínua da gestão de manutenção (Figura 6.14).



Figura 6.14: Etapa de Ação do sistema híbrido

A padronização e documentação é uma etapa apresentada tanto no TPM quanto no RCM, o que ratifica a importância do registro das atividades desenvolvidas para que o conhecimento adquirido não seja perdido, bem como seja facilitado o treinamento de novos colaboradores. O processo de implementação da etapa de Ação é descrita no fluxograma da Figura 6.15:

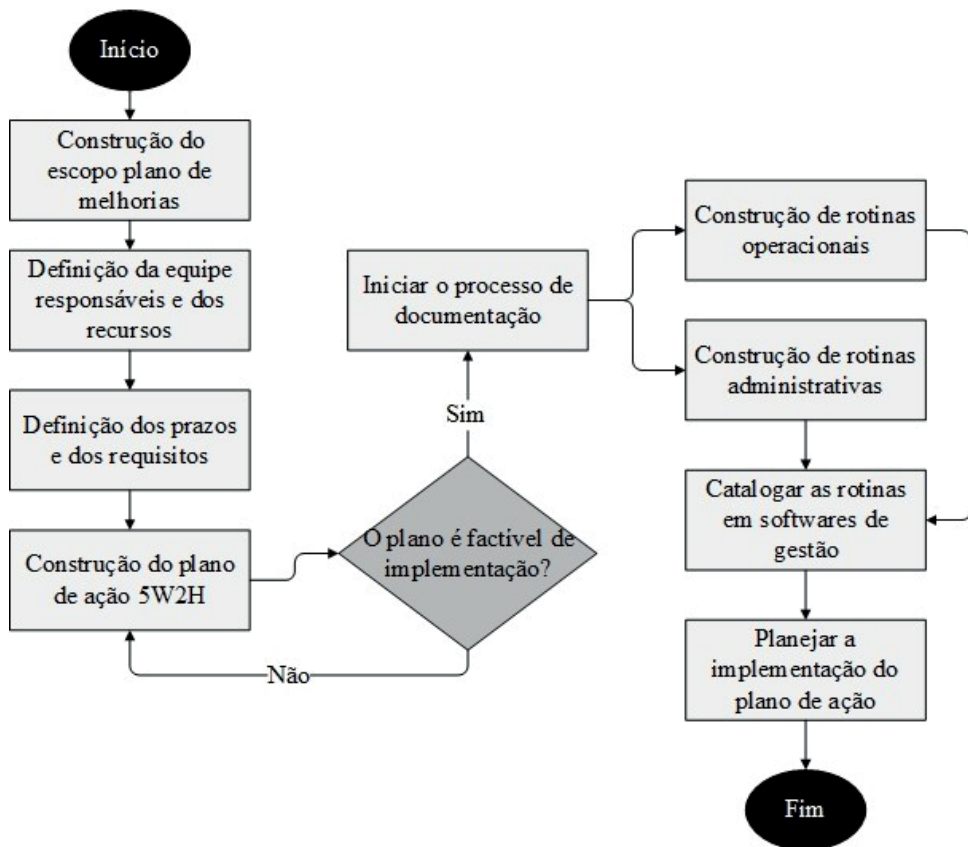


Figura 6.15: Fluxograma da etapa de ação

6.3 Análise de aplicabilidade

O estudo de caso exploratório descrito têm como objetivo dar uma visão global do processo de implementação e avaliar algumas técnicas apresentadas, como o modelo de PLI proposto, por meio de simulação computacional. Trata-se de uma aplicação a um caso real, cujos dados foram deflatados para preservar as informações da empresa.

A aplicação proposta é desenvolvida para um Terminal Logístico de Açúcar, cujas atividades fundamentais são realizar a troca do carregamento de açúcar do modal rodoviário para o ferroviário, bem como exercer o papel de um “pulmão” de produção, por estocar o produto. A Figura 6.16 apresenta o fluxograma do processo estudado

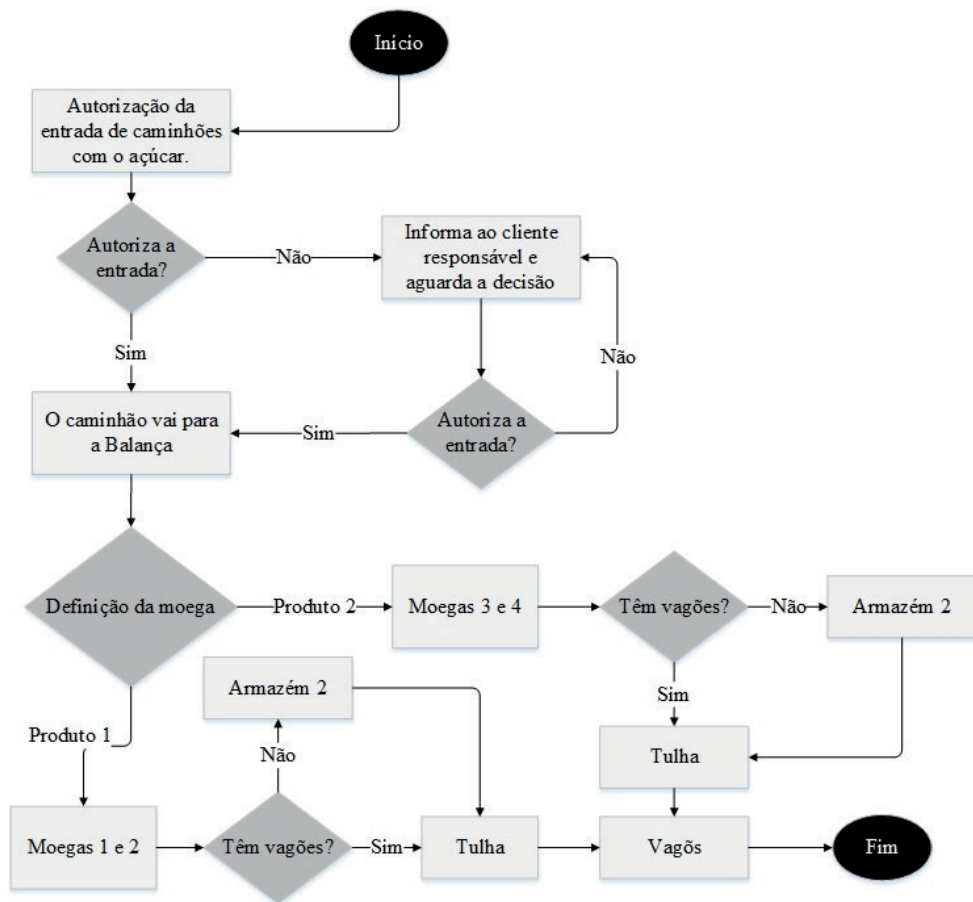


Figura 6.16: Fluxograma do terminal logístico de açúcar

O terminal está em uma cadeia de abastecimento que compete na dimensão custos, dessa forma as atividades de manutenção devem estar atreladas à redução dos custos e aumento da disponibilidade dos ativos físicos para aumentar continuamente a produtividade. Trata-se de uma operação com baixa intervenção humana, se comparado à manufaturas extensivas. A ação humana está essencialmente no processo de acompanhamento, regulação, manutenção e gestão, não na produção em si.

Verificou-se que a gestão de manutenção do terminal é corretiva e não planejada. A ausência de planejamento a nível tático e operacional para a equipe de manutenção incorre em custos. Não existe um plano de treinamento periódico e um sistema de gestão informatizada para o gerenciamento da função manutenção. Os primeiros esforços de desenvolvimento dos processos são tomados na direção de obter uma certificação de qualidade ISO 9001.

Modelo de implementação da etapa de planejamento

A aplicação do modelo tem por objetivo traçar e simular os resultados de aplicação de uma primeira rodada do R-TPM (Tabela 6.1). Conforme apresentado, na primeira etapa de planejamento são alinhados os objetivos e o escopo do projeto R-TPM. A Tabela apresenta os objetivos traçados, a dimensão do escopo do projeto e as metas estipuladas conforme as necessidades levantadas no terminal.

Objetivos	
1	Garantir que o terminal opere com o mínimo de interrupções devido a quebra de máquinas
2	Garantir que o terminal opere com nível de confiabilidade média de 80%
3	Operar de forma econômica em termos de custos de manutenção
4	Treinar e envolver os funcionários para obter efetividade e longevidade dos resultados do projeto
Dimensão do Escopo	
1	Implementar o programa inicialmente para os equipamentos mais representativos
2	Gastar no máximo mensalmente 30% do custo médio mensal dos últimos 12 períodos
3	Possuir uma equipe de 5 colaboradores de diferentes níveis de gestão
Metas	
1	Aumentar o MTBF dos equipamentos gargalo em 15% em 6 meses
2	Reduzir os custos médios de manutenção em 10% em 6 meses
3	Ter todos os funcionários com pelo menos 20h de treinamento em 6 meses
4	Mensurar o OEE em todos os equipamentos críticos em 3 meses

Tabela 6.1: Planejamento do projeto R-TPM para o terminal

Os objetivos foram traçados junto aos gestores considerando duas frentes: redução de custos de manutenção e parada não programada e a necessidade de treinar os colaboradores envolvidos direto ou indiretamente com a função manutenção. O investimento para o projeto foi limitado a 30% dos custos totais com manutenção do último ano (Figura 6.17) com duração prevista de seis meses e o escopo delimitado para os equipamentos mais representativos, tendo uma equipe de diferentes níveis de gestão para por em prática o projeto.

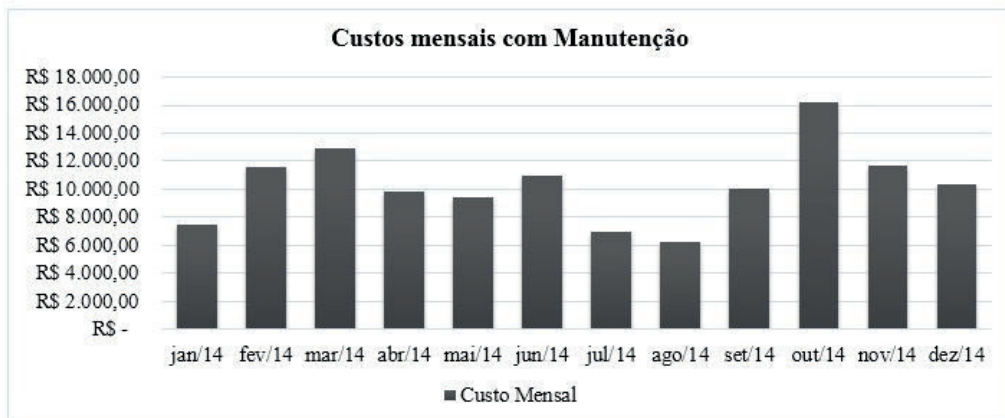


Figura 6.17: Gráfico de custos de manutenção do último exercício

A representatividade dos equipamentos foi dada a partir de uma classificação ABC realizada na organização, conforme a Tabela 6.2 apresenta.

Classe	Quantidade de equipamentos	Custos totais no último período	Representatividade
A	10	R\$ 79.338,20	64,13%
B	22	R\$ 26.524,42	21,44%
C	47	R\$ 17.852,02	14,43%

Tabela 6.2: Classificação ABC dos equipamentos quanto a função manutenção

Os 10 equipamentos classe A são: 3 elevadores de carga responsáveis por retirar a carga de açúcar das carretas e levar para o galpão de estoque, 6 balanças rodoviárias por onde as carretas são devidamente pesadas antes e depois do descarregamento e o exaustor principal do terminal. Estes equipamentos representam cerca de 64% nos custos totais de manutenção apurados no último período.

Ainda na etapa de planejamento foi delimitado os indicadores iniciais a serem implementados com base nos objetivos e na meta inicial do projeto (Tabela 6.3).

Indicadores	Significado	Cálculo	Complexidade do indicador	Frequência de coleta e análise	Responsável
OEE	Avalia a efetividade média dos equipamentos em termos de disponibilidade, desempenho e qualidade	$OEE = DISP.(\%) \times Desemp.(\%) \times Qual.(\%)$	Elevada	Mensal	Colaborador B
MTBF	Avalia o tempo médio entre avarias para sistemas reparáveis (consertáveis)	$MTBF = 1/tx \text{ de avarias ou Tempo de ensaio/n de falhas ou Modelo Duane para elementos fora da vida útil}$	Baixa	Mensal	Colaborador B
MTTR	É o tempo médio de reparo, avalia o trabalho de reparação de equipamentos	$MTTR = \text{média aritmética dos tempos de reparação}$	Baixa	Mensal	Colaborador B
Confiabilidade	Avalia a probabilidade de um equipamento continuar a desempenhar as suas funções conforme o especificado	Verificar cálculo para uma das curvas de probabilidade - $RT = 1 - \text{prob falha}$	Elevada	Semanal	Colaborador B
Custos Totais de Manutenção	Indicador de custos, que engloba todos os custos inerentes direto ou indiretamente à manutenção	Soma dos custos de manutenção preventiva, preditiva, corretiva e custos de não produção (parada não programada)	Moderada	Mensal	Colaborador A

Tabela 6.3: Indicadores a serem implementados

A complexidade de implementação e mensuração dos indicadores, a frequência de análise e o responsável pelo acompanhamento do respectivo indicador foi determinado pela equipe de trabalho do projeto (Tabela 6.4).

Colaborador	Função na empresa	Função no projeto de RTPM
A	Gerente geral do terminal	Coordenar as atividades do projeto, motivar e direcionar a atuação da equipe para o alcance das metas
B	Supervisor de Produção	Descrição e acompanhamento das atividades, junto com os colaboradores, coletar e analisar os dados, sugerir ações e medidas de melhoria. É o responsável por medir os equipamentos
C	Técnico Mecânico I	Equipe de execução, que terá voz ativa para sugerir ações junto ao gerente ao supervisor. São os responsáveis pela implementação das ações e desempenham papel fundamental na etapa de análise. Passaram pelo programa intensivo de treinamentos em manutenção preventiva e preditiva.
D	Técnico Mecânico II	
E	Técnico Eletricista	

Tabela 6.4: Equipe de implementação do R-TPM

O planejamento realizado servirá de diretriz para as demais etapas. Para atingir a diretriz de custos estipulada, segue o orçamento previsto (Figura 6.5):

Período	Orçamento Mensal	Gastos previstos
Mês 1	R\$ 3.092,87	Treinamentos, materiais de limpeza e polimento, lubrificantes, óleos, materiais diversos, equipamento para análise de vibração e temperatura
Mês 2	R\$ 3.092,87	
Mês 3	R\$ 3.092,87	
Mês 4	R\$ 3.092,87	
Mês 5	R\$ 3.092,87	
Mês 6	R\$ 3.092,87	
Orçamento do projeto	R\$ 18.557,20	

Tabela 6.5: Orçamento previsto para o projeto

Modelo de implementação da etapa de análise e execução

Esta etapa se inicia com a aplicação do FMEA para os equipamentos presentes no escopo do projeto (Classe A). Há três naturezas de equipamentos (balanças, elevadores e exaustor), dessa forma o FMEA deve levantar a descrição dos itens, a sua função no processo, os tipos de falhas potenciais e seus efeitos, as causas da falha em potencial, as medidas de controle atuais, e os índices medidos (severidade, ocorrência, detecção e risco).

Essa análise presente na Tabela 6.6 foi desenvolvida junto a equipe de trabalho. A escola é progressiva do nível mais crítico para o mais facilitado, variando de 1 a 10 respectivamente. A falta de padronização das tarefas e organização de rotinas e catálogos de equipamentos dificultou a montagem de um FMEA mais específico para cada uma das classes de equipamentos críticos, limitando-se a avaliação com base no conhecimento do processo dos envolvidos a nível severidade, ocorrência e detecção; e dos modos de falhas

gerais de cada uma das classes.

Classe de equipamentos	Severidade	Ocorrência	Detecção	Falhas Principais	Causas Principais
Elevador de Carga	3	5	8	Deformação	Não elevar à altura necessária por excesso de carga inoperância do equipamento devido à válvula de vazão mal dimensionada Ruptura de solda; manutenção inadequada; material inadequado
				Quebra	
				Oxidação	
Balança	4	7	3	Calibração	Excesso de carga; velocidade brusca de entrada; automação inoperante Surtos de tensão; excesso de carga; manutenção inadequada; material inadequado
				Oxidação	
				Quebra	
Exaustor	8	2	6	Super aquecimento	Falha no sistema de proteção; não execução de limpeza periódica; uso extremo da capacidade Curto-circuito; qubra de peças de natureza mecânica; falha no motor Oscilação na tensão oriunda da concercionária; sobreaquecimento; fiação exposta; fiação e manutenção inadequada
				Quebra	
				Defeito Elétrico	

Tabela 6.6: Aplicação do FMEA nos equipamentos críticos

Em sequência foi realizada a simulação para o modelo de manutenção corretiva, que atualmente é desenvolvido pela organização, conforme os passos descritos no algoritmo presente na Tabela 6.7. O período de análise é de seis meses, tempo total de implementação da primeira rodada do R-TPM. Como na empresa o planejamento operacional é feito semanalmente, sugere-se a discretização do tempo em semanas, totalizando 24.

Passo	Comando	Comentário
1	Definir os Parâmetros (taxa_avaria, Nt)	Nt - a quanto tempo o equipamento funciona, taxa_avaria = 1/mtbf
2	Inserir N(t) para $N(t) = 1, \dots, 24$	"Avaliação de 24 semanas"
3	Calcular a prob_falha $F(t) = \text{distribuição_prob}(\text{taxa_avaria}, Nt)$ $\text{Passo_melhoria} = 1 - ((2 * \text{ALEATÓRIO} + 3) * 5) / 100$	"melhoria de 15 a 25% com o conserto"
4	Gerar Simulação	
	Se Aleatório(t) < F(t), então Simulação = 1,	"equipamento falhou"
	Senão Simulação = 0	"equipamento funciona"
	Se "funciona", então $N(t+1) = N(t) + 7$	"t escalonado em semanas de 7 dias válidos"
	Senão $N(t+1) = N(t) * \text{passo_melhoria}$	
	Fim-se	
	Fim-se	
5	Repetir (4) por k simulações	
6	Somar simulação(k)	
7	Calcular a média de avarias para $N(t) = 1, \dots, 24$	"Média da soma das simulações(k)"
8	Calcular os custos de reparo	"média de avarias x custo do reparo"
9	Calcular os custos de parada não programada	"média de avarias x custo-hora da parada não programada x MTTR"
10	Calcular o custo total esperado (8) + (9)	"para os 6 meses (24semanas) estudados"

Tabela 6.7: Construção da Simulação para o Modelo de Manutenção Corretiva

O modelo simulado considera a aleatoriedade intrínseca a falha de equipamentos mecânicos considerando as probabilidades de falhas. Quando é executado um reparo, o equipamento sofre uma “regeneração” que varia de 15 a 25% conforme aponta a literatura. Finalmente é preciso repetir o procedimento por um número K de simulações, o que gera um número médio de avarias que serve de base para o cálculo dos custos de manutenção.

Em seguida, foi aplicado o modelo de PLI desenvolvido considerando os estados possíveis (falhas leves, falhas graves, e funcionamento normal), bem como os custos inerentes a manutenção. Foram apurados o custo-hora das manutenções preventivas, os custos médios de reparação e os custos relativos as paradas não programadas no processo produtivo (Tabela 6.8).

Equipamentos	Custo-hora da preventiva	Tempo-hora preventiva	Custo-Hora paradas não programada
Elev01	R\$ 66,32	1,89	R\$ 756,63
Elev02	R\$ 66,32	1,89	R\$ 756,63
Elev03	R\$ 66,32	1,89	R\$ 756,63
Bal01	R\$ 139,32	0,84	R\$ 306,85
Bal02	R\$ 139,32	0,84	R\$ 306,85
Bal03	R\$ 139,32	0,84	R\$ 306,85
Bal04	R\$ 139,32	0,84	R\$ 306,85
Bal05	R\$ 139,32	0,84	R\$ 306,85
Bal06	R\$ 139,32	0,84	R\$ 306,85
Exaustor	R\$ 87,90	1,25	R\$ 1.540,37

Tabela 6.8: Custos de manutenção no terminal

Além dos custos foram levantados as taxas de ocorrências dos tipos de falhas (leves e graves) bem com os respectivos tempos e custos, conforme apresenta a Tabela 6.9.

Família	Tipo de falha	Taxa de ocorrência	Tempo médio do reparo	Custo-hora do reparo
Elevadores	Grave	0,143	11,160	R\$ 519,37
	Leve	0,857	1,258	R\$ 63,24
Balanças	Grave	0,286	5,750	R\$ 244,61
	Leve	0,714	1,300	R\$ 118,12
Exaustor	Grave	0,087	4,120	R\$ 287,25
	Leve	0,913	0,800	R\$ 87,20

Tabela 6.9: Tipos de falhas e as taxas de ocorrência no terminal

Em sequência foi construída a árvore de decisão, que serviu de base para rodar o modelo de PLI. Como o número de variáveis é pequeno, foi possível rodar o modelo utilizando o Solver do MS Excel.

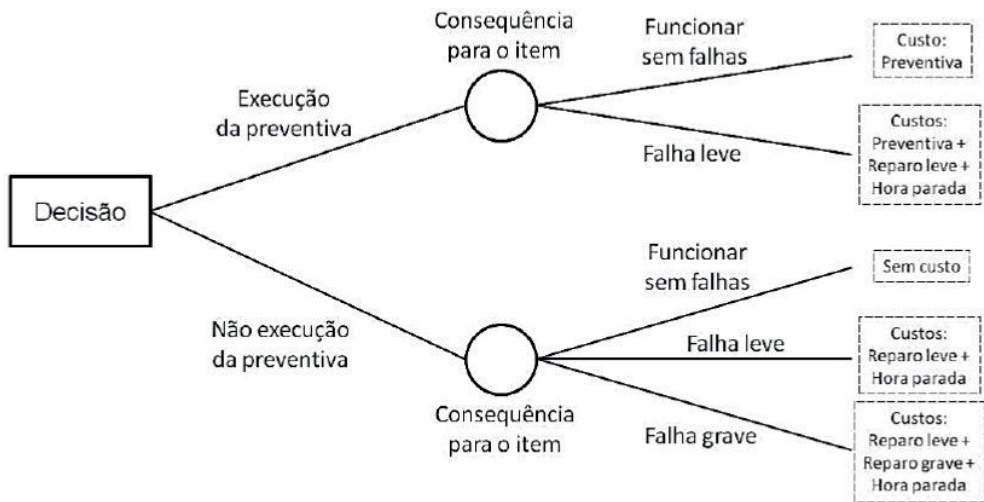


Figura 6.18: Árvore de decisão para o modelo desenvolvido no terminal de açúcar

Os parâmetros obtidos para p_i e β podem ser visualizados no Apêndice II. Finalmente, foi feita a discretização dos resultados, recalculando o plano de manutenção considerando a atualização das confiabilidades e das probabilidades de falha ao considerar o período de 24 semanas. foram apresentados os seguintes resultados na Figura 6.19.

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Figura 6.19: Matriz de resultados do modelo de PLI para o terminal em 24 semanas

Os valores apresentados na matriz A_{ij} assumem 0 ou 1 (variável binária x_{ij}), uma vez que apresentam a manutenção preventiva no equipamento $i = 1, 2, \dots, 10$ no período $j = 1, 2, \dots, 24$.

Na simulação com o uso do PLI apresentado, é apresentado mais um contexto, a possibilidade de realizar manutenção preventiva, que da mesma forma que a manutenção corretiva provoca a recuperação do ativo, impedindo que haja uma degeneração acelerada. A Tabela 6.10 apresenta a construção da simulação utilizando o PLI desenvolvido.

Passo	Comando	Comentário
1	Definir os Parâmetros (taxa_avaria, Nt)	Nt - a quanto tempo o equipamento funciona, taxa_avaria = 1/mtbf
2	Inserir N(t) para $N(t) = 1, \dots, 24$	"Avaliação de 24 semanas"
3	Calcular a prob_falha $F(t)$ = distribuição_prob (taxa_avaria, Nt) Passo_melhoria = $1 - ((2 * \text{ALEATÓRIO}() + 3) * 5) / 100$	"melhoria de 15 a 25% com o conserto"
4	Gerar Simulação Se Aleatório(t) < F(t), então Simulação = 1, Senão Simulação = 0 Se "funciona", então $N(t+1) = N(t) + 7$ Senão $N(t+1) = N(t) * \text{passo_melhoria}$	"equipamento falhou" "equipamento funciona" "t escalonado em semanas de / dias válidos"
	Inserir P(t) Se $P(t) = 1$, então $N(t+1) = N(t) * \text{passo_melhoria}$ Senão $N(t+1) = N(t) + 7$ Fim-ses Fim-ses	"Decisão de fazer ou não preventiva"
5	Repetir (4) por k simulações	
6	Somar simulação(k)	
7	Calcular a média de avarias para $N(t) = 1, \dots, 24$	"Média da soma das simulações(k)"
8	Calcular os custos de reparo	"média de avarias x custo do reparo"
9	Calcular os custos de parada não programada	"média de avarias x custo-hora da parada não programada x MTTR"
10	Calcular o custo total esperado (8) + (9)	" para os 6 meses (24semanas) estudados"

Tabela 6.10: Construção da Simulação para o Modelo de Manutenção com o uso do PLI

Finalmente, foi feita a simulação considerando a preventiva plena. Neste, o modelo de PLI é modificado, incluindo manutenção preventiva em todas as semanas. O que reduz a probabilidade de falha, todavia, aumenta substancialmente os custos de manutenção preventiva isso porque requer a contratação de mais dois mecânicos e um eletricista, conforme levantado junto a empresa.

Com a realização de 100 ensaios, obteve-se o seguinte resultado:

Estatística (100 amostras)	Redução de custos do modelo PLI do R-TPM frente a manutenção corretiva	Redução de custos do modelo de manutenção preventiva frente a manutenção corretiva
Média	14,93%	13,78%
Desvio Padrão	3,72%	3,38%
Maior ganho	24,42%	22,91%
Menor ganho	8,52%	7,48%
Coef. Variação de Pearson	0,249	0,245

Tabela 6.11: Resultados do modelo R-TPM e do Modelo de Manutenção Preventiva Plena

Ressalta-se que em média o modelo de PLI foi melhor que o modelo tradicional de manutenção preventiva, muito utilizado na abordagem do TPM. Além disso, dos 100 ensaios realizados, 74 apresentaram resultados onde o modelo de PLI foi melhor que o de manutenção preventiva tradicional. Ressalta-se que a média dos resultados é superior a meta pretendida de redução de custos (10%), e que em 90 a cada 100 ensaios esta meta foi atingida (Apêndice I). O coeficiente de variação apresenta um valor moderado de 0,249. Isto pode ser interpretado, considerando que o processo ainda apresenta um elevado grau de aleatoriedade, uma vez que a gestão de manutenção apresenta seus ativos pouco controlados em termos de manutenção preventiva, preditiva e de análise de confiabilidade.

Ainda na etapa de análise e execução foi realizado um plano de treinamento para todos os funcionários envolvidos no programa de implementação.

Módulos	Mês 1	Mês 2	Mês 3	Mês 4	Mês 5	Mês 6	Custos dos módulos	Colaboradores
Introdução do TPM e ao RCM (16h)	X						R\$ 1.120,0	A, B, C, D, E
Ferramentas da Qualidade (32h)	X			X			R\$ 1.120,0	A, B, C, D, E
Planejamento e Controle de Manutenção (32h)	X	X					R\$ 2.240,00	A E B
Introdução à confiabilidade (16h)				X			R\$ 1.120,0	A E B
Técnicas de predição de falhas (64h)		X	X		X	X	R\$ 4.480,00	C, D E E
Custos por mês	R\$ 2.240,00	R\$ 2.240,00	R\$ 2.240,00	R\$ 2.240,00	R\$ 1.120,00	R\$ 1.120,00	Custo total:	R\$ 11.200,00

Figura 6.20: Plano de treinamentos

A estimativa de custos compreendem o valor de R\$70,00 por hora para o treinamento técnico e foi modelado considerando as restrições orçamentárias previstas no escopo do projeto.

Modelo de implementação da etapa de Controle

Esta fase se inicia com a validação e mensuração dos indicadores. Foram estipulados 5 indicadores iniciais a serem mensurados e acompanhados: MTBF, MTTR, Confiabilidade, OEE e Custos de Manutenção. A inserção do OEE não foi possível devido a ausência de um sistema informatizado acurado para fornecer as informações com precisão, bem como

o conhecimento dos colaboradores envolvidos na operação e gestão de manutenção para mensurar as perdas que impactam no OEE.

Equipamentos	MTBF (Semanas)	MTTR (horas)	Confiabilidade	Custos de Manutenção Esperado
Elev01	5,49	1,78	0,796	R\$ 15.569,53
Elev02	2,27	2,92	0,586	R\$ 27.459,85
Elev03	5,02	3,31	0,741	R\$ 14.500,96
Bal01	2,10	0,94	0,554	R\$ 12.166,79
Bal02	4,25	3,43	0,723	R\$ 6.414,51
Bal03	5,41	2,5	0,785	R\$ 4.321,10
Bal04	2,65	2,77	0,649	R\$ 10.623,05
Bal05	5,33	1,81	0,748	R\$ 6.303,25
Bal06	3,91	4,02	0,691	R\$ 6.990,66
Exaustor	4,06	1,09	0,768	R\$ 28.419,91

Tabela 6.12: Resumo dos indicadores implementados

Em termos de confiabilidade os resultados apontam que o elevador 02 e a balança 01 apresentam uma média projetada abaixo do esperado (>0.6). Isto porque a probabilidade de falha verificada nos instantes iniciais é elevada, se comparado aos demais equipamentos, o que é controlada com o transcorrer das semanas, por meio de intervenções preventivas. Existe uma atenção direcionada ao exaustor principal, por este ser vital para o correto funcionamento das operações no terminal.

Em termos de custos, verificou-se uma redução média de 14,93%, num conjunto de 100 ensaios. Verifica-se que os principais custos são provocados pelo exaustor principal e pelo elevador de carga 02. Não houve trabalho para a redução do MTTR para este primeiro ciclo do modelo híbrido. Já o MTBF deve apresentar melhorias significativas conforme as simulações realizadas (Tabela 6.13).

Equipamentos	MTBF Atual (Semanas)	MTBF - R-TPM (Semanas)	Aumento do MTBF
Elev01	4,42	5,49	24,38%
Elev02	2,14	2,27	6,01%
Elev03	4,06	5,02	23,48%
Bal01	1,88	2,10	11,36%
Bal02	3,05	4,25	39,18%
Bal03	4,68	5,41	15,75%
Bal04	2,39	2,65	10,95%
Bal05	4,80	5,33	10,94%
Bal06	3,36	3,91	16,14%
Exaustor	3,23	4,06	25,65%

Tabela 6.13: Redução do MTBF com o R-TPM

Uma das metas traçadas foi de aumentar em 15% o MTBF dos equipamentos críticos estudados. Verificou-se que o elevador 02, as balanças 0,1, 04 e 05 não atingiram a meta estipulada. Entretanto, os ganhos esperados para o exaustor superou as expectativas, bem como para o elevador 01, 03 e para a balança 02.

Uma das metas estipuladas não foi atingida, considerando as restrições do sistema e as dificuldades de implementação, que foi a implantação do indicador OEE.

Pode-se observar que os indicadores implementados mostraram-se oportunos. Os resultados de custos são fundamentais, entretanto, possuem relação direta com os outros indicadores operacionais estipulados (MTBF, MTTR e Confiabilidade).

A aferição da confiabilidade ainda precisa ser refinada com os novos ciclos do modelo híbrido, uma vez que requer um robusto histórico de falhas dos equipamentos estudados.

O processo de avaliação da qualidade dos indicadores é uma importante ferramenta de verificação da consistência e aplicabilidade dos indicadores sugeridos.

Para balizar a consistência dos indicadores é fundamental analisar os indicadores acerca de três aspectos importantes: a sua complexidade, se o indicador é simples quanto ao procedimento de cálculo e de fácil implementação; se ele é completo, ou seja é possível extrair as principais informações para monitorar o objetivo estratégico e se ele é reativo, capaz de sinalizar os pontos que devem ser atacados em caso de diagnóstico negativo (Simons et al., 2000).

A avaliação foi feita em reunião com a equipe de implementação do projeto R-TPM.

Indicador	Completo	Complexo	Reativo	Avaliação
MTBF	4	4	3	Verificou-se que o indicador não precisa de informações adicionais ou outros indicadores para expressar os seus resultados. Embora seja moderadamente reativo, ele não induz diretamente à ação que deve ser executada para ele ser melhorado. Sua complexidade reside na necessidade de um elevado histórico de falhas, com coletas precisas, preferencialmente automatizadas.
MTTR	5	5	2	O MTTR apresenta um processo de implementação pouco complexo, uma vez que é um indicador direto e completo, ligado ao tempo médio de reparo. É pouco reativo, pois não tem a capacidade de pontuar aonde e que tipo de ações devem ser tomadas para desenvolvê-lo.
R (t)	4	2	3	O procedimento de cálculo para a confiabilidade é relativamente complexo, mas apresentam informações para a gestão da vida dos itens, em termos de probabilidade de falha e fase na lei de vida.
Custos de Manutenção	5	3	3	O cálculo é simples, apesar do esforço de coleta junto à contabilidade de custos. É completo por abranger todos os custos explícitos, mas não considera os custos implícitos. É moderadamente reativo ao não definir com clareza a origem dos gastos.

Tabela 6.14: Avaliação dos indicadores implementados

A avaliação dos indicadores aponta para uma consistência média elevada (Figura 6.14), conforme a avaliação qualitativa em escala ordinal (1 – muito pouco; 2 – pouco; 3 – moderado; 4 – elevado; 5 – muito elevado).

As principais vulnerabilidades encontradas no processo de implementação diz respeito a necessidade de treinamento do corpo operacional e de gestão. Treinamentos em coleta, análise e tomada de decisão para indicadores de desempenho. A falta de experiência e de qualificação nesse sentido, foi o principal entrave para a implementação do OEE como indicador operacional de gestão de manutenção.

Outra vulnerabilidade verificada foi na gestão dos equipamentos elevador 02 e balança 01, que apresentaram resultados abaixo do esperado. Restrições orçamentárias e pressões a nível de custo impossibilitaram a adoção de medidas mais agudas em termos de modificação de layout e melhoria nas operações de manutenção que visam a redução do MTTR e aumento do MTBF.

Modelo de implementação da etapa de Ação

Nessa etapa são levantadas as principais vulnerabilidades para a construção de um plano de ação para ser executada na próxima rodada do modelo R-TPM. Este plano de ação (Tabela 6.15) foi construído com base na ferramenta 5W2H e leva em consi-

deração as três vulnerabilidades apontadas: a não implementação do OEE, os resultados incipientes do elev02 e da bal01 e a desorganização do ambiente de trabalho. Durante o desenvolvimento do plano de ação, um dos enfoques foi o desenvolvimento de ações factíveis, considerando um volume máximo de 5 ações por ciclo do R-TPM.

O plano de ação servirá de base para o desenvolvimento de um novo ciclo do R-TPM, que deve se encerrar com a documentação e registro do trabalho desenvolvido.

6.4 Discussões

A proposta híbrida tem como objetivo colocar no mesmo patamar os programas de RCM e TPM reunindo as suas melhores práticas. Na sistematização do modelo conceitual (Tabela 6.2) as atividades apresentadas são oriundas de ambo os modelos, com algumas contribuições externas que foram julgadas pertinentes (Tabela 6.16).

Vulnerabilidade	Medida (o que?)	Responsável (quem?)	Prazo (quando?)	Local (onde?)	Razão (por que?)	Procedimento (como?)	Investimento estimado (quanto?)
Não implementação do OEE	Treinamento intensivo em gestão e implementação de indicadores	Colaborador A	3 meses	Sala de reunião e treinamentos	Falta de capacidade de coletar as informações e gerenciar o indicador	Contratar uma empresa de treinamento; construir e executar um plano de treinamentos	R\$ 3.000,00
Resultados pequenos do elevador 02 e da balança 01	Mapeamento das perdas produtivas		3 meses	PCP e Gestão de Qualidade	É a base para a implementação do OEE	Levantamento das informações necessárias; mapeamento das perdas produtivas; tradução das perdas em custo e tempo.	R\$
Desorganização do ambiente de trabalho	Realização de um <i>Kobetsu Kaizen</i> para os equipamentos	Colaborador B	1 mês	Local dos equipamentos	Desenvolvimento do MTBF e do MTTR	Avaliação técnica dos ativos; estudo aprofundado da lei da vida dos equipamentos; verificação das oportunidades de melhorias; modificação no plano de manutenção; aquisição de sobressalentes; restauro ou aquisição de novos ativos.	R\$ 5.000,00
	Programa de 5S	Colaborador A	6 meses	Todo o terminal	Impossibilita uma gestão mais eficiente e dificulta a coleta de informações	Envolvimento dos colaboradores; marco inicial de implementação; treinamento em 5S; inserção da filosofia durante os DDS; implementação das 5 etapas do programa.	R\$ 3.000,00

Tabela 6. 15: Plano de Ação

Fases	Atividade	Contribuição			
		TPM	RCM	Ambos	Externa
Planejamento	Definição dos Objetivos e Requisitos			X	
	Definição da Equipe			X	
	Definição do escopo do projeto			X	
	Implementação dos indicadores em estágios iniciais	X			X
Análise e Execução	Aplicação do FMEA			X	
	Programa de Educação e Treinamento	X			X
	Modelo de PLI para manutenção preventiva				
	Determinação da periodicidade para manutenção preventiva por MTBFinf e MTTR		X		
	Dimensionamento de sobressalentes		X		
	Programa de 5S	X			
	Plano de lubrificação e limpeza			X	
	Análise de vibração			X	
	Facilitação de manutenção	X			
	Melhorias de processos	X			
	Troca sistemática de itens		X		
	Adoção de novas tecnologias			X	
Controle	Avaliação de indicadores				X
	Avaliação de vulnerabilidade	X			
Ação	Plano de melhoria contínua	X			
	Documentação e padronização			X	

Tabela 6.16: Contribuição do RCM e do TPM para o sistema híbrido

A etapa de planejamento compila o processo desenvolvido por ambos os sistemas de manutenção estudados. A definição dos objetivos, da equipe e do escopo de trabalho é alicerce para o desenvolvimento e implementação do modelo híbrido.

Destaca-se que o planejamento e a gestão de indicadores da função manutenção precisam estar alinhados à estratégia global da organização. Esta é que vai ditar os caminhos e metas a traçar. Dependendo do nicho empresarial, para a manutenção, dimensões de custos, qualidade ou disponibilidade podem exercer pesos diferenciados.

O TPM nasceu com foco na redução de desperdícios, com intensa relação com a redução de custos e melhorias de qualidade. Já o RCM, por nascer em um ambiente intolerante ao risco e às falhas tem um foco mais direcionado à disponibilidade e a “falha zero”. Na manufatura, comumente, a dimensão de custos ganha um aspecto preponderante em relação a manutenção. Por outro lado, em setores de serviços e produtos de alto valor agregado, a qualidade se torna o mais importante. E em setores de hospitalidade e

aeroespacial, por exemplo, a disponibilidade com a garantia do funcionamento dos ativos físicos, torna-se fator fundamental.

A fase de análise e execução se inicia com a aplicação do FMEA, que é uma ferramenta poderosa de análise de riscos e padrões de falhas utilizado tanto no TPM quanto no RCM. Entretanto, o nível de detalhe e aprofundamento é diferenciado. No RCM a aplicação do FMEA, normalmente com a análise de criticidade (FMECA) é mais detalhada e com base em dados de confiabilidade apurados. Nesse sentido, a abordagem do FMEA proposto se baseia na aplicação dada no RCM, uma vez que os dados de confiabilidade serão vitais para a construção de outras etapas do programa.

Recebem dados e informações do FMEA três programas: o primeiro de manutenção planejada, o segundo de recuperação do equipamento e o terceiro de desenvolvimento de ativos.

O primeiro, está muito atrelado ao pilar Manutenção Planejada, todavia, a abordagem quantitativa apresentada, é sustentada por técnicas e ferramentas do RCM, como o dimensionamento de sobressalentes e a determinação da periodicidade de manutenção. Mas o modelo de programação linear inteira (PLI) agrega uma abordagem externa aos dois sistemas, enquanto ferramenta.

O segundo, está atrelado a dois pilares do TPM - Melhoria focalizada e Controle Inicial - mas também tem estreita afinidade com o RCM em sua etapa de implementação. O 5S é uma ferramenta consolidada e utilizada na implementação de um programa de TPM. Os planos de lubrificação e limpeza por sua vez aparecem em ambas as abordagens, bom como a análise de vibrações, enquanto ferramenta da manutenção preditiva. Ressalta-se que a análise de vibrações, por requerer um grau de especialização e qualificação da análise teve sua prática iniciada na implementação de RCM.

O terceiro também tem ligação com os dois: quanto ao uso de ferramentas de melhorias há ligação com as propostas no TPM (SMED, Poka-Yoke, Kaizen, etc.), mas a troca sistemática de itens está diretamente relacionado a gestão de sobressalentes e ao estudo da lei de vida dos componentes sob aspectos econômico-financeiros, proposto pela abordagem do RCM.

Na fase de controle, a avaliação dos indicadores, traz uma abordagem externa, atrelada ao estudo de indicadores proposta por Simons et al. (2000), que avalia se os indicadores são completos, reativos e de implementação simplificada. A análise de vulnerabilidades faz parte do escopo do TPM, e sistematiza os pontos críticos de melhoria

Finalmente, na última fase de ação, são montados os alicerces para a construção de um plano de ação e para a cultura da melhoria contínua. Esta, advém sobretudo do TPM, uma vez que o RCM, apesar de prezar pelo desenvolvimento, prega a manutenção da excelência, em vez de buscar formas de desenvolver ainda mais. Ambos têm como base o processo final de padronização, já desenvolvido com o programa de 5S, é de documentação.

6.4.1 Avaliação conceitual dos principais indicadores

A engenharia de confiabilidade presente no escopo do RCM pode gerar impactos positivos na tomada de decisão e na melhoria do OEE, principal indicador do TPM, o que no sistema híbrido busca-se traduzir com as etapas propostas.

Em relação ao aumento do índice de disponibilidade, um dos três componentes do OEE, o RCM tem importância vital no que diz respeito à gestão de risco de falha (confiabilidade), ao passo que a sua metodologia sistematiza bem os passos para o aumento do MTBF (tempo médio entre avarias) e redução do MTTR (tempo médio de reparação) em sistemas reparáveis. Atua ainda na definição da meta de confiabilidade e como esta pode ser atingida, seja por meio de manutenção planejada, seja pelo dimensionamento de sistemas complexos.

O dimensionamento de equipamentos de reserva a partir da lei de vida de equipamentos e dos custos inerentes a sua reposição e/ou manutenção e armazenagem é outro ponto em que o RCM pode dar suporte quantitativo à tomada de decisões e, conseqüentemente, impactar no índice de disponibilidade, que faz parte da tríade que compõe o OEE ao garantir que, sob determinada probabilidade não falem equipamentos de substituição.

No que diz respeito a perdas de performance por pequenas paradas e por redução de velocidade, uma análise das fases de equipamentos na (Modelo da curva da Banheira) pode auxiliar no diagnóstico das causas das perdas, permitindo avaliar se as perdas são decorrentes de desgaste, mortalidade infantil ou ainda descartar estas hipóteses. Muitas vezes, a manutenção autônoma pode mitigar ou velar pequenos desacertos e desregulagem de equipamentos desgastados, que estão na fase terminal de sua vida útil.

Em relação ao aumento do índice de disponibilidade, o RCM tem importância vital no que diz respeito à gestão de risco de falha (confiabilidade), ao passo que a sua metodologia sistematiza bem os passos para o aumento do MTBF (tempo médio entre avarias) e redução do MTTR (tempo médio de reparação) em sistemas reparáveis.

A definição das funções e padrões de desempenho dos equipamentos fabris estabelece a base de trabalho para o RCM. Todos devem compreender o que é esperado de cada equipamento, as funções que ele deve cumprir e os padrões de desempenho. O correto funcionamento dos equipamentos e o atendimento aos requisitos intrínsecos (velocidade operacional, MTTF, confiabilidade, etc.) possui impacto direto na determinação do OEE. Mais do que isso, o OEE, enquanto indicador que sinaliza o desempenho e expõe problemas em sistemas fabris, pode ter algumas soluções no âmbito técnico e quantitativo suportado pela política RCM.

A coexistência das duas políticas traz economia de escopo a gestão da manutenção pela ocorrência de pontos congruentes como a dinâmica do Ciclo PDCA (Planejar - Fazer- Checar - Agir), ao passo que o RCM busca analisar e quantificar os problemas,

enquanto o TPM se debruça sobre as ferramentas para eliminação de perdas. O desafio de aperfeiçoamento contínuo dos sistemas de produção a fim de prover aumento de competitividade é uma realidade crescente do ambiente industrial e de estudos intensivos no meio acadêmico para otimização de processos e redução de custos.

6.4.2 Discussão sobre a implementação

Os resultados previstos, por meio da simulação realizada, permite inferir que o modelo proposto atinge o esperado, superando a meta de redução de custos de 10%, conseguindo uma redução média de 14,93% apenas com a implementação do modelo de PLI. Acredita-se que para novas rodadas do modelo híbrido pode-se reduzir ainda mais os custos, com a execução do plano de ação proposto, que objetiva melhorar a organização, reduzir o MTBF, o MTTR e desenvolver ainda mais os funcionários envolvidos.

Ficou evidente a necessidade de um planejamento acurado que detalhe o escopo, as metas, indicadores e a equipe de trabalho. Mesmo executando todas as etapas previstas para o planejamento, nem todas as metas foram atingidas. Não foi possível implementar o indicador OEE, pelos seguintes motivos:

1. Ausência de profissionais qualificados na gestão e acompanhamento de indicadores de desempenho.
2. As perdas, nesse primeiro momento, não eram claras para a equipe de trabalho.
3. O indicador requer uma base consistente de informações geradas no ambiente operacional. Entretanto, a inexistência de um software de gestão consolidado, dificultou a coleta de dados, que ainda estão difusos.

O plano de treinamento é aperfeiçoado no plano de ação, com a introdução de tópicos em indicadores de desempenho. Só é possível gerenciar aquilo que se pode medir, nesse sentido é importante conhecer os principais indicadores e o processo de avaliação - “o que fazer com o indicador?”- e as etapas de coleta de informações. Este é um ponto importante para a implementação do OEE e de outros indicadores mais robustos.

As restrições orçamentárias inicialmente eram vistas como um entrave. Todavia, o escopo, dentro dessas restrições trouxeram ganhos significativos em termos de redução de custos e melhoria do MTBF. Nesta primeira etapa não foi tratado o desenvolvimento do MTTR, isto porque, é necessário o devido treinamento em técnicas de melhoria de processos, como SMED e dimensionamento de estoque de sobressalentes.

A equipe de trabalho, na construção do escopo, mostrou-se motivada no processo, apesar das limitações técnicas observadas. Nesse sentido, o R-TPM incorpora um dos aspectos centrais do TPM, que é a valorização e desenvolvimento dos recursos humanos, o que pode ser ratificado pelo fato da maior parte do orçamento ser destinada a treinamento e funcionários.

As principais dificuldades encontradas foram referente ao desenvolvimento dos

recursos humanos e a disponibilidade de informações para gestão. Muitos equipamentos críticos estão fora de controle, sem a manutenção adequada. Nesse sentido a ferramenta FMEA também foi subutilizada, considerando todo o seu potencial. As bases para o FMEA foram empíricas, o que pode ser utilizado em fases iniciais, mas que possui sérias restrições em etapas mais desenvolvidas. Os modos de falhas foram compilados, mas poderia gerar uma base mais consistente caso fosse baseada em um histórico de falhas.

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 Conclusões

O objetivo central da pesquisa em “propor um sistema híbrido estruturada de gestão de manutenção que utilize de forma integrada os fundamentos das políticas de manutenção TPM e RCM para ambientes industriais, orientado na reunião das melhores práticas de cada filosofia de manutenção” foi atingido com a apresentação das quatro etapas fundamentais sugeridas e as técnicas inerentes a cada uma delas.

Foram definidos os pontos congruentes entre o TPM o RCM, entorno de seus objetivos fundamentais e a busca por otimização da função manutenção. Verificou-se que a estrutura de implementação em ambos os casos se orientava diretamente ou indiretamente pelo ciclo PDCA e que a fase de planejamento têm um papel fundamental para o sucesso da implementação.

Também foram estudadas as lacunas dos dois modelos de gestão de manutenção. Como apresentam orientações divergentes - o TPM voltado para os colaboradores e o RCM orientado ao processo - as lacunas apareceram naturalmente. Há inúmeros aspectos divergentes entre os modelos, mas algumas observadas são conflitantes: as divergências de estratégia e de formação de equipe. Ter uma estratégia de implementação *top-down*, foca na especialização e na capacidade de liderança dos escolhidos para gerir o projeto, o que é o caso do RCM. Por outro lado, o TPM aposta em uma equipe qualificada, entretanto, multidisciplinar, com membro de diferentes níveis hierárquicos. Usa uma estratégia *bottom-up*, pois parte de uma das máximas da produção enxuta que afirma que “ninguém conhece melhor o processo e suas necessidades que o próprio operador”. Ao orientar o programa de manutenção ao processo, o RCM pode negligenciar a participação contínua dos envolvidos, o que pode por em risco a saúde do programa em longo prazo.

Acredita-se que a implementação do sistema híbrido pode trazer resultados organizacionais melhores que a implementação isolada de cada uma das abordagens pelas seguintes razões:

1. Contempla de forma harmônica e sistematizada as melhores práticas verificadas em cada modelo clássico.
2. Busca soluções internas e externas para as lacunas verificadas em cada sistema, os mais notáveis, referente a gestão de indicadores de desempenho e ao método de construção de um programa de manutenção planejada.
3. Conjuga o uso do FMEA com a utilização dos pilares manutenção planejada e melhoria específica.
4. Conduz o pilar manutenção autônoma do TPM a um nível de especialização e qualificação trazida pelo RCM que sugere decisões mais assertivas, tendo como base informações de confiabilidade.
5. O RCM dá ao TPM uma abordagem mais orientada em métodos quantitativos

de engenharia de confiabilidade, enquanto que o TPM entrega ao RCM um caráter mais orgânico, com foco nos colaboradores envolvidos.

Acredita-se que a principal contribuição da pesquisa, é entregar um sistema híbrido sistematizada, com a definição das etapas e detalhamento das principais técnicas utilizadas - Programação Linear Inteira, Determinação da Periodicidade de Manutenção; Técnicas do *Lean Manufacturing* orientadas a eliminação de desperdícios; e a definição de indicadores de gestão de manutenção.

Uma contribuição que tangencia ao objetivo central mas que foi fundamental para a consolidação do sistema híbrido é o arcabouço de implementações de TPM e RCM gerados. Isto porque, os sistemas não são implementados de forma linear e uniforme, logo, no âmbito de pesquisa acadêmica, é uma contribuição relevante copilar e analisar na literatura o processo de implementação de TPM e RCM

A validação foi realizada por meio da aplicação piloto de técnicas e procedimentos sugeridos no sistema híbrido em uma planta de um terminal logístico de açúcar modelo. Foi definido: o escopo da implementação, realizada a análise crítica dos equipamentos e a seleção para aplicação do modelo matemático proposto de PLI, bem como a periodicidade de realização de manutenção e o estudo de confiabilidade como um todo, que servirá de base para o estudo de confiabilidade que alimentará o FMEA. Além disso, foi construído um plano de educação e treinamento modelo, tendo como base as necessidades da planta piloto. Finalmente, foi gerado um plano de ação utilizando a ferramenta 5W2H.

Quando se propõe um sistema híbrido de gestão de manutenção, busca-se elevar a competitividade empresarial, por meio do uso de métodos quantitativos aplicados a eliminação de perdas. Métodos estes que auxiliam na tomada de decisão em manutenção corretiva, preventiva ou preditiva. Propõe-se que o foco da gestão de manutenção seja repartido entre a eliminação de perdas do TPM; e a previsão e gestão das falhas e seus riscos inerentes aos processos produtivos, cerne do RCM.

A implantação conjunta do RCM e do TPM no sistema híbrido estudada pode evitar desperdício de tempo e dinheiro, conforme simulado na aplicação piloto, bem como ações na área de manutenção que não são necessárias para preservar a função do equipamento. A integração das ferramentas pretende maximizar os pontos de melhoria de cada uma e fazer nascer um sistema híbrido ainda mais efetivo no sentido de reduzir experiências na implantação e maximizar o retorno desejado.

A implantação do sistema híbrido pretende evitar desperdício de tempo e dinheiro, bem como ações na área de manutenção que não são necessárias para preservar a função do equipamento. A integração das ferramentas pode maximizar os pontos de melhoria de cada uma e fazer nascer uma ferramenta mais poderosa no sentido de reduzir experiências na implantação e maximizar o retorno desejado.

7.2 Meios de divulgação da pesquisa

Vale ressaltar que parte da pesquisa desenvolvida foi apresentada e publicada em anais de congressos nacionais (SBPO, ENEGEP e SIMPEP). A citar os seguintes trabalhos:

1. Balanced Scorecard para o controle e gestão de indicadores de manutenção industrial (SIMPEP/2014).
2. Programação de manutenção periódica para sistemas reparáveis críticos de um terminal logístico de açúcar utilizando análise e confiabilidade (SBPO/2015).
3. Um modelo de programação linear inteira para a tomada de decisão de manutenção preventiva (SBPO/2015).
4. Qual o impacto da confiabilidade operacional na gestão do efeito chicote em cadeias de suprimentos? (ENEGEP/2015).

Pretende-se ainda gerar artigos para submissão em revistas indexadas com os resultados apresentados na pesquisa

5.1 Considerações Finais

A execução dessa pesquisa representa a primeira etapa para desenvolvimento de um sistema híbrido de manutenção industrial pautado em TPM e RCM. Os próximos passos em pesquisas futuras é aplicar a sistematização e os métodos em estudos multicase em diferentes ambientes industriais, com o objetivo de verificar as facilidades, dificuldades e desafios do que é proposto, bem como avaliar os resultados obtidos. Pretende-se ainda consolidar o escopo e os requisitos das organizações para implementar o sistema híbrido R-TPM. A implementação em diferentes segmentos empresariais é importante para verificar realmente a efetividade do modelo híbrido proposto e a sua capacidade de se adaptar e moldar aos objetivos estratégicos de diferentes empresas e negócios.

REFERÊNCIAS

- Ahmad, M., Zakuan, N., Jusoh, A., and Takala, J. (2012). Relationship of TQM and Business Performance with Mediators of SPC, Lean Production and TPM. *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, 65:186–191.
- Ahuja, I. P. S. and Khamba, J. S. (2008). Strategies and success factors for overcoming challenges in TPM implementation in Indian manufacturing industry. *J. Qual. Maint. Eng. Iss J. Qual. Maint. Eng. Int. J. Qual. & Reliab. Manag.*, 14(7):356–374.
- Alebrant Mendes, A. and Duarte Ribeiro, J. L. (2014). Establishment of a maintenance plan based on quantitative analysis in the context of RCM in a JIT production scenario. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 127:21–29.
- Alsyouf, I. (2009). Maintenance practices in Swedish industries: Survey results. *Int. J. Prod. Econ.*, 121(1):212–223.
- Arabian-Hoseynabadi, H., Oraee, H., and Tavner, P. (2010). Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) for wind turbines. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 32(7):817–824.
- Arca, J. G. and Prado, J. C. P. (2008). Personnel participation as a key factor for success in maintenance program implementation: A case study. *Int. J. Product. Perform. Manag.*, 57(3):247–258.
- Arenales, M., ARMENTANO, V., and MORABITO, R. (2007). *Pesquisa operacional*. Coleção Campus-ABEPRO engenharia de produção. CAMPUS - RJ.
- Aspinwall, E. and Elgharib, M. (2013). TPM implementation in large and medium size organisations. *J. Manuf. Technol. Manag.*, 24(5):688–710.
- Assis, R. (2010). *Apoio à decisão em Manutenção na Gestão de Activos Físicos*. Lidel, Lisboa.
- Bakri, A. H., Rahim, A. R. A., Yusof, N. M., and Ahmad, R. (2012). Boosting Lean Production via TPM. *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, 65:485–491.
- Barends, D. M., Oldenhof, M. T., Vredenburg, M. J., and Nauta, M. J. (2012). Risk analysis of analytical validations by probabilistic modification of FMEA. *J. Pharm. Biomed. Anal.*, 64-65:82–6.
- Bartz, T., Siluk, J. C. M., and Bartz, A. P. B. (2014). Improvement of industrial performance with TPM implementation. *J. Qual. Maint. Eng.*, 20(1):2–19.
- Birolini, A. (2014). *Reliability Engineering*. London, 17th edition.
- Carretero, J., Pérez, J. M., García-Carballeira, F., Calderón, A., Fernández, J., García, J. D., Lozano, A., Cardona, L., Cotaina, N., and Prete, P. (2003). Applying RCM in large scale systems: A case study with railway networks. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 82(3):257–273.
- Chand, G. and Shirvani, B. (2000). Implementation of TPM in cellular manufacture. *J. Mater. Process. Technol.*, 103(1):149–154.
- Cheng, Z., Jia, X., Gao, P., Wu, S., and Wang, J. (2008). A framework for intelligent reliability centered maintenance analysis. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 93(6):806–814.
- Dave, Y. and Sohani, N. (2012). Single Minute Exchange of Dies: Literature Review. *Int. J. Lean Think.*, 3(2).

De Almeida, A. T., Cavalcante, C. A. V., Alencar, M. H., Ferreira, R. J. P., De Almeida- Filho, A. T., and Garcez, T. V. (2015). *Multicriteria and Multiobjective Models for Risk , Reliability and Maintenance Decision Analysis*. Springer, London.

de Souza, F. (2004). *Melhoria do pilar "manutenção planejada"da TPM através da utilização do RCM para nortear as estratégias de manutenção*. Mestrado profissional, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Mestrado Profissionalizante em Engenharia.

Ebrahimipour, V., Rezaie, K., and Shokravi, S. (2010). An ontology approach to support FMEA studies. *Expert Syst. Appl.*, 37(1):671–677.

Fernández, J. and Márquez, A. (2012). *Maintenance Management in Network Utilities*. Fogliato, Flavio e Ribeiro, J. (2009). *Confiabilidade e Manutenção Industrial*. Elsevier Brasil.

Fogliatto, F. S. and Ribeiro, J. L. D. (2009). *Confiabilidade e Manutenção Industrial*. Elsevier Editora, Rio de Janeiro.

Gavranis, A. and Kozanidis, G. (2015). An exact solution algorithm for maximizing the fleet availability of a unit of aircraft subject to flight and maintenance requirements. *Eur. J. Oper. Res.*, 242(2):631–643.

Gil, A. C. (2002). Como classificar as pesquisas... *Como elaborar projetos de pesquisa*, 4:41–56.

Gil, A. C. (2010). Métodos e técnicas de pesquisa social. In *Métodos e técnicas de pesquisa social*. Atlas.

Gupta, P., Gupta, S., and Gandhi, O. (2014). Annual maintenance budget estimation for a plant system. *J. Qual. Maint. Eng.*, 20(2):193–210.

He, Z., Qi, E., and Liu, Z. (2002). Continuous improvement through integration of quality tools. *Asian Journal on Quality*, 3(2):38–45.

Heo, J. H., Kim, M. K., and Lyu, J. K. (2014). Implementation of Reliability-Centered Maintenance for transmission components using Particle Swarm Optimization. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 55:238–245.

Igba, J., Alemzadeh, K., Anyanwu-Ebo, I., Gibbons, P., and Friis, J. (2013). A Systems Approach Towards Reliability-Centred Maintenance (RCM) of Wind Turbines. *Pro- cedia Comput. Sci.*, 16:814–823.

Ireland, F. and Dale, B. (2001). A study of total productive maintenance implementation.

Jain, A., Bhatti, R., and Singh, H. (2003). Total productive maintenance (TPM) implementation practice. *Int. J. Lean Six Sigma*.

Jain, A., Bhatti, R., Singh, H., Bartz, T., Cezar, J., Siluk, M., Paula, A., and Bartz, B. (2014). Total productive maintenance (TPM) implementation practice: A literature review and directions. *Int. J. Lean Six Sigma Iss Int. J. Qual. & Reliab. Manag. Iss J. Qual. Maint. Eng.*, 5(1):293–323.

Jiménez, M., Romero, L., Domínguez, M., and Espinosa, M. d. M. (2015). 5S methodology implementation in the laboratories of an industrial engineering university school. *Saf. Sci.*, 78:163–172.

Kaplan, R. and Norton, D. (1996). *The Balanced Scorecard: Translating Strategy Into Action*. Harvard Business School Press. Harvard Business School Press.

Karanikas, N. (2013). Using reliability indicators to explore human factors issues in maintenance databases. *Int. J. Qual. Reliab. Manag.*, 30(2):116–128.

Kelly, A. (2006). *Plant Maintenance Management Set*. Elsevier.

Knechtges, P., Bell, C. J., and Nagy, P. (2013). Utilizing the 5S methodology for radiology workstation design: applying lean process improvement methods. *J. Am. Coll. Radiol.*, 10(8):633–4.

Kumar, J., Soni, V. K., and Agnihotri, G. (2014). Impact of TPM implementation on Indian manufacturing industry. *Int. J. Product. Perform. Manag.*, 63(1):44–56.

Lakatos, E. M.; Marconi, M. (2009). *Metodologia científica*. Atlas, São Paulo, 5ª edition.

Lazzaroni, M. (2011). *Reliability engineering: basic concepts and applications in ICT*. Lobo, B. S. A. (2013). *Gestão de Manutenção*.

Manuel Inácio da Silva, C., Manuel Pereira Cabrita, C., and Carlos de Oliveira Matias, J. a. (2008). Proactive reliability maintenance: a case study concerning maintenance service costs. *J. Qual. Maint. Eng.*, 14(4):343–355.

Manzini, R., Accorsi, R., Cennerazzo, T., Ferrari, E., and Maranesi, F. (2015). The scheduling of maintenance. A resource-constraints mixed integer linear programming model. *Comput. Ind. Eng.*

Manzini, Riccardo; Regattieri, Alberto; Pham, Hoang; Ferrari, E. (2010). *Maintenance for Industrial Systems*. Springer, London, 1 edition.

Marín-García, J. a. and Martínez, R. M. (2013). Barreras y facilitadores de la implantación del TPM. *Intang. Cap.*, 9(3):823–853.

Márquez, a. C. (2007). *The maintenance management framework: models and methods for complex systems maintenance*.

McCarthy, D. and Rich, N. (2015). *Lean TPM*. Elsevier.

McIntosh, R. I., Culley, S., a.R. Mileham, and Owen, G. (2000). A critical evaluation of Shingo's 'SMED' (Single Minute Exchange of Die) methodology. *Int. J. Prod. Res.*, 38(11):2377–2395.

Mendes, A. A. and Ribeiro, J. L. D. (2011). Um estudo do suporte quantitativo necessário para a operacionalização da MCC. *Produção*, 21(4):583–593.

Mkandawire, B. O., Ijumba, N., and Saha, A. (2015). Transformer risk modelling by stochastic augmentation of reliability-centred maintenance. *Electr. Power Syst. Res.*, 119:471–477.

Moghaddam, K. S. (2013). Multi-objective preventive maintenance and replacement scheduling in a manufacturing system using goal programming. *Int. J. Prod. Econ.*, 146(2):704–716.

Moreira, A. C. and Pais, G. C. S. (2011). Single minute exchange of die. A case study implementation. *J. Technol. Manag. Innov.*, 6(1):129–146.

Moubray, J. and Network, T. (1997). *Reliability-Centered Maintenance*. Elsevier Science.

Muchiri, P., Pintelon, L., Gelders, L., and Martin, H. (2011). Development of maintenance function performance measurement framework and indicators. *Int. J. Prod. Econ.*, 131(1):295–302.

Nakajima, S. (1988). *Introduction to TPM: Total Productive Maintenance*. Preventative Maintenance Series. Productivity Press.

Nakajima, S. (1989). *TPM Development Program: Implementing Total Productive Maintenance*. Preventative Maintenance Series. Productivity Press.

NASA, A. N. A. and Space (2000). Reliability centered maintenance guide for facilities and collateral equipment. page 365.

Pinto, R. G. (2008). *A importância dos aspectos básicos da manutenção para a implantação do RCM: Um estudo de caso*. PhD thesis.

Prakas, J., Murali Manohar, M. B., Jain, A., Bhatti, R., Singh, H., Majumdar, J. P., and Murali Manohar, B. (2012). Implementing TPM programme as a TQM tool in Indian manufacturing industries. *Implementing TPM programme as a TQM tool in Indian manufacturing industries. Asian J. Qual. Int. J. Lean Six Sigma Int. J. Qual. & Reliab. Manag. J. Qual. Maint. Eng.*, 13(4):185–198.

Rodrigues, M. and Hatakeyama, K. (2006). Analysis of the fall of TPM in companies. *J. Mater. Process. Technol.*

Salonen, A. and Bengtsson, M. (2011). The potential in strategic maintenance development. *J. Qual. Maint. Eng.*, 17(4):337–350.

Sampieri, R. H.; Collado, C. F.; Lúcio, M. P. B. (2013). *Metodologia de pesquisa*. Penso Editora, Porto Alegre, 5 edition.

Saurin, T. A., Ribeiro, J. L. D., and Vidor, G. (2012). A framework for assessing poka-yoke devices. *J. Manuf. Syst.*, 31(3):358–366.

Scherrer-Rathje, M., Boyle, T. A., and Deflorin, P. (2009). Lean, take two! Reflections from the second attempt at lean implementation. *Bus. Horiz.*, 52(1):79–88.

Selvik, J. T. and Aven, T. (2011). A framework for reliability and risk centered maintenance. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 96(2):324–331.

Seng, O., Jantan, M., and Ramayah, T. (2005). Implementing Total Productive Maintenance (TPM) in Malaysian manufacturing organisation: an operational strategy study. *ICFAI J. Oper. Manag.*

Sharma, R. K., Kumar, D., and Kumar, P. (2006). Manufacturing excellence through TPM implementation: a practical analysis. *Ind. Manag. Data Syst.*, 106(2):256–280.

Shingo, S. (1985). *A Revolution in Manufacturing: The SMED System*. Taylor & Francis.

Simons, R., Davila, A., and Kaplan, R. (2000). *Performance Measurement and Control Systems for Implementing Strategy: Text and Cases*. Performance Measurement & Control Systems for Implementing Strategy. Prentice Hall PTR.

Singh, R., Gohil, A. M., Shah, D. B., and Desai, S. (2013a). Total Productive Maintenance (TPM) Implementation in a Machine Shop: A Case Study. *Procedia Eng.*, 51:592–599.

Singh, R., Gohil, A. M., Shah, D. B., and Desai, S. (2013b). Total productive maintenance (TPM) implementation in a machine shop: A case study. *Procedia Eng.*, 51(NuICONE 2012):592–599.

Smith, A. and Hinchcliffe, G. (2003). *RCM—Gateway to World Class Maintenance*. Elsevier Science.

Smith, R. and Hawkins, B. (2004). *Lean Maintenance*. Elsevier.

Smith, R. and Mobley, R. (2011). *Rules of Thumb for Maintenance and Reliability Engineers*. Elsevier Science.

Soković, M., Jovanović, J., Krivokapić, Z., and Vujović, A. (2009). Basic quality tools in continuous improvement process. *Stroj. Vestnik/Journal Mech. Eng.*, 55(5):1–9.

Stenström, C., Parida, A., Kumar, U., and Galar, D. (2013). Performance indicators and terminology for value driven maintenance. *J. Qual. Maint. Eng.*, 19(3):222–232.

Sundar, R., Balaji, A., and Kumar, R. S. (2014). A Review on Lean Manufacturing Implementation Techniques. *Procedia Eng.*, 97:1875–1885.

Suzuki, Y. (1994). *Reliability Engineering.*, volume 10.

Tenera, A. and Pinto, L. C. (2014). A Lean Six Sigma (LSS) Project Management Improvement Model. *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, 119:912–920.

Tondato, R. (2003). *Manutenção Produtiva Total: Estudo de Caso na Indústria Gráfica*. Dissertação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Trafialek, J. and Kolanowski, W. (2014). Application of Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) for audit of HACCP system. *Food Control*, 44:35–44.

Van Horenbeek, A. and Pintelon, L. (2013). A dynamic predictive maintenance policy for complex multi-component systems. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 120:39–50.

Verma, A. K., Srividya, A., and Karanki, D. R. (2010). *Reliability and Safety Engineering*.

Wang, W. (2012). An overview of the recent advances in delay-time-based maintenance modelling. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 106:165–178.

Werkema, C. (2012). Poka Yoke (Capítulo 11). In *Lean Seis Sigma*, pages 92–99.

Xenos, H. G. (2014). *Gerenciando a Manutenção Produtiva*. Falconi, Nova Lima.

Yin, R. K. (2005). *Estudo de Caso Planejamento e Métodos*, volume 15.

Yssaad, B., Khiat, M., and Chaker, a. (2014). Reliability centered maintenance optimization for power distribution systems. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 55:108–115.

Zio, E. and Compare, M. (2013). Evaluating maintenance policies by quantitative modeling and analysis. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 109:53–65.

APÊNDICES

APÊNDICE I - GANHOS DOS MODELOS DE PLI E DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA FRENTE A MANUTENÇÃO CORRETIVA

Ensaio	Redução de custos do modelo PLI do R-TPM frente a manutenção corretiva	Redução de custos do modelo de manutenção preventiva frente a manutenção corretiva	Ensaio	Redução de custos do modelo PLI do R-TPM frente a manutenção corretiva	Redução de custos do modelo de manutenção preventiva frente a manutenção corretiva
1	15,59%	13,22%	51	13,30%	10,16%
2	10,13%	11,27%	52	19,85%	18,43%
3	15,79%	13,40%	53	14,98%	12,83%
4	9,39%	10,37%	54	18,08%	18,09%
5	22,40%	21,57%	55	9,99%	7,87%
6	18,70%	18,20%	56	11,40%	12,94%
7	12,92%	12,52%	57	20,56%	18,11%
8	19,65%	19,71%	58	13,96%	12,13%
9	14,33%	14,64%	59	20,11%	18,64%
10	24,23%	16,36%	60	16,96%	15,35%
11	10,56%	11,10%	61	16,82%	15,24%
12	13,84%	12,91%	62	15,56%	12,30%
13	14,86%	15,85%	63	14,35%	14,03%
14	21,55%	13,14%	64	14,76%	13,67%
15	17,32%	17,12%	65	15,67%	14,83%
16	13,95%	13,61%	66	13,13%	13,08%
17	13,33%	9,99%	67	8,52%	12,62%
18	12,39%	13,34%	68	15,87%	16,26%
19	16,77%	18,02%	69	16,24%	14,14%
20	11,76%	13,62%	70	11,77%	10,73%
21	15,91%	13,71%	71	9,29%	8,04%
22	18,27%	16,01%	72	13,71%	13,78%
23	11,98%	11,81%	73	20,56%	19,84%
24	14,34%	13,71%	74	13,64%	12,00%
25	16,94%	15,10%	75	16,01%	13,24%
26	17,04%	18,42%	76	18,95%	14,98%
27	15,18%	17,20%	77	16,80%	13,63%
28	13,58%	11,73%	78	9,18%	8,01%
29	9,27%	7,80%	79	12,80%	11,63%
30	20,86%	22,57%	80	11,56%	10,16%
31	15,19%	13,19%	81	19,61%	14,02%
32	9,89%	10,98%	82	11,33%	10,78%
33	19,10%	18,54%	83	13,75%	13,20%
34	24,42%	22,91%	84	11,16%	8,44%
35	19,61%	22,51%	85	14,87%	12,10%
36	12,99%	14,42%	86	10,41%	9,70%
37	17,10%	16,11%	87	13,71%	12,50%
38	9,92%	8,59%	88	14,51%	15,43%
39	11,85%	11,71%	89	14,65%	13,21%
40	12,29%	13,35%	90	9,12%	8,66%
41	12,18%	11,43%	91	9,80%	7,48%
42	18,21%	18,03%	92	15,40%	14,07%
43	16,38%	14,39%	93	18,11%	16,73%
44	13,03%	12,76%	94	10,90%	11,93%
45	11,04%	9,06%	95	11,47%	12,66%
46	18,98%	16,17%	96	13,86%	10,59%
47	10,95%	8,90%	97	10,96%	12,37%
48	17,99%	18,13%	98	20,21%	13,30%
49	24,41%	15,73%	99	17,11%	12,71%
50	16,72%	14,92%	100	12,72%	11,86%
MÉDIA				15,50%	14,60%
Desvio Padrão				4,02%	3,66%
Maior ganho				24,42%	22,91%
Menor ganho				9,27%	7,80%
Coef. Variação de Pearson				0,259	0,251

APÊNDICE II - PARÂMETROS p E β UTILIZADOS NO PLI

Variável	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6
x1	0,76048	0,205303907	0,034217318	0,239521225	0	0,760478775
x2	0,63734	0,31085499	0,051809165	0,362664155	0	0,637335845
x3	0,73112	0,230469726	0,038411621	0,268881347	0	0,731118653
x4	0,74825	0,179822559	0,071929024	0,251751583	0	0,748248417
x5	0,82168	0,127371927	0,050948771	0,178320698	0	0,821679302
x6	0,81742	0,1304143	0,05216572	0,182580019	0	0,817419981
x7	0,68714	0,223472234	0,089388894	0,312861128	0	0,687138872
x8	0,76186	0,170097732	0,068039093	0,238136825	0	0,761863175
x9	0,82407	0,125664571	0,050265828	0,1759304	0	0,8240696
x10	0,68073	0,027908199	0,291363742	0,319271941	0	0,680728059

Variável	p1	p2	p3	p4	p5	p6	mi
x1	0	R\$ 1.031,40	R\$ 5.876,99	R\$ 1.031,40	R\$ 15.271,59	R\$ 125,34	125,3448
x2	0	R\$ 1.031,40	R\$ 5.876,99	R\$ 1.031,40	R\$ 15.271,59	R\$ 125,34	125,3448
x3	0	R\$ 1.031,40	R\$ 5.876,99	R\$ 1.031,40	R\$ 15.271,59	R\$ 125,34	125,3448
x4	0	R\$ 552,46	R\$ 3.723,35	R\$ 465,57	R\$ 3.723,35	R\$ 117,03	117,0288
x5	0	R\$ 552,46	R\$ 3.723,35	R\$ 465,57	R\$ 3.723,35	R\$ 117,03	117,0288
x6	0	R\$ 552,46	R\$ 3.723,35	R\$ 465,57	R\$ 3.723,35	R\$ 117,03	117,0288
x7	0	R\$ 552,46	R\$ 3.723,35	R\$ 465,57	R\$ 3.723,35	R\$ 117,03	117,0288
x8	0	R\$ 552,46	R\$ 3.723,35	R\$ 465,57	R\$ 3.723,35	R\$ 117,03	117,0288
x9	0	R\$ 552,46	R\$ 3.723,35	R\$ 465,57	R\$ 3.723,35	R\$ 117,03	117,0288
x10	0	1302,056	8831,8504	1302,056	0	109,875	109,875

APÊNDICE III - PANORAMA DE SIMULAÇÕES DE FALHAS NO MODELO R- TPM

[illegible]

R-TPM

Uma abordagem híbrida entre
a Manutenção Produtiva Total
e a Manutenção Centrada em
Confiabilidade para ambientes
industriais



www.atenaeditora.com.br



contato@atenaeditora.com.br



[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)



www.facebook.com/atenaeditora.com.br

R-TPM

Uma abordagem híbrida entre
a Manutenção Produtiva Total
e a Manutenção Centrada em
Confiabilidade para ambientes
industriais



www.atenaeditora.com.br



contato@atenaeditora.com.br



[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)



www.facebook.com/atenaeditora.com.br