

ESCOLA DE GUERRA NAVAL

CMG(EN) Carlos José Peixoto

A IMPLEMENTAÇÃO DA MANUTENÇÃO PREDITIVA NA MB
UMA PROPOSTA PARA O AUMENTO DA DISPONIBILIDADE E CONFIABILIDADE
DOS MEIOS

Rio de Janeiro

2020

CMG(EN) Carlos José Peixoto

A IMPLEMENTAÇÃO DA MANUTENÇÃO PREDITIVA NA MB
UMA PROPOSTA PARA O AUMENTO DA DISPONIBILIDADE E CONFIABILIDADE
DOS MEIOS

Tese apresentada à Escola de Guerra Naval, como requisito parcial para a conclusão do Curso de Política e Estratégia Marítimas.

Orientador: CF (RM1-EN) José Roberto Brito de Souza

Rio de Janeiro

Escola de Guerra Naval

2020

AGRADECIMENTOS

Minha profunda gratidão a DEUS, por tudo que tem me dado, me amparando e me fortalecendo nessa jornada existencial, abrandando minhas angústias, atenuando minhas dores e mostrando-me o caminho nas minhas incertezas. *“Por isso não tema, pois estou com você; não tenha medo, pois sou o seu Deus. Eu o fortalecerei e o ajudarei; eu o segurarei com a minha mão direita vitoriosa. Isaías 41:10”*.

Aos meus pais pelo amor incondicional e pelos exemplos de conduta ilibada. Que minha mãe, Celma, na glória de DEUS desde 2015, possa receber meu carinho, meu afetuoso abraço e minha eterna gratidão por tudo.

Ao meu pai, Carlos, exemplo de honradez e dedicação à família, espelho de minha conduta. Em cima de seus 88 anos, em cima de sua sapiência, em cima de sua coragem, navega com altivez e bravura por esses mares da vida deixando nesses mares da vida esteira alva e brilhante.

Às minhas irmãs Sandra, Helen e Daniele pela amizade e convivência fraterna.

À minha amada esposa, Rosemere, companheira e parceira, completando a minha vida com carinho e afeto. Um cais seguro em minha existência que preenche a minha alma com amor alcançando as dimensões espirituais.

Júlia e Carlos. Agradeço a DEUS por ter me honrado em tê-los como filhos. Vocês são exemplos de retidão de conduta.

Ao meu netinho Joaquim, novo tripulante de nossa família. Presente de DEUS, que chegou iluminado, irradiando luz e bondade em tudo e em todos. Muito obrigado por ter vindo.

Aos meus sogros, Nicério e Madalena, pessoas simples com corações grandiosos.

Ao amigo Luís Henrique Monteiro de Castro, pelas longas horas de trocas de ideias que muito contribuiu para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu Orientador, CF (RM1-EN) José Roberto Brito de Souza, que com fidalguia orientou-me com clareza e objetividade na confecção desta tese. Dispensando grande disponibilidade durante a elaboração deste trabalho.

Ao CMG(RM1-IM) João Roberto Carneiro de Freitas, Gerente Sênior de Contas MTU do Brasil, pelas reuniões e pelo vasto material disponibilizados no sentido de mostrar e esclarecer a evolução e perspectivas da manutenção preditiva na MTU.

À empresa SKM Engenharia de Automação e Assistência Técnica, empresa da BID, na pessoa dos Diretores Sr. Nicolau Alves Sebastião, Sr. Álvaro Kuabara Filho, Sr. José Carlos Machado, e do Sr. Antônio Roberto Rodrigues Penna, pela vasta literatura, apresentação de novos projetos e implementação de manutenção preditiva.

À Escola de Guerra Naval pela oportunidade nos dada de aprimorarmos nossos conhecimentos com conteúdo de alto nível que contribuirá para nos tornarmos melhores do que quando aqui chegamos.

Aos colegas da Turma CPEM-2020, pela camaradagem convivência amistosa.

Ao Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro, instituição secular, onde tive a honra de servir durante quase toda minha carreira. Organização militar que forjou todas as minhas virtudes como Oficial e Engenheiro.

À Marinha do Brasil, por todas as oportunidades que tive ao longo de minha carreira, coroando com esse excelente curso.

PARADIGMAS DA MANUTENÇÃO

PASSADO: o profissional da manutenção sente-se realizado quando executa um bom reparo - eficiência. **ATUAL:** O profissional de manutenção sente-se bem quando evita todas as falhas não previstas – eficácia

Atualmente não é mais aceitável que o equipamento ou sistema pare de maneira não prevista. Isso é o fracasso da gestão da manutenção

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho de pesquisa é verificar a aplicabilidade da manutenção preditiva na Marinha do Brasil como uma forma de aumentar a confiabilidade e disponibilidade com uma adequada relação custo-benefício, sendo uma solução viável para os Navios em operação e para as novas aquisições. Foi feita pesquisa descritiva com objetivo encontrar no referencial teórico argumentos que pudessem justificar os benefícios da manutenção preditiva. No desenvolvimento da tese foi comparada a manutenção preditiva com a preventiva e corretiva, por serem as mais praticadas na Marinha do Brasil. Apesar de estar previsto em publicações da Marinha o emprego da manutenção preditiva, observou-se que não foi aplicada ou empregada de maneira modesta, o que acelerou a queda de desempenho dos ativos contribuindo para a situação crítica atual que ainda é potencializada pelas restrições orçamentárias e a idade avançada dos Navios. Os custos mais elevados para implementar manutenção preditiva serão compensados pelo aumento da confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade e ao longo do ciclo de vida de sistema de defesa se tornar também mais barata que as demais. A manutenção preditiva deve ser protagonista numa nova mentalidade de manutenção em que intervenções corretivas e preventivas tornar-se-ão mais eficazes.

Palavras-chave: corretiva; preventiva; preditiva; disponibilidade; confiabilidade e manutenibilidade.

ABSTRACT

The main objective of this research is to verify the applicability of predictive maintenance in the Brazilian Navy as a way to increase reliability and availability at an adequate cost-benefit ratio, so that it could become a viable solution for ships in operation and for new acquisitions. Descriptive research was carried out with the objective of finding arguments in the existing literature that could provide support to the benefits of using predictive maintenance. In the development of this thesis, predictive and corrective maintenance were compared, as they are the most performed in the Brazilian Navy. Although the use of predictive maintenance is foreseen in Navy publications, it was observed that it was not applied or used modestly, which accelerated the downgrade of asset performance contributing to the current critical situation that is still worsened -by budget constraints and the advanced age of ships. The higher costs to implement predictive maintenance will be offset by the increase in reliability, availability, and maintainability and throughout the defense system lifecycle it becomes cheaper than other types of maintenance. Predictive maintenance must be a protagonist in a new maintenance mentality where corrective and preventive interventions will become more effective.

Keywords: corrective; preventive; predictive, availability; reliability and maintainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Linha do tempo de falha da bomba de incêndio	30
Figura 2 -	Linha do tempo de intervenção para reparo.....	31
Figura 3 -	Padrões de idade-confiabilidade para equipamentos não estruturais de aeronaves.....	46
Gráfico 1 -	Da confiabilidade	37
Gráfico 2 -	Curva da banheira - ciclo de vida de equipamento	43
Gráfico 3 -	Curva PF - Áreas características de desempenho	50
Gráfico 4 -	Curva PF - Análise dos pontos P e F.....	51
Gráfico 5 -	Curva PF - Intervalo PF	53
Gráfico 6 -	Influência da manutenção preditiva no ciclo de vida.....	53
Gráfico 7 -	Curva PF - Custo para reparo.....	56
Gráfico 8 -	Tipos de falha pelo percentual de ocorrência.....	58
Gráfico 9 -	Partição de falhas em função do envelhecimento	58
Gráfico 10 -	Custos relativos às manutenções corretiva, preventiva e preditiva.....	61
Gráfico 11 -	Custo pelo nível de manutenção	63
Gráfico 12 -	Lucro pela Disponibilidade.....	64
Gráfico 13 -	Distribuição das rotinas por Classe de Navios e tipos de manutenção	67
Gráfico 14 -	Partição percentual por Classe de Navios e tipo de manutenção	68
Gráfico 15 -	Partição percentual total consolidada.....	68
Gráfico 16 -	Partição percentual ideal	69
Gráfico 17 -	Duração de PMG de Submarino em dias	71
Gráfico 18 -	Duração de PMG - FCN em dias	70
Gráfico 19 -	Duração de PMG - CCI em dias	71

LISTA DE TABELAS

1 - Tempo total para a correção incluindo aquisição de sobressalentes e insumos	34
2 - Cálculo de confiabilidade.....	36
3 - Comportamento da função taxa de falhas	43
4 - Relação entre as fases do ciclo de vida e estratégias de manutenção de equipamentos.....	45
5 - Distribuição das rotinas por Classe de Navios e tipos de manutenção	66
6 - Duração de PMG.....	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT -	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAMAN -	Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos
AMRJ -	Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro
AMRJ-21 -	Departamento de Orçamento e Controle Industrial
BEI -	Bomba de Extração e Incêndio
C -	Criticidade
CCI -	Corvetas Classe Inhaúma
CCQ -	Círculo de Controle da Qualidade
C-PEM -	Curso de Política e Estratégia Marítimas
D -	Detecção
D_t -	Disponibilidade técnica
D_{in} -	Disponibilidade inerente
D_{op} -	Disponibilidade operacional
DEN -	Diretoria de Engenharia Naval
DGePEM	Diretoria de Gestão dos Programas Estratégicos da Marinha
DGMM -	Diretoria Geral do Material da Marinha
DIM	Diretoria Industrial da Marinha
EGN -	Escola de Guerra Naval
EMA -	Estado Maior da Armada
EUA -	Estados Unidos da América
F -	Falha funcional
FCG -	Fragatas Classe Greenhalgh
FCN -	Fragatas Classe Niterói

FCT -	Fragatas Classe Tamandaré
$F_{InDisp_{Pr}}$ -	Frequência da indisponibilidade devido manutenção preventiva
F_{InDisp_C} -	Frequência de indisponibilidade devido manutenção corretiva
GCV -	Gestão do Ciclo de Vida
GCVSD -	Gestão do Ciclo de Vida de Sistemas de Defesa
GTI -	Grupo de Trabalho Intersetorial
IA -	Inteligência Artificial
IEC 60300-3-11 -	<i>Gestion de la surté de fonctionnement – Parte 3-11: Guide d’application – Maintenance basée sur la fiabilité. Comission Electrotechnique Internationale, Geneva, Switzerland.</i>
InspPrev -	Inspeção preventiva
LCC	Life Cycle Cost ou Custo do Ciclo de Vida
MB -	Marinha do Brasil
MC -	Manutenção Corretiva
MCC / RCM -	Manutenção Centrada em Confiabilidade (<i>Reliability Centered Maintenance</i>)
MCE -	Manutenção Corretiva Emergencial
MCp -	Manutenção Corretiva Programada
MCP -	Motor a combustão principal
MTTC -	<i>Mean Time to corrective</i> ou tempo médio de manutenção
MTTM -	<i>Mean time to maintenance</i> ou tempo médio de manutenção preventiva
MPr -	Manutenção Preventiva
MPd -	Manutenção Preditiva
MDe -	Manutenção Detectiva
MPT / TPM -	Manutenção Produtiva Total (<i>Total Productive Maintenance</i>)
NBR -	Norma Técnica

Mil-Std-1629A -	<i>Military Standard: Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Critically analysis</i>
MTBF -	<i>Mean Time between failures</i> ou Tempo Médio entre Falhas
MTBM -	<i>Mean Time Between Maintenance</i> ou Tempo Médio entre Manutenções
MTTR -	<i>Mean Time to Repair</i> ou Tempo Médio para Reparo
MTTR _{Reactive} -	Tempo médio para reparo corretivo ou preventivo
n_{Pr} -	Número de manutenções preventivas realizadas no período
n_{Cr} -	Número de manutenções corretivas realizadas no período
O -	Ocorrência
OM -	Organização Militar
P -	Modo de Falha ou Falha Potencial
PDE -	Período de Docagem ⁹ Extraordinário
PDR -	Período de Docagem de Rotina
PME -	Período de Manutenção Extraordinário
PMG -	Período de Manutenção Geral
RestPrev -	Restauração preventiva
RPN -	Risk Priority Number
S -	Severidade
SAE JA1012 -	<i>SAE International. Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Standard. SAE JA1012, Warrendale, PA, USA, 2002.</i>
SbtPrev -	Substituição preventiva
SMP -	Sistema de Manutenção Planejada
t_{MC} -	Tempo gasto na manutenção corretiva
t_{MPr} -	Tempo gasto na manutenção preventiva
ZD -	Zero Defeito
Δt -	Intervalo de tempo considerado para análise

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	Conceitos preliminares	18
2.2	Conceito de manutenção.....	19
2.3	Histórico da manutenção	21
2.4	Tipos de manutenção	22
2.4.1	Manutenção corretiva	22
2.4.2	Manutenção preventiva.....	24
2.4.3	Manutenção detectiva	25
2.4.4	Manutenção produtiva total ou <i>total productive maintenance</i>	25
2.4.5	Manutenção centrada em confiabilidade ou <i>reliability centered maintenance</i>	26
3	INDICADORES PARA GESTÃO DE MANUTENÇÃO	29
3.1	Tempo médio entre falhas ou mean time between failures (MTBF).....	29
3.2	Tempo médio entre manutenção ou mean time to repair (MTTR).....	30
3.3	Disponibilidade.....	32
3.3.1	Disponibilidade inerente.....	32
3.3.2	Disponibilidade operacional	33
3.3.3	Disponibilidade técnica	34
3.3.4	Considerações sobre disponibilidade.....	34
3.4	Confiabilidade	35
3.5	Mantenabilidade	37
4	MANUTENÇÃO PREDITIVA.....	41
4.1	Condições para implementação	41
4.2	Curvas típicas de falha durante um período – Taxa de falha.....	42
4.2.1	Curva da banheira	43
4.2.2	Outros tipos de curva de comportamento de falha ao longo do tempo	46
4.3	Curva PF	47
4.3.1	Modo de falha.....	48
4.3.2	Falha funcional	48
4.3.3	Representação gráfica.....	49

4.3.4	Pontos P e F	50
4.3.5	O Intervalo PF	52
4.3.6	Como a manutenção preditiva influencia o comportamento da curva PF e no ciclo de vida de ativos	53
4.3.7	Como a manutenção preditiva influencia no custo de manutenção	55
5	MANUTENÇÃO PREDITIVA E SUA INTER-RELAÇÃO COM A CORRETIVA E PREVENTIVA.....	57
5.1	Comportamento da falha em função do tempo.....	57
5.2	Análise FMEA	59
5.3	Custos das manutenções corretiva, preventiva e preditiva	60
5.4	Análise econômica da política atual de manutenção na MB	61
5.5	Vantagens econômicas da manutenção preditiva.....	63
6	SITUAÇÃO ATUAL DA MANUTENÇÃO NA MARINHA DO BRASIL	65
6.1	Sistema de Manutenção Planejada e partição pelas manutenções preventiva, detectiva e preditiva	66
6.2	Período de manutenção nos últimos anos.....	68
6.3	A manutenção preditiva poderia ter melhorado o cenário atual.	71
7	CONCLUSÃO.....	74
	REFERÊNCIAS	79

1 INTRODUÇÃO

A função logística da manutenção¹ é uma atividade fortemente relacionada à disponibilidade² e à confiabilidade³ de equipamentos e de sistemas. Quando a manutenção é bem planejada e bem executada, resulta em benefícios como maior segurança para os operadores de equipamentos, menor impacto negativo ao meio ambiente e preservação do material.

Até a década de setenta do século XX a manutenção dos meios navais baseava-se na manutenção corretiva não planejada. Com a chegada das Fragatas Classe Niterói (FCN), entre o final da década de setenta e o início da década de oitenta do mesmo século, a MB elevou o patamar de seus procedimentos de manutenção. Foi estabelecido um Sistema de Manutenção Planejada (SMP) inspirado nas rotinas da *Royal Navy* (RN)⁴, baseadas em intervenções preventivas. Essas rotinas previam a substituição de itens ou de componentes em consonância com horas de funcionamento e com o tempo de instalação ou vinculadas a grandes períodos de manutenção como, por exemplo, o Período de Manutenção Geral (PMG) ou o Período de Docagem de Rotina (PDR).

A MB tem privilegiado as manutenções corretivas (MC) e preventivas (MPr), caracterizadas, não obstante suas relevâncias, por intervenções excessivas. Essas rotinas, somadas à idade avançada dos Navios da MB, acabam por ter um incremento significativo nos custos de manutenção, sem apresentar o aumento da confiabilidade e da disponibilidade esperados. Ainda em relação aos pontos negativos das intervenções preventivas, Kardec e Nascif (2010) destacam que há um aumento da probabilidade de falha, após as revisões, geralmente, ocasionados por falha humana, por emprego de procedimento de correção e técnica inadequados, por uso de peças de reposição defeituosas e pelo desconhecimento de parâmetros de montagem e de ajustes.

A política de manutenção impacta diretamente a disponibilidade e a confiabilidade

¹ A logística naval agrupa atividades funcionais de uma mesma natureza, correlatas ou afins, sob a denominação de funções logísticas a seguir relacionadas: suprimento, manutenção, salvamento, saúde, recursos humanos, transporte e engenharia. De acordo com o Manual de Logística da Marinha (EMA-400).

² Conforme definição da norma técnica, disponibilidade é a capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando-se em conta os aspectos combinados de sua confiabilidade [...]. Norma Técnica NBR 5462 - Confiabilidade e Manutenibilidade. (ABNT, 1994).

³ Confiabilidade é a capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo. Norma Técnica NBR 5462 - Confiabilidade e Manutenibilidade. (ABNT, 1994).

⁴ Marinha do Reino Unido.

dos Navios, além de influenciar seu ciclo operativo. Sob essa ótica, não considerar a função logística da manutenção como um dos pilares que sustentam a operação e a missão do setor operativo, é apontar para um cenário desfavorável, com sérias consequências para o dever constitucional da Marinha do Brasil. É fundamental pontuar que uma política inadequada de manutenção afeta a manutenibilidade⁵ e arrasta consigo o desgaste prematuro de itens, podendo não só inviabilizar a operação dos Navios, devido a problemas tecnológicos e econômicos, como tornar, dessa forma, prescindível a recuperação do Meio em questão.

A manutenção atualmente aplicada na MB é norteadada pelas condutas preventivas, como citado anteriormente. Cabe lembrar que essa modalidade de intervenção é dispendiosa e nem sempre aumenta a disponibilidade e a confiabilidade dos meios. Por diversos motivos, atualmente, as rotinas preventivas não têm sido aplicadas em sua plenitude, acarretando a degradação inesperada de componentes, o aparecimento de novos defeitos e falhas inéditas.

A partir de meados da década de noventa do século XX, a função logística da manutenção amargou retrocesso, pois não houve amadurecimento no planejamento e na execução da manutenção, o que tornou as intervenções preventivas e corretivas menos eficientes e eficazes. Desde o advento das FCN, a política de manutenção da MB deveria ter sido pautada na busca incessante pela melhoria contínua dos processos de MC e de MPr, por meio de inovações⁶, as quais iriam possibilitar o emprego da Manutenção Preditiva (MPd).

Contudo, com o passar do tempo, ocorreram, não só a redução gradativa da disponibilidade de sobressalentes e amplificação do desgaste de equipamentos e componentes, como também a perda de capacidade técnica. Devido a tais fatos, acrescido por restrições orçamentárias e agravado pelo envelhecimento dos Navios, a MB sofre, atualmente, com os efeitos nocivos gerados pela falta de uma política de manutenção inovadora, de sorte que fossem adotados novos métodos de intervenção técnica, associados a gestões modernas e eficientes.

Desse modo, atualmente, predominam na MB ações corretivas. O abandono parcial da MPr tem aumentado a frequência e a gravidade das falhas, tornando a correção mais complicada tecnicamente, aumentando o tempo de reparo e amplificando o fenômeno

⁵ Manutenibilidade, conforme definido na norma técnica NBR 5462 - *Confiabilidade e Manutenibilidade* (ABNT), é a capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas, sob condições de uso especificadas, quando a manutenção é executada sob condições determinadas e mediante procedimentos e meios prescritos.

⁶ Inovação engloba todas as atividades de uma nova tecnologia. Inovar significa dominar a arte da mudança, ou seja, as organizações devem ser flexíveis para que estejam aptas ao aprimoramento contínuo. YOGUI, R. Palestra na EGN para o curso do C-PEM, mar. 2020.

conhecido como “mortalidade infantil”⁷.

Diante da situação de restrição de recursos, de uma frota de Navios com idade avançada e da diminuição de pessoal, a alternativa em adotar rotinas preditivas em um novo contexto sinalizado pelo Grupo de Trabalho Intersetorial (GTI)⁸ é uma estratégia que poderá atingir os objetivos de melhorar significativamente a sistemática de manutenção da Marinha do Brasil.

É imperativo que haja uma mudança profunda na mentalidade de manutenção na MB, a fim de não agravar ainda mais a disponibilidade e a confiabilidade dos Navios em operação, bem como evitar prejuízos no ciclo operativo dos novos meios em processo de aquisição, como as Fragatas Classe Tamandaré (FCT).

Logo, o problema identificado é a degradação dos meios da MB associada a um aumento da deficiência da mão de obra aplicada na manutenção, assim como da utilização de rotinas ultrapassadas que resultam na diminuição da confiabilidade e disponibilidade, nesse sentido o desenvolvimento desta pesquisa procurou responder a seguinte questão central: o emprego da manutenção preditiva poderá atenuar o problema?

No atual contexto, esta pesquisa tem como propósito de instigar a MB a implementar a manutenção preditiva, com argumentações fundamentadas e consistentes de que a manutenção preditiva poderá ser uma solução para o problema. Para cumprir esse objetivo, o presente trabalho foi dividido em sete partes, que responderam a seis objetivos intermediários: objetivo 1 - entender os tipos de manutenção e suas diferenças, objetivo 2 – entender os principais indicadores, objetivo 3 – conhecer os tipos de falhas e suas características, objetivo 4 – analisar o gráfico PF de tal forma que seja apontadas as vantagens técnicas e econômicas da manutenção preditiva, objetivo 5 – condições para implementação da manutenção preditiva e o objetivo 6 – analisar a situação atual do Sistema de Manutenção Planejado em vigor na MB.

No segundo capítulo – Referencial teórico – serão abordados os conceitos e definições básicas para o correto entendimento do tema proposto.

⁷ De acordo com Reason (2003), o fenômeno da mortalidade infantil é causado por defeitos introduzidos por erros nas fases de especificação, projeto, fabricação, controle de qualidade, montagem ou comissionamento. Esse fenômeno corresponde à fase inicial do ciclo de vida de um equipamento ou após uma intervenção corretiva ou preventiva. São falhas que se relacionam em nível de capacidade ou habilidade do pessoal responsável pela execução da manutenção.

⁸ Grupo de trabalho Intersetorial – Aprimoramento da Sistemática de Manutenção de Meios Navais, criado pela DGMM em janeiro de 2020 tem objetivo estudar, identificar e aprimorar a sistemática de manutenção dos meios navais da MB, em consonância com a metodologia de Gerenciamento de Projetos. Para cumprimento desses objetivos, o Grupo está analisando o EMA-420 no sentido de propor alterações de tal forma que esse documento possa traduzir uma nova sistemática de manutenção para a MB, que possa ser mais moderna, mais eficaz e que possa resultar no aumento da disponibilidade de meios, sem prejuízo da confiabilidade.

No terceiro capítulo – Indicadores para gestão de manutenção – serão apresentados os principais indicadores atualmente utilizados como ferramentas para análise, avaliação e implementação de um plano de gestão de manutenção efetivo e eficaz. Esse capítulo, ainda, trará um exemplo que contribuirá para o entendimento dos processos de cálculo e análise de alguns índices de gestão.

O quarto capítulo – Manutenção preditiva – serão abordadas condições para implementação da MPr além de analisar as curvas modo de falha versus falha funcional e a curva da banheira com as cinco derivações. Será analisado o intervalo PF, fundamental no ciclo de vida de um ativo e como a Manutenção preditiva influencia esse intervalo. Serão feitas algumas considerações sobre a melhoria do custo de manutenção pelo emprego da manutenção preditiva.

No quinto capítulo – Interrelação com as manutenções corretiva e preventiva – será desenvolvido o raciocínio de que a manutenção preditiva não eliminará as manutenções corretiva e preventiva, pelo contrário, o emprego de procedimentos preditivos tornará os procedimentos preventivos e corretivos mais eficazes, no sentido de que eles poderão ser bem delimitados, de quando, quais equipamentos e cada tipo de manutenção deverão ser empregados. Serão feitas considerações sobre custo de cada tipo de manutenção e, finalmente, uma análise econômica da atual política da manutenção da Marinha do Brasil.

No sexto capítulo – Situação atual da manutenção na Marinha do Brasil – será apresentado um panorama da manutenção que é utilizada na Marinha do Brasil, que privilegia a manutenção preventiva e corretiva.

No sétimo capítulo – Conclusão – será apresentada a possibilidade da implementação de uma política de manutenção preditiva na MB, como uma solução adequada e viável para aumentar a disponibilidade e a confiabilidade dos Navios.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A manutenção tem aumentado a sua importância entre as atividades industriais. O constante aumento das exigências de produtividade e qualidade motiva os responsáveis pela manutenção a procurarem metodologias e técnicas que permitam melhorar a gestão da manutenção em todas as suas vertentes. Para uma melhor compreensão desse tema, são apresentados os referenciais teóricos da manutenção, a partir de conceitos pesquisados na literatura especializada, nos documentos do Estado Brasileiro: Manual de Logística da Marinha (EMA-400), Normas para Logística de Material (EMA-420), Sistema de Manutenção Planejada – SisSMP e em normas técnicas.

2.1 Conceitos preliminares

Para um adequado entendimento de manutenção, é necessária a definição dos conceitos de defeito, falha e pane, que precisam estar claros e delimitados, pois, são os eventos que formam uma linha temporal de progressão do estado do equipamento, de acordo com a sua condição frente às funções estabelecidas em projeto. Há, no meio técnico, uma confusão entre esses três conceitos, principalmente na diferenciação do entendimento entre falha e pane.

Segundo a norma técnica NBR-5462 (ABNT, 1994), defeito é definido como qualquer desvio de uma característica de um item em relação aos seus requisitos, que podem ser expressos ou não na forma de especificação. Defeito pode ou não afetar a capacidade de um item em exercer uma função requerida. A norma classifica os defeitos em: críticos e não críticos. Críticos são aqueles que, provavelmente, resultarão em condições perigosas e inseguras para pessoas, com danos materiais significativos ou outras consequências inaceitáveis. Não-críticos são aqueles cujas consequências negativas sobre o item são menores e que, quanto à sua abrangência, são classificados em maior e menor. Desse modo, defeito maior é aquele que, provavelmente, resultará em uma falha ou reduzirá substancialmente a utilização do item, para o fim a que se destina. E defeito menor é aquele, cujo resultado negativo impactará menos sobre a utilização do item. Cabe ressaltar, ainda, que os defeitos classificados como maior ou menor podem ser considerados críticos e não-críticos.

De acordo com a norma técnica NBR-5462 (ABNT, 1994), falha é conceituada como o término da capacidade de um item em desempenhar a função requerida. Esse termo não deverá ser utilizado para itens compostos somente por *software*. Depois da falha, o item tem uma pane. Falha é um evento, enquanto pane é um estado, por isso o correto é dizer que o ativo

está em pane e não em falha. De mesma forma, é correto afirmar que o item teve uma falha e não uma pane.

A NBR-5462/1994 (ABNT, 1994) define pane como estado de um item caracterizado pela incapacidade de desempenhar uma função requerida, excluindo a incapacidade durante a manutenção preventiva ou outras ações planejadas, ou pela falta de recursos externos. Uma pane é geralmente o resultado de uma falha de um item, mas pode existir sem uma falha anterior.

Não obstante a semelhança entre os termos é importante delimitá-los, pois ao definir a condição em que o item se encontra, decorrerá as ações no sentido de colocar o item na condição de desempenho requerida.

De acordo com as definições, esses conceitos podem resumidamente serem entendidos da seguinte forma:

a) defeito é um desvio que não necessariamente terá como consequência o fim da capacidade de um ativo desempenhar sua função;

b) falha é um evento que em sua decorrência fará com que o item não seja capaz de desempenhar sua função; e

c) pane é um estado, geralmente resultado de uma falha, que impede o item de executar a função requerida.

2.2 Conceito de manutenção

O termo manutenção, segundo Cunha (2007, p. 497), advém da expressão latina *mānus tenēre*, cujo significado é “manter o que se tem em mãos”. A expressão, no latim medieval, resultou na palavra *manutenēre*. Monchy (1987) observa que o emprego do termo manutenção tem origem no ambiente militar, no qual o sentido da palavra reportava a manter as unidades de combate, seu material e efetivo, constantemente, em um bom nível. O autor afirma, ainda, que na Indústria o termo manutenção surgiu por volta de 1950, nos Estados Unidos da América.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT – define o termo manutenção, na norma NBR 5462 (ABNT, 1994, p. 12) como: “Combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida”. Segundo Monchy (1987), a Associação Francesa de Normatização define manutenção como um conjunto de ações que permitem manter ou restabelecer um bem em seu estado especificado em projeto. A manutenção

é definida pela publicação EMA-420 (BRASIL,2002, p. 3.1) como “o conjunto de atividades técnicas e administrativas que são executadas visando a manter o material na melhor condição para emprego com confiabilidade, segurança e custo adequado e, quando houver avarias, reconduzi-lo àquela condição”.

Kardec e Nascif (2010) definem a manutenção como a garantia da disponibilidade de uso de equipamentos e instalações, a fim de atender, de forma confiável e segura, o processo produtivo e Monchy (1987) afirma que a função manutenção evolui, da mesma forma que os equipamentos e sistemas de uma indústria, tornando-se cada vez mais uma função complexa e automatizada. Tavares (2005) acrescenta a necessidade de visão e atuação sistêmica dos gestores da manutenção, de forma a aumentar a longevidade dos sistemas e equipamentos e maximizar os lucros, elevando, assim, a manutenção a uma função nas empresas.

Diversos conceitos foram e ainda são apresentados na literatura especializada para o termo, porém, atualmente, destacam-se os aspectos preditivos, preventivos, conservativos e corretivos, além dos aspectos administrativos, de custo e de confiabilidade da função de manutenção e a inserção da manutenção na indústria 4.0, com a utilização de inteligência artificial (IA). A visão de futuro para a manutenção, segundo Kardec e Nascif (2010), deve ser a ação a ser proposta, a fim de evitar a ocorrência de todas as falhas e defeitos, maximizando, portanto, os resultados esperados de uma boa política de manutenção.

A definição de manutenção dada por Mirshawka e Olmedo (1993, p. 14 *apud* SILVA, 1994, p. 13), como “o conjunto de atividades e recursos aplicados aos sistemas e equipamentos, visando a garantir a consecução de sua função dentro dos parâmetros de disponibilidade, de qualidade, de prazo, de custos e de vida útil adequados”, é mais abrangente e atualizada, pois extrapola os limites técnicos da concepção de projeto e a função de um item, caminhando para um conceito de gestão, ao considerar custos, vida útil⁹ e disponibilidade.

Este conceito deveria ser a visão de futuro de manutenção da MB, dessa forma possibilitará que paradigmas sejam quebrados, no sentido de privilegiar as manutenções preventivas e corretivas. A manutenção preditiva é um grande passo para que a MB alcance patamares modernos que trarão benefícios à melhoria da disponibilidade e confiabilidade, assim como abrirão caminho para implementação da manutenção centrada na confiabilidade (MCC).

⁹ Termo que designa o tempo em que qualquer dispositivo (peça, componente, equipamento ou sistema) deve operar de forma satisfatória, obedecendo as especificações de projeto e atendendo aos quesitos de segurança, desde que sujeito a um processo adequado de manutenção conforme indicação do fornecedor, sem ser submetido a condições ambientais ou esforços superiores aos limites estabelecidos. (NEPOMUCENO, 2014)

2.3 Histórico da Manutenção

Segundo Tavares (1998), a história da manutenção acompanha o desenvolvimento técnico-industrial da sociedade, de forma direta. No fim do século XIX, com a mecanização das indústrias, surgiu a necessidade dos primeiros reparos. Até 1914, a manutenção tinha importância periférica e até marginalizada, pois era executada pelo pessoal menos qualificado, que não poderia ser utilizado na produção, considerada atividade fim.

A manutenção passou por uma grande evolução ao longo da história, todavia, o período anterior ao século XX não será considerado nesta análise pelos motivos apontados anteriormente. Kardec e Nascif (2010) e Tavares (1998) descrevem essa evolução desde o advento das linhas de montagem de Henry Ford em 1909 até hoje.

A partir da implantação das linhas de montagem instituída por Henry Ford, a função manutenção começou a assumir alguma relevância com a formação de equipes para esse fim, pois os equipamentos deveriam ser conservados e reparados. Assim, surgiu um órgão subordinado à operação, cujo objetivo básico era de execução da manutenção corretiva não planejada. Nesse período ainda não havia uma visão clara em relação às falhas e ao acompanhamento do desgaste de peças e equipamentos.

A partir da Segunda Guerra Mundial houve um impulso na demanda de consumo de todo tipo de produto, gerando a necessidade de se aumentar a produção industrial. Como consequência, houve o imediato aumento da mecanização e das instalações industriais. Para atender a demanda, as linhas de montagem não podiam parar. O tempo gasto para diagnosticar as falhas na execução da manutenção puramente corretiva era maior do que aquele gasto na execução do reparo. Dessa forma iniciou-se a implementação de manutenção preventiva, com foco na manutenção periódica, baseada nas especificações técnicas do fabricante e no próprio acompanhamento de funcionamento dos equipamentos e com o objetivo de minimizar as interrupções na produção.

A partir da década de 70 do século passado, houve uma mudança acelerada nas indústrias em busca de confiabilidade de produtos e processos. Nesse período a indústria se apropriou da informática para a automação e para o controle e análise de processos. Essa mudança gerou, a partir da implementação da manutenção preditiva e da manutenção detectiva, sistemas automatizados que buscavam prever ou prever as falhas, visando à otimização da atuação das equipes de execução de manutenção, na busca por cada vez melhores padrões de qualidade e confiabilidade.

A partir do fim do século XX, houve a necessidade de aperfeiçoar ainda mais os padrões de qualidade e confiabilidade dos produtos e dos sistemas de produção. Com a globalização, a integração de mercados produtores e mercados consumidores foi inevitável, gerando o aumento da competitividade para a sobrevivência industrial. As práticas de manutenção preventiva, preditiva, detectiva, manutenção centrada em confiabilidade e manutenção produtiva total foram aperfeiçoadas, para atenderem essas novas exigências de crescimento sustentável e responsável. Nesse momento, a ênfase passou para o atendimento às demandas de qualidade, de confiabilidade, do cliente, da higiene e segurança do trabalho e do crescimento sustentável.

A evolução da manutenção mostra que ela foi perdendo o caráter corretivo, ao serem adotadas posturas mais preventivas e preditivas. Não se admite na indústria 4.0 sistemas que apresentem falhas frequentes e subsequentes panes. A busca pela prevenção, através de análises preditivas, reduz intervenções para reparo emergencial. Os sistemas atuais são complexos e interdependentes, portanto, necessitam que sejam adotados procedimentos de manutenção que possam detectar desvios de performance do item, antes que se tornem uma falha, colocando-o na condição de indisponível e podendo ter como consequência a indisponibilidade de todo sistema devido a essa interdependência e complexidade.

2.4 Tipos de manutenção

Os tipos de manutenção podem ser agrupados em cinco grandes famílias: corretiva (MC), preventiva (MPr), preditiva (MPd), detectiva (Mde), manutenção produtiva total (MPT) ou *total productive maintenance (TPM)* e manutenção centrada na confiabilidade (MCC) ou *Reliability Centered Maintenance (RCM)*. Neste capítulo, serão descritos esses tipos de manutenção, exceto a manutenção preditiva que será tratada com mais detalhes no capítulo 4.

2.4.1 Manutenção corretiva

Este tipo de manutenção surgiu da necessidade de recolocar um equipamento, componente ou sistema na condição de performance de projeto ou próxima dela, para que não haja prejuízo na execução da função requerida. A intervenção corretiva normalmente é realizada após a ocorrência da falha. Ela se divide em manutenção corretiva emergencial (MCE) e manutenção corretiva programada (MCP). A primeira é realizada quando ocorre a falha

funcional¹⁰ (F), ou seja, o componente ou equipamento deverá ser reparado em caráter de urgência; a segunda é realizada para eliminar um modo de falha, também conhecido como falha potencial¹¹ (P), antes que esta evolua para falha funcional.

A manutenção corretiva possui o maior custo pelos seguintes motivos:

- a) Danos auxiliares. A quebra de um rolamento de um eixo de uma bomba pode ocasionar avarias na carcaça, acoplamentos e no motor elétrico, no qual ela está acoplada, por exemplo;
- b) Maior dispêndio de tempo para uma correção emergencial devido às incertezas dos danos, contrapondo-se ao tempo de reparo planejado;
- c) Compra de sobressalentes em caráter emergencial impedindo pesquisa de fornecedores mais adequados submetendo-se aos custos associados à emergência;
- d) Lucro cessante¹² que, no caso da Marinha, paralelamente pode ser considerado como sendo o tempo em que o meio está indisponível para cumprir sua missão.

De acordo com EMA-420 (BRASIL, 2002, p. 3.3), manutenção corretiva é definida como aquela “que se destina a reparar ou recuperar o material danificado para repô-lo em condições de uso”. A norma técnica NBR-5462 (ABNT, 1994, p. 12) já a define como a “manutenção efetuada após a ocorrência de uma pane destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida”. Kardec e Nascif (2010, p. 38), por sua vez, definem manutenção corretiva como “atuação para a correção da falha ou do desempenho menor do que o esperado”.

Os autores dividem a manutenção corretiva em duas categorias: corretiva planejada, cujo propósito é corrigir o desempenho menor do que o esperado ou corrigir a falha por decisão gerencial. Normalmente essa decisão baseia-se na modificação dos parâmetros de condições observados pela Manutenção Preditiva. A segunda categoria é classificada como corretiva não planejada, também conhecida como manutenção corretiva não programada ou simplesmente emergencial, cujo propósito é corrigir a falha ou desempenho de maneira aleatória. Não há tempo para preparação do serviço e implica custos elevados, visto que equipamento ou sistema

¹⁰ Falha funcional é aquela que impede o item de executar sua função requerida.

¹¹ Modo de falha ou falha potencial é um sintoma anormal de desempenho, indicando que há alguma não conformidade e que poderá levar a uma falha funcional.

¹² É o lucro líquido remanescente descontados tributos, obrigações trabalhistas, participações e contribuições sociais, ou seja, representa toda a vantagem, ganho e benefícios que foram cessados por uma vontade alheia à organização. No contexto dessa tese, seria toda a perda que comprometeria o meio da MB para o cumprimento de sua missão, devido à falha e consequente pane em um equipamento ou sistema.

estão parados, ou seja, não estão desempenhando a função requerida, enquanto aguardam a ação de reparo.

Fica claro que a MC sempre existirá, não podendo ser entendida como algo ultrapassado e obsoleto. Ela fará parte de um sistema de gestão de manutenção moderna e atual, no qual a predição será palavra chave. O modo de falha detectado deverá ser corrigido através da MCp. Cabe ressaltar que falhas aleatórias ocorrerão, apesar dos controles rigorosos da predição e prevenção e, nesse sentido, a MCE entrará em campo, sendo inevitável, entretanto o que se almeja é que seu emprego seja o menor possível.

2.4.2 Manutenção preventiva

Como abordado anteriormente, esse tipo de manutenção começou a ser empregado após a Segunda Guerra Mundial, quando os equipamentos e sistemas se tornaram mais complexos. O grande dilema, naquela época, era aumentar a confiabilidade e disponibilidade, o que não poderia ser alcançado com as práticas de manutenção corretiva. Nesse sentido as falhas deveriam ser evitadas e a solução mais viável seria considerar a estatística do histórico das falhas. O objetivo da manutenção preventiva é restabelecer as condições originais do equipamento, visando a reduzir e evitar a probabilidade de falhas.

A publicação EMA-420 define manutenção preventiva como

o tipo de manutenção executada para reduzir ou evitar a falha ou queda do desempenho do material, sua degradação e, ainda, reduzir a possibilidade de avarias, através da intervenção e/ou remoção periódica do item. Deve obedecer a um plano previamente elaborado, baseado em intervalos definidos de tempo (BRASIL, 2002, p. 3.3).

A norma técnica NBR-5462 (ABNT, 1994, p. 7) define manutenção preventiva como “manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item”.

Kardec e Nascif (2010, p. 42) definem manutenção preventiva como a “atuação realizada de forma a reduzir ou evitar falhas ou a queda de desempenho, obedecendo a um plano previamente elaborado, baseado em intervalos de tempo bem definidos”.

A definição da NBR-5462 é mais abrangente e melhor se coaduna com os objetivos da MPr, que significa a redução da probabilidade de falha, pois existem três tipos de gatilhos que, além daquele baseado no tempo, podem ser acionados de acordo com critérios bem

definidos e que resultam na redução de falha. São eles: horas de funcionamento, produtividade e misto.

- a) Horas de funcionamento, como exemplo a substituição de elementos de vedação de um motor hidráulico a cada 1300 horas de funcionamento;
- b) Tempo, como exemplo a troca de óleo de um mancal de deslizamento de linha de eixo a cada 12 meses;
- c) Produtividade, como exemplo a troca do fluido de corte de uma central de usinagem CNC ¹³ a cada 1000 parafusos fabricados;
- d) Misto, como exemplo a lubrificação dos mancais da bomba de esgoto de um dique a cada 12 meses, ou 260 horas de funcionamento, ou seja, o que acontecer primeiro.

Existem critérios de seleção de equipamentos para emprego da MPr, que serão abordados mais adiante. Cabe ressaltar que a MPr deve ser aplicável em equipamentos onde as taxas de falha estão ligadas à idade do equipamento, ou seja, as taxas de falha aumentam à medida que o equipamento envelhece.

2.4.3 Manutenção detectiva

A manutenção detectiva (MDe) não está referendada na MB. Este tipo de manutenção tem como objetivo a descoberta de falhas ocultas. Kardec e Nascif (2010) esclarecem que, através de testes funcionais, sejam eles de comando, controle ou alarme, as falhas não evidentes ao operador ou mantenedor podem ser detectadas.

O diferencial da manutenção preditiva (MPd) reside no fato de que os testes detectivos não são capazes de prever uma falha potencial, mas apontam aquelas funcionais que já ocorreram, mostrando ao operador que ele deverá intervir corretivamente em algum componente alarmado, antes que a situação se agrave.

2.4.4 Manutenção produtiva total ou *total productive maintenance*

A manutenção produtiva total (MPT) ou *total productive maintenance* (TPM) surgiu no Japão. Foi uma alternativa para um país que amargava com a falta de recursos naturais

¹³ CNC é uma sigla no idioma inglês, *Computer Numeric Control* ou controle numérico computadorizado, ou seja, é um processo de fabricação que utiliza computadores para automatizar máquinas operatrizes em diversas etapas de produção, como torneamento, furação, abertura de rosca, fresamento, retífica e aplainamento.

e com a reconstrução nacional, após a Segunda Guerra Mundial. Para cumprir as metas nacionais, não restava outra opção que não fosse a fabricação e exportação de produtos manufaturados; entretanto, os produtos japoneses apresentavam baixa qualidade e, por isso, eram considerados itens de segunda linha. A divisão de manutenção da Nippon Denso, do Grupo Toyota, foi a primeira empresa que sistematizou a MPT no Japão, entre 1961 e 1969 e, com esse novo método de trabalho ela recebeu o primeiro prêmio de excelência em manutenção do *Japan Institute of Plant Maintenance* (JIPM). A MPT popularizou-se no Japão na década de 70 e, em 1986, foi apresentada ao Brasil pelo Sr. Seiichi Nakajima¹⁴.

A questão central da MPT é a busca do Zero Defeito (ZD)¹⁵ e para, tal, utilizou os Círculos de Controle de Qualidade (CCQ),¹⁶ pelos quais se almejava conhecer as habilidades das pessoas, adequar o perfil dos indivíduos às tarefas e mudar a sistemática de trabalho. As bases da MPT são o exercício do autocontrole, conhecimento da máquina pelo seu operador, integração do homem com a máquina e empresa e responsabilidade de todos com a manutenção dos meios de produção (KARDEC e NASCIF, 2010).

Os ganhos esperados pela adoção da MPT são sentidos na empresa como mais atenção ao trabalho, noção de pertencimento de todo pessoal, espírito de equipe e maior autoconfiança e autonomia.

2.4.5 Manutenção centrada em confiabilidade ou *reliability centered maintenance*

A manutenção centrada na confiabilidade (MCC) ou *reliability centered maintenance* (RCM) tem como propósito o aumento da disponibilidade e confiabilidade, focando-se na função do ativo e não nas condições técnicas de operação de equipamentos ou sistemas. Neste trabalho, o autor considera como ativo o Sistema de Defesa¹⁷ qualquer equipamento, componente, ou parte de um sistema ou equipamento.

¹⁴ Cidadão japonês e pioneiro no sistema de manutenção produtiva total (1919-2015).

¹⁵ Programa de qualidade utilizado na redução de defeitos na produção industrial, apesar do nome, não significa que os erros cairão para zero, mas sim que as equipes devem concentrar seus esforços para realizar os processos de maneira correta desde a primeira vez.

¹⁶ Atividades que envolvem um grupo de colaboradores da organização. Essas pessoas se reúnem para juntos proporem soluções de melhoria ou para resoluções de problemas de qualidade, do processo ou do produto. A metodologia foi criada em 1962 no Japão pelo Engenheiro Químico Kaoru Ishikawa (junto a outros membros da União Japonesa de Cientistas e Engenheiros – JUSE).

¹⁷ Conforme definido na Lei nº 12.598, de 21 de março de 2012, no seu inciso III, Sistema de Defesa (SD) é o “conjunto inter-relacionado ou interativo de Produto de Defesa que atenda a uma finalidade específica”. (BRASIL, 2012)

O objetivo global da MCC é a redução dos custos do ciclo de vida do ativo, ou seja, melhorando a gestão do ciclo de vida (GCV). A MCC é normalizada segundo as normas IEC 60300-3-11 e SAE JA1012¹⁸.

Foi imperativo para o setor de manutenção aeronáutico estadunidense, na década de 1960, aumentar a confiabilidade de equipamentos e sistemas das aeronaves com propulsão a jato, recém introduzidas no serviço de transporte de passageiros, com o propósito de reduzir o índice de acidentes, atendendo, assim, aos requisitos de certificação da *Federal Aviation Agency* (FAA)¹⁹. Naquela época, os engenheiros verificaram que a utilização da MPr não podia garantir os níveis de confiabilidade desejado, além dos custos serem muito elevados.

Em 1967, foi criado um grupo de trabalho denominado MSG-1, Maintenance Steering Group, com propósito de estudar, se o aumento da confiabilidade estaria vinculado ao tempo de utilização ou horas de funcionamento, como preconiza a sistemática da manutenção preventiva. Esse grupo chegou à conclusão de que se um item não possui um modo predominante e característico de falha, revisões programadas afetavam muito pouco o nível de confiabilidade.

Em 1969, um novo grupo de trabalho, MSG-2, foi constituído com objetivo de elaborar uma nova política de manutenção que buscasse alcançar alta confiabilidade com custo reduzido em comparação com aquele associado à manutenção preventiva.

A principal característica da MCC é a redução do custo do ciclo de vida ou *Life Cycle Cost* (LCC), que é o somatório de todos os custos envolvidos com o ativo desde o projeto até seu desfazimento. A manutenção centrada na confiabilidade reside na utilização otimizada das manutenções corretivas, preventivas, preditiva / detectiva e proativa, sendo que esta última consiste na melhoria contínua de processos e equipamentos por meio da gestão de conhecimento pela análise de registros de eventos de falhas e defeitos.

Basicamente, a sistemática da MCC consiste em selecionar cada ativo de tal forma que seja definido qual a melhor manutenção a ser empregada de acordo com a função que ele exerce. Deverão ser identificadas as possíveis falhas, os modos de falhas e o efeito de cada falha, desta forma os ativos poderão ser classificados de acordo com a criticidade relacionada à sua função dentro de um processo.

¹⁸ IEC 60300-3-11 *Gestion de la surté de fonctionnement – Parte 3-11: Guide d’application – Maintenance basée sur la fiabilité. Commission Electrotechnique Internationale, Geneva, Switzerland.* e SAE JA1012: *SAE International. Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Standard., Warrendale, PA, USA, 2002.*

¹⁹ Agência reguladora de aviação nos Estados Unidos da América.

Para aqueles equipamentos que tem baixa criticidade, deverá ser empregada a manutenção corretiva, já a manutenção preventiva deverá ser utilizada para aqueles de média criticidade e para os ativos que têm alta criticidade as manutenções preditiva e detectiva deverão ser privilegiadas.

A MCC deverá ser a política de manutenção para os novos meios ora em aquisição, como os Submarinos e as Fragatas Classe Tamandaré. Essa política estará fadada ao insucesso se a MB antecipadamente não implementar a manutenção preditiva.

3 INDICADORES PARA GESTÃO DE MANUTENÇÃO

A manutenção deverá ser entendida como uma política de gestão, e para isso, devem ser utilizadas ferramentas gerenciais, como indicadores que fornecem dados para a tomada de decisão, que podem subsidiar a estratégia para implementação da política de manutenção. Existem muitos indicadores; entretanto, nesta tese, serão abordados alguns deles, os quais este autor considera com mais relevância para a MB.

3.1 Tempo médio entre falhas ou mean time between failures (MTBF)

A NBR-5462 (ABNT, 1994, p. 12) define MTBF como “esperança matemática do tempo entre falhas de um item”. É um dos indicadores mais importantes, que possibilita uma visão ampla e global de como está o desempenho da política de manutenção adotada. Ele deve ser aplicado a cada equipamento individualmente e não ser considerado, tal qual os valores de uma família de equipamentos. No caso da MB, ao se utilizar desse indicador para conhecer o tempo médio de falhas de uma bomba de extração e incêndio (BEI) que equipa as Fragatas Classe Niterói (FCN), por exemplo, cada bomba individualmente deverá ter o seu MTBF.

Nota-se que muitos meios da MB se encontram no final da vida útil ou o extrapolaram e, dessa forma, aparecem as falhas com o comportamento típico de mecanismo de degradação em consequência da idade do item ou do tempo de operação e, nesse sentido, evidencia-se, nessa fase, uma taxa de falha instantânea crescente ao longo do tempo, descaracterizando aleatoriedade. O MTBF é calculado de acordo com a equação abaixo, devendo ser considerado na fase de falhas aleatórias:

$$MTBF = \frac{\text{total de horas em funcionamento adequado}}{\text{total de paradas para MC}} \quad (1)$$

Como exemplo, consideramos os dados reais de operação da bomba de incêndio número 1 do Dique Almirante Régis, do Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro (AMRJ), no período compreendido entre os meses de novembro de 2018 e agosto de 2019, totalizando 10 meses. A referida bomba iniciou a operação e teve a primeira avaria após 300 horas de funcionamento. A segunda avaria ocorreu após 380 horas do primeiro reparo. As falhas subsequentes estão representadas na linha de tempo da FIG. 1. Obteve-se, de acordo com a

equação (1) o MTBF igual a 452 horas; ou seja, há expectativa de que a bomba funcione 452 horas sem avaria.

Mais adiante será visto que, mesmo com o tempo médio entre falhas, não obstante, ser uma constante, a confiabilidade reduz exponencialmente ao se considerar horas futuras de funcionamento. Também será verificado que a MPd poderá aumentar o MTBF, pois ações preditivas mostram antecipadamente algum modo de falha, que deverá ser corrigido com ações preventivas ou corretivas planejadas. Dessa forma, a taxa de degradação do item diminui, o que eleva o aumento do tempo médio de falhas.

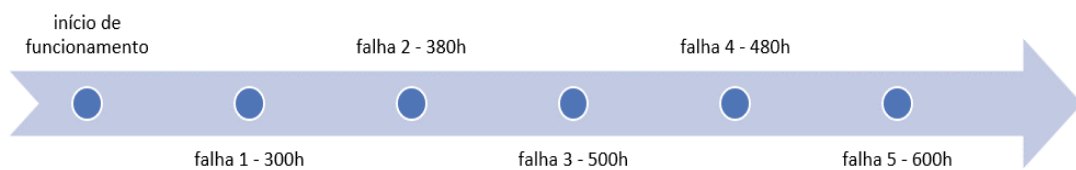


FIGURA 1 - Linha do tempo de falha da bomba de incêndio
Fonte: elaborado pelo autor com dados obtidos junto ao AMRJ.

3.2 Tempo médio entre manutenção ou mean time to repair (MTTR)

A NBR-5462 (ABNT, 1994, p. 13) define MTTR como “tempo de restabelecimento médio; abreviação: MTTR. Esperança matemática do tempo de restabelecimento”. Nesta tese vamos considerar MTTR traduzido como o tempo médio para reparo, pois, além de ser mais intuitivo, é uma expressão mais comum nos meios industriais.

Este indicador, além de implicar na disponibilidade, está fortemente ligado à manutenibilidade, que é a medida da facilidade de um item em ser reparado. Ele representa o tempo médio que a equipe de manutenção gasta para corrigir uma falha e restabelecer o item, para que seja capaz de exercer novamente sua função. Está também relacionado ao lucro cessante de empresas e, no caso da MB, considera-se como o tempo em que o meio cessa sua capacidade de cumprir sua missão.

Fica evidente que quanto menor o MTTR, melhor. Todavia, a política de manutenção tem que ser precavida, no sentido de forçar a diminuição desse índice, pois o fato pode incorrer na incapacidade da equipe de corrigir a falha, atuando em sua causa fundamental ou raiz; tal fato trará como consequência o aumento substancial da taxa de falha, o que ocasionará o aumento do MTBF, que é indesejável.

Diferentemente do MTBF, o MTTR pode ser usado de forma global dentro de uma empresa, ao poder ser adaptado para as equipes de manutenção da MB, separando por Organizações Militares (OM) e, dentro delas, por setor ou por tipo de reparo, como por exemplo: reparo mecânico, hidráulico, pneumático, elétrico, eletrônico e estrutural.

$$MTTR = \frac{\text{total de tempo para reparo}}{\text{número total das intervenções realizadas}} \quad (2)$$

A bomba referenciada no exemplo do item 3.1, sofreu intervenção das equipes de manutenção, que demandaram horas para corrigirem as falhas e recolocarem o equipamento nas condições operacionais desejadas. As intervenções estão representadas na FIG. 2.

- a) Falha 1 – 5 h
- b) Falha 2 – 7h
- c) Falha 3 – 5h
- d) Falha 4 – 18h
- e) Falha 5 – 6h

O MTTR calculado foi de 8,2 horas, o que significa que, a equipe de manutenção consegue corrigir as falhas, intervindo no equipamento, em um tempo médio de 8 horas e 12 minutos.

A MPd melhora esses indicadores pois, a partir do momento que esse tipo de manutenção descobre modos de falhas ou sintomas – que ainda não trouxeram como consequência uma queda de desempenho intolerável – as equipes de manutenção poderão atuar em correções, prevenções ou ajustes que, obviamente demandarão menos tempo.

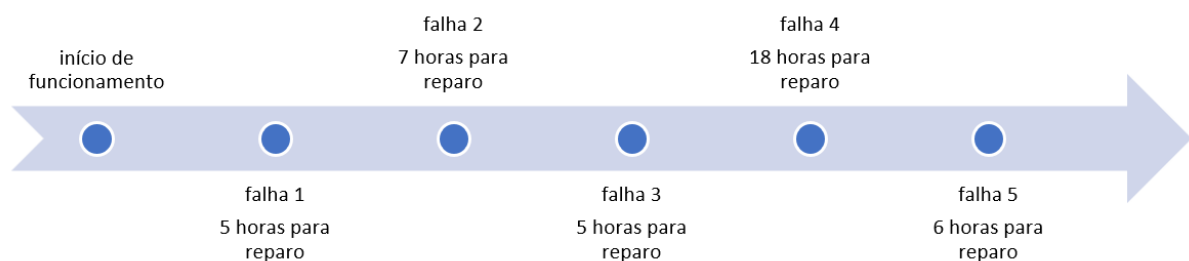


FIGURA 2 - Linha do tempo de intervenção para reparo
Fonte: elaborado pelo autor com dados obtidos junto ao AMRJ.

3.3 Disponibilidade

Toda política de manutenção deve buscar o aumento da disponibilidade. A NBR-5462 define disponibilidade como a

capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando-se em conta os aspectos combinados de sua confiabilidade, manutenibilidade e suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados (ABNT, 1994, p. 2).

Da definição da norma, entende-se que disponibilidade é o tempo em que o ativo está pronto para exercer sua função dentro de um intervalo de tempo ou num instante qualquer. Na MB é desejável que um meio tenha a maior disponibilidade possível, mas como explica a norma, com confiabilidade adequada, ou seja, um item deve estar disponível para executar sua função inerente, mas com a baixa probabilidade matemática de falha.

Kardec e Nascif (2010, p. 112) classificam a disponibilidade em inerente (D_{in}), operacional (D_{op}) e técnica (D_t).

3.3.1 Disponibilidade inerente

Disponibilidade inerente (D_{in}) é aquela em que são excluídos os períodos de MPr, atrasos logísticos, ou quaisquer outros fatores que não sejam para MCE ou MCp, isto é, somente são considerados os períodos de parada para intervenções corretivas, sejam elas planejadas ou não. A disponibilidade inerente é definida pela equação (3).

$$\% D_{in} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} * 100 \quad (3)$$

Para o exemplo em questão considerando o MTBF igual a 452 horas e o MTTR igual a 8,2 horas, a disponibilidade inerente calculada foi de 98,22%, ou seja, durante o período de 10 meses, a bomba ficou 1,78% do tempo indisponível devido ao efetivo emprego da mão de obra para reparo. Cabe ressaltar que, neste cálculo não são considerados outros atrasos logísticos, como espera de sobressalentes e compra de outros insumos.

Analisando-se a fórmula, fica evidente que, se um equipamento funcionar mais tempo sem apresentar falha, ocorreria o aumento do MTBF e, como consequência, o aumento da disponibilidade inerente de equipamento ou sistemas. Por outro lado, se a equipe de

manutenção reduzir o tempo para reparo corretivo, o MTTR ia diminuir e, como consequência, teríamos também o aumento da disponibilidade. O MTTR está fortemente relacionado ao adestramento das equipes de manutenção e, também, à manutenibilidade.

3.3.2 Disponibilidade operacional

A disponibilidade operacional leva em consideração outros fatores, além das ações efetivas da mão de obra, atuando diretamente para a correção de falhas. É utilizada a equação abaixo para cálculo desse tipo de disponibilidade.

$$\% D_{op} = \frac{MTBM}{MTBM + MDT} * 100 \quad (4)$$

Em que MTBM é o tempo médio entre manutenções. Do inglês *Mean Time Between Maintenance* e MDT é o *Mean Down Time* que, traduzido para o português significa tempo médio de indisponibilidade que é definido pela NBR-5462 (ABNT, 1994, p. 12) como “Tempo de indisponibilidade médio; abreviação: MDT esperança matemática do tempo de indisponibilidade”.

$$MDT = \frac{\text{soma do tempo total de indisponibilidade}}{\text{número de paradas}} \quad (5)$$

Para o exemplo em questão, são apresentados na tabela 1 o tempo para a retirada, o tempo de correção, o tempo de espera de sobressalente e o tempo de instalação e comissionamento de cada uma das falhas consideradas no equipamento. Também é determinado pela soma algébrica do tempo total de indisponibilidade do equipamento a partir de cada uma das falhas.

Considerando esses dados registrados na tabela 1, calculamos o valor de MDT igual a 45 horas no período analisado e o valor de MTBM igual a 541,75 horas, o que resulta em uma disponibilidade operacional de 92,33%.

TABELA 1
Tempo total para a correção incluindo aquisição de sobressalentes e insumos

Falha	Tempo para retirada [h]	Tempo de correção [h]	Tempo de espera de sobressalente [h]	Tempo de instalação e comissionamento [h]	Tempo total de indisponibilidade [h]
1	2	5	48	4	59
2	2	7	8	4	21
3	2	5	16	4	27
4	2	18	72	8	100
5	2	6	4	6	18

Fonte: elaborado pelo autor com dados obtidos junto ao AMRJ.

3.3.3 Disponibilidade técnica

Também conhecida como disponibilidade encontrada ou obtida, utiliza-se a equação abaixo para seu cálculo.

$$\% D_t = \frac{MTBM}{MTBM + MTTR_{Reactive}} * 100 \quad (6)$$

$MTTR_{Reactive}$ é o tempo médio para reparos corretivos planejados ou paradas para revisão preconizada pela MPr. A disponibilidade técnica não leva em consideração o tempo gasto com a logística. Mas, sim o tempo dispendido para intervenções preventivas e corretiva planejada. Como não houve dados relacionados ao exemplo, não será possível calcular a disponibilidade técnica.

3.3.4 Considerações sobre disponibilidade

A disponibilidade, por ser um dos parâmetros importantes, seu aumento deve ser uma meta para a política de manutenção. Caberá, portanto, à organização escolher qual tipo de disponibilidade será mais significativa.

O exemplo trouxe resultados diferentes para as disponibilidades inerente, 98,21%, e operacional 92,33%, de onde conclui-se que, na prática, o equipamento ficou indisponível 92,33% do tempo no período considerado, e como na MB os aspectos logísticos carregiam

dificuldades inerentes na obtenção, este autor analisa que a disponibilidade operacional seja mais representativa.

A disponibilidade inerente pode ser importante, quando se leva em consideração aspectos mais técnicos no sentido da execução dos reparos e poderá compor valores que auxiliem em controle de processos já mapeados.

A MPd, como será observado mais adiante, melhora a disponibilidade, da seguinte forma: pelo aumento do MTBF, explicado no item 3.1. Advindo do aumento do intervalo médio entre falhas e do tempo médio entre manutenções, o MTBM, também aumentará, como consequência a disponibilidade operacional (Equação 4) e técnicas (Equação 6) aumentarão. A disponibilidade inerente ficará maior pelo aumento do MTBF (Equação 3).

Ao ser analisado pelo denominador das equações, o MTTR tenderá a reduzir quando a organização utiliza a MPd, como explicado no item 3.2. Da mesma forma, também haverá redução do $MTTR_{Reactive}$. Quanto ao MDT, é óbvio que se os tempos de entre falhas e tempos médios de atuação da equipe de reparo aumentam e não resta dúvida de que o tempo total de indisponibilidade também será menor.

3.4 Confiabilidade

A NBR-5462 (ABNT, 1994, p. 3) define confiabilidade como a “capacidade de um item em desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo”. Uma boa política de manutenção deve buscar operar seus ativos com a maior confiabilidade possível, de tal forma que a expectativa de falha num intervalo de tempo futuro seja a menor possível.

Cabe ressaltar que, ao nos referirmos à confiabilidade, devemos ter em mente um período temporal. É muito comum, nos órgãos de reparo naval usar esse termo equivocadamente. Por exemplo, dizer que a confiabilidade daquele conjunto diesel – gerador é 98,7%, quando o correto seria: a probabilidade daquele conjunto diesel gerador operar nas próximas 2500 horas de acordo com especificações de projeto ou em conformidade com a função requerida, é de 98,7%, haja vista que, como será verificado mais adiante, a confiabilidade é uma função exponencial onde a variável é o tempo.

A confiabilidade é um indicador que traz como resultado um cálculo probabilístico, que tem, como base, um histórico de falhas. Há necessidade de conhecer ou levantar os seguintes dados para medir a confiabilidade:

- a) período considerado para coleta de dados;

- b) MTBF;
c) taxa de falhas.

O intervalo de tempo não carece de mais explicações; o MTBF já foi definido anteriormente e a seguir, será tratado um novo conceito, a taxa de falhas que é uma grandeza definida como o inverso do MTBF.

$$\lambda(t) = \frac{1}{MTBF} \quad (7)$$

A confiabilidade é calculada conforme equação a seguir.

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (8)$$

Serão usados os dados do exemplo com o objetivo de comprovar a teoria. O MTBF calculado no item 3.1 foi de 452 horas. Surge a seguinte questão: qual é a probabilidade desse equipamento funcionar nas próximas 10, 100, 300, 600, 1000, 2000 e 3000 horas sem avarias? Essa questão pode ser respondida observando os valores da última coluna da tabela 2.

TABELA 2
Cálculo de confiabilidade

Horas Futuras	MTBF [h]	Taxa de falha (λ) [h^{-1}]	$\lambda \times t$	Confiabilidade (R)	Confiabilidade (R) %
10	452	0,0022124	-0,0221239	0,97811904	97,81
100			-0,2212389	0,80152514	80,15
300			-0,6637168	0,51493386	51,49
600			-1,3274336	0,26515688	26,52
1000			-2,2123894	0,10943884	10,94
2000			-4,4247788	0,01197686	1,20
3000			-6,6371681	0,00131073	0,13

Fonte: elaborado pelo autor com dados obtidos junto ao AMRJ.

O GRÁF. 1 foi plotado a partir dos dados da tabela 2.

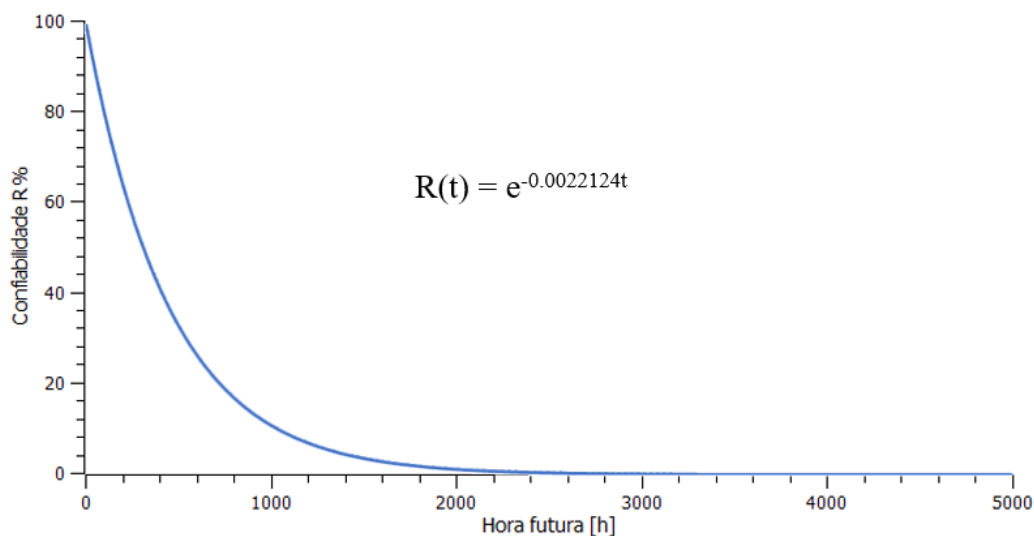


GRÁFICO 1 - Da confiabilidade

Fonte: elaborado pelo autor com dados obtidos junto ao AMRJ.

Nota-se que o MTBF é de 452 horas, ou seja, falhas têm ocorrido na média temporal de 452 horas; entretanto, a confiabilidade tenderá a diminuir com o tempo de operação se comportando de acordo com a curva exponencial do GRÁF. 1.

Ao não se tomarem ações dentro de uma política de manutenção adequada e permitindo-se que o equipamento funcione 1000 horas, sua confiabilidade será reduzida para apenas 10,94 %. O equipamento terá somente 1,20 % e 0,13 % de confiabilidade para operar nas próximas 2000 e 3000 horas respectivamente.

A MPd, como será mostrado mais adiante, aumenta esse indicador, haja vista que aumentar a confiabilidade significa reduzir a taxa de falha. Como explicado anteriormente o MTBF aumenta com emprego de ações preditivas, se a taxa de falha é o inverso do MTBF, (Equação 7), aumentado o tempo médio entre falhas, resulta na redução da taxa de falhas.

3.5 Manutenibilidade

Outro conceito muito importante a ser considerado é manutenibilidade, também conhecida como manutenibilidade. A NBR-5462 define manutenibilidade como a

probabilidade de uma dada ação de manutenção efetiva, para um item sob dadas condições de uso, poder ser efetuada dentro de um intervalo de tempo determinado, quando a manutenção é feita sob condições estabelecidas e usando procedimentos e recursos prescritos (ABNT, 1994, p. 12).

Entende-se que este indicador representa ou expressa a facilidade de manutenção, que pode ser em função do projeto, da instalação, mas também de outros fatores, como o desempenho que a equipe de manutenção tem para executar atividades de manutenção, nesse caso.

Decorrente da definição acima, a manutenibilidade depende de alguns parâmetros como:

- a) Tempo médio de manutenção corretiva (MTTC);
- b) Tempo médio de manutenção preventiva (MTTM);
- c) Frequência de indisponibilidade devido à manutenção preventiva;
- d) Frequência de indisponibilidade devido à manutenção corretiva.

O MTTC difere do MTTR no sentido de que ele leva em conta o tempo total em que o item ficou submetido à manutenção corretiva, enquanto o MTTR expressa o tempo efetivo que foi utilizado para a correção da falha. Obviamente, o MTTC será normalmente maior do que o MTTR, isto é, seu valor mínimo não poderá ser menor do que o MTTR.

Alguns autores consideram o MTTR para análise e não o MTTC. Todavia, este autor considera o MTTC mais adequado para a MB, pois, quando um item tem uma falha funcional, as facilidades de retirada de bordo, esgotamento de fluidos e limpeza influenciam na percepção da facilidade da manutenção; isto é, se tivermos equipamentos iguais instalados em locais diferentes, aquele cujo acesso é melhor e facilitado, terá uma manutenibilidade melhor

Para equipamentos de diferentes fabricantes, aquele, cujo projeto é mais complexo, resultará em uma manutenibilidade menor. Por exemplo, ao considerar dois geradores de marcas diferentes que produzam a mesma tensão e corrente elétrica. No entanto, se um desses geradores for mais fácil para desmontar, inspecionar, reparar e testar, terá, conseqüentemente, uma melhor manutenibilidade.

O MTTC mede a dificuldade em se detectar, reparar e corrigir falhas funcionais, enquanto o MTTM, apresenta a dificuldade para proceder às revisões preventivas.

As equações abaixo mostram como são calculados os quatro parâmetros acima relacionados:

$$MTTM = \frac{\sum_{i=1}^{n_{Pr}} t_{MPr}}{n_{Pr}} \quad (9)$$

$$MTTC = \frac{\sum_{i=1}^{n_c} t_{MC}}{n_c} \quad (10)$$

Em que: t_{MC} = tempo gasto na manutenção corretiva;

t_{MPr} = tempo gasto na manutenção preventiva;

n_{Pr} = número de manutenções preventivas realizadas no período;

n_c = número de manutenções corretivas realizadas no período.

A política de manutenção deverá visar à redução dos tempos médios, MTTM ou MTTC, em que o item ficou sujeito às manutenções MPr ou MC, respectivamente. Assim, quanto maior o valor desses indicadores, pior será a manutenibilidade, ou seja, mais difícil será recolocar o item em condições operacionais, no padrão desejado.

Dados históricos fornecem referências para cálculo das indisponibilidades forçadas, que são calculadas conforme as equações a seguir:

$$F_{InDisp_{Pr}} = \frac{n_{Pr}}{\Delta t} \quad (11)$$

$$F_{InDisp_C} = \frac{n_C}{\Delta t} \quad (12)$$

Em que:

$F_{InDisp_{Pr}}$ = frequência da indisponibilidade forçada devido à manutenção preventiva;

F_{InDisp_C} = frequência de indisponibilidade forçada devido à manutenção corretiva;

Δt = intervalo de tempo considerado para análise.

Diversos fatores podem contribuir para a melhoria da manutenibilidade, os quais devem ser planejados desde a fase de concepção do projeto, tais como a padronização de equipamentos, uniformização e facilidade de aquisição de sobressalentes, facilidade de acesso ao equipamento e qualificação dos mantenedores em todos os escalões, como preconizam Kardec e Nascif (2010). A manutenção corretiva, principalmente a M_Ce implica em reparos mais complexos e menos previsíveis.

Ambos concordam que a MPd é aquela que proporciona os melhores índices de manutenibilidade, uma vez que o monitoramento contínuo ou periódico da condição de performance de um item fornece dados que possibilitam prever falhas funcionais em função dos modos de falha e, dessa forma, organizar a intervenção preventiva ou corretiva planejada, antes que o item deixe de exercer sua função, para a qual foi projetado, quando ocorre a falha funcional.

Ao se analisarem as equações, pode-se observar que a manutenibilidade está relacionada com a capacidade da equipe de manutenção em recolocar o ativo nas condições operacionais desejadas. O adiestramento da equipe influencia a manutenibilidade, pois, se para um mesmo equipamento uma equipe está mais bem preparada do que outra, ela gastará menos tempo para executar a mesma tarefa e, dessa maneira, reduzirá o MTTC ou o MTTM.

Condições de projeto também interferem na manutenibilidade. Se equipamentos iguais forem instalados em locais com acesso e condições diferentes, aquele, cujo acesso é mais fácil, ocasionará redução desses indicadores.

Observando as equações 9 e 10, seus denominadores traduzem o tempo que o item ficou submetido à MPr, MCE ou MCP. No desenvolvimento desta Tese será mostrado que o emprego da MPd reduz as intervenções preventivas ou corretivas, de onde pode-se concluir que uma política de manutenção que emprega a manutenção preditiva aumenta indiretamente a manutenibilidade pela redução dos MTTC e MTTM.

4 MANUTENÇÃO PREDITIVA

Manutenção preditiva (MPd) é o tipo de manutenção que tem por base prever um estado futuro mais provável de um equipamento ou sistema, por meio da coleta e análise de dados em períodos definidos, utilizando-se de instrumentação específica. São realizadas medições de temperatura, análise físico-química de lubrificantes, termografia e ultrassom, ou quaisquer outros meios, que possam avaliar o estado atual do funcionamento de um item. As medições são realizadas com equipamentos em funcionamento, e não causam redução da disponibilidade.

A NBR-5462/1994 a conceitua como aquela que tem por finalidade

garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva (ABNT, 1994, p. 7).

A publicação EMA-420 define MPd como sendo constituída

pelo conjunto de medidas, com base em modificações de parâmetros de condições ou desempenho, que têm como propósito caracterizar, acompanhar, diagnosticar e analisar a evolução do estado de equipamentos e sistemas, subsidiando o planejamento e a execução de ações de manutenção para quando forem efetivamente necessárias, a fim de prevenir a ocorrência de falhas e avarias, permitindo a operação contínua pelo maior tempo possível (BRASIL, 2002, p. 3.3).

Kardec e Nascif (2010, p. 44) definem MPd como “a atuação realizada com base em modificação de parâmetro de condição ou desempenho, cujo acompanhamento obedece a uma sistemática”. Decorrente da definição desses autores pode-se inferir que é feita uma comparação do desempenho com padrões seja em projeto ou em outra fase do desenvolvimento do produto. Decorrente dessa comparação, o gestor da manutenção poderá estabelecer quando deverá ocorrer uma intervenção preventiva ou corretiva planejada, de tal forma que o equipamento seja recolocado na condição de desempenho padrão ou próximo dele.

4.1 Condições para Implementação

Não obstante as vantagens da MPd, ela não pode ser aplicada em todos os itens, como será mostrado mais adiante neste capítulo. Ou seja, não é um procedimento de manutenção que irá substituir irrestritamente as outras manutenções.

Dessa forma, Kardec e Nascif estabelecem algumas condições para que a utilização da MPd seja eficiente e eficaz:

- a) as características físicas do item permitem o monitoramento da condição, isto é, apresentam algum parâmetro que possa ser medido com precisão;
- b) os parâmetros selecionados viabilizam a previsão da ocorrência de falhas, devendo, para isso, existir um banco de dados de manutenção que concentre as informações históricas e permita a análise de tendência;
- c) é possível estabelecer um valor padrão para a análise comparativa e a definição de limites que servem de base para a decisão de parada do item; e
- d) o monitoramento é realizado em intervalos de tempo definidos ou de forma contínua, neste caso medidores e alarmes permanentemente instalados (2015, p. 63).

Eles afirmam também que uma condição fundamental é a qualificação da mão de obra, para que seja possível se analisar e diagnosticar todos os parâmetros, de forma que as ações de intervenção tenham a qualidade equivalente aos dados coletados (KARDEC e NASCIF, 2013); ou seja, de nada adianta investir vultosos recursos na aquisição de equipamentos de monitoramento se, de outro lado, não se investir na qualificação de pessoal.

Kardec e Nascif (2013) consideram, ainda, que, uma vez decidida a utilização da MPd e atendendo as quatro condições apresentadas, deverão ser analisadas as seguintes condicionantes:

- a) se há possibilidade de monitoramento e medição do equipamento ou sistema;
- b) se o custo é viável;
- c) se é possível monitorar falhas e acompanhar suas progressões; e
- d) se há um programa sistematizado e informatizado de acompanhamento e análise de diagnóstico.

Acrescentamos como uma quinta condicionante: se há pessoal capaz de ser treinado para operar equipamentos e analisar dados coletados.

4.2 Curvas típicas de falha durante um período – Taxa de falha

Tentar implementar uma política de manutenção, sem conhecer o comportamento de falhas típicas de cada equipamento ou componente, terá certamente, como resultado, o insucesso. A definição do tipo de manutenção ou uma combinação delas dependerá do conhecimento de como as falhas acontecem em função do tempo.

Decorre dessa análise a separação em dois grupos de equipamentos: aqueles cujas falhas estão relacionadas ao envelhecimento e outros, cujas falhas não estão relacionadas ao envelhecimento.

4.2.1 Curva da banheira

É uma curva que representa o comportamento de falha ao longo do tempo, em que a probabilidade de ocorrência apresentará um comportamento típico nas etapas do ciclo de vida. O comportamento estatístico resulta em um gráfico que tem uma forma semelhante com a de uma banheira, daí o nome empregado. Uma boa política de manutenção deverá conhecer e analisar o comportamento da taxa de falha de cada fase da curva da banheira como mostrado no gráfico abaixo:

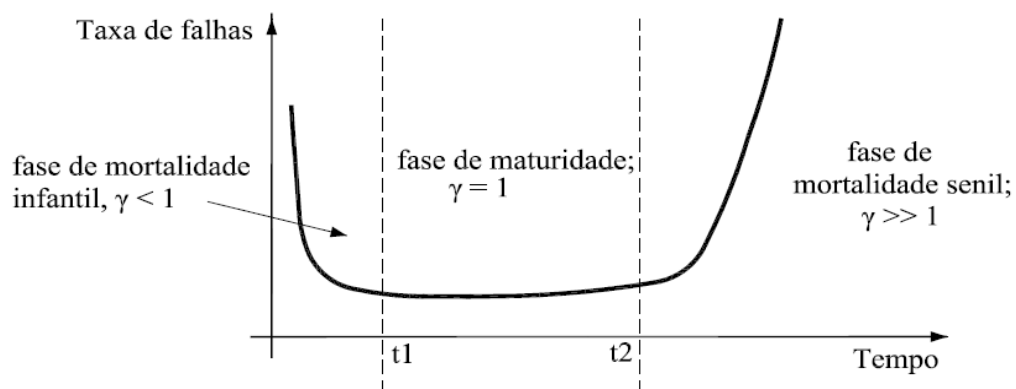


GRÁFICO 2 - Curva da banheira - ciclo de vida de equipamento
Fonte: LAFRAIA, 2001, p. 16

O GRÁF. 2, acima, mostra uma curva típica. Observa-se que a taxa de falha é decrescente na fase da mortalidade infantil, estável na vida útil ou fase de maturidade e crescente no período de desgaste, fase também denominada por alguns autores de mortalidade senil.

A taxa de falha, explicada no item 3.4, é uma grandeza importante, pois, quanto maior, pior será o MTBF. O parâmetro *gamma* (γ), denominado parâmetro de forma e mostrado no GRÁF. 2, fornece o comportamento da taxa de falha, como pode ser visto na tabela 3. Tão importante quanto conhecer a quantidade de falha em função do tempo, é também conhecer como elas se comportam, pois para uma mesma taxa, saber se elas estão aumentando ou diminuindo, muda completamente as ações de manutenção a serem empregadas.

TABELA 3
Comportamento da função taxa de falhas

γ	Comportamento da função
< 1	Taxa de falha decrescente
$= 1$	Taxa de falha constante – distribuição exponencial

> 1	Taxa de falha crescente
= 2	Taxa de falha linearmente crescente

Fonte: Adaptado de Lafraia (2001)

Na mortalidade infantil, a taxa de falha, não obstante ser alta, tende a decrescer. As falhas são prematuras e causadas, por exemplo, por erro de projetos, peças defeituosas, mão de obra desqualificada, pessoal sem treinamento adequado, instalação incorreta e falha no comissionamento. Normalmente, essas falhas, na fase da mortalidade infantil, são identificáveis e devem ser corrigidas por emprego da MCE ou MCP.

Na segunda fase, ou período de vida útil, predomina a ocorrência de falhas aleatórias e a taxa de falha é constante. Elas ocorrem devido a fatores menos controláveis e mais difíceis de serem identificados, como vibração, impactos mecânicos, acidentes, matéria prima defeituosa, operação inadequada, dentre outros. Nesta fase, deverá ser aplicada a manutenção preditiva. Note-se que na fase de vida útil, a MPd é fundamental, pois fornecerá subsídios no momento certo para intervenções corretivas ou preventivas, tendo como resultado o aumento da confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade. A curva PF²⁰, explicada mais adiante, fornecerá mais detalhes.

Na última fase, mortalidade senil ou desgaste, ocorre o aumento da taxa de falhas, devido ao desgaste de componentes mecânicos ou elétricos, corrosão, alcance do limite da vida de projeto, por exemplo. Nessa fase, a MPr deve ser privilegiada, quando deverá ser feita a opção por substituição, de componentes ou itens. Cabe uma ressalva: a partir dessa fase, a taxa de desgaste das partes apresenta forte tendência de crescimento, levando ao aumento significativo de intervenções corretivas e redução do tempo para ações preventivas. Obviamente, os principais parâmetros como confiabilidade, disponibilidade tendem a piorar e, muitas vezes, a manutenibilidade também é prejudicada.

Sellito (2005, p. 56) mostra na tabela 4 a relação entre as fases da curva da banheira e a estratégia de manutenção. Cabe observar que a MPd se faz presente em todas elas, donde se conclui que uma boa política de manutenção deve utilizar a análise preditiva, a fim de melhorar ou evitar o decaimento dos três pilares da manutenção: disponibilidade, confiabilidade e manutenibilidade.

²⁰ A curva PF mostra a performance de equipamentos em função do tempo, em que são identificadas as falhas potenciais e funcionais.

TABELA 4
Relação entre as fases do ciclo de vida e estratégias de manutenção de equipamentos

Fases	Estratégia	Decorências
Mortalidade infantil, falhas de origem	emergência	retarda ou até impede o fim da mortalidade infantil ao não reforçar os itens que quebraram ou não remover as causas das falhas de origem
	corretiva	antecipa o fim da mortalidade infantil ao reforçar os itens que quebraram ou remover as causas das falhas de origem
	preditiva	monitora as falhas em progresso que podem resultar em quebra, mas estas são muito poucas nesta fase, pois as quebras se dão mais por baixa resistência
	preventiva	perpetua ou até agrava a mortalidade infantil ao trocar exatamente os sobreviventes, os itens fortes, que não têm falhas de origem
Maturidade de falhas aleatórias	emergência	como se limita a trocar componentes quebrados, pode fazer retornar à mortalidade infantil se não selecionar os substitutos
	corretiva	é inócua quanto às falhas catastróficas, mas pode reduzir o patamar de expectativa de falhas eliminando modos de falha que passaram da primeira fase
	preditiva	informa o início e monitora os processos de falhas progressivas que resultarão em quebras, podendo predizer aumentos na probabilidade da quebra
	preventiva	retorna à mortalidade infantil ao trocar exatamente os sobreviventes, os itens fortes, que não têm falhas de origem e ainda não iniciaram o desgaste
desgaste, falhas progressivas	emergência	permite que as quebras que vão ocorrer realmente ocorram a um custo interno mais baixo do que a preventiva
	corretiva	só será útil se for capaz de retardar ou o início da falha ou a quebra que realmente vai ocorrer
	preditiva	monitora os processos progressivos de falhas já iniciados predizendo aumentos na probabilidade da quebra
	preventiva	previne a emergência antecipando a troca à quebra que realmente vai ocorrer, porém a um custo interno mais alto do que a emergência

Fonte: SELLITO, 2005, p. 58.

4.2.2 Outros tipos de curva de comportamento de falha ao longo do tempo

Há cinco tipos de curvas, mostradas na FIG. 3, que caracterizam taxa de falha, além da curva da banheira.

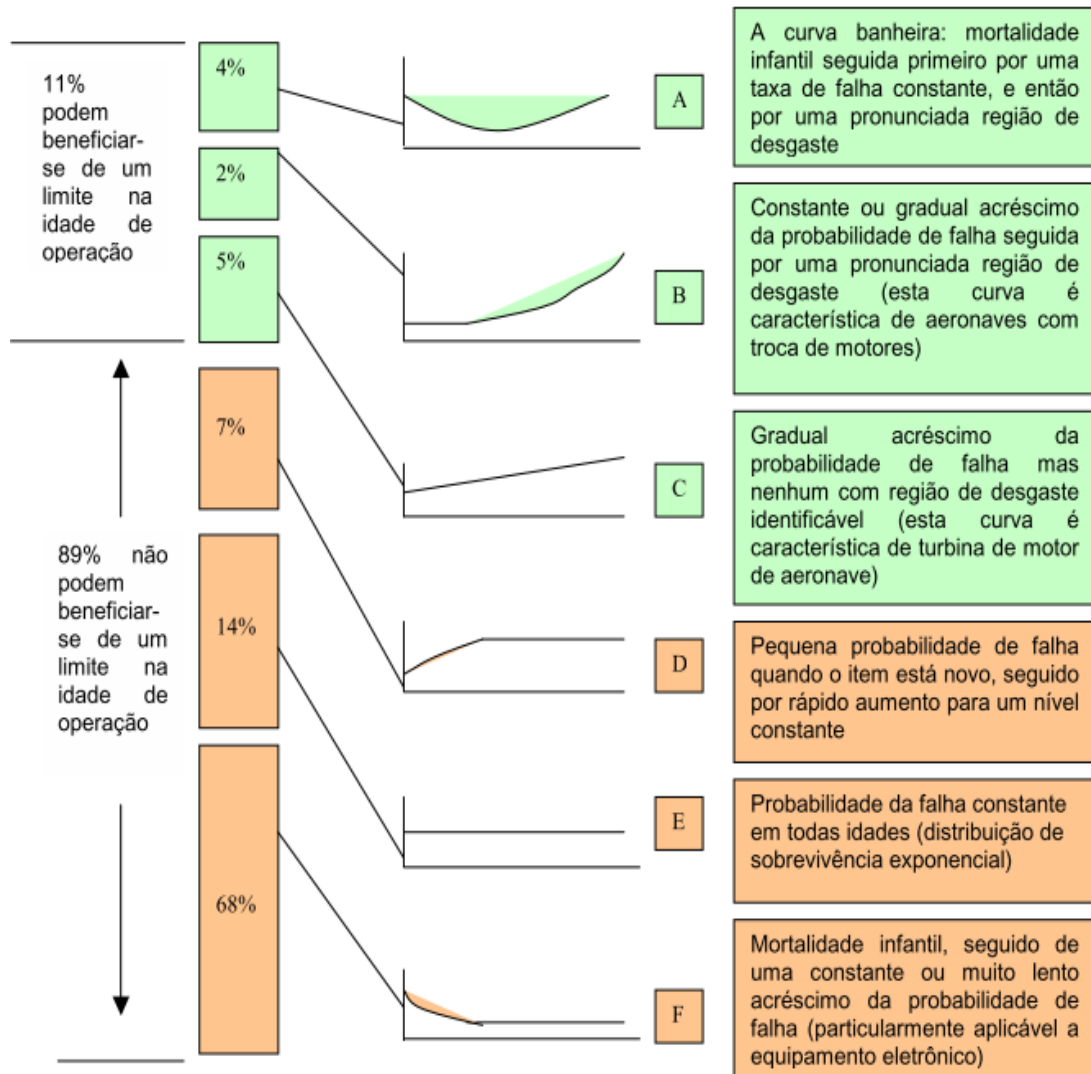


FIGURA 3 - Padrões de idade-confiabilidade para equipamentos não estruturais de aeronaves
Fonte: QUEIROZ, 2016, p. 47.

Os percentuais apontados na FIG. 3 representam o comportamento estatístico para aviação civil, nos Estados Unidos da América (EUA). De acordo com Moubray (1997) o comportamento não seria o mesmo para outras atividades industriais e decorrente dessa afirmação, a MB teria que fazer um levantamento dos principais equipamentos com objetivo de conhecer em quais tipos de curvas eles estariam enquadrados. Ele considera, ainda, (MOUBRAY, 1997) que, quanto mais complexos os sistemas ou equipamentos, eles apresentarão comportamento típico das curvas E e F.

As curvas apresentadas demonstram a **quebra de um paradigma** (grifo nosso) ao se considerar a relação direta da diminuição da confiabilidade com o tempo de operação. Essa crença levou a um conceito de que quanto mais um item sofresse revisões, menor seria a probabilidade de falha. Atualmente, os resultados de organizações com boas práticas de manutenção mostram que isso não é verdade, a menos que haja um limite da idade do item bem definido; do contrário, considerar revisões ou reparos planejados, levando-se em conta o tempo ou um dos gatilhos para a manutenção preventiva, muito pouco vai contribuir para o aumento da confiabilidade. Além disso, há grande tendência de aumento de falhas pela mortalidade infantil em outros sistemas ou itens que estáveis apresentam performance adequada de funcionamento.

Há de ser ter cuidado com conclusões errôneas que podem levar ao abandono da MPd inserida em um contexto de manutenção proativa. Essa postura pode ser correta para falhas que apresentam consequências não significativas; por outro lado, se uma falha trouxer graves consequências, não resta dúvida que a predição é o melhor caminho para prevenir falhas funcionais ou, pelo menos, reduzir seus efeitos (MOUBRAY, 1997).

4.3 Curva PF

Curva PF é uma ferramenta essencial para assessorar o gestor de manutenção a traçar uma estratégia para aplicação dos tipos de manutenções. A grandeza no eixo das abscissas é o tempo e no das ordenadas, a performance de um item.

Uma organização que tenha por objetivo implementar uma política de manutenção eficiente e eficaz deverá adotar ações capazes de fornecer dados para traçar a curva PF que, juntamente com as curvas típicas de falha descritas no item anterior, darão subsídios consistentes para definir a estratégia de manutenção a ser implementada.

Conforme a NBR-5462 (ABNT, 1994, p. 6) política de manutenção é “descrição das inter-relações entre os escalões de manutenção, os níveis de intervenção e os níveis de manutenção a serem aplicados para a manutenção de um item”, ou seja, devemos conhecer quando e em quais equipamentos deverão ser empregadas a MPr, MCe, MCp, MDe ou MPd ou uma combinação desses tipos de manutenção.

Como será visto mais adiante, na curva PF deverá ser identificado o intervalo de tempo entre a falha potencial e a falha funcional, sendo esse um dos objetivos principais.

4.3.1 Modo de falha

Muitos ativos não falham abruptamente, mas dão algum aviso ou sinal do fato de que eles estão prestes a falhar. O modo de falha pode ser definido também como o ponto em que a deterioração da condição ou desempenho pode ser identificada; ponto também é conhecido como falha potencial. Somente a MPd pode descobrir o modo de falha, que é caracterizado por um sintoma anormal do funcionamento.

Moubray (1997) define modo de falha como qualquer evento que causa uma falha funcional. O autor considera que é vago e simplista utilizar o termo falha para o ativo como um todo; nesse sentido, é muito importante entender o mecanismo em que elas ocorrem desde o momento em que aparecem os sintomas, até a falha funcional. Assim, o melhor caminho para distinguir o que é o modo de falha e falha funcional é fazer uma correlação entre a avaria e os possíveis sintomas.

O modo de falha (P) é o ponto, no qual é possível detectar o início de sintoma anormal, mas que não resulte em avaria que impeça o item de exercer sua função, ou seja, é o momento em que se inicia uma queda na performance do equipamento, caracterizando como deterioração da condição de desempenho. Uma falha menor e superficial de um elemento secundário ou terciário não estabelece que a falha potencial ou modo de falha tenha ocorrido, isto é, quando uma falha funcional ocorre, ela deve afetar algum componente primário de um equipamento, enquadrando-se em uma classe de falhas conhecida como, falhas intrínsecas²¹. Nesse caso, provavelmente, ela teve um modo de falha anterior. No instante do modo de falha aparecem os sintomas anormais no funcionamento, como citamos anteriormente.

4.3.2 Falha funcional

Moubray (1997) define falha funcional como a incapacidade de qualquer ativo para cumprir uma função, com um padrão de desempenho que seja aceitável para o usuário, ou quando a operação de um equipamento está acima ou abaixo de limites padronizados. Existem falhas funcionais relacionadas com instrumentação, indicadores ou controladores. A fronteira entre desempenho ou função satisfatórios e falha está relacionada com o desempenho padrão.

²¹ Falha que resulta da natureza inerente de um ativo. A falha intrínseca pode ser parcial ou sistêmica e pode afetar o componente crítico ou componentes secundários da montagem. Pode ocorrer durante o período de garantia e, portanto, ser classificado como um defeito de garantia, ou após o esse período, sendo considerada como uma deficiência do ciclo de vida.

Pode-se entender que, uma completa perda de função é claramente uma falha funcional. No entanto, quando o desempenho de um item está aquém do esperado, considerado insatisfatório, cujas consequências não devem ser toleradas, também significa que estamos diante de uma falha funcional.

Falhas funcionais somente podem ser definidas, se a função do componente ou sistema é conhecida com exatidão. Logo, o contexto operacional passa a ter relevância, pois, para um mesmo item, o conceito de falha funcional está intrinsicamente relacionado à importância da função. Quando o desempenho do item decai, o setor de manutenção deverá conhecer o limite a ser tolerado. Dependendo de onde o item esteja instalado e as inter-relações com outros equipamentos de um sistema, podem ser estabelecidos parâmetros distintos que definem a falha funcional para um mesmo item. Por exemplo, em um mesmo rolamento instalado em equipamentos que fazem parte de sistemas diferentes, se o modo de falha a ser considerado for “elevação de temperatura” para um equipamento, pode ser estabelecida falha funcional para 40° graus centígrados e, para o outro equipamento, o limite de 50° graus.

A falha funcional é indicada no gráfico PF como o ponto F, ou seja, a partir desse ponto o item não tem capacidade de exercer a função esperada ou a queda de desempenho não poderá ser tolerada.

4.3.3 Representação gráfica

A curva PF, como mostrada no GRÁF. 3, pode ser dividida em três áreas, onde deverão ser aplicadas, preferencialmente, os tipos de manutenções. É relevante observar que, na área 1, a MPd deverá ser empregada. Nesse sentido, uma política de manutenção adequada deve implementar procedimentos preditivos no início do funcionamento de equipamentos e, como será mostrado, haverá ganhos significativos em relação aos três pilares da manutenção: confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade.

Na área 2 predominam as MPr e MCp. Essas intervenções serão mais efetivas em decorrência dos parâmetros obtidos pela MPd. Na área 3 predomina a MCp, mas, principalmente, a MCe. Esta área também é conhecida como RTF.²²

²² RTF é uma sigla em inglês que significa *run to failure*, em tradução livre: *caminhando para falha*, ou seja, na área 3 aparecem sintomas do funcionamento não conforme com o esperado.

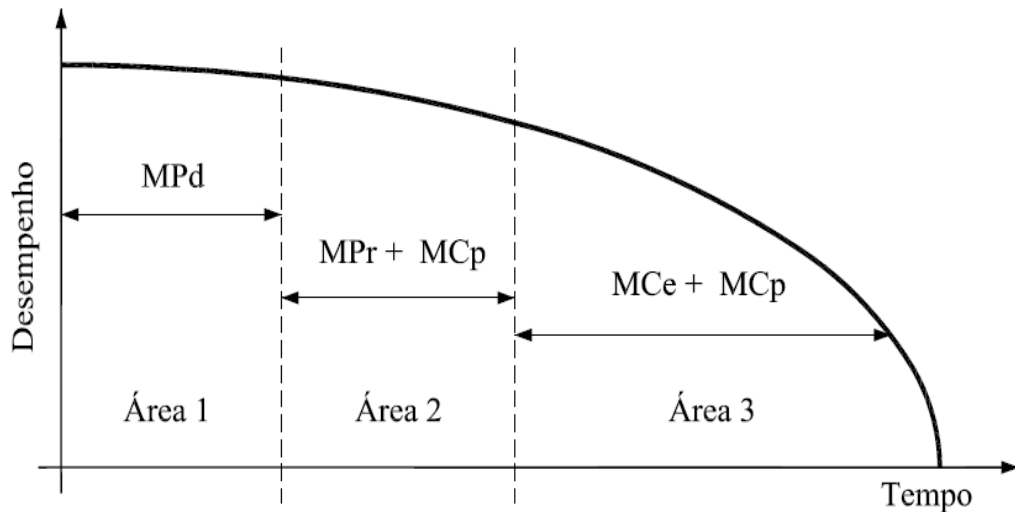


GRÁFICO 3 - Curva PF - Áreas características de desempenho
 Fonte: adaptado de MOUBRAY (1997).

4.3.4 Pontos P e F

No GRÁF. 4 são identificados os pontos P e F. O ponto X é onde ocorre o início da falha, mas que ainda não foi detectada. No ponto P, modo de falha ou falha potencial, pode-se perceber que, nele aparecem os modos de falhas ou sintomas e, quanto mais os instrumentos para avaliação forem tecnologicamente avançados, mais o ponto P se aproxima de X.

A palavra “detectada”, utilizada no parágrafo acima, expressa claramente que a MPd não tem a finalidade de eliminar falhas, antes que elas ocorram, mas identificar o instante em que elas aparecem, de tal forma, a prever que há tendência de falha funcional futura. De fato, a MPd deseja encontrar a falha potencial, qualificá-la e quantificá-la de modo a conhecer a sua severidade e consequências futuras.

É muito importante que a organização conheça o modo de falha ou o sintoma típico de cada equipamento, pois, a partir dele, será selecionada a técnica preditiva a ser empregada e a instrumentação de monitoramento para coleta de dados. Por exemplo para um determinado equipamento a equipe de manutenção, após estudos, tenha chegado à conclusão de que o modo de falha ou sintoma a ser monitorado seja vibração dos mancais de rolamentos.

Para um sistema hidráulico, pode ser que o modo de falha a ser monitorado sejam as propriedades físico-químicas do óleo hidráulico; para um mancal de linha de eixo pode ser escolhido o sintoma contaminação por partículas; para um motor elétrico pode ser a temperatura. De acordo com a complexidade e a importância do equipamento ou sistema, a equipe de manutenção pode eleger dois ou mais sintomas a serem monitorados.

Ao se utilizar uma política de MPd, no período anterior a P, nenhuma intervenção preventiva ou corretiva planejada é necessária, pois entende-se que nenhum sintoma anormal foi detectado, logo, nada a fazer, exceto continuar o monitoramento. Nesse sentido, se no período, estivessem previstas ações preventivas que norteiam a MPr, poderia haver necessidade de indisponibilidade forçada desnecessária para ações de prevenção, como troca de óleo, substituição de rolamentos, dentre outras ações, conforme os gatilhos preventivos.

Ao se evitarem paradas para inspeção, de acordo com a MPr, como resultado teríamos o aumento da disponibilidade, redução da mortalidade infantil e sem nenhuma redução da confiabilidade; ao contrário, como o tempo de operação sem falha ou defeito aumenta; advindo do conceito de confiabilidade, esse indicador também ia aumentar.

Não se pode deixar de observar que teremos a diminuição do custo para compra de sobressalentes e itens de reposição. No caso de empresas, nota-se efeito positivo em reduzir o lucro cessante, e para a MB, redução dos tempos em que os meios estariam indisponíveis para cumprimento da missão.

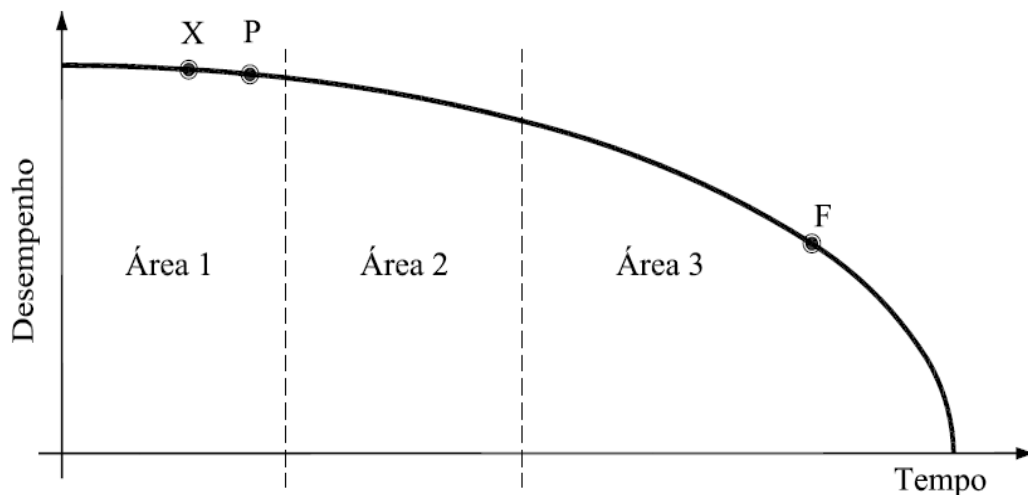


GRÁFICO 4 - Curva PF – Análise dos pontos P e F
Fonte: adaptado de MOUBRAY (1997).

Em que:

Ponto X – ponto onde ocorre a falha não necessariamente detectável;

Ponto P – falha potencial, quando começa um decaimento do desempenho;

Ponto F – falha funcional, quando ocorre falha que resulta no impedimento total ou parcial do ativo para exercer a função, para a qual foi projetado.

4.3.5 O Intervalo PF

Como explicado, o intervalo PF representa a segunda fase no modelo de ciclo de vida trifásica e o modelo de deterioração dos ativos, como componentes, equipamentos e sistemas. As três fases são identificadas da seguinte forma: fase 1, que compreende o período antes de P; fase 2, que é o intervalo PF e a fase 3, que compreende o período após a falha funcional F. O intervalo PF, como mostrado no GRÁF. 5, é definido desde quando um modo de falha P é detectado pela primeira vez até o instante em que o ativo tenha atingido a falha funcional F.

Há diversas técnicas para encontrar os sintomas. Uma das mais sensível é a análise por ultrassom, pois detecta não conformidades precocemente. Caso não seja utilizado ultrassom, as outras técnicas vão apontar um sintoma anormal mais tarde. Desta maneira, seria como se o ponto P caminhasse mais para a direita, reduzindo o intervalo PF. Observe-se que a percepção humana começará a notar um modo de falha na área 3 do GRÁF. 5, como aquecimento e ruído audível, onde este “novo” ponto P já está muito próximo de uma falha funcional. Não resta dúvida de que a predição feita mais cedo, está diretamente relacionada a equipamentos mais sofisticados e com mão de obra mais qualificada. Assim, quanto mais cedo a falha potencial for encontrada, aumentando o intervalo PF, melhores serão os resultados esperados em termos de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade, pois a organização terá mais tempo para planejar as prevenções, MPr, e as correções, MCp, reduzindo substancialmente as surpresas de falhas e emprego da MCE.

No parágrafo anterior foi abordado o aumento do intervalo PF pelo adiantamento do ponto P, mas pode-se também aumentar esse intervalo pelo atraso do ponto F. Suponha-se que um determinado mancal de rolamento tem seu modo de falha definido como “aquecimento e vibração”. Para dois equipamentos idênticos, 1 e 2, e mesmas condições de operação, ocorreu falha potencial praticamente no mesmo instante. O operador do equipamento 2, diante do sintoma apresentado pela MPd, após consultar a engenharia de manutenção da organização, tomou ações no sentido de substituir o óleo do mancal com um aditivo mais eficaz para a redução da temperatura, o que postergou a possibilidade de falha funcional. Diante da ação tomada, a organização pode planejar a substituição no equipamento 2 posteriormente à troca no equipamento 1. A ação proporcionou, portanto, aumento do intervalo PF, incorrendo em todos os benefícios como mais tempo, para planejar a correção ou substituição, mais tempo para escolha de fornecedores confiáveis e maior tempo de operação equipamento.

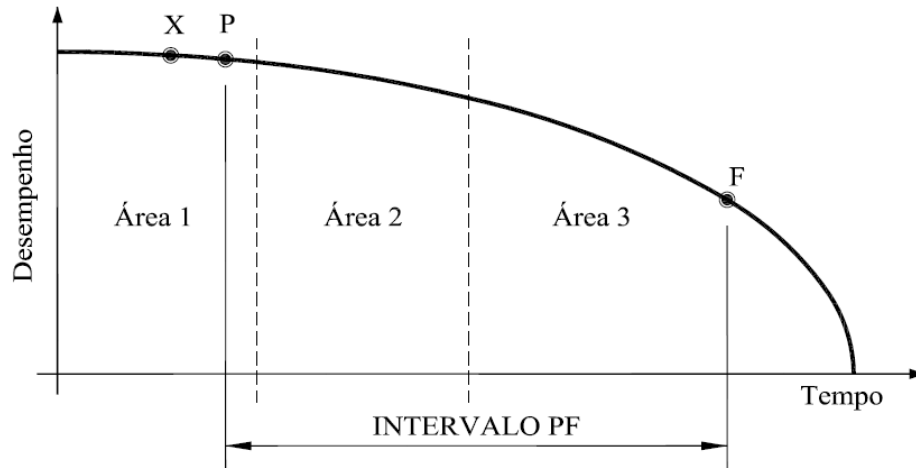


GRÁFICO 5 - Curva PF – Intervalo PF
Fonte: adaptado de MOUBRAY (1997).

4.3.6 Como a manutenção preditiva influencia o comportamento da curva PF e no ciclo de vida de ativos

Quando uma falha potencial ou modo de falha é encontrado, a política de manutenção deverá implementar atitudes adequadas, estabelecendo ações de prevenção ou de correção planejada. Quando essas ações são bem executadas, o equipamento ou componente volta, teoricamente, para o patamar de performance original. Na curva PF, tal fato se manifesta como um “atraso” do início da área 3, ou seja, o ponto F se deslocaria mais para a direita e a curva teria um perfil mais achatado, principalmente nas áreas 1 e 2, GRÁF. 4

O GRÁF. 6 ilustra o comportamento de três organizações, X, Y e Z que operam com políticas de manutenção distintas representadas pelas curvas a, b e c, respectivamente.

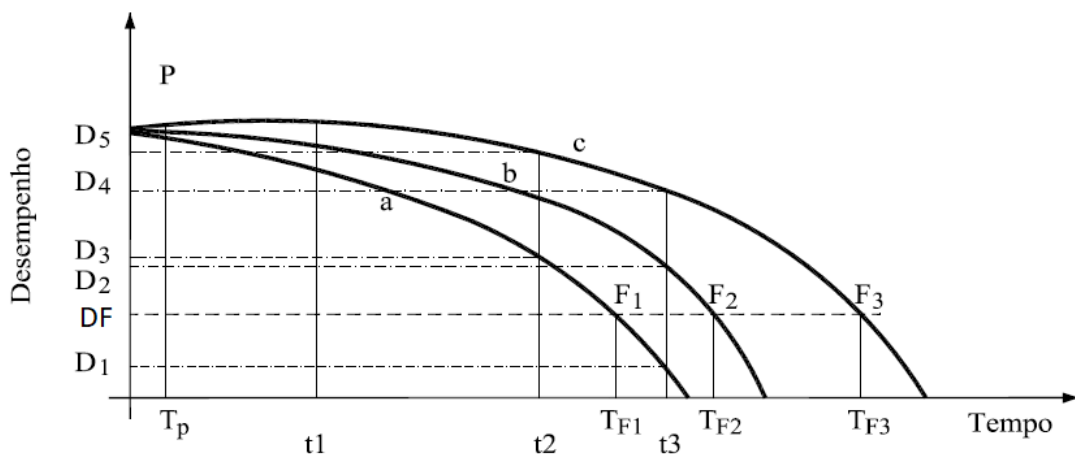


GRÁFICO 6 - Influência da manutenção preditiva no ciclo de vida
Fonte: adaptado de MOUBRAY (1997).

Em que DF é o desempenho que caracteriza falha funcional.

As empresas operam com o mesmo equipamento e nas mesmas condições. A empresa **X** somente utiliza a MC, abstendo-se da MPr e da MPd. Como o ativo é o mesmo, e levando-se em conta que começou a operar no mesmo momento, a falha potencial ou modo de falha **P** surgiu no mesmo instante T_P para as três organizações.

X não pode detectar a falha potencial, pois a forma para encontrá-la, ainda em estágio não perceptível para os sentidos humanos, seria pela MPd. É possível observar que, no instante t_1 a curva **a** demonstra uma redução de desempenho, enquanto para esse mesmo instante, a curva **c** indica desempenho muito próximo do inicial. A maior inclinação da curva **a** sinaliza velocidade de degradação maior do que a das curvas **b** e **c**, levando à falha funcional F_1 no instante T_{F1} .

Y adota a política de MPr, mas não emprega a MPd e, portanto, também não foi capaz de descobrir a falha potencial **P**. Se as rotinas de manutenção preventiva não abrangessem a revisão ou substituição de componente onde a falha potencial tenha se manifestado, a curva **b** teria um comportamento semelhante ao da curva **a**. Entretanto, como uma finalidade da MPr é eliminar falhas antes que elas ocorram, foi considerado, para este estudo, que outros componentes, que cumpriram a rotina de inspeção, resultaram em uma melhor performance para o conjunto e, dessa forma, a degradação iniciou no tempo t_2 com a falha funcional ocorrendo no instante T_{F2} . Caso, em uma das rotinas preventivas, estivesse incluído o componente que apresentou o sintoma anormal, obviamente a curva **b** teria o mesmo comportamento da curva **c**. Por outro lado, se as rotinas preventivas não abrangessem itens auxiliares ou interrelacionados com o componente que apresentou falha potencial ou modo de falha, além do próprio componente, a curva **b**, teria um comportamento próximo de **a**.

Diante dessa análise, conclui-se que a MPr, que é a base do Sistema de Manutenção Planejada (SMP) da MB, pode trazer bons resultados, como o comportamento da curva **c**. Entretanto, esse tipo de manutenção baseia-se nos quatro gatilhos já explicados anteriormente e, por conta disso, incorre-se na necessidade de se adquirirem itens planejados para manutenção, paradas para revisão e disponibilidade de sobressalentes. Contudo, nem sempre os resultados são otimizados, pois a MPr não consegue identificar uma falha potencial ou modo de falha que, por isso, nem sempre poderá ser evitada. Nesse sentido, há um gasto de recursos, sem o aumento correspondente na confiabilidade e disponibilidade do meio. Se ocorrer o fenômeno da mortalidade infantil, os indicadores ficarão piores ao serem comparados aos valores, antes da rotina preventiva.

Z emprega uma boa política de MPd. Assim, quando ocorreu a falha potencial ela pode ser identificada, e foram tomadas ações preventivas ou corretivas planejadas e não

emergenciais, pois não houve ainda a falha funcional. Após eliminados os sintomas, o equipamento retornou à condição de projeto, refletindo na forma da curva **c** que apresenta uma inclinação mais suave.

Para o exemplo citado, é possível observar que, no instante **t₂**, a curva **c** indica a condição **D₅** e a curva **a**, a condição **D₃**, em que, provavelmente, o equipamento já apresenta sintomas perceptíveis, como ruído e aquecimento, pois está muito próximo da falha funcional, enquanto **D₅** indica um desempenho praticamente inalterado.

No instante **t₃**, a empresa **Z** que utiliza MPd conjugada com MPr e MC, permite ao ativo o desempenho **D₄**, ainda confortável para os gestores da manutenção, pois há tempo suficiente para planejar a parada e as intervenções necessárias.

Na empresa **Y**, que utiliza MPr, conjugada como MC, o ativo já apresenta no instante **t₃** sintomas perceptíveis, mas que ainda não lhe impede de executar sua função. No entanto, há necessidade de uma rápida intervenção corretiva, a fim de evitar falha funcional.

Na empresa **X**, o equipamento já teve a falha funcional, ou seja, não é mais capaz de executar sua função. Assim, diante dessa situação, só resta a M_{Ce}, com impossibilidade de quaisquer planejamentos.

4.3.7 Como a manutenção preditiva influencia no custo de manutenção

O custo de total de manutenção tende a ser maior, num mesmo instante, para um ativo sujeito somente à MPr ou MC quando se compara com o custo ao se empregar MPd. Para nossa análise neste item, não vamos considerar os gastos iniciais como estoque de sobressalentes para MPr ou investimento em equipamentos no caso da MPd.

Para ilustrar, são consideradas duas situações hipotéticas representadas no GRÁF. 7: situação **A** com as curvas **a** e **a'**, que mostram a performance do equipamento e custo total de manutenção respectivamente. Da mesma forma, temos a situação **B** com as correspondentes curvas **b** e **b'**.

A situação **A** emprega MPd, diferente de **B**, que não adota uma política preditiva. A partir da falha potencial **P**, na situação **A**, houve intervenções para a correção dos sintomas apresentados. Na situação **B** nada foi feito, pois não foi possível detectar a falha potencial. A partir do ponto **P** a curva **b** apresentou queda, representando redução da performance do equipamento, enquanto a performance representada por **a**, praticamente não se alterou.

Ao se observar o instante **t₂**, pode-se notar que o custo de manutenção **C₂** associado a curva **b** é maior do que **C₁**, que está associado à curva **a**. Cabe observar que **C₁** ainda está

praticamente igual ao início de operação. Conclui-se que a MPd também favorece a redução dos custos associados à política de manutenção.

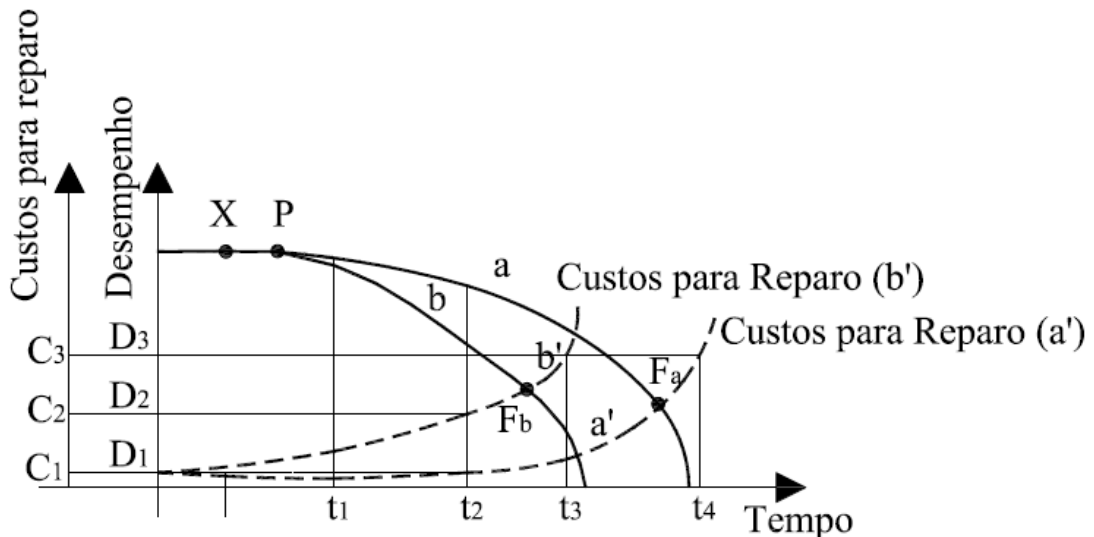


GRÁFICO 7 - Curva PF - Custo para reparo
Fonte: adaptado de MOUBRAY (1997).

Diante dessa análise, observa-se que, com o passar do tempo e a conseqüente queda de desempenho de um item, os custos de manutenção aumentam em uma relação inversamente proporcional, como mostram as curvas de custo e suas correspondentes curvas de desempenho.

O custo de manutenção C_3 é atingido no instante t_3 para a política de manutenção sem o emprego da MPr, enquanto no instante t_4 , esse custo relaciona-se com um item sujeito à MPd, além da MPr e MC. Ou seja, para um mesmo custo de manutenção, quando se utiliza a MPd, ele é alcançado em tempo maior em relação às políticas que não empregam procedimentos preditivos.

5 MANUTENÇÃO PREDITIVA E SUA INTER-RELAÇÃO COM A CORRETIVA E PREVENTIVA

A NBR-5462 define desempenho de suporte de manutenção como a “capacidade de uma organização de manutenção prover, sob demanda, os recursos necessários para manter um item sob condições especificadas e de acordo com uma dada política de manutenção” (ABNT, 1994, p. 3). Diante desse conceito, uma boa política de manutenção deverá adotar os três tipos estudados: corretiva, preventiva e preditiva, mas deverá saber quando e em quais equipamentos elas deverão ser aplicadas, considerando a função que eles exercem em um sistema operacional, além de suas especificações técnicas.

5.1 Comportamento da Falha em Função do Tempo

Da FIG. 3, observa-se que as falhas que ocorrem, de acordo com as curvas **A**, **B** e **C** estão relacionadas com o envelhecimento do ativo e correspondem a apenas 11% do total de equipamentos. A curva tipo **A** é a curva da banheira, o equipamento apresenta aumento de falha no final da vida útil ou após longo período de funcionamento; a curva tipo **B** tem as mesmas características de **A**, exceto pela ausência de mortalidade infantil e, finalmente, na curva tipo **C** as falhas têm aumento gradual com o passar do tempo.

Já as falhas de 89% dos equipamentos não estão relacionadas ao tempo de operação e se comportam de acordo com as curvas **D**, **E** e **F**. Isso significa que, pouco adiantará adotar políticas de manutenção exclusivamente ligadas aos gatilhos típicos na manutenção preventiva.

A curva tipo **D** apresenta taxa elevada de falhas no início da operação e se mantém constante, independentemente do tempo de funcionamento; a curva tipo **E** apresenta o comportamento de falhas constante em todo o período de operação, não aumentando, com o passar do tempo, e a curva **F**, cujo comportamento de falha corresponde a 68% e que apresenta a mortalidade infantil. Após uma redução dessa taxa, ela se mantém constante ao longo do tempo de operação, e não apresenta acréscimo ao longo do tempo.

Conclui-se que, se for privilegiada a MPr, ela terá alta efetividade somente para 11% dos equipamentos, pois esse tipo de manutenção tem por objetivo evitar falhas. Os dados do fabricante e conhecimento do MTBF darão subsídios para intervenções preventivas, por meio dos gatilhos, como tempo de operação ou tempo de uso.

Para o restante dos equipamentos, mais especificamente, 89%, as falhas ocorrerão principalmente de forma aleatória. Os procedimentos preventivos, portanto, não serão capazes

de evitá-las, a não ser que o seu modo de falha ou falha potencial esteja sob uma rotina de manutenção. Para esse maior percentual deverá ser utilizada a MPd, pois é a única capaz de descobrir um sintoma de desempenho considerado anormal.

Da FIG. 3, obtemos os seguintes percentuais de equipamentos que falham de acordo com um dos seis tipos de falhas apresentados. Os percentuais estão representados no GRÁF. 8 e consolidados no GRÁF. 9.

- a) Curva tipo A – 4%
- b) Curva tipo B – 2%
- c) Curva tipo C – 5%
- d) Curva tipo D – 7%
- e) Curva tipo E – 14%
- f) Curva tipo F – 68%

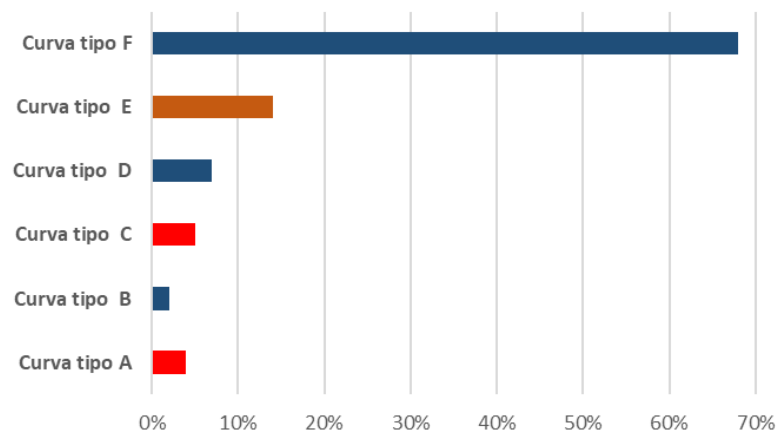


GRÁFICO 8 - Tipos de falha pelo percentual de ocorrência
Fonte: elaborado pelo autor a partir de dados de QUEIROZ (2016)

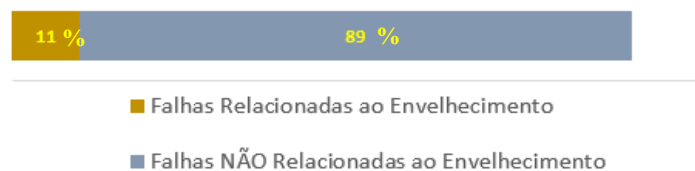


GRÁFICO 9 - Partição de falhas em função do envelhecimento
Fonte: elaborado pelo autor a partir de dados de QUEIROZ (2016)

5.2 Análise FMEA

FMEA é uma sigla em inglês que significa *Failure Modes and Effects Analysis*. Na tradução livre para o português seria análise de modos e efeitos de falha. Segundo Stamatis (2003) é uma ferramenta fundamental para análise da confiabilidade, por meio da ocorrência (O), detecção (D) e severidade (S); constitui-se, portanto em uma técnica capaz de identificar falhas potenciais ou modos de falha de sistemas, projetos, processos ou serviços.

Como mostra Puente *et al.* (2002) foi a NASA que empregou essa metodologia pela primeira vez, em 1963. Depois, ela se expandiu para a indústria automobilística com a finalidade de quantificar e ordenar defeitos no estágio de projeto de produtos.

A aplicação correta dessa ferramenta ajuda a elaborar um bom plano de manutenção, no qual os modos de falha podem ser determinados, assim como os riscos a eles associados, além de calcular o *Risk Priority Number* (RPN²³), cuja equação é mostrada a seguir.

$$RPN = S \times O \times D \quad (13)$$

$$C = S \times O \quad (14)$$

Em que:

C - Criticidade

S – Severidade

O – Ocorrência

D – Detecção

Uma visão moderna de manutenção é ter foco, não somente no equipamento, mas na função que ele exerce, nas condições em que ele opera e nas consequências da falha. Por esse motivo, as três variáveis – severidade, ocorrência e detecção – devem ser muito bem avaliadas, de tal forma que o RPN possa trazer como resultado o ordenamento em que estejam priorizadas as falhas em função de suas consequências. O FMEA poderá ser aplicado para um

²³ RPN (Risk Priority Number) é um indicador usado na avaliação do risco para para identificar modos de falha crítica associados ao projeto ou processo. O RPN é comumente usado na indústria automotiva sendo semelhante à criticidade dos valores usados norma Mil-Std-1629A. O valor calculado do RPN é o produto da multiplicação da Severidade (S) pela Ocorrência (O) e Detecção (D). Severidade é um conceito subjetivo que representa o quanto o utilizador tem a percepção do efeito da falha. Ocorrência pode ser conhecida como probabilidade, é um valor estimado de que a causa de um modo de falha ocorrerá durante o ciclo de vida de um item. Detecção, também chamada de eficácia, indica o quanto que controles podem prevenir ou detectar a causa ou modo de falha.

processo ou a para um ativo. O que se espera é a mitigação de riscos com base na redução do efeito ou probabilidade de falha ou uma redução de ambos, o que é ideal.

A ferramenta FMEA auxilia na priorização de equipamentos sejam eles iguais ou diferentes de tal forma a orientar a equipe de manutenção estabelecer com clareza quando e qual equipamento deverá sofrer algum tipo de intervenção preditiva.

Tem que haver um entendimento de que a função de um ativo é que estabelece a sua importância dentro de um sistema, ou seja, deve-se conhecer quais seriam as consequências de uma pane. Por exemplo: duas bombas hidráulicas iguais, sendo que uma exerce a função de alimentar o sistema hidráulico do leme de um Navio e outra que aciona um tampão de um paiol, não resta dúvida, que pela análise FMEA, será indicada a bomba do sistema hidráulico do leme com mais prioridade, ou seja essa bomba certamente terá um RPN maior.

5.3 Custos das manutenções corretiva, preventiva e preditiva

Uma política de manutenção adequada tem que ter a capacidade de selecionar os tipos de manutenção que serão empregados na organização. Os três tipos de manutenção devem conviver em harmonia, cada um ocupando seu espaço e inter-relacionando-se com os outros. Deverão responder aos seguintes questionamentos: Em quais ativos serão utilizadas a MC, MPr ou MPd ou a combinação delas? Quais são as funções dos equipamentos? Quais seriam as consequências dessas falhas?

Deverá ser levado em conta que a MPd é mais cara para ser implantada, mas, com o decorrer do tempo, os custos de manutenção tendem a reduzir, enquanto a MC apresenta um comportamento contrário; já a MPr situa-se entre ambas. O GRÁF. 10 ilustra as três situações descritas.

Para a MC, não há investimento em equipamentos para coletas de dados dos modos de falha e software para análise de dados. Também não há gastos relacionados à compra de sobressalentes para utilização em rotinas preventivas.

Quando o foco é na MPr, o investimento inicial é maior do que na MC, pois existe dispêndio de recursos financeiros para compra de sobressalentes e itens de reposição. Há necessidade também de aplicar recursos em controle de estoques e treinamento de pessoal, a fim de executar as rotinas planejadas.

Na MPd o investimento inicial é o maior do que nas demais, aplicados em equipamentos mais sofisticados para coleta e dados, softwares capazes de analisar dados e

treinamento de pessoal. Todavia, o custo tende a ser reduzido, devido aos benefícios que esse tipo de manutenção pode oferecer.

Observando o GRÁF. 10, chega-se à conclusão de que uma organização não deverá utilizar somente a MPd; entretanto, como já abordamos anteriormente, os três tipos de manutenção coexistirão em quaisquer organizações, cabendo aos gestores definirem o ponto econômico ótimo, ilustrado pelo ponto t

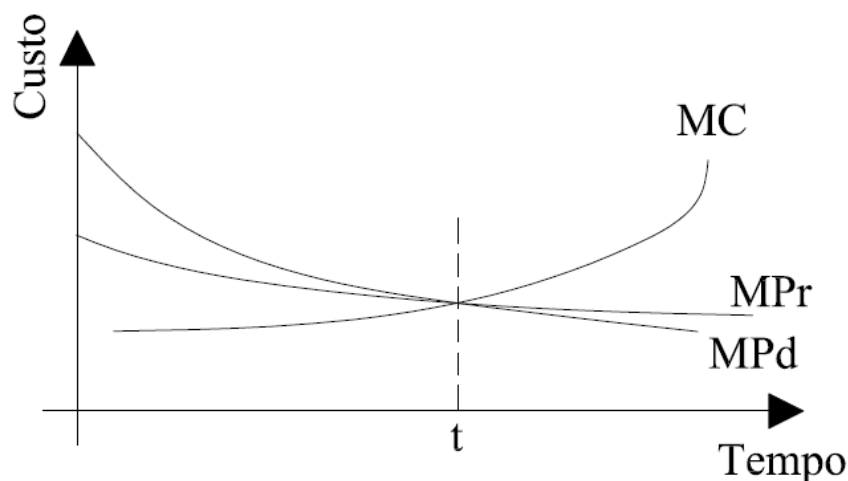


GRÁFICO 10 - Custos relativos às manutenções corretiva, preventiva e preditiva
 Fonte: Gráfico com modelo ideal no custo de manutenção em ativos
 (CAVALCANTE e ALMEIDA, 2005). Adaptado pelo autor.

No caso da MB, a DGMM deverá ser a responsável pela implementação de uma nova política de manutenção de tal forma que tal política seja norteadora de novos procedimentos de manutenção enfatizando a utilização da MPd.

Este autor sugere que o AMRJ seja responsável pela execução da MPd, atuando na coleta de dados e em sua análise de modo a subsidiar a Diretoria Industrial da Marinha (DIM) ou a Diretoria de Gestão dos Programas Estratégicos da Marinha (DGePEM) no sentido de definir o tipo de intervenção, corretiva ou preventiva, e quando ela deverá ser realizada.

5.4 Análise econômica da política atual de manutenção na MB

Já foi demonstrado que, ao se utilizar a manutenção preditiva, além das corretiva e preventiva, os índices de confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade aumentam. O fator custo de manutenção, ao ser analisado isoladamente, principalmente quando se propõe a mudar toda uma política vigente, poderá inibir estratégias para inovação ou torná-las mais modestas. Isto é proveniente da falta de conscientização de a manutenção ser vista como função

estratégica, trazendo como consequência falta de clareza quanto ao modelo de gestão que será adotado para essa atividade.

Os custos gerados pela manutenção, segundo Mirshawa & Olmedo (1993), são a parte visível de um *iceberg*, que corresponde aos custos de ferramental, máquinas, instrumentação, material de insumos aplicados nos reparos ou revisões e material em estoque. A parte submersa corresponde aos custos advindos da indisponibilidade. No caso da MB, considera-se a indisponibilidade de um Navio, por exemplo, de cumprir uma missão, podendo refletir em prejuízo da missão constitucional da Marinha do Brasil. Independente do levantamento de custos de um Navio de Guerra parado, cabe uma reflexão: como essa indisponibilidade se reflete na imagem da MB?

Partindo-se da premissa de que manutenção adequada causa redução de custo, será analisado o GRÁF.11, em que está mostrada a relação entre o custo da MPr e o custo de falha. Como visto anteriormente, a MPr tem como objetivo principal evitar falhas, por meio de rotinas planejadas. Como consequência, quanto maior o gasto com as rotinas preventivas, menor será o custo decorrente das falhas, pois o excesso dessas rotinas abarcaria muitos modos de falha reduzindo falhas funcionais, entretanto haveria redução da disponibilidade devido a horas paradas para revisão, gasto excessivo com sobressalentes e aparecimento da mortalidade infantil. Conclui-se que não é compensador buscar redução da taxa de falhas para patamares baixos utilizando somente MPr.

Ao se observar o instante t_2 , o custo C_3 em relação a C_1 no instante t_1 significa aumento na frequência das rotinas de manutenção, aumento nas paradas para inspeção e revisão, e maiores custos para compra de sobressalentes e insumos. Apesar do custo das falhas ser menor, temos outras consequências indesejáveis, como indisponibilidade por parada forçada e ocorrência da mortalidade infantil, como citado anteriormente.

Tal gráfico é muito significativo, pois a política de manutenção da MB, como externado na Introdução desta tese, é baseada no Sistema de Manutenção Planejada (SMP) que, por sua vez, segue os conceitos da MPr. Com a escassez de recursos para compra de sobressalentes e outros itens, a manutenção da MB está situada em um ponto com o instante t_1 , que significa pouco investimento na manutenção preventiva, C_1 , cabendo uma ressalva: nem sempre a redução de investimento significa uma efetiva redução de gastos, mas, na prática, a indisponibilidade de sobressalentes e itens para as rotinas previstas no SMP. Em consequência, o custo de falhas C_4 tem aumentado, agravado pelo envelhecimento dos meios.

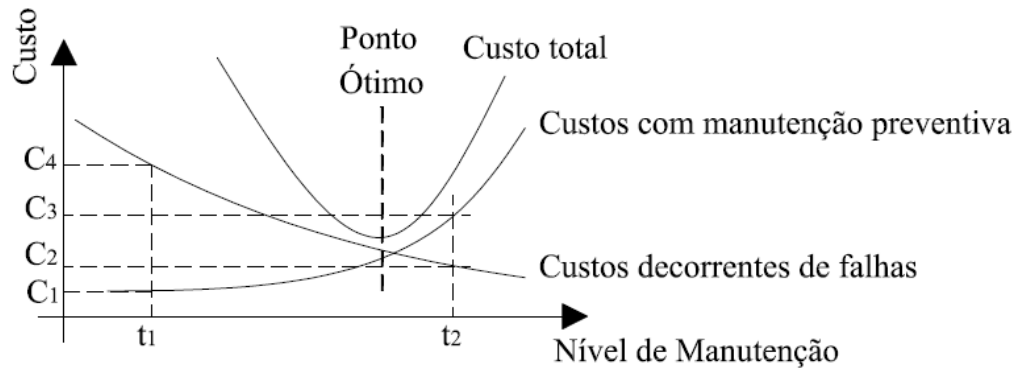


GRÁFICO 11 - Custo pelo nível de manutenção
 Fonte – MIRSHAWA E OLMEIDO (1993). Adaptado pelo autor.

5.5 Vantagens econômicas da manutenção preditiva

O GRÁF.12 mostra que para uma disponibilidade de 100%, os gastos tenderiam ao infinito, pois 100% de disponibilidade é uma situação de análise matemática e que na prática não tem muito significado. O que se quer na realidade é encontrar um ponto entre o custo de manutenção e lucro, que traduza em um ponto ótimo de disponibilidade.

No caso da MB, devido às peculiaridades por ser uma Força Armada, ao se optar por um aumento de disponibilidade além do ponto ótimo, o aumento do custo será exponencial e a relação disponibilidade pelo gasto será economicamente proibitiva, mas caberá às autoridades decidir se, pela importância em se ter um Meio disponível, assumir esse gasto considerando outros aspectos além do econômico. Este autor entende que o setor de material da MB deverá assessorar o decisor na relação custo *versus* disponibilidade. Há de se considerar também os aspectos da confiabilidade, que tem um decaimento exponencial em função de horas futuras de funcionamento, como mostrado anteriormente.

O maior custo para implementação da manutenção preditiva, como mostrado no GRÁF. 10, é compensado pelos resultados conseguidos não só pela melhoria dos valores calculados dos indicadores, mas também no aspecto econômico na relação custo pelo benefício da disponibilidade, pois a parada de equipamentos devido a falha funcional quando se privilegia a MC, ou quando o investimento em peças e sobressalentes também é elevado quando se privilegia a MPr.

A MPd propicia à organização alcançar disponibilidade próxima ao ponto ótimo mostrado no GRÁF. 12. Uma boa política de manutenção, na busca desse ponto deve levar em consideração a importância do item dentro de um processo ou de um sistema.

Para a MB, como o lucro não é auferido, o gráfico poderá ser analisado considerando o custo de manutenção e o ponto ótimo poderia ser considerado um ponto de inflexão, em que a taxa de crescimento do custo teria uma inclinação relativamente maior que a tendência até o ponto ótimo de disponibilidade.

O lucro é função da despesa e receita, considerando a despesa como “custo de manutenção”, a busca pela redução de despesa com manutenção deve ser uma meta constante na MB. Fazendo uma análise com o gráfico PF, discutido no capítulo 4, mostramos que a MPd traz como consequência um atraso na falha funcional implicando em um menor custo com reparo ao longo da vida útil do ativo. Essa situação é representada no gráfico pela linha tracejada, “custo de manutenção com MPd”; ou seja, com o uso da MPd, haverá aumento da disponibilidade para um mesmo custo de manutenção.

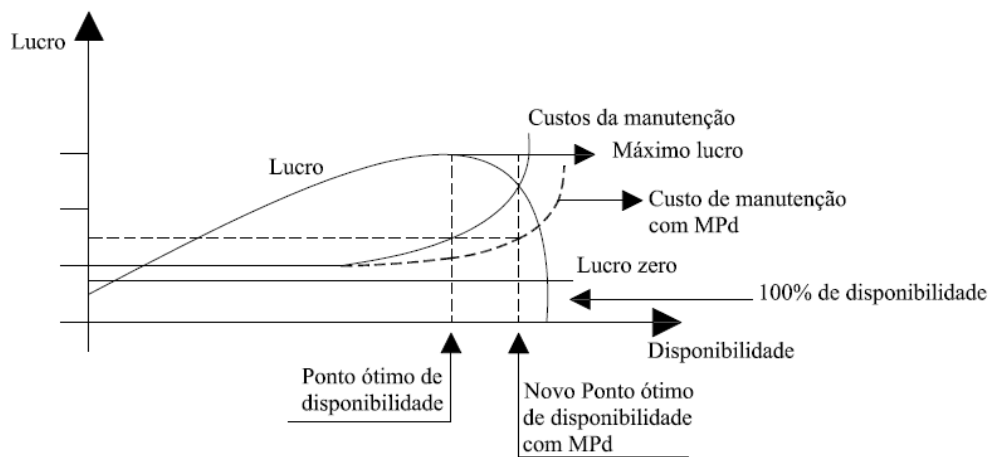


GRÁFICO 12 - Lucro pela disponibilidade

Fonte: MURTY E NAIKAN (1995). Adaptado pelo autor.

6 SITUAÇÃO ATUAL DA MANUTENÇÃO NA MARINHA DO BRASIL

Neste capítulo, abordaremos a manutenção da MB a partir da chegada das Fragatas Classe Niterói na década de 1970, pois naquele período, a Marinha do Brasil mudou a política de manutenção vigente, adotando um modelo de manutenção preventiva, que era o modelo preconizado pela *Vosper Thornycroft*²⁴, para as Fragatas Vosper-Mk 10, designação britânica do projeto das Fragatas Classe Niteroi. Advindo desse fato criaram-se rotinas de manutenção, estabelecendo periodicidade em que para algumas foi fixado o tempo de uso e para outras, as horas de funcionamento. Foram adquiridos sobressalentes que seriam alguns disponibilizados a bordo e outros, nos depósitos navais. As rotinas, procedimentos e sobressalentes constituíram o Sistema de Manutenção Planejada (SMP). A publicação EMA-420, estabelece que o SMP é

constituído pela reunião das ações de manutenção planejada preventiva e preditiva, em uma coletânea de rotinas programadas, que obedece a um método racional de planejamento, execução e controle. O cumprimento das rotinas estabelecidas pelo SMP busca a obtenção dos seguintes propósitos imediatos:

- a) definir a atividade de manutenção necessária, por intermédio de tipos, métodos, procedimentos e critérios padronizados, de fácil identificação e administração;
- b) detectar possíveis deficiências do material, de modo a permitir o aperfeiçoamento de futuras especificações técnicas;
- c) avaliar a eficácia das atividades de manutenção, à luz dos registros que são feitos durante sua execução;
- d) identificar as necessidades de aperfeiçoamento da formação de pessoal e das técnicas de manutenção;
- e) conhecer o custo da manutenção; e
- f) aumentar a confiabilidade e a disponibilidade dos meios (BRASIL, 2002, p. 3.6).

Analisando a constituição do SMP, não obstante se referir à manutenção planejada preventiva e preditiva, não foram empregadas ações preditivas ou, quando aplicadas, foram bastante modestas, ou seja, o SMP teve e tem por base a MPr.

Como mostraremos mais adiante, as Fragatas Classe Greenhalgh foram as que tiveram maior percentual de MPd do total de suas rotinas. À época, por ocasião da incorporação na MB, houve uma impressão equivocada de que as rotinas preditivas dessa Classe compreendiam cerca de 40% do total, pois o que estava estabelecido foi um aumento no emprego da MDe, que somadas com as ações preconizadas pela MPd, chegou-se à este percentual. Mais adiante, veremos que a manutenção preditiva equivale somente a 9,9 % do

²⁴ Vosper Thornycroft é uma empresa britânica de projeto e construção de Navios. Foi formada em 1966 pela fusão dos principais construtores de navios do Reino Unido: Vosper Limited e J.I. Thornycroft & Company.. Essa empresa foi responsável pelo projeto das Fragatas Vosper Mk 10 que deu origem às Fragatas Classe Niteroi. Das seis Fragatas, 04 foram construídas em suas instalações em Woolston, Hampshire, Inglaterra e duas foram construídas no Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro. A primeira da Classe, Niteroi, teve o batimento de quilha em junho de 1972 e foi incorporada à Marinha do Brasil em novembro de 1976.

total, mesmo assim já representou um aumento em relação a outras classes de Navio. Cabe ressaltar que a MB adquiriu quatro Fragatas *type 22* da *Royal Navy* que deram origem à Classe Greenhalgh²⁵. Esses Navios vieram com um pacote de manutenção definido.

6.1 Sistema de Manutenção Planejada e partição pelas manutenções preventiva, detectiva e preditiva

Cambra (2016) pesquisou 12.046 rotinas de manutenção o que possibilitou fazer a partição da composição do SMP para as Fragatas Classe Niterói (FCN), Corvetas Classe Inhaúma (CCI), Corveta Barroso e Fragatas Classe Greenhalgh, apresentados na tabela 5.

TABELA 5
Distribuição das rotinas por Classe de Navios e tipos de manutenção

Classe Navio	Total de rotinas	MPr				MDe	MPd
		InspPrev	RestPrev	SbtPrev	Total MPr		
FCN 1972	3.847	1.096 %(28,5)	1.301 %(33,8)	249 %(6,5)	2.646 %(68,8)	969 %(25,2)	232 %(6)
CCI 1983	2.554	613 %(24)	1.052 %(41,2)	168 %(6,6)	1.833 %(71,8)	576 %(22,5)	145 %(5,7)
Cv Barroso 1994	2.001	469 %(23,4)	763 %(38,1)	165 %(8,2)	1.397 %(69,7)	500 %(25)	104 %(5,3)
FCG 1975	3.644	991 %(27,2)	979 %(26,8)	189 %(5,2)	2.159 %(59,2)	1.126 %(30,9)	359 %(9,9)

Fonte: CAMBRA (2016), adaptada pelo autor

A MPr compreendeu as seguintes rotinas:

- inspeção preventiva (InspPrev): verificações conduzidas sem a medição de parâmetros de monitoramento da condição;
- restauração preventiva (RestPrev): revisões programadas que pressupõem gastos de material; e
- substituição preventiva (SbtPrev): substituição completa do item com base no tempo de funcionamento.

²⁵ A Fragata Greenhalgh, a primeira da Classe, foi incorporada à Marinha do Brasil em junho de 1995.

A MPd restringiu-se às ações de medição de vibração de equipamentos rotativos, diagnose de motores, acompanhamento da qualidade de lubrificantes e controle de parâmetros elétricos.

A MDe focou nos testes de descoberta de falhas ocultas em dispositivos de controle e proteção de equipamentos e sistemas de armas.

Da tabela, foram plotados os gráficos abaixo. No GRÁF. 13 é mostrada a distribuição dos tipos de manutenção distribuídas por quatro classe de Navios, considerando os valores absolutos. Nota-se que há franca predominância da MPr em detrimento da MPd.

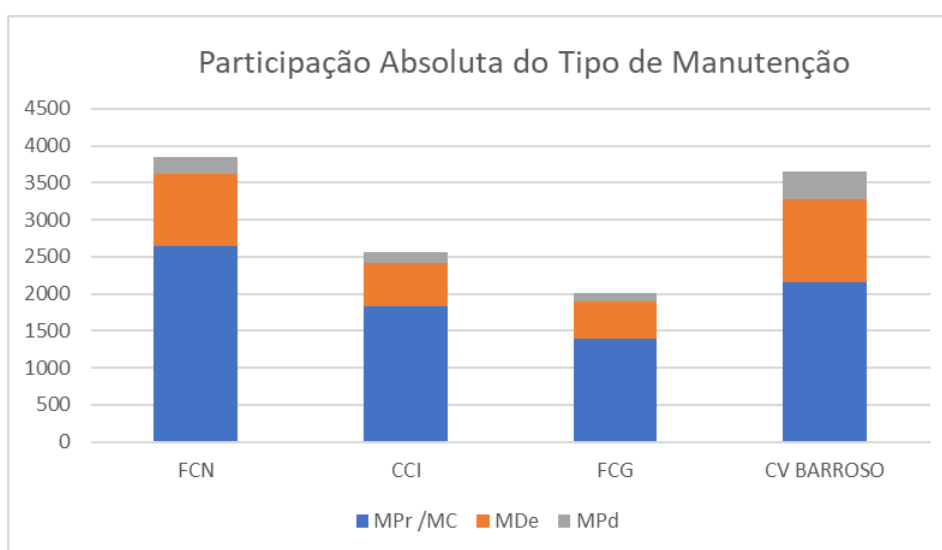


GRÁFICO 13 - Distribuição das rotinas por Classe de Navios e tipos de manutenção
Fonte: elaborado pelo autor a partir de dados oriundos de CAMBRA (2016)

Comparando as duas classes de Fragatas, a Greenhalgh apresenta um percentual de 9,9% de procedimentos preditivos em relação ao total das rotinas; enquanto a Classe Niterói atinge um percentual de 6%.

Ao considerarmos as Classe Inhaúma e Corveta Barroso, a MPd corresponde somente a 5,7% e 5,3%, respectivamente, o que demonstra uma política de manutenção contraditória em relação à evolução da política de manutenção mundial, tendo em vista que são classes mais novas que a Classe Niterói e a Classe Greenhalgh.

O gráfico a seguir tem o propósito de mostrar a partição percentual por Classe de Navios e por tipo de manutenção. As FCG apresentam uma evolução na política de manutenção, pois o somatório de MPd e MDe representa 40,8%, esse número denota uma visão mais moderna de manutenção ao se comparar com as Fragatas Classe Niterói e Greenhalgh, assim como em relação às Corvetas Classe Inhaúma e Barroso. Cabe destacar que a MDe tem o

propósito de detectar falhas que já ocorreram, mas que são imperceptíveis pelo sentimento do operador ou utilizador, ou seja, indica anormalidades na área 2 e início da área 3 dos GRÁF. 3, 4 e 5. Diferente da MPd que consegue detectar modos de falha ou falhas potenciais na área 1 desses gráficos.

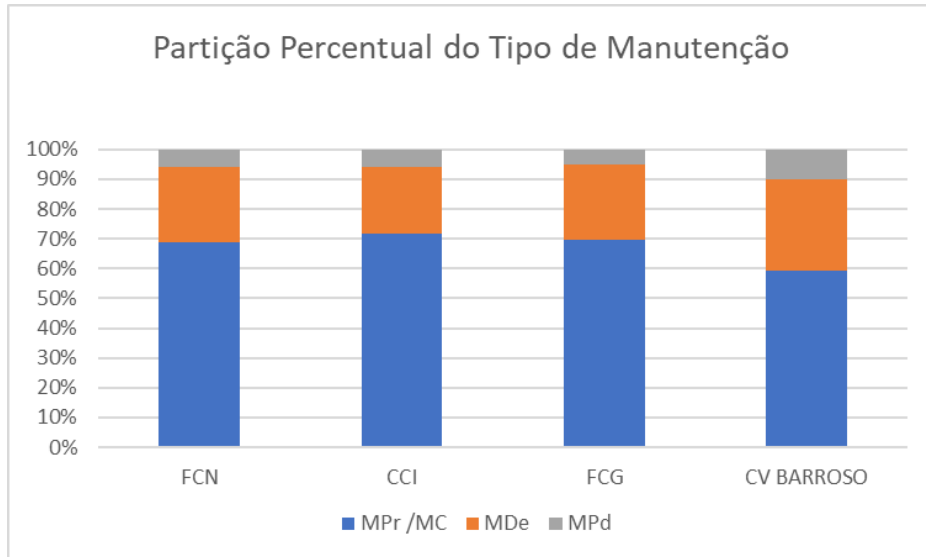


GRÁFICO 14 - Partição percentual por Classe de Navios e tipo de manutenção
Fonte: elaborado pelo autor a partir de dados oriundos de CAMBRA (2016)

A distribuição consolidada das 12.046 rotinas das quatro Classes analisadas apresentou a seguinte distribuição mostrada no GRÁFICO 15. Em que a MPr /MC totalizam 8035 rotinas que correspondem a 66,70%, a MDe totaliza 3171 rotinas correspondentes a 26,32% do total e finalmente a MPd com 840 rotinas representa somente 6,97% do total.

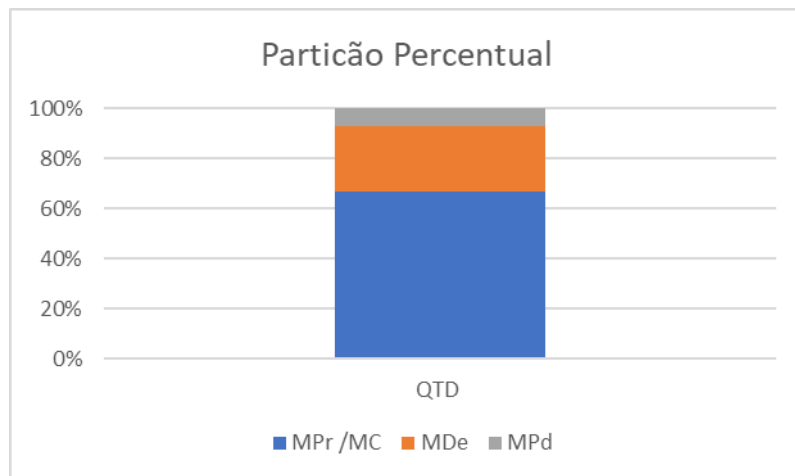


GRÁFICO 15 - Partição percentual total consolidada
Fonte: elaborado pelo autor a partir de dados oriundos de CAMBRA (2016)

Políticas modernas e atuais de manutenção deverão buscar substancial participação da MPd de tal forma que represente em torno de 50% do total da mão de obra empregada no esforço de manutenção. O somatório das MPr e MCp deverá ficar em torno de 40% e a Mce não deverá ultrapassar 10%.

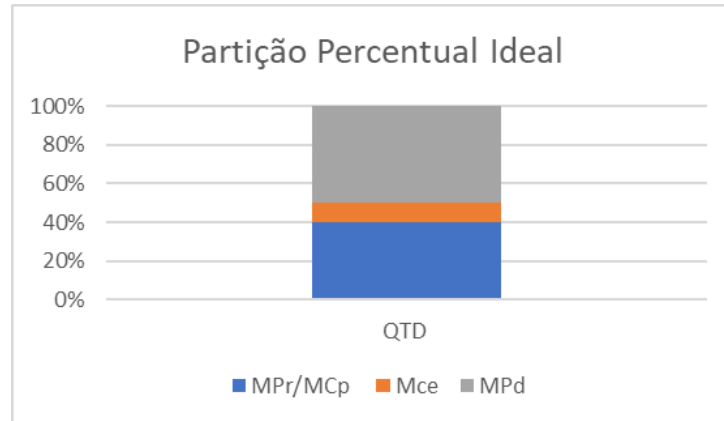


GRÁFICO 16 - Partição percentual ideal
Fonte: elaborado pelo autor

6.2 Período de manutenção nos últimos anos.

Foram obtidos junto ao Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro (AMRJ) através do Departamento de Orçamento e Controle Industrial (AMRJ-21) a duração de alguns Períodos de Manutenção Geral (PMG). Os dados foram consolidados na tabela 6 abaixo e em seguida foram traçados os respectivos gráficos. A Norma da Diretoria Geral do Material da Marinha (DGMM), Materialmarinst 21-11F²⁶ define prazos padrões para os períodos de manutenção que podem ser vistos na coluna “Duração Padrão”.

TABELA 6
Duração de PMG

Classe de Navio	Nome do Navio	Início do PMG	Fim do PMG	Duração [dias]	Duração Padrão	Observação
Submarino Classe Tupi e Classe Tikuna	Tamoio	02/01/05	10/01/06	373	720	
	Timbira	03/01/05	26/09/07	996		
	Tapajó	19/07/07	06/10/10	1175		
	Tikuna	17/03/16	19/08/20	1616		Em andamento

²⁶ Materialmarinst 21-11F é uma instrução permanente da Diretoria-Geral do Material da Marinha que trata dos assuntos atinentes a Períodos de Manutenção (PM) dos Meios Navais.

FCN	Independência	03/01/05	03/01/06	365	420	
	Liberal	13/02/05	30/05/08	1202		
	União	19/07/07	17/06/11	1429		
	Defensora	23/05/12	19/08/20	3010		Em andamento
CCI	Inhaúma	03/01/05	03/01/06	365	360	
	Jaceguai	06/01/14	11/01/15	370		Junto com PME ²⁷
	Júlio de Noronha	29/03/17	23/10/18	573		
	Frontin	14/09/13	27/08/14	347		Junto com PDE ²⁸

Fonte: elaborada pelo autor a partir de dados oriundos do AMRJ

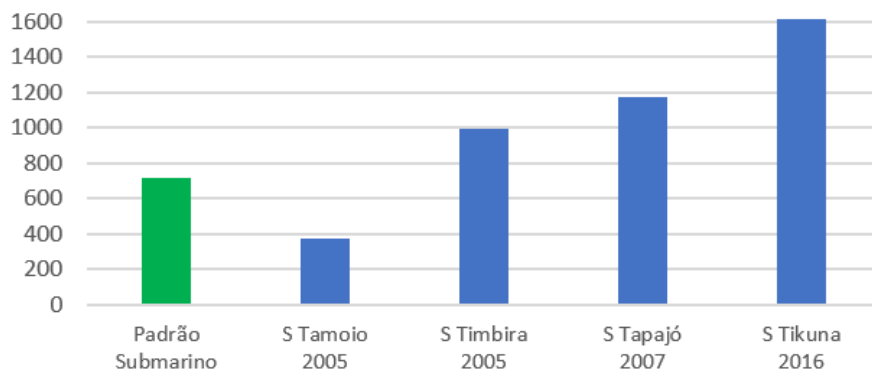


GRÁFICO 17 - Duração de PMG de Submarinos em dias

Fonte: elaborado pelo autor a partir de dados oriundos do AMRJ

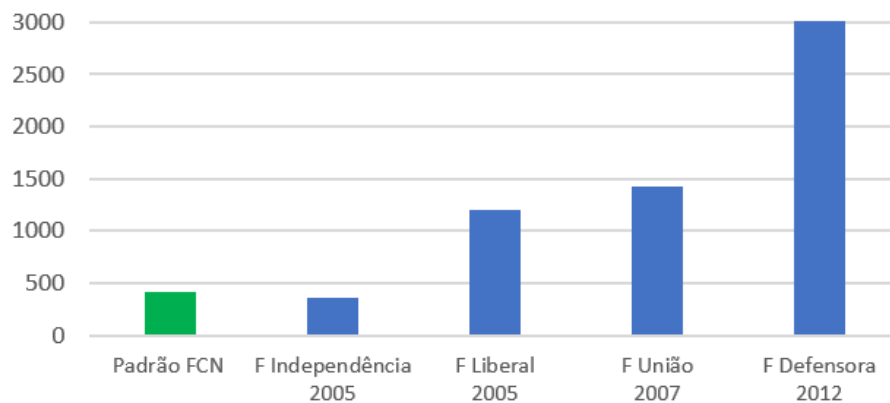


GRÁFICO 18 - Duração de PMG - FCN em dias

²⁷ Período de Manutenção Extraordinário.

²⁸ Período de Docagem Extraordinário.

Fonte: elaborado pelo autor a partir de dados oriundos do AMRJ

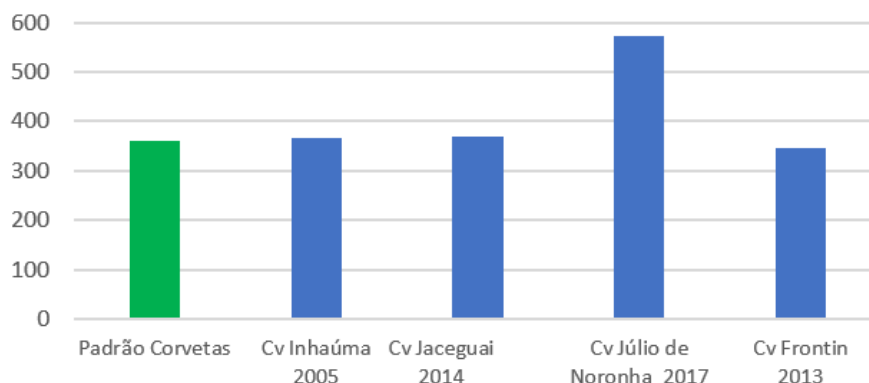


GRÁFICO 19 - Duração de PMG - CCI em dias

Fonte: elaborado pelo autor a partir de dados oriundos do AMRJ

Cabe uma ressalva, no GRÁF. 17, o PMG registrado da CV Frontin teve duração de apenas 347 dias, todavia as rotinas previstas não foram cumpridas e o reparo foi interrompido, pois houve decisão da baixa do Navio.

Da análise dos GRÁF. 15, 16 e 17, conclui-se que houve tendência crescente nos tempos para PMG. As CCI tiveram dois períodos de manutenção próximo ao prazo padrão, mas nota-se um aumento do último PMG da CV Júlio de Noronha.

Cabe ressaltar que os PMG da Fragata Defensora e do Submarino Tikuna, não obstante o prazo dilatado, ainda se encontram em andamento.

6.3 A Manutenção Preditiva poderia ter melhorado o cenário atual.

Quando os Navios eram novos, os ativos operavam na área 1 da curva PF, GRÁF. 3, 4 e 5 e havia grande quantidade de sobressalentes, então a manutenção empregada trouxe a impressão de que a disponibilidade e confiabilidade estavam sendo otimizadas, que seria uma expectativa da alínea f da definição do EMA-420.

Entretanto, como explicado anteriormente, na área 1 não há ocorrência de falhas funcionais e alguns modos de falha ou falhas potenciais poderiam ter sido corrigidos pelas rotinas preventivas ao acaso, mesmo que eles não fossem detectados. Nesse caso, a curva PF teria o ponto de falha funcional atrasado e a curva PF teria uma forma mais planificada e menos inclinada.

Caso o modo de falha não pudesse ser corrigido por uma rotina, e tendo em vista que MPd não era utilizada implicaria na impossibilidade em descobrir o sintoma não conforme,

logo aquele modo de falha não poderia ser atacado pelas MCp, o que levaria à falha funcional. Apesar do cumprimento das rotinas do SMP, ou seja, seriam gastos recursos sem resultar em um aumento da disponibilidade.

O envelhecimento dos Navios significa que o desempenho dos ativos está na área 2 ou 3 do gráfico PF, pois como mostramos nos três gráficos citados anteriormente, os períodos de manutenção têm aumentado e os sintomas estão mais evidentes e podem ser percebidos pelos sentidos humanos ou por equipamentos menos sofisticados como aqueles que devem ser empregados numa MPd inovadora.

Se a Marinha tivesse optado pela MPd, atualmente os estoques de sobressalentes não estariam tão reduzidos, pois a conduta preditiva iria apontar os sintomas que careciam de atuação corretiva ou preventiva, e de outra forma, poderia indicar que certas rotinas poderiam deixar de ser executadas. Outra consequência seria o aumento da disponibilidade, ao se levar em conta que o MTBF e MTBM aumentariam, equações 3 e 4. Cabe destacar que a falta de sobressalentes tem sido uma das causas do aumento do tempo de reparo.

Considerando para a nossa análise a curva da banheira e suas derivações, item 4.2.1, vimos que o ciclo de vida em termos de comportamento de falhas divide-se em três fases: mortalidade infantil cujas falhas estão na origem e são decrescente; segunda fase, maturidade, em que as falhas são aleatórias e a taxa de falha constante; e a terceira fase, desgaste, são crescentes e progressivas.

A taxa de falha altera de comportamento ao longo das três fases operacionais, como pode ser visto no GRÁF. 2 e na tabela 3, na fase senil ou desgaste, fase 3, a taxa de falha adquire comportamento linearmente crescente. A MPd na atual conjuntura pode ser útil no sentido de monitorar processos progressivos de falhas já iniciados. A MPr também é útil, se for empregada junto com a MPd, do contrário essa intervenção terá um custo muito alto, pois ao tentar evitar falhas futuras adotará uma conduta de substituição de muitos componentes.

A MPd tem aplicação em todas as fases, sendo menos expressiva na fase de mortalidade infantil, como mostrado na tabela 4.

Na fase da maturidade, em que está o maior percentual da vida de um item, falhas aleatórias ocorrem, e nessa fase, a MPr pode corrigir defeitos ao acaso, pois não é capaz de detectar sintomas anormais. Dessa forma, a MPd deveria ser empregada de tal forma a corrigir e alterar rotinas preventivas e dessa maneira traria benefícios como economia de sobressalentes e redução de intervenções, e por outro lado sinalizaria intervenções não previstas nas rotinas preventivas.

A manutenção preventiva pode trazer alguns inconvenientes na fase da maturidade ao trocar os itens “sobreviventes” que ainda não iniciaram o desgaste ou ainda, se teve início, ainda com pouca significância. Dessa forma, apesar de estarmos na segunda fase, essa atitude implicaria no aparecimento de novas mortalidades infantis.

Não resta dúvida que a MPd deve ser empregada em todas as três fases, e, como mostrado acima, mesmo para Navios velhos, pode trazer benefícios em termos de disponibilidade, confiabilidade e manutenibilidade.

7 CONCLUSÃO

A expressão latina *mānus tenēre* derivou a palavra *manutenēre* no latim medieval que significa “manter o que se tem em mãos”. A MB para manter e preservar “o que se tem em mãos” atendendo aos objetivos da Força, deverá gerenciar o ciclo de vida dos seus ativos considerados como sistema de defesa. A manutenção preditiva é uma ferramenta basilar para esse propósito.

A manutenção deve ser entendida como uma atividade crucial que impacta fortemente a gestão do ciclo de vida dos Sistemas de Defesa. Das seis fases: concepção, desenvolvimento, produção, operação, apoio e desfazimento; a manutenção se faz presente de maneira manifesta na fase de operação e apoio e de maneira menos evidente nas fases de concepção e desenvolvimento. Considera-se que ela também se faz presente no desfazimento de modo a garantir segurança mínima do ativo, das pessoas e do meio ambiente até que ele tenha a destinação adequada.

Nas fases de concepção, a engenharia deve desenvolver modelos que permitam estabelecer requisitos que facilitem a manutenibilidade. Na fase de desenvolvimento o projetista não pode deixar de conferir ao sistema ou ao item condições de ser bem operado e bem mantido de tal forma que a política de manutenção seja capaz de entregar à MB meios com alta disponibilidade associada à confiabilidade e com ótima manutenibilidade.

Na fase de operação e apoio, a política de manutenção deverá ter a capacidade de garantir a efetividade operacional a um custo aceitável, ou seja, os recursos gastos com a manutenção não devem ser elevados de tal forma que torne o reparo inviável economicamente.

Abster de empregar a manutenção preditiva em conjunto com as manutenções corretiva e preventiva é abnegar de boas práticas de gerenciamento do ciclo de vida de qualquer sistema de defesa e acenar com cenários desfavoráveis na preservação dos meios, sejam aqueles que estão em operação ou os novos em aquisição, como as Fragatas Classe Tamandaré, apesar do Consórcio Águas Azuis²⁹ ainda não ter proposto o tipo de manutenção, há a expectativa de que a Thyssen desenvolva um sistema baseado na MPd.

Em que pese, no âmbito da MB, existirem publicações que fazem menção à MPd, ela não foi efetivamente empregada ou quando aplicada teve modesta participação em relação

²⁹ Consórcio Águas Azuis é uma sociedade de propósito específico estabelecida entre a thyssenkrupp Marine Systems, a Embraer Defesa & Segurança e a Atech, subsidiária da Embraer, para a construção das quatro novas Fragatas Classe Tamandaré.

ao total das ações preventivas, corretivas ou detectivas. Das classes de Navios analisadas, FCN, CCI, Corveta Barroso e FCG, esta última é que tem o maior percentual de MPd, mas com apenas 9,9% do total das rotinas, contra 6% das FCN, 5,7% das CCI e 5,3% da Corveta Barroso. Esses percentuais caracterizam um contrassenso, pois classes mais novas apresentam escopo de rotinas preditivas menores que as Classes mais antigas, indo de encontro a uma tendência da evolução mundial da manutenção.

A manutenção vigente na MB é a preventiva e a corretiva, sendo inexpressivas as MDe e MPd.

Dos dois tipos de manutenção corretiva predomina na MB a corretiva emergencial, não obstante ter que ser empregada, já que a política de manutenção é ineficaz de modo proporcionar uma intervenção corretiva planejada, advém dessa política diversos contratempos como imprevisibilidade do tempo de reparo, compra de sobressalentes em caráter de urgência e danos auxiliares em componentes ou itens interligados, além do aumento da indisponibilidade do Meio.

A manutenção preventiva é a que apresenta o maior percentual no SMP, mas é pouco eficaz na fase de operação dos equipamentos, em que a ocorrência de falha é aleatória, advém dessa política maiores gastos com sobressalentes, insumos e itens de reposição, além de maior tempo de indisponibilidade forçada para as inspeções e revisões.

A manutenção detectiva, empregada na MB, com percentuais maiores que MPd, mas ainda menores que MPr, como pode ser visto na tabela 5, tem por objetivo descobrir falhas que ocorreram, mas imperceptíveis para o sentido humano. São falhas consideradas funcionais que se caracterizam pelo decaimento do desempenho do item que não deve ser tolerado, e dessa forma, necessita de intervenção corretiva planejada ou emergencial.

A manutenção centrada na confiabilidade deve ser um dos objetivos de uma nova política de manutenção da MB, entretanto ela não poderá ser implementada se a MPd não estiver consolidada. A MCC tem grande influência na gestão do ciclo de vida de qualquer sistema de defesa. Diferente de concepção clássica de manutenção, ela foca na função contextualizada de um item dentro de um sistema ou um componente dentro de equipamento. Um grupo de estudo criado nos Estados Unidos da América chegou à conclusão de que a confiabilidade nem sempre estaria vinculada ao tempo de utilização ou horas de funcionamento, ou seja, as rotinas preventivas seriam ineficazes para esses casos. Dessa forma, falhas que tem características aleatórias são encontradas pela MPd.

A manutenção entendida como gestão necessita de indicadores que possa medir e parametrizar características, comportamentos e tendências das falhas. Nesta tese foram

abordados cinco deles que este autor considerou mais relevantes para a MB: tempo médio entre falhas (MTBF), tempo médio entre reparos (MTTR), disponibilidade, confiabilidade e manutenibilidade.

A MPd melhora o MTBF, pois com ações preditivas indica sintomas anormais de desempenho que adverte a equipe de manutenção que uma intervenção preventiva ou corretiva planejada deve ser executada antes que uma falha funcional ocorra. Nesse sentido há uma redução do tempo de parada para uma manutenção corretiva emergencial, resultando no aumento do MTBF.

Quando um item necessita de ser reparado, o tempo gasto para o restabelecimento impacta diretamente na disponibilidade. O MTTR representa o tempo médio para que o item, ao sofrer reparo, volte a ter um desempenho esperado. Evidente que o adestramento da equipe de manutenção influencia o MTTR, e por conseguinte a manutenibilidade. Diferente do MTBF, quanto menor esse índice, melhor será para a organização. Pode ser utilizado como um indicador global de desempenho além da utilização em equipamentos e sistemas.

A MPd melhora esse indicador pela descoberta de falhas em sua origem, que ainda não caracterizam queda de desempenho que não pode ser tolerado ou sintomas sutis. Dessa forma, as intervenções tendem a ser mais simples para a correção demandando menos tempo.

Disponibilidade é a grande aspiração da MB. Ela pode ser entendida como o tempo que um ativo está pronto para exercer sua função dentro de um intervalo de tempo ou num instante qualquer. Divide-se em inerente, operacional e técnica, todas elas em função de tempo de parada para algum tipo intervenção, seja preventiva ou corretiva. A disponibilidade operacional é que deve ser considerada na MB, pois tempo de espera de sobressalentes e outras atividades não ligadas ao reparo propriamente dito influencia o resultado.

A MPd melhora a disponibilidade pois, como mostrado anteriormente, os MTBF e MTTR melhoram com uma política preditiva

Pouco adianta para a MB alta disponibilidade com baixa confiabilidade, ou seja, quando ativo inicia a operação deve ser levado em conta a probabilidade de falha durante um período futuro de operação, logo o que se deseja é que esse indicador seja o maior possível. Como a confiabilidade é função da taxa de falha, a MPd aumenta a confiabilidade pelo aumento do MTBF que resulta na redução da taxa de falha.

A MPd melhora a manutenibilidade pelo fato de ser capaz de descobrir falhas ainda na origem, facilitando e tornado mais simples as correções e, de mesma forma, melhora a atuação preventiva ao ser capaz de alterar o planejamento das rotinas, ou seja, poderá indicar a necessidade de antecipar ou atrasar intervenções preventivas.

O Gráfico PF é um instrumento essencial para que seja definida uma política de manutenção, nesse gráfico devem ser observados o ponto P, modo de falha, o ponto F, falha funcional e o intervalo de tempo compreendido entre esses dois pontos, denominado intervalo PF. A curva do gráfico indica o comportamento do desempenho de um ativo ao longo do tempo. No início de funcionamento a MPd deve ser priorizada, ela é capaz de apontar sintomas que podem, futuramente, causar uma falha funcional e, em conjunto com a MPr, estabelecer rotinas novas preventivas ou evitar aquelas desnecessárias, trazendo como consequência melhorias nos indicadores, como explicado anteriormente.

Uma política eficaz de manutenção resulta num aumento do intervalo PF, isto é, descobrir o mais cedo possível uma falha potencial e atrasar o quanto possível a ocorrência de uma falha funcional. Se não houver atuação preditiva, as manutenções preventivas e corretivas não serão capazes de encontrar uma falha potencial e, dessa forma, os problemas decorrentes desse sintoma anormal aparecerá mais cedo. Isso significa menos tempo para planejamento de correção, maior pressão na equipe de manutenção e maiores gastos com reparo devido ao agravamento da consequência de falha.

Ao analisar as curvas da banheira e suas derivações observa-se que a MPd pode ser aplicada nas três fases: mortalidade infantil, na maturidade e mortalidade senil. Terá pouca influência na mortalidade infantil, mas muito significativa nas outras duas fases, principalmente na fase de maturidade, período que corresponde ao maior tempo de operação. Nessa fase, as falhas ocorrem aleatoriamente e, portanto, a MPd é mais efetiva. Ou seja, no maior tempo de operação de um ativo, a MPd poderá contribuir para a redução da taxa de falhas, advindo desse fato o aumento da confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade.

Mostramos que a MPd traz incontestáveis benefícios na melhoria dos índices de manutenção. Mas os custos de implantação seriam compensadores? Para responder essa questão devemos considerar que a MPr e MC sempre existirão, o cerne da questão é saber quando e em quais ativos cada tipo de manutenção será empregado. A MPd por ter um custo inicial mais alto, caberá ao setor de manutenção responder ao questionamento acima, a para tanto deverá utilizar a análise FMEA em que, por meio do RPN, vai considerar os ativos em termo das funções que exercem e as consequências de suas falhas. Deverá ser encontrado um ponto ótimo para a convivência em harmonia dos três tipos de manutenção

Buscar uma meta audaciosa de disponibilidade abstendo-se da MPd significa aumentar os custos de tal forma que poderá inviabilizar economicamente os gastos com manutenção. A MPd devido aos benefícios já descritos resulta em menor gasto com mão de obra, peças de reposição e sobressalentes e, partindo do pressuposto de que os recursos

destinados para a manutenção esbarram em um teto, com a manutenção preditiva melhores índices de disponibilidade são alcançados.

Cabe destacar que a partir da década de quarenta do século passado, a manutenção evoluiu em quatro gerações. A Marinha do Brasil encontra-se estacionada na segunda geração que corresponde, nos dias atuais, a um atraso de cerca de 30 anos. Na aquisição dos novos meios, como os Submarinos e Fragatas Classe Tamandaré, a política de manutenção adotada deverá estar focada na gestão do ciclo de vida, e como vimos, a MCC é a mais indicada para que esta política seja eficaz. A MB deveria estar na atualidade com a MPd em pleno emprego, pois a análise preditiva é a base da manutenção centrada na confiabilidade. Nesse sentido é urgente a definição de uma nova política de manutenção que adote condutas preditivas fins não causar impacto na gestão do ciclo de vida dos novos meios em aquisição.

Conclui-se que a aplicabilidade da manutenção preditiva na Marinha do Brasil é uma forma viável para aumentar a confiabilidade e disponibilidade com uma adequada relação custo-benefício, sendo uma solução adequada para os Navios em operação e para as novas aquisições.

REFERÊNCIAS

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

BARAN, L. R. *Manutenção centrada em confiabilidade aplicada na redução das falhas*. 2011. 103f. Monografia (Especialização em Gestão Industrial) - Universidade de Tecnologia Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2011. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/1450/3/PG_CEGIPM_VII_2011_12.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2020.

BARBOZA, T. L. A logística de manutenção na MB e a influência da filosofia de manutenção de outras marinhas no seu desenvolvimento. In: *Revista Marítima Brasileira*: Rio de Janeiro, v. 124, n. 4/6, p. 107-131, abr./jun. 2004.

BONANOMI, R. C.; SILVA, W. V da. CORSO, J. M. D.; DUCLÓS, L. C. Aplicação da teoria Grey e FMEA – Análise dos modos de falha e efeitos na priorização de riscos de projeto de desenvolvimento de software produto. In: *Revista Gestão Industrial*, Ponta Grossa, v. 06, n. 04, p. 70-92, 2010.

BRASIL. Ministério da Defesa. *Manual de boas práticas para a gestão do ciclo de vida de Sistemas de Defesa* - MD40-M-01. Brasília, 2019.

_____. *Lei nº 12.598 de 21 de março de 2012* - Estabelece normas especiais para as compras, as contratações e o desenvolvimento de produtos e de sistemas de defesa: dispõe sobre regras de incentivo à área estratégica de defesa. Brasília: Imprensa Oficial, 2012.

_____. Estado-Maior da Armada. *Manual de Logística da Marinha*. EMA-400. Brasília, 2003.

_____. Estado-Maior da Armada. *Normas para Logística de Material*. EMA-420. Brasília, 2002.

CAMBRA, A.C. *Manutenção centrada na confiabilidade: Uma proposta de aprimoramento da manutenção dos meios navais da Marinha do Brasil*. Tese, Rio de Janeiro: Escola de Guerra Naval, 2016.

CAPETTI, R. B. Aprimoramento da gerência de manutenção na Marinha Brasileira. In: *Revista Marítima Brasileira*, Rio de Janeiro, v. 125, n.07/09, p. 49-83, jul./set. 2005.

CAVALCANTE, C. A. V.; ALMEIDA, A. T. Modelo multicritério de apoio a decisão para o planejamento de manutenção preventiva utilizando PROMETHEE II em situações de incerteza. In: *Revista Pesquisa Operacional*, v. 25, n. 2, p. 279-296, 2005.

CONGRESSO BRASILEIRO DE MANUTENÇÃO E GESTÃO DE ATIVOS, 28., 2013, Salvador. *Documento Nacional 2013: a situação da manutenção no Brasil*. Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos - ABRAMAN, 2013.

CUNHA, A. G. *Dicionário etimológico Nova Fronteira*. 3. ed., 2. Reimpressão. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 2007.

FRANÇA, J. L.; VASCONCELLOS, A. C. *Manual para normalização de publicações técnico-científicas*. 8.ed. ver. e ampl. por Júnia L. França e Ana C. de Vasconcellos. Belo Horizonte: UFMG, 2007.

JUNIOR J. J. M.G., RIBEIRO M. V. & FRANCO B. C. *Custo de manutenção de ativos numa óptica operacional e estratégica no ambiente industrial*, XII SEGET (Simpósio De Excelência Em Gestão E Tecnologia), 2015.

KARDEC, A. Gestão estratégica de ativos físicos. In: *Seminário Amazonense de Manutenção*, 2012, Manaus: Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos - ABRAMAN, 2013.

KARDEC, A.; NASCIF, J. A. *Manutenção preditiva. Fator de sucesso na gestão empresarial*. 1. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora, 2013.

_____. *Manutenção: Função estratégica*. 4 ed. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora, 2010.

LAFRAIA, J. R. B. *Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade*. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

LEAL, F.; PINHO, A. F.; ALMEIDA, D. A. *Análise de falhas através da aplicação do FMEA e da teoria Grey*. XXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção - Porto Alegre, RS. out. - nov. 2005.

MENDES, A. A. *Manutenção Centrada em Confiabilidade: uma abordagem quantitativa*. 2011. 85f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

MIRSHAWKA, V. & OLMEDO, N.C. *Manutenção – combate aos custos na não-eficácia – a vez do Brasil*. São Paulo: Editora McGraw-Hill Ltda., 1993.

MONCHY, F. *A Função Manutenção*. São Paulo: Durban, 1987.

MOUBRAY, J. *RCM II: reliability centered maintenance*. 2. ed. New York: Industrial Press Inc, 1997. 423 p.

MURTY, A.S.R. & NAIKAN, V.N.A. Availability and maintenance cost optimization of a production plant. In: *International Journal of Quality & Reliability Management*, Cambridge, 12 (2): 28-35, 1995.

NEPOMUCENO, L. X. *Técnicas de manutenção preditiva*. Vol. 1. São Paulo: Editora Blucher, 2014.

PUENTE, J. et al. A decision support system for applying failure mode and effects analysis. In: *International Journal of Quality & Reliability Management*. v. 19, n 2, 2002, p. 137-150.

QUEIROZ, A. R. S. *Estratégia de manutenção de equipamentos elétricos em unidades offshore de produção de petróleo e gás baseada na filosofia de operações integradas*. 2016. 204 p. Tese de Doutorado - Universidade de São Paulo, 2016.

REASON, J.; HOBBS, A. *Managing maintenance error - A practical guide*. 1 ed. New York, 2003.

SANTOS, A. C. R. *Aplicação da engenharia de confiabilidade no aprimoramento da manutenção de Meios Militares: um estudo de caso*. 2007. 176 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2007.

SELLITTO, M. A. Formulação estratégica da manutenção industrial com base na confiabilidade dos equipamentos. In: *Revista Produção*, v.15, p. 44-59, 2005.

SILVA, W. C. *Manutenção predial no Banco Central do Brasil*. Monografia, Brasília: Faculdade de Estudos Sociais Aplicados. Universidade de Brasília, 2006.

STAMATIS, D.H. *Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from theory to execution*. Milwaukee, Wisconsin: ASQ Quality Press, second edition, 2003.

TAVARES, L.A. *Manutenção centrada no negócio*. 1ª edição. Rio de Janeiro: NAT, 2005.164p.

WUTTKE, R. A.; SELLITTO, M. Cálculo da disponibilidade e da posição na curva da banheira de uma válvula de processo petroquímico. In: *Revista Produção On-line*. ABEPRO/UFSC. v. 8, n. 4, 23p., 2008.

XAVIER, F. J. C. *Manutenção como atividade de gestão e estratégia: um estudo na empresa alfa do polo industrial de Manaus*. 2015. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará.