

LUCIANO CONFORT QUINTELLA

**APLICAÇÃO DA MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE (RCM)
NA OTIMIZAÇÃO DO PROGRAMA DE MANUTENÇÃO DE
CENTRAIS TERMONUCLEARES.**

LUCIANO CONFORT QUINTELLA

APLICAÇÃO DA MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE (RCM)
NA OTIMIZAÇÃO DO PROGRAMA DE MANUTENÇÃO DE
CENTRAIS TERMONUCLEARES.

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia do Campus de Guaratinguetá,
Universidade Estadual Paulista, para a
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Mecânica na área de Gestão e Otimização.

Orientador: Prof. Dr. Agnelo Marotta Cassula

Guaratinguetá - SP

2016

FICHA CATALOGRÁFICA

Q7a	Quintella, Luciano Confort Aplicação da manutenção centrada em confiabilidade (RCM) na otimização do programa de manutenção de centrais termonucleares / Luciano Confort Quintella – Guaratinguetá, 2016. 157 f : il. Bibliografia: f. 133-137 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016. Orientador: Prof. Dr. Agnelo Marota Cassula 1. Manutenção produtiva total. 2. Confiabilidade (Engenharia). 3. Usinas nucleares I. Título CDU 658.581(043)
-----	---

unesp **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

LUCIANO CONFORT QUINTELLA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: GESTÃO E OTIMIZAÇÃO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. AGNELO MAROTTA CASSULA
UNESP/FEG


Profa. Dra. ELIANA VIEIRA CANETTIERI
UNESP/FEG


Prof. Dr. EDSON DA COSTA BORTONI
UNIFEI

Junho de 2016

DADOS CURRICULARES

LUCIANO CONFORT QUINTELLA

NASCIMENTO	03.01.1979 – BARRA DO PIRAÍ / RJ
FILIAÇÃO	Antônio Carlos Prudente Quintela Célia Gomes Confort
2001/2006	Curso de Graduação Engenharia Produção - Mecânica / UERJ – Campus Resende.

DEDICATÓRIA

À minha amada esposa Franceila Glenda de Oliveira Quintella, aos meus pais; Sr^a. Célia Gomes Confort, e Sr. Antônio Carlos Prudente Quintela. Também, aos meus Irmãos; Gelza Aparecida da Silva, Luiz Augusto Confort Quintella, Fernanda Confort Quintella e Ana Cecília Silveira Quintella. Por todo apoio, compreensão, dificuldades superadas, ensinamentos e amor a mim dedicados.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me permitir a concretização de mais esta etapa tão sonhada e tão importante para minha vida. A minha família e amigos por toda compreensão e ajuda, em especial aos Meus tios Luciano e Maria de Lourdes, por todo apoio hospitalidade que me deram durante todos estes anos de curso.

Ao professor Dr. Fernando Augusto Silva Marins por todos os ensinamentos, e-mails e apoio durante tantos anos que passei como aluno especial até chegar a aluno regular. E a todos os professores do programa de pós-graduação pelos valiosos conhecimentos transmitidos, amizade e paciência dispensada. À FEG e seus colaboradores.

Em especial, ao professor Dr. Agnelo Marotta Cassula, meu orientador, por todo conhecimento transmitido e, principalmente, por acreditar em mim e apostar comigo na concretização deste trabalho em prazo tão ambicioso.

Agradeço também a Eletronuclear por todo apoio a este trabalho e, em especial, ao Sr. Sérgio Alexandre O. Martin, a Sra. Valéria Simões de Marco, ao Sr. Walber Zanotti Vieira e ao Sr. Gedeon de Almeida Fernandes por tornar possível a concretização desta etapa tão importante para mim.

A todos, meu Muito Obrigado!

EPÍGRAFE

“Cada pessoa deve trabalhar para o seu aperfeiçoamento e, ao mesmo tempo, participar da responsabilidade coletiva por toda a humanidade. ”
(Marie Curie, 1903, Nobel em Física).

RESUMO

A função manutenção vem sendo considerada como fator estratégico para as empresas, pois através do alinhamento de suas políticas corporativas e integração de seus programas de gestão de ativos, de riscos e de ciclo de vida de suas unidades de negócios, as empresas vêm buscando a constante redução de custos e a melhoria de seus resultados operacionais. E, assim, obtendo maior competitividade. A Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM) é um método já bem disseminado por todo o mundo e que, ao longo dos anos, vem promovendo estes diferenciais estratégicos através de preceitos que possibilitam a elaboração de Programas de Manutenção Preventiva de custo-eficaz, através de um método para a definição de políticas de manutenção mais adequadas, com o foco na manutenção da função dos ativos em seu contexto operacional.

Ao longo dos anos, o método RCM vem sendo aplicado em inúmeros estudos de casos em diferentes empresas de diversos seguimentos, onde podem ser observadas novas adaptações ou simplificações do método RCM clássico. Estas adaptações buscam uma maior adequação as particularidades destas empresas e/ou um retorno mais rápido de resultados. O setor nuclear de geração de energia foi um dos pioneiros na adoção e disseminação do RCM, e vem desenvolvendo processos simplificados de aplicação do RCM, como o “*Streamlined RCM*” e o “método PMO” (Otimização do Programa de Manutenção, do inglês: *Preventive Maintenance Optimization*). Estes estudos mostram que o método PMO apresenta uma maior flexibilidade, o que permite a adoção de diferentes estratégias de aplicação que, por sua vez, têm trazido resultados expressivos para as empresas, através da otimização dos Programas de Manutenção já existentes.

Com base na literatura, neste trabalho são abordadas questões referentes ao RCM e sua contextualização na área nuclear, estudos sobre os métodos simplificados do RCM e o desenvolvimento do método PMO. Por fim, é realizada uma aplicação prática do método PMO sobre os sistemas relacionados e subsistemas do Sistema de Remoção de Calor Residual (JN), mais especificamente, sobre as Bombas de injeção de segurança do Sistema de Injeção de Alta Pressão (JND) da Usina Nuclear Angra 2. Através dos resultados obtidos com esta aplicação, pretende-se otimizar o Programa de Manutenção da Planta (PMP) referente a estes equipamentos e, assim, validar o método PMO como ferramenta para a melhoria contínua do Programa de Gestão de Ativos e Ciclo de Vida da Usina Nuclear Angra 2.

PALAVRAS-CHAVE: Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM). Otimização do Programa de Manutenção (PMO). Usina Nuclear Angra 2. Gestão de Ativos e Ciclo de Vida da Planta.

ABSTRACT

Corporations tend to consider maintenance work a strategic element. It is through maintenance—especially the alignment between corporate policies and integration of their programs to manage assets, risks, and life cycles of business units—that corporations try to continuously improve their results, reduce their operational costs, and, therefore, increase their competitiveness. *Reliability Centered Maintenance* (RCM) is a popular method across the world; it has been promoting competitiveness through concepts that allow the design of cost-effective *Preventive Maintenance Programs*. These programs are effective because they entail appropriate maintenance policies that are focused on the preservation of the assets functions in their operational context and on the formation of technical knowledge basis supported by hard data.

Throughout the years, RCM has been applied in numerous case studies and in different companies engaged in a variety of market segments. Such diversity in the application of RCM allowed us to observe new adaptations and variations of the classic method. Such adaptations aim to better respond to specific operational contexts in and within production units, as well as achieve faster results. The nuclear power sector has pioneered regarding the adoption and dissemination of RCM; it has been developing simplified versions of RCM, such as the “Streamlined RCM” and the PMO (Preventive Maintenance Optimization). These studies demonstrate that the PMO presents enhanced flexibility, which allows the adoption of different strategies; such enhanced flexibility brings expressive results to corporations as pre-existing maintenance programs are optimized.

Based on the currently available literature, this dissertation addresses numerous questions regarding RCM and its application to nuclear power segments. It also addresses studies about simplified versions of RCM and the development of the PMO method. The discussion is supplemented with a practical application of the PMO method regarding auxiliary systems and sub-systems of *Removal of Residual Heat System* (JN), especially those regarding the security injection pumps of the *High Pressure Injection System* (JND) at Angra II Nuclear Plant. Through the results obtained from this application, it is possible to optimize the *Maintenance Program* of these equipments, and therefore, validate the PMO method as a tool of continuous improvement of the *Assets and Life Cycle Program* of Angra II.

KEYWORDS: Reliability Centered Maintenance (RCM). Preventive Maintenance Optimization (PMO). Angra 2 Nuclear Power Plant (NPP). Asset Management and Plant Lifecycle.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - A evolução da manutenção.....	8
Figura 2 - “Curva da banheira” para equipamentos eletrônicos.....	16
Figura 3 - Novos perfis das taxas de falha	18
Figura 4 - Processo RCM resumido	29
Figura 5 - Árvore Lógica de Decisão (LTA) para seleção de tarefas	30
Figura 6 - <i>Software</i> PMBD® para acesso aos Modelos Padrões do EPRI.....	33
Figura 7 - Complexo CNAAA, Usinas Angra 1, Angra 2 e Angra 3.....	34
Figura 8 - CNAAA – Usinas Angra 2 e Angra 1	35
Figura 9 - Reator à água pressurizada tipo PWR	36
Figura 10 - Programa de Manutenção de Angra 2	40
Figura 11 - <i>Software</i> IBM MAXIMO®	44
Figura 12 - Telas de cadastro dos PTs e PMs no MAXIMO®	45
Figura 13 - Prioridades das SOTs	47
Figura 14 - Gerenciamento do PMEM.....	51
Figura 15 - Planejamento e Controle de Trabalho	54
Figura 16 - Estrutura de trabalhos do PMEM	54
Figura 17 - Fluxograma de aplicação de projeto PMO	58
Figura 18 - Categorização dos Efeitos de Falha (FEC).....	77
Figura 19 - Árvore Lógica de Decisão (LTA).....	84
Figura 20 - Bomba de Injeção de Segurança.....	101
Figura 21 - Corte longitudinal da Bomba de Injeção de Segurança.....	107
Figura 22 - Análise preditiva de vibração Bomba 10.....	109
Figura 23 - Análise preditiva de vibração Bomba 20.....	109
Figura 24 - Análise preditiva de vibração Bomba 30.....	110
Figura 25 - Análise preditiva de vibração Bomba 40.....	110
Figura 26 - Curvas de degradação pós manutenção	117
Figura 27 - Taxas de Indisponibilidade das Bombas do JND	127

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - Variações do Método RCM Clássico.....	23
Quadro 2 - Estratégia PMO sobre equipamento específico	28
Quadro 3 - Típicos objetivos e metas de projetos PMO	62
Quadro 4 - Desdobramento de tarefas do PMP existente na Planilha de Trabalho	67
Quadro 5 - Funções de interesse do ESC	71
Quadro 6 - Análise de Modo de Falhas.....	72
Quadro 7 - Racionalização de tarefas.....	74
Quadro 8 - Análise dos efeitos de falhas.....	75
Quadro 9 - Classificação funcional EPRI	78
Quadro 10 - Análise de Criticidade na Planilha de Trabalho.....	80
Quadro 11 – Definição de tarefas na Planilha de Trabalho.....	89
Quadro 12 - Comparação de tarefas de manutenção.....	94
Quadro 13 - Desdobramento do PMP das bombas do JND	104
Quadro 14 - Principais ocorrências nas bombas	108
Quadro 15 - Análise FMECA nas bombas do sistema JND	112
Quadro 16 - Base de Dados EPRI sobre bomba horizontal	118
Quadro 17 - Seleção e comparação de tarefas de manutenção	121
Quadro 18 - Comparativo entre números de ocorrências.....	125

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AOI	Autorização de Operação Inicial
APS	Análise Probabilística de Segurança
CFS	Critério de Falha Simples
CNAAA	Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CROU	Comissão de Revisão da Operação da Usina
DFMEA	Análise dos Modos de Falha e Efeitos devido ao projeto, do inglês: <i>Design Failure Modes and Effects Analysis</i>
ECM	Manutenção Centrada na Experiência, do inglês: <i>Experience-Centered Maintenance</i>
EOP	Procedimentos de Operação de Emergência, do inglês: <i>Emergency Operating Procedures</i>
EPRI	Instituto de Pesquisas em Energia Elétrica, do inglês: <i>Electric Power Research Institute</i>
ESC	Estrutura, Sistema ou Componente
FAL	Sistema de Purificação da piscina de Elementos Combustíveis
FAT	Árvore de Análise de Falhas, do inglês: <i>Fault Tree Analysis</i>
FEC	Categorização do Efeito de Falha, do inglês: <i>Failure Effect Categorization</i>
FF	Falha Funcional
FMEA	Análise dos Modos de Falha e Efeitos, do inglês: <i>Failure Modes and Effects Analysis</i>
FMECA	Análise dos Modos de Falha, Efeitos e Criticidades, do inglês: <i>Failure mode, effects, and criticality analysis</i>
GDD.O	Engenharia de Desempenho de Sistemas e Reator
GMI.O	Gerência de Manutenção Integrada da Usina
IAEA	Agência Internacional de Energia Atômica, do inglês: <i>International Atomic Energy Agency</i>
INPO	Instituto de Operações em Energia Nuclear, do inglês: <i>Institute of Nuclear Power Operations</i>
IRCMAS	Sistema de Análise Inteligente do RCM, do inglês: <i>Artificial RCM Intelligence System</i>
JN	Sistema de Remoção de Calor Residual
JND	Sistema de Injeção de Alta Pressão
JR	Sistema de Proteção do Reator

JS	Sistema de Controle do Reator
JT	Sistema de Limitação do Reator
LCM	Gerenciamento do Ciclo de Vida, do inglês: <i>Life Cycle Management</i>
LT	Licença de Trabalho
LTA	Árvore Lógica de Decisão, do inglês: <i>Logic Tree Analysis</i>
MOU	Manual de Operação da Usina Angra 2
MOV	Válvulas Moto-Operadas, do inglês: <i>Motor Operated Valves</i>
NPP	Usina Nuclear, do inglês: <i>Nuclear Power Plant</i>
PMBD	Base de Dados de Planos de Manutenção, do inglês: <i>Preventive Maintenance Basis Database</i>
PMEM	Programa de Monitoramento da Eficácia da Manutenção
PMO	Otimização do Programa de Manutenção, do inglês: <i>Preventive Maintenance Optimization</i>
PMP	Programa de Manutenção da Planta
PST	Programação Semanal de Trabalho
PT	Plano de Trabalho
PWR	Reator de Água Pressurizada, do inglês: <i>Pressurized Water Reactor</i>
RCM	Manutenção Centrada em Confiabilidade, do inglês: <i>Reability Centered Maintenance</i>
RM	Manutenção Radical, do inglês: <i>Radical Maintenance</i>
RRCM	Manutenção Centrada na Confiabilidade e Risco, do inglês: <i>Reliability and Risk Centered Maintenance</i>
SOT	Solicitação de Ordem de Trabalho
WANO	Associação Mundial de Operadores Nucleares, do inglês: <i>World Association of Nuclear Operators</i>

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1	NATUREZA DO PROBLEMA	2
1.2	OBJETIVOS.....	4
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	5
2.	REVISÃO DA LITERATURA.....	6
2.1	A EVOLUÇÃO DA MANUTENÇÃO AO RCM	8
2.2	O RCM E SUA CONTEXTUALIZAÇÃO NA ÁREA NUCLEAR	12
2.3	OS PRECEITOS DO RCM.....	15
2.3.1	<i>Mecanismo de degradação da função</i>	16
2.3.2	<i>As sete questões básicas do processo RCM</i>	19
2.4	O RCM SIMPLIFICADO.....	22
2.5	A OTIMIZAÇÃO DO PROGRAMA DE MANUTENÇÃO (PMO)	27
3.	A EMPRESA ELETROBRAS ELETRONUCLEAR	34
3.1	A USINA NUCLEAR ANGRA 2	35
3.1.1	<i>Funcionamento básico da Usina Angra 2</i>	36
3.1.2	<i>Controle e segurança de um reator PWR</i>	37
3.1.3	<i>Considerações determinísticas de segurança</i>	39
3.2	O PROGRAMA DE MANUTENÇÃO DE ANGRA 2	40
3.2.1	<i>Manutenção Preventiva</i>	40
3.2.2	<i>Manutenção Preditiva</i>	42
3.2.3	<i>Manutenção Corretiva</i>	43
3.2.4	<i>Sistema de Gerenciamento da Manutenção (Software MAXIMO®)</i>	44
3.2.5	<i>Programação Semanal de Trabalho (PST)</i>	46
3.3	O PROGRAMA DE MONITORAÇÃO DA EFICÁCIA DA MANUTENÇÃO (PMEM).....	49
3.3.1	<i>Os objetivos do PMEM</i>	50
3.3.2	<i>Estrutura de gerenciamento das atividades do PMEM</i>	51
3.3.3	<i>Interfaces do PMEM</i>	53
3.3.4	<i>Estrutura de trabalhos do PMEM</i>	54
4.	MÉTODO DE IMPLANTAÇÃO DO PMO	56
4.1	DEFINIÇÕES DO PROJETO PMO	61
4.1.1	<i>Objetivos e metas do projeto</i>	61
4.1.2	<i>Estratégia e cronograma de implantação</i>	63
4.1.3	<i>Qualidade nos trabalhos de implantação</i>	63
4.1.4	<i>Comprometimento e apoio da direção</i>	64

4.1.5	<i>Organização, papéis e responsabilidades</i>	65
4.2	DESDOBRAMENTO DO PMP ATUAL	66
4.3	COLETA DE DADOS	68
4.4	ANÁLISE DE CRITICIDADE	69
4.4.1	<i>Análise funcional</i>	70
4.4.2	<i>Análise dos modos de falha</i>	71
4.4.3	<i>Racionalização de tarefas</i>	73
4.4.4	<i>Avaliação dos efeitos de falha e criticidades</i>	75
4.5	DEFINIR ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO PARA ESCS “CRÍTICOS”	81
4.5.1	<i>Avaliação da Experiência operacional</i>	81
4.5.2	<i>Análise dos mecanismos de falha para Seleção de tarefas</i>	82
4.5.3	<i>Seleção de tarefas de manutenção</i>	83
4.5.4	<i>Hierarquia na seleção de tarefas de manutenção</i>	85
4.5.1	<i>Modelos Padrões de tarefas (EPRI)</i>	86
4.5.2	<i>Revisão das tarefas selecionadas</i>	87
4.6	DEFINIR ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO PARA ESCS “NÃO-CRÍTICOS”	91
4.7	COMPARAÇÃO DE TAREFAS DE MANUTENÇÃO	92
4.8	IMPLANTAR AS DECISÕES	95
4.9	PROGRAMA DE GESTÃO DE ATIVOS E CICLO DE VIDA	97
5.	APLICAÇÃO PMO NA USINA ANGRA 2	99
5.1	DEFINIÇÕES DO PROJETO DE APLICAÇÃO NA USINA ANGRA 2	99
5.1.1	<i>Seleção e delimitações de sistemas para aplicação PMO</i>	100
5.1.2	<i>Objetivos e metas do projeto de aplicação PMO</i>	101
5.1.3	<i>Estratégias do projeto PMO</i>	102
5.1.4	<i>Organização do projeto PMO</i>	103
5.2	DESDOBRANDO DO PMP EXISTENTE DAS BOMBAS DO JND	104
5.3	COLETA DE DADOS PARA O PROJETO PMO	106
5.3.1	<i>Descritivo técnico da bomba do sistema JND</i>	106
5.3.2	<i>Histórico de manutenção da bomba do sistema JND</i>	108
5.3.3	<i>Histórico de manutenção preditiva da bomba do sistema JND</i>	109
5.4	ANÁLISE DE CRITICIDADE DO SISTEMA DE REMOÇÃO DE CALOR RESIDUAL (JN)	111
5.4.1	<i>Análise funcional</i>	111
5.4.2	<i>Análise dos modos de falha, efeitos e criticidade (FMECA)</i>	112
5.5	DEFINIR ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO PARA O PMP	114
5.5.1	<i>Avaliação da experiência operacional</i>	114
5.5.2	<i>Análise dos mecanismos de falhas das bombas do sistema JND</i>	116
5.5.3	<i>Modelo Padrão do EPRI</i>	117
5.5.4	<i>Seleção, Revisão e Comparação de tarefas propostas</i>	120

5.6	IMPLANTAR DECISÕES NO PROGRAMA DE GESTÃO DE ATIVOS DA PLANTA.....	124
5.7	ANÁLISE DOS RESULTADOS DO PROJETO PMO APLICADO	125
5.7.1	<i>Resultados de Confiabilidade</i>	125
5.7.2	<i>Resultados de Indisponibilidade</i>	127
5.7.3	<i>Resultados econômicos diretos</i>	128
5.7.4	<i>Outros ganhos e resultados indiretos</i>	129
6.	CONCLUSÃO.....	130
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	133
	GLOSSÁRIO	138
	ANEXO A - EXEMPLO PARA PLANILHA DE TRABALHO PMO	140

1. Introdução

Hoje, em um mundo globalizado e cada vez mais competitivo, a manutenção tem sido vista como uma função estratégica para as empresas, pois para permanecer no mercado as empresas precisam cada vez mais aumentar sua produtividade com a contínua redução de custos e, ao mesmo tempo, atendendo a padrões de qualidade cada vez mais rigorosos. Neste cenário, a manutenção passa por um processo inverso: antes vista como uma função geradora de custos para então ser vista como uma função estratégica de mercado.

Esta mudança global se deve ao novo enfoque de que a melhoria na produtividade está diretamente ligada à confiabilidade e a disponibilidade dos ativos da empresa, bem como na redução de custos obtida através de uma aplicação otimizada da manutenção, baseada em fatos e dados de seus ativos, como máquinas e equipamentos, em seu contexto operacional. A melhoria na confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos também contribui diretamente para a qualidade dos produtos com a redução de retrabalhos, para a segurança das operações com a redução de riscos e, também, para o controle dos aspectos e impactos ambientais. Deste modo, fornecendo uma contribuição significativa para a competitividade das organizações.

Nesses termos, a Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM, do inglês: *Reability Centered Maintenance*) é um método que oferece uma estratégia para consolidação de um programa otimizado de manutenção, incorporando um novo entendimento quanto aos modos pelos quais os equipamentos falham em cumprir suas funções, formando uma base de ligação lógica entre as práticas de manutenção com as causas de falhas. O RCM visa preservar a integridade da função dos Equipamentos, Sistemas e Componentes (ESCs) através de uma análise estruturada de dados e informações referentes às práticas de manutenção, de modo a garantir maior confiabilidade e disponibilidade dos ESCs.

Na indústria nuclear de geração de energia, além das razões econômicas e competitivas, existem também razões regulamentares para a existência dos Programas de Manutenção em suas plantas, que hoje são reguladas por organismos nacionais e internacionais como, por exemplo, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA). E, portanto, para a manutenção de suas licenças de operação, as usinas são regularmente auditadas quanto ao cumprimento de normas que, entre outras, incluem sistemáticas para o gerenciamento de seus ativos, seus programas de manutenção e a melhoria contínua do ciclo de vida da planta e destes programas.

1.1 Natureza do problema

Ao longo dos anos, as empresas têm desenvolvido e ampliado cada vez mais o uso de novas tecnologias em seus processos que ficam cada vez mais automatizados, o que também traz novos problemas e desafios para a manutenção, pois a quantidade de tecnologia embarcada nos equipamentos e a diversidade de componentes cada vez mais eletrônicos tendem a favorecer o aumento da probabilidade de ocorrência de falhas e trazem também novos perfis de comportamento nos tempos esperados de falhas, ou seja, novos padrões das curvas de degradação dos ativos.

No início do desenvolvimento do RCM, por volta de 1978, o cenário industrial mostrava que a maioria dos departamentos de manutenção trabalhava de forma corretiva, onde o equipamento era reparado ou substituído apenas quando ocorresse uma falha. Aplicações de manutenção preventiva, onde se atua antes da ocorrência da falha (com intervalos de tempo pré-determinados), não era uma prática comumente utilizada pelas indústrias. A tecnologia disponível à época para manutenção preditiva (onde o momento de intervenção é determinado com base em dados medidos no monitoramento de parâmetros físicos do equipamento), não eram utilizadas nas instalações industriais, salvo raras exceções.

Tradicionalmente, o planejamento de manutenção utiliza a experiência profissional do pessoal envolvido e as instruções contidas nos manuais de fabricantes do equipamento para determinar o momento ou condição de substituição ou manutenção de componentes ou equipamentos. No entanto, a experiência pode ser limitada e as instruções contidas nos manuais dos fabricantes não são sempre calçadas em bases de dados reais, pois não consideram as condições específicas de operação ao qual o equipamento estará submetido. Também porque alguns fabricantes de equipamentos no âmbito comercial emitem recomendações de intervalos de substituição para maximizar as vendas de peças de reposição e/ou minimizar seu nível de responsabilidade. Deste modo, a coleta e análise de dados reais de confiabilidade são tarefas cruciais em instalações industriais (ALEBRANT MENDES; DUARTE RIBEIRO, 2014).

O RCM é um método que tem por característica manter o funcionamento do sistema através da identificação e priorização das funções do sistema, identificando os modos de falha e efeitos associados a estas funções, promovendo uma coleta e análise cuidadosa dos dados de manutenção dos ESCs relacionados a cada função em seu contexto operacional. Deste modo,

o RCM é um método que busca auxiliar a escolha da estratégia de manutenção mais eficiente para a mitigação ou eliminação dos modos de falha identificados e, nesta escolha, é considerada a relevância de cada modo de falha para as respectivas funções do equipamento afetadas. Assim, concentrando-se nas funções mais importantes e nos modos de falha mais relevantes, este método tem seu foco na redução de custos de manutenção, de modo que a capacidade operacional do equipamento seja obtida, restaurada ou mantida de forma econômica, eficiente e eficaz.

Apesar da ampla repercussão destes conceitos, a aplicação do RCM clássico, tal qual concebido originalmente, se mostrou um processo dispendioso e de longo prazo. E ao longo dos anos, na busca contínua pela otimização dos processos de manutenção, o método de aplicação do RCM vem sendo modificado ou simplificado, gerando outras interpretações similares como, por exemplo, o *Streamlined RCM* (RCM Simplificado) e a Otimização do Programa de Manutenção (PMO, do inglês: *Preventive Maintenance Optimization*). Estes métodos têm base no RCM clássico, porém visam trazer resultados mais imediatos priorizando os sistemas mais importantes e, assim, atender às diferentes demandas dos mais variados setores da indústria.

Na indústria nuclear de geração de energia, em se tratando de um setor com instalações de grande complexidade tecnológica e fortemente regulado por agências nacionais e internacionais, bem como auditado por associações de fomento e compartilhamento de boas práticas, vem sendo cada vez mais exigida a implantação de programas de gestão da manutenção, com um maior uso da manutenção baseada na condição e com a adoção de práticas de monitoramentos e controles da eficácia da manutenção das usinas.

Neste contexto, métodos mais otimizados do RCM como o PMO ganham popularidade neste setor em razão de sua maior adequação para otimização de programas de manutenção já existentes, em sistemas complexos com grandes equipamentos, numerosos componentes e instalações replicadas e redundantes como é o setor nuclear. Desta forma, com sua adoção, estes métodos simplificados vêm se mostrando viáveis e eficientes, reduzindo custos de manutenção e trazendo ganhos em termos de confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos e, por conseguinte, maior produtividade e segurança para as usinas (ALEBRANT MENDES et al., 2014; BERGMAN, 1999; DARRAGI et al., 2005; DEHGHANIAN et al., 2013; DESHPANDE et al., 2002b; DUARTE et al., 2013; ETI et al., 2006a; IAEA, 2008; IGBA et al., 2013; MÁRQUEZ et al., 2009; NOWLAN, F. S.; HEAP, 1978; MOUBRAY, 1997; YSSAAD et al., 2014).

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho consiste no estudo quanto ao desenvolvimento do método PMO na área nuclear e sua validação prática como ferramenta de análise e otimização do Programa de Manutenção da Planta (PMP)¹ da Usina Nuclear Angra 2. Com a implantação prática de um projeto PMO espera-se validar o método e obter ganhos de confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos, bem como ganhos com a redução de custos de manutenção resultantes desta aplicação.

Os objetivos específicos são:

- Realizar estudo na literatura quanto ao desenvolvimento do método RCM e sua contextualização no setor nuclear de geração de energia;
- Realizar estudo na literatura quanto às diversas variações e simplificações do método RCM e suas diferentes aplicações;
- Realizar estudo quanto ao método PMO, seu desenvolvimento com base nos preceitos do RCM e sua aplicação sobre os PMPs das usinas nucleares;
- Realizar uma aplicação prática do método PMO sobre as tarefas dos Planos de Manutenção (PM) das Bombas de Injeção de Segurança do Sistema de Injeção de Alta Pressão (JND) da Usina Nuclear Angra 2;
- Validação do método PMO, através da análise de resultados obtidos com esta aplicação em termos de confiabilidade, disponibilidade e redução de custos de manutenção.

¹ Neste trabalho é usada a abreviatura PMP para “Programa de Manutenção da Planta”. Entretanto, é comum na literatura o uso desta abreviatura para “Programa de Manutenção Preventiva”, ambos os casos se referem ao programa de tarefas de manutenção da planta, independente se são tarefas preventivas, preditivas, inspeção, testes periódicos. Apesar de comum, o termo “Programa de Manutenção Preventiva” não é adotado neste trabalho, uma vez que costuma gerar certa confusão, pois o Programa de Manutenção da Planta (PMP) não trata apenas de tarefas preventivas.

1.3 Organização do trabalho

No presente capítulo foi feita uma introdução ao tema do trabalho, sua relevância, delimitações, foram também apresentados os objetivos gerais e específicos a serem atingidos.

No segundo capítulo é realizada uma profunda revisão da literatura que aborda a evolução da manutenção ao longo do tempo até o surgimento dos conceitos do RCM e sua contextualização na área nuclear de geração de energia. Bem como, são abordados nesta pesquisa, os desdobramentos de otimização e simplificação que o RCM vem sofrendo nesses 30 anos. As fundamentações teóricas destes métodos simplificados de RCM são revisadas em maior profundidade neste capítulo, como por exemplo, o método PMO.

No terceiro capítulo é apresentada a Usina Nuclear Angra 2, seus conceitos básicos de funcionamento e segurança, seu Programa de Manutenção da Planta (PMP) e seu Programa de Gestão de Ativos pelo Programa de Monitoramento da Eficácia da Manutenção (PMEM).

No quarto capítulo é apresentado em maior profundidade o processo de aplicação do método PMO. Este processo foi delineado em etapas com base em diversas aplicações e guias pesquisados na literatura.

No quinto capítulo é apresentado o estudo de caso aplicado sobre o Sistema de Injeção de Alta Pressão (JND) e, seguindo o passo a passo definido pelo capítulo 4, o projeto PMO é aplicado nas Bombas de Injeção de Segurança do JND. Os resultados obtidos com a aplicação do método são analisados e discutidos.

No sexto e último capítulo, são feitas as considerações finais quantos aos objetivos alcançados e a conclusão do trabalho.

2. Revisão da literatura

A definição formal do RCM é: “Processo usado para determinar o que precisa ser feito para assegurar que qualquer ativo continue a atender as necessidades dos usuários, no seu contexto operacional atual”, e sua filosofia: “Não basta executar certo as tarefas de manutenção, é preciso executar certo as tarefas certas” (MOUBRAY, 1997).

Nesta pesquisa quanto ao “estado da arte”, é possível observar que o tema RCM já está bastante difundido tanto no meio científico quanto nos mais variados ramos da indústria, seja nos seguimentos da aviação, indústria militar, termonuclear, geração e transmissão de energia em geral, transporte ferroviário, indústria automotiva e autopeças, entre outros. Já foi extensivamente estudado e aplicado em estudos de casos que exploraram as mais variadas possibilidades de aplicação dos seus princípios.

Entretanto, o RCM é um tema ainda muito atual, pois novos trabalhos são publicados diariamente e aplicados nas empresas por todo o mundo. É, ainda, um forte diferencial estratégico para a função manutenção dentro das empresas. Por ser um método que traz ganhos econômicos, sejam eles através da redução de custos de manutenção ou através de ganhos de produtividade, disponibilidade e confiabilidade dos ativos. Deste modo, o RCM ainda é atual por trazer vantagem competitiva real para as empresas.

Bergman (1999) reitera que depois de implantado, o RCM é uma prática econômica, eficaz e eficiente de manutenção. É econômica, pois busca atingir uma melhor relação custo-benefício nas tarefas de manutenção. É eficaz, pois as tarefas de manutenção devem atuar na causa raiz das falhas funcionais previamente identificadas. E, é eficiente, pois a execução das tarefas de manutenção deve ser possível com o mínimo esforço e, também, eliminando esforços desnecessários.

Embora estudos de casos publicados sobre o RCM sejam praticamente unânicos em sugerir que a sua adoção traz grandes benefícios, seu processo de implantação na prática é muito dispendioso, exigindo grande alocação de recursos em horas de trabalho qualificado e por longos períodos de tempo. Também exige uma grande sinergia entre diferentes departamentos da empresa, principalmente as áreas de manutenção e operação, em níveis técnicos e de engenharia. E, assim como qualquer sistema de gestão, também exige um forte envolvimento e apoio das gerências e da alta direção da empresa, de modo a sedimentar a introdução de seus novos conceitos e de modo a mitigar ou prevenir possíveis embates culturais que normalmente surgem dentro das organizações. Desta forma, contribuindo para

adequar o RCM ao contexto operacional e estratégico da empresa (MKANDAWIRE; IJUMBA; SAHA, 2015).

Para Bowler (1995), embora os defensores do RCM reconheçam que sua adoção possa envolver despesas consideráveis, a decisão por sua implantação não tem sido tomada como uma decisão de investimento para os quais uma contrapartida financeira é previamente calculada. É adotada como uma decisão de investimento por si só, em suas palavras, é visto mais como um “ato de fé” de que trará resultados positivos. Deste modo, gestores ansiosos estão implantando RCM sem uma compreensão realista das dificuldades e custos envolvidos. Clarke (2001) e Johnston (2002) destacam que os resultados do RCM aparecem somente em longo prazo, e em muitas vezes estes resultados não se refletem em retornos financeiros diretos, ou apresenta retornos indiretos de difícil contabilização.

“RCM não é um processo com o qual resultará em benefícios em curto prazo, por isso aqueles que o adotam devem estar preparados para algo em torno de 5 a 10 anos para obter seu retorno.” (IAEA, 2007).

Para Faccio et al. (2014), a alta complexidade do ambiente industrial e a dificuldade de coletar dados corretos de campo, tornam a definição e estimativa de custos de manutenção extremamente complicada, bem como a seleção da política ótima de manutenção tão difícil. Diante destas dificuldades, muitas empresas iniciam e abandonam projetos de implantação do RCM ainda em seus projetos pilotos. Apesar disso, segundo Eti, Ogaji e Probert (2006b), líderes empresariais percebem cada vez mais a importância estratégica da função manutenção para as organizações que têm investimentos significativos em ativos físicos. E que, por isso, passam a ver a manutenção como um custo necessário no orçamento operacional. Em outras palavras, a confiabilidade tornou-se uma questão crítica nas operações de capital intensivo.

“RCM é a oportunidade para que a função de manutenção possa ser devidamente vista como uma atividade que agrega valor e que contribui diretamente para o desempenho operacional dos ativos investidos. RCM é parte integrante da gestão de risco e de ativos” (BERGMAN, 1999).

Tendo o aumento de lucratividade como meta, um melhor gerenciamento de ativos pela função manutenção pode aumentar as margens de lucro de duas maneiras: de forma direta,

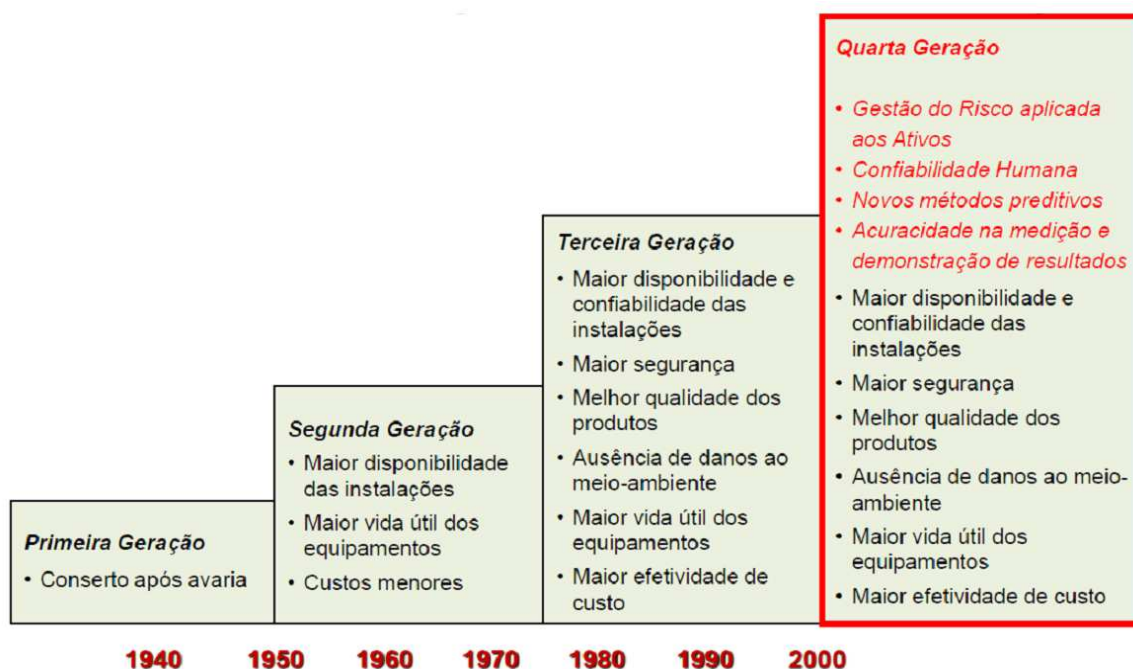
com a redução dos custos operacionais do equipamento; e de forma indireta, com o aumento da confiabilidade e disponibilidade do equipamento, desta forma, a capacidade produtiva. Caso o custo anual de manutenção exceda 5% do valor do ativo, a empresa estará provavelmente em dificuldades financeiras (considerando, por exemplo, as regras tributárias de depreciação de ativos). O custo total de manutenção está relacionado à qualidade do equipamento (questões intrínsecas ao seu projeto tecnológico), à forma como é usado, à política de manutenção adotada para o ativo e à estratégia do negócio. Como uma das características deste processo, os empresários procuram cada vez mais comprar equipamentos que por projeto necessitem menos de manutenção (ETI; OGAJI; PROBERT, 2006c).

2.1 A evolução da manutenção ao RCM

Segundo Moubray (1997), a evolução histórica da manutenção pode ser dividida em três gerações distintas: Primeira Geração (Mecanização); Segunda Geração (Industrialização); e Terceira Geração (Automatização).

Alguns autores, como Dunn (2003), já consideram a Quarta Geração da manutenção, em que o termo "Manutenção" vem sendo gradativamente substituído por "Gestão de Ativos" e incluem os conceitos de estatística e análise de risco, como demonstrado na Figura 1.

Figura 1 - A evolução da manutenção



Fonte: SQL BRASIL (2011)

A Primeira Geração estende-se aproximadamente de 1940 a 1950, com o final da Segunda Guerra Mundial. Esta geração caracteriza-se pela utilização de equipamentos simples e sobredimensionados para as funções requeridas. Nesta época a sociedade exigia apenas que estes equipamentos fossem restaurados quando apresentassem defeitos, minimizados pelo seu sobredimensionamento, visto que pouco se dependia de seu desempenho. A manutenção era basicamente corretiva, após a ocorrência da falha, com pequenas ações sistemáticas de conservação, como limpeza e lubrificações, visto que os equipamentos eram basicamente mecânicos.

A Segunda Geração inicia-se após o término da Segunda Guerra Mundial, com ampla disseminação das linhas de produção contínuas, gerando dependência crescente da sociedade em relação aos produtos e processos industriais. Registra-se uma onda de escassez de mão-de-obra especializada, decorrente do rápido processo de automação, gerando custos crescentes de correção das falhas. Uma maior disponibilidade e vida útil dos ativos industriais, a um baixo custo, tornaram-se o objetivo básico de avaliação no ambiente industrial.

A partir deste cenário, de uma forte industrialização, surgiu um grande esforço científico de pesquisa e desenvolvimento de técnicas de manutenção preventiva, com foco na minimização dos impactos das falhas no processo produtivo. Este esforço gerou as técnicas de manutenção preventiva, com a disseminação do processo de revisão periódica de equipamentos, mais especificamente na indústria aeronáutica.

A Terceira Geração surgiu nos anos 70, para Dunn (2003), esta transformação se deve a fatores globais, afirma que essa inevitável evolução deu-se, sobretudo, pelas novas exigências de mercado em virtude da concorrência internacional, trazendo cada vez mais a necessidade de redução dos custos operacionais.

Segundo Moubray (1997), tais transformações podem ser classificadas em três áreas principais, quais sejam: a expectativa de crescimento da função manutenção; o melhor entendimento do modo como o equipamento se comporta; e o aumento da gama de técnicas e ferramentas de gerenciamento de manutenção. Outros fatores, tais como o fenômeno da automação industrial e o advento da informática, contribuíram para tal evolução, tornando-as extremamente complexas e, por consequência, transformando a confiabilidade e a disponibilidade dos equipamentos em “pontos-chaves” para a indústria.

A Quarta Geração da manutenção, definida como a geração na qual o objetivo passa a ser evitar ou eliminar a possibilidade de ocorrência de falhas funcionais, e não mais preveni-

las ou predizê-las, abrangendo o aprimoramento das técnicas de monitoramento da condição como, por exemplo, técnicas de manutenção preditiva, a utilização de ferramentas de auxílio à decisão e análise de riscos. Na quarta geração também se observa uma maior exigência quanto aos aspectos de confiabilidade e manutenibilidade junto aos fabricantes dos ESCs, ainda na fase de projeto dos mesmos, através aplicações como o FMEA de projeto (Análise dos Modos de Falha e Efeitos devido ao projeto, ou do inglês: DFMEA, *Design Failure Modes and Effects Analysis*). Também a criação de grupos de trabalho multidisciplinares, com o envolvimento de todos os níveis hierárquicos da companhia, para o estabelecimento de metodologias mais eficientes na gestão de ativos.

A gestão de ativos refere-se à tomada de decisões. É uma abordagem disciplinada, deliberada e sistemática para a tomada de decisão sobre os ativos e seus ciclos de vida com base em informação. A gestão de ativos é um custo do negócio, mas traz em contrapartida resultados de grande contribuição (ADOGHE; AWOSOPE; EKEH, 2013).

A gestão de ativos envolve técnicas e ferramentas para interpretar as informações e dados obtidos pelas áreas de operação e manutenção mais abrangentes do que simplesmente aquelas utilizadas para manter os equipamentos em condições de operação. É necessário conectar as decisões sobre os ativos aos objetivos estratégicos da empresa, considerar os sistemas e não somente suas partes, ter em perspectiva todo o ciclo de vida dos ativos, considerar e gerenciar as incertezas e levar aos “*stakeholders*” alternativas de decisões que possam ser entendidas. A gestão de ativos envolve um conjunto de atividades associados à segurança, confiabilidade, disponibilidade, infraestrutura e custo (MARCO, 2013a).

Para Adoghe et al. (2013), mesmo hoje após quase três décadas de disseminação do RCM, assim como tantos outros conceitos estratégicos de manutenção, a manutenção em equipamentos, de modo geral, ainda é feita somente no “calor das emoções”, ou seja, quando um equipamento crítico está parado e requer atenção imediata (manutenção corretiva).

A maneira pela qual é feita a intervenção nos ESCs caracteriza os vários tipos de manutenção existentes. Existe uma variedade muito grande de denominações para qualificar a atuação da manutenção e, em razão disso, não é rara a confusão originada na caracterização ou definição dos tipos de manutenção. Entretanto, os três tipos mais difundidos e utilizados de manutenção são:

- Manutenção Corretiva, baseada na falha ou com ação após a falha;
- Manutenção Preventiva, baseada no tempo de uso, com ações periódicas em tempos pré-determinados para evitar a falha;
- Manutenção Preditiva, baseada na condição ou estado do equipamento, através de monitoramento e análises estatísticas para determinar o momento correto para a intervenção.

A otimização da política de manutenção requer um eficiente equilíbrio de custos entre os diferentes tipos de manutenções. O tipo e tempo de manutenção, bem como os intervalos entre as atividades de manutenção dependem da sua taxa de falha (λ), impactos e custos associados. Portanto, o uso de dados quantitativos é importante para o desenvolvimento de planos de manutenção mais eficazes (ALEBRANT MENDES; DUARTE RIBEIRO, 2014).

Uma pesquisa quantitativa (Pesquisa *Survey*), feita através de formulários enviados e preenchidos por empresas industriais italianas destacou que as empresas aplicam a política de manutenção baseada na falha em cerca de 55% dos casos (corretiva), a política de manutenção baseada no tempo de uso em 35% dos casos e política de manutenção baseada na condição em apenas 10% dos casos. E, ainda, acrescentam que estas percentagens estão discrepantes em relação aos valores recomendados de 30% para manutenção baseada na falha, 70% para manutenção baseada no uso e na condição juntos. E, relata que estes resultados são semelhantes aos reportados em estudos realizados em outros países (PINJALA; PINTELON; VEREECKE, 2006; CHINESE; GHIRARDO, 2013; FACCIO et al., 2014).

Faccio (2014) destaca ainda, que atualmente pesquisas científicas internacionais têm estudado amplamente o assunto, introduzindo variadas abordagens na busca pelo “mix” ótimo entre as políticas de manutenção. A Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM) é a aplicação de um método estruturado para estabelecer a melhor política de manutenção para cada sistema ou equipamento, considerando sua importância funcional, impactos e custos para a segurança, confiabilidade e disponibilidade operacional.

Sua metodologia inicia definindo as funções do ESC e o desempenho operacional esperado em seu contexto operacional, depois identifica os modos de falha (modos pelos quais o ESC pode falhar em cumprir suas funções) e as respectivas causas prováveis, efeitos e consequências da falha. Deste modo, este procedimento permite avaliar a criticidade das falhas proporcionando a identificação de consequências significantes que afetam a segurança,

a disponibilidade ou custos. A metodologia permite selecionar as tarefas mais adequadas de manutenção direcionadas para os modos de falha identificados.

Os clássicos problemas de manutenção nas indústrias modernas são: pouca aplicação de políticas de manutenção proativas (preventivas e preditivas), recorrência frequente dos mesmos problemas, intervenções errôneas, práticas de manutenção não padronizadas pela instituição, tarefas de manutenção proativas desnecessárias ou demasiadas (conservativas), planos de manutenção mal elaborados, falta de rastreabilidade/visibilidade do PMP, aceitação “às cegas” de componentes e insumos do fabricante, aplicações insuficientes ou pouco eficazes da manutenção preditiva. Por tudo isso, se fez necessário desenvolver uma metodologia adequada para estabelecer estratégias e enfoques programáticos para lidar com esses problemas (CONTRI, 2009).

“A manutenção centrada em confiabilidade (RCM) oferece o método mais sistemático e eficiente para lidar com uma abordagem programática global para a otimização da manutenção da planta e equipamentos” (DESHPANDE; MODAK, 2002a).

2.2 O RCM e sua contextualização na área nuclear

Segundo Siqueira (2005), o RCM teve origem a partir da necessidade de certificação da linha de aeronaves Boeing 747, pela FAA (*Federal Aviation Authority*) nos Estados Unidos. O Boeing 747 foi um marco em níveis de automação para a aviação comercial, com a triplicação do número de assentos em relação à maior aeronave existente na época. O tamanho considerável do Boeing 747 (duas vezes e meia o tamanho da maior aeronave de longo alcance até então existente, o Boeing 707), seus novos motores a jato e os diversos avanços tecnológicos em estrutura e sistemas eletrônicos, levaram a FAA ao posicionamento de que o programa de manutenção do avião seria tão extenso que as empresas de aviação civil não seriam capazes de operar a aeronave de uma maneira lucrativa.

A metodologia tradicional de manutenção seria inviável para máquinas com tamanha complexidade, pois as aeronaves passariam mais tempo em terra, fazendo manutenção, do que voando. Sendo assim, era necessário reduzir a probabilidade de ocorrência de falhas que fossem de fato significativas. Isto motivou a criação de uma força-tarefa na United Airlines em 1968, conhecida pela sigla de MSG (*Maintenance Steering Group*), encarregada de rever a aplicabilidade dos métodos existentes a estas aeronaves. Esses esforços resultaram em uma nova abordagem que empregava processos com árvores de decisões para classificar as

atividades de manutenção que eram necessárias para preservar funções críticas dos aviões durante os voos. O relatório de 520 páginas resultante desta comissão coordenada pelos engenheiros Stanley F. Nowlan e Howard Heap, denominado MSG-1, introduziram os conceitos de *Reliability-Centered Maintenance* (RCM), atendendo à solicitação do Departamento de Defesa Americano.

Nesta época, a aviação civil americana apresentava sessenta acidentes por milhão de decolagens, o que representaria dois acidentes por dia atualmente. Com o desenvolvimento de novas tecnologias, e a implantação de técnicas avançadas de manutenção, este índice atinge dois acidentes por milhão de decolagens nos dias de hoje.

Os conceitos contidos nos documentos MSGs e no relatório de Nowlan e Heap (1978) transcenderam os limites da aviação e deram origem a diversas versões de processos RCM nos mais diversos setores da indústria. As ideias sobre o processo RCM foram difundidas nas indústrias a partir de três pontos básicos: a indústria militar, empresas fornecedoras para as forças armadas e a indústria nuclear (RAUSAND, 1998).

Na década de 1980, as plantas de energia nuclear norte-americanas estavam operando com confiabilidade satisfatória, ou seja, dentro dos padrões estabelecidos para o setor. Entretanto, esse nível de segurança adequado foi obtido através de práticas exageradas de manutenção. E ao observar que as técnicas RCM poderiam ser usadas para reduzir os custos de manutenção das plantas, mantendo ou até superando o nível de confiabilidade e segurança no setor, em 1984 o *Electric Power Research Institute* (EPRI) elaborou os primeiros documentos de aplicação, e de fato introduziu o RCM à indústria da energia nuclear.

As usinas já possuíam seus PMPs, entretanto, em muitas usinas nucleares estes programas de manutenção foram baseados em recomendações excessivamente conservadoras dos fornecedores, sem consideração suficiente de ciclos reais de operação ou quanto às funções gerais dos sistemas. Também se observou que pouca manutenção preventiva era realizada sobre componentes importantes, que não tinham sido identificados como críticos. A não inclusão destas considerações acarretava em um maior número de falhas, ocasionando aumento dos custos de manutenção corretiva e maior indisponibilidade de sistemas das plantas (IAEA, 2008).

A empresa EDF Energy (França), foi umas das pioneiras na aplicação do RCM no seguimento da geração nuclear de energia, implantando um estudo-piloto sobre RCM a dois sistemas (RCV e diesel gerador de emergência) de sua planta nuclear de 900MW em 1991. Neste estudo foram utilizadas técnicas de Análise Probabilística de Segurança (APS) para

classificar os componentes de segurança de acordo com seus fatores de contribuição para a probabilidade de dano ao núcleo do reator e, assim, classificar os sistemas mais importantes. O estudo piloto foi tão bem sucedido que em poucos anos a EDF o expandiu para todas as suas unidades (MAUGER; DUBREUIL CHAMBARDEL, 1996).

Em 1993, também com base no RCM, o NRC (Conselho Regulatório Nuclear Americano) publicou a norma NUMARC 93-01, que é uma norma de conduta industrial para o monitoramento da eficácia da manutenção em plantas nucleares. Esta norma acabou por influenciar as agências reguladoras do setor nuclear em diferentes países a emitirem normas semelhantes (NRC, 1996).

Outro “divisor de águas” que surgiu na área nuclear foi a publicação em 2001 pelo *Institute of Nuclear Power Operations* (INPO) do documento INPO AP-913 – Descrição de Processo de Confiabilidade de Equipamentos, que configura a estratégia para o gerenciamento da confiabilidade e do ciclo de vida dos ativos nas plantas (INPO, 2001).

Em 2007, a IAEA (*International Atomic Energy Agency*) publicou o IAEA-TECDOC-1590, que é o documento de referência em boas práticas para a aplicação do RCM no setor nuclear de geração de energia, de modo a auxiliar no atendimento as exigências estabelecidas para o licenciamento de operação de uma usina nuclear junto à comunidade internacional.

Ao longo dos anos as usinas nucleares vêm consolidando suas bases e padronizando suas políticas e boas práticas de trabalho através do compartilhamento, troca de informações e experiências operacionais ao redor do mundo, isso ocorre através de iniciativas conjuntas promovidas por organismos internacionais como, por exemplo, a WANO (*World Association of Nuclear Operators*), EPRI (*Electric Power Research Institute*), INPO (*Institute of Nuclear Power Operations*) e a IAEA (*International Atomic Energy Agency*). Nesta busca pela excelência no setor nuclear, a função manutenção tem sido foco de estudos de melhoria na gestão de ativos em termos de confiabilidade e disponibilidade com a melhoria contínua de desempenho e redução de custos, seja por questões de segurança ou econômicas.

Deste modo, para Jiejuan, Dinyuan e Dazhi (2004), novas abordagens e estudos vem se desenvolvendo neste campo, onde os princípios da Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM) são os grandes representantes e formam a base destes novos conceitos na área nuclear de geração de energia, sem nunca perder de vista a manutenção do nível de segurança nas usinas.

2.3 Os preceitos do RCM

Segundo Arno et al., (2015), a abordagem RCM baseia-se nos seguintes preceitos:

1) A manutenção tem o objetivo de preservar a função de um item ou sistema, não apenas sua operacionalidade por si só. Redundâncias de equipamentos podem permitir uma falha individual sem gerar impacto para o funcionamento global do sistema;

2) RCM centra-se no sistema como um todo e está mais preocupado com a manutenção da função primária do sistema do que nos componentes individuais;

3) Confiabilidade é a base para as decisões quanto às ações a serem tomadas. As circunstâncias da falha de um ESC devem ser analisadas e entendidas para determinar o quão eficaz é o PMP, bem como os devidos ajustes que se façam necessários;

4) RCM é regido em primeiro lugar pela segurança e, em seguida, pela economia. O nível de segurança deve ser preservado, mas quando não é um problema, o PMP deve ser justificado por benefícios econômicos;

5) RCM reconhece limitações de projeto. A confiabilidade de um ESC é inerente ao seu projeto e a manutenção não pode mudar isto, tendo por objetivo apenas sustentar o nível de confiabilidade intrínseca ao longo da vida deste ESC;

6) RCM é um processo contínuo no qual as informações obtidas pela experiência operacional e pelas características de falhas são utilizadas para realimentar o processo e promover a melhoria contínua do PMP;

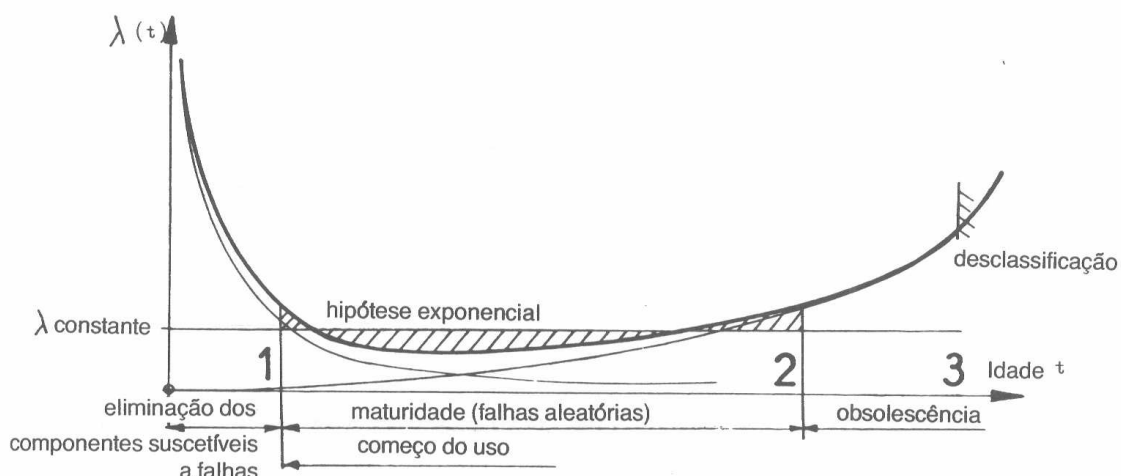
Com base em Bergman (1999), a estes preceitos pode-se ainda acrescentar que: Falhas funcionais são definidas no RCM como a incapacidade de realizar as funções esperadas pelo usuário. Portanto, realizar uma análise RCM em componentes individuais é possível, mas a interdependência funcional dos componentes fica, deste modo, perdida. Por este motivo, muitas vezes se faz necessário uma abordagem em nível de sistema ou subsistema, e não no nível de componente. Ou seja, é possível determinar a função de cada componente do equipamento, mas muitas vezes pode ser mais produtivo realizar as análises funcionais em nível de equipamentos ou de sistemas do que em nível de componentes, uma vez que determinados conjuntos de componentes que formam um equipamento se prestam a realizar uma mesma função.

Com relação ao preceito de número 5, Rausand² (1998 apud IGBA et al., 2013) acrescenta que a confiabilidade é inerente ao ESC a partir de sua concepção de projeto, e somente pode ser melhorada através da modificação e/ou reprojeção do mesmo.

2.3.1 Mecanismo de degradação da função

Por muito tempo acreditou-se que a degradação até a falha funcional de um equipamento seguia um único padrão ou perfis semelhantes em relação à Taxa de Falha (λ) no tempo. Este padrão da curva de degradação ficou popularmente conhecido como “Curva da Banheira”, ilustrado na Figura 2, onde pode-se observar uma divisão da escala temporal em três fases:

Figura 2 - “Curva da banheira” para equipamentos eletrônicos



Fonte: Monchy (1989, p.81)

- Fase 1 – Falha precoce ou “mortalidade infantil”, esta fase compreende a parte inicial da curva de distribuição quando o equipamento está em seu período inicial de operação, é onde a taxa de falha é elevada para muitos equipamentos;
- Fase 2 – Maturação ou “amaciamento”, esta fase compreende a maior parte da vida útil do equipamento, onde a taxa de falha é reduzida e relativamente constante;

² RAUSAND, M. Reliability centered maintenance. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 60, n. 2, p. 121–132, maio 1998. apud

IGBA, J. et al. A Systems Approach Towards Reliability-Centred Maintenance (RCM) of Wind Turbines. **Procedia Computer Science**, v. 16, p. 814–823, jan. 2013.

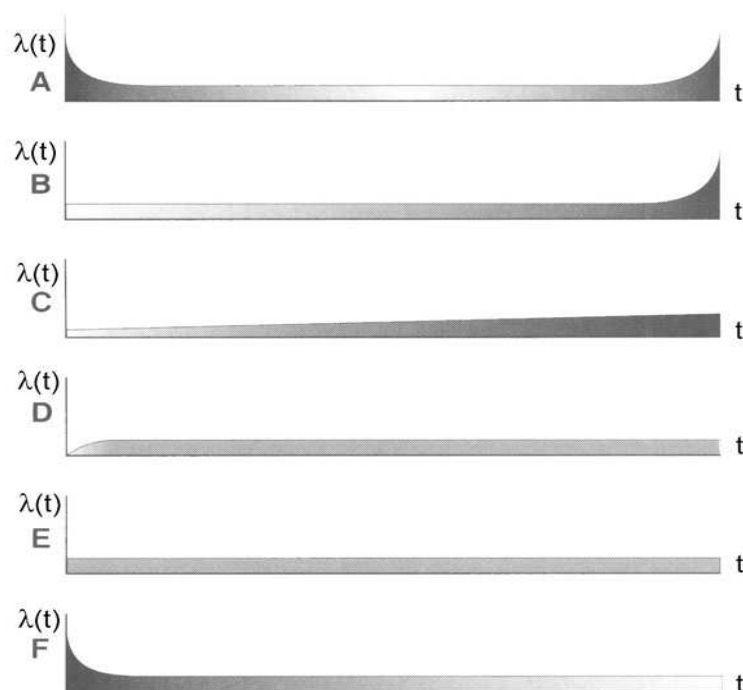
- Fase 3 – Obsolescência ou “envelhecimento”, esta fase compreende a fase em que o ESC já está no fim de sua vida útil esperada, onde a taxa de falha volta a aumentar. Nesta fase, portanto, o ESC poderia ser substituído, reparado ou restabelecido a uma melhor condição.

Castro (1997) observa que a idade operacional não está necessariamente associada à confiabilidade, fato este que pode ser observado em seu trabalho, onde comenta que a indústria aeronáutica obteve maus resultados no desempenho operacional ao acreditar que a abrangência e a frequência das intervenções programadas eram indispensáveis para garantia da confiabilidade.

A esse respeito, Moubray (1997) comenta que as características de desgaste são frequentemente encontradas somente em equipamentos que entram em contato direto com o produto. Ou seja, ao acreditar que em aumentar a frequência de substituição de componentes por peças novas, por exemplo, estaria assim garantindo maior confiabilidade ao equipamento. Estes estudos mostraram que, deste modo, um pior desempenho operacional e custos elevados de manutenção são obtidos devido a uma maior ocorrência de falhas na fase de mortalidade infantil (maior λ), além de uma maior indisponibilidade do equipamento devido à alta frequência de paradas para substituição de componentes ainda em boas condições. Arcando-se com todos os custos envolvidos neste processo.

Os estudos pioneiros de Nowlan e Heap (1978) questionaram a tradicional “curva da banheira” e revelaram seis padrões, para representar a taxa de falha em relação ao tempo de operação de equipamentos mais complexos, com o uso e integração de uma grande variedade de componentes elétricos, eletrônicos e mecânicos, como indicado na Figura 3.

Figura 3 - Novos perfis das taxas de falha



Fonte: Nowlan e Heap (1978)

Observa-se que o padrão de falha 'A' é a 'curva da banheira' tradicional. Já os padrões 'B' e 'C', representam equipamentos com falhas relacionadas com o tempo de operação. Para o padrão 'B', fica caracterizada uma zona de desgaste, o que não ocorre para o padrão 'C'. Neste caso, tem-se um lento aumento na taxa de falha. A característica do padrão 'D' é a ocorrência de uma baixa taxa de falha, quando o equipamento é novo; ocorre mais tarde um rápido aumento dessa taxa até atingir um nível constante. Os equipamentos com taxa de falha constante, independentemente de seu tempo de operação, seguem o padrão 'E'. Por último, tem-se o padrão 'F', que apresenta um período inicial característico de mortalidade infantil, após este período a taxa de falha se mantém constante ao longo do tempo.

Os mesmos estudos de Nowlan e Heap (1978) para a indústria aeronáutica indicaram, também, que 4% dos equipamentos obedecem ao padrão 'A'; 2% ao padrão 'B'; 5% ao padrão 'C'; 7% ao padrão 'D'; 14% ao padrão 'E'; e 68% o padrão 'F'. Dessa maneira, 89% dos equipamentos não apresentam falhas associadas à idade operacional, casos "D", "E" e "F". Com relação a estes padrões, Moubray (1997) observa que o número de vezes que ocorrem nas aeronaves não é necessariamente o mesmo que ocorre na indústria em geral. Contudo, o autor afirma não ter dúvida que, como os equipamentos tornam-se mais complexos, recaem cada vez mais nos padrões 'E' e 'F'.

Com base nos padrões apresentados, a estratégia geralmente adotada de substituir periodicamente algum equipamento ou componente, com a intenção de aumentar a confiabilidade, não é adequada por si só. Pois estas intervenções podem ser desnecessárias e invasivas, além do risco de introdução de falha no caso de erro de instalação do novo componente. Também pode adicionar maior probabilidade de falha por mortalidade infantil do novo componente e maior indisponibilidade do equipamento devido à parada de manutenção para esta substituição. Portanto, a confiabilidade não aumenta com simples substituições, na verdade pode diminuir, enquanto os custos aumentam.

Constata-se que os estudos de Nowlan e Heap (1978) culminaram no desenvolvimento do método RCM, devido à concepção vigente à época, de realizar a manutenção preventiva, simplesmente associada a intervalos de tempo pré-definidos. Essas manutenções, comumente associadas a substituições de componentes e equipamentos, apresentavam custos operacionais altos sem a contrapartida do aumento esperado de confiabilidade e disponibilidade, ao contrário, com o indesejável aumento da ocorrência de falhas.

O RCM preconiza um estudo mais cuidado destas questões, enfatiza a análise das funções e consequências das falhas, mais que nos equipamentos e na falha em si, procurando definir as tarefas de manutenção que sejam técnica e economicamente mais adequadas, utilizando as diferentes formas de manutenção para cada caso específico. Este método preconiza, por exemplo, a adoção de manutenção corretiva (ou estratégia de “Rodar até falhar”), quando as consequências de uma falha não são significativas para a função do ESC, o que representa uma quebra de paradigma da manutenção até então (NUNES, 2001).

2.3.2 As sete questões básicas do processo RCM

Segundo Moubray (1997), o processo RCM alcança seus objetivos através da obtenção de respostas precisas e satisfatórias para as sete questões listadas a seguir, respeitando a ordem em que são apresentadas.

1. Quais são as funções e padrões de desempenho associados de um ativo no seu contexto operacional atual? – Funções e padrões de desempenho.
2. De que forma ele pode falhar em cumprir suas funções? – Falhas funcionais.
3. Quais eventos levam a cada falha funcional? – Modos de falha.
4. O que acontece quando cada falha ocorre? – Efeitos da falha.
5. De que forma cada falha importa? – Consequências da falha.

6. O que pode ser feito para predizer ou prevenir cada falha? – Tarefas proativas e intervalos das tarefas.
7. O que deve ser feito caso uma tarefa proativa adequada não possa ser encontrada? – Tarefas padrões.

Segundo Clarke (2001), as cinco primeiras questões do RCM podem ser respondidas através da realização da aplicação do método de Análise dos Modos de Falha e Efeitos (FMEA). Ao se realizar o FMEA corretamente, todas as funções (questão 1) e falhas funcionais (questão 2) e os padrões de desempenho do ESC que está sendo analisado serão identificados.

A terceira questão visa identificar todas as causas possíveis (modos de falha) que podem provocar a perda das funções identificadas. Experientes analistas do RCM clássico não procuram identificar todos os modos de falha possíveis para cada falha funcional, mas avaliam a probabilidade de ocorrência e gravidade da consequência. Também é importante identificar modos de falha em um nível apropriado de causa, ou seja, a um nível de análise que permite o quanto possível, encontrar uma “causa raiz” para o modo de falha, não apenas mais um sintoma a ser tratado (Técnicas de apoio à identificação de “causa raiz” podem ser empregadas).

A quarta questão (efeitos de falha) identifica o efeito físico da falha, caso venha a ocorrer, sem que nada tenha sido feito para preveni-la ou predizê-la. Os principais aspectos a serem considerados nesta etapa consistem em identificar quaisquer possíveis efeitos sobre a segurança, o meio ambiente, operações e custos de manutenção.

A quinta questão do RCM consiste em apurar as consequências ou impacto destes efeitos de falha sobre a operação. Até aqui as questões básicas do RCM podem ser respondidas com a correta aplicação do FMEA. É, portanto, nesta quinta questão que a parte “verdadeira” do processo RCM realmente começa, através da classificação das falhas apuradas. Todos os processos RCM classificam falhas funcionais como falhas ocultas ou falhas evidentes. Falhas ocultas são falhas funcionais que não estão evidentes para os operadores em circunstâncias normais, e normalmente envolvem algum tipo de dispositivo de proteção que não é “à prova de falhas”. São características das falhas ocultas não terem nenhuma consequência direta por si só, e somente impactam na função do sistema quando ocorre alguma outra falha (por exemplo, a falha de um extintor de incêndio em operar, só vai

impactar se houver fogo). Falhas evidentes são geralmente classificadas como tendo consequências diretas para segurança, ao meio ambiente, consequências operacionais ou não.

Uma falha funcional com consequências a segurança é aquela que poderia causar a perda de vidas humanas ou ferimentos, falhas com consequências ambientais são aquelas que podem causar a violação de uma norma ou regulamento ambiental, gerando impactos ao meio ambiente. Falhas com consequências operacionais envolvem perdas de capacidade operacional ou custos adicionais não previstos com retrabalhos, perdas materiais, reparos ou mitigação das consequências, enquanto consequências não operacionais envolvem falhas cujo único impacto é o custo direto de reparo do item. Determinar claramente as consequências da falha é fundamental para o processo RCM, pois é a consequência das falhas que qualquer política proposta de gestão de riscos deve tratar muito mais do que a falha em si.

A sexta questão envolve políticas proativas de gerenciamento de falhas. Estas incluem o monitoramento da condição do ESC no estado, revisão dos Planos de Manutenção (PM), combinação de tarefas, entre outras. Para esta análise, é importante conhecer o mecanismo de degradação do ESC, ou seja, seu perfil de distribuição de taxa de falha ao longo do tempo. O RCM estabelece critérios para seleção de tarefas e avaliação da "viabilidade técnica" ou "aplicabilidade" dessas tarefas para tratar o modo de falha que está sendo analisado. Com uma análise criteriosa é possível determinar se a tarefa pode de fato impedir ou prevenir a falha analisada, bem como o intervalo que deve ser realizada.

A sétima e última questão do RCM trabalha com as falhas para as quais não se pôde encontrar uma tarefa proativa tecnicamente viável ou que vale a pena investir esforços. Estas são muitas vezes chamadas como "Tarefas padrão", e incluem as tarefas de manutenção corretiva (ou "Rodar até falhar"), reparos decorrentes da manutenção preditiva, inspeções e testes, ou seja, decorrentes do monitoramento do estado ou condição do ESC, muitas vezes empregadas para prevenção de Falhas Ocultas, ou ainda, ESCs que necessitam reprojeção.

Por fim, o RCM estabelece critérios para determinar qual a melhor estratégia de manutenção que deve ser adotada para cada ESC. O principal produto do processo de análise RCM é uma lista de tarefas de manutenção, com intervalos definidos e responsáveis. Essas tarefas propostas são então preparadas para implantação na programação de manutenção ou PMP. A documentação e implantação são os passos finais para formalizar este processo e os seguintes pontos devem ser considerados:

- Análise e tomada de decisão;
- Melhoramento contínuo com base na experiência da manutenção e operação;
- Auditoria clara dos caminhos das ações tomadas pela manutenção e maneiras de melhorá-las.

Uma vez que esteja documentado e implantado, este processo será um sistema efetivo para assegurar operações confiáveis e seguras de um sistema ou equipamento.

2.4 O RCM simplificado

O RCM Clássico consiste na obtenção de respostas precisas e satisfatórias para as sete questões básicas listadas anteriormente. Entretanto, segundo Darragi et al. (2005), um processo RCM clássico não é considerado ótimo no que diz respeito às necessidades da indústria nuclear. Pois o RCM clássico consiste em um processo que é melhor empregado quando se deseja criar um novo e completo PMP, em vez de melhorar e/ou rever o existente. Já que uma quantidade considerável de tempo e esforço é alocada para realizar a análise e implantação completa de todas as tarefas de manutenção, este fato tem sido considerado como um dos principais problemas para as aplicações tradicionais do RCM clássico.

Esta situação deve-se ao nível dos detalhes requeridos e documentação excessiva produzida como resultado dos passos rígidos do processo clássico. Em meados da década de 1990, a indústria nuclear iniciou projetos de investigação para desenvolver maneiras mais rentáveis de realizar o RCM com base na sua própria experiência. Alguns conceitos foram desenvolvidos a fim de demonstrar que o padrão do método RCM clássico poderia ser simplificado para reduzir o custo das análises, sobretudo, mantendo um produto de alta qualidade e o mesmo nível de segurança para as operações.

Em 1995, o EPRI publica estudo em duas plantas nucleares utilizando três métodos simplificados; *Streamlined RCM*, *Plant Maintenance Optimizer* e *Critical Checklist*, cujo resultado indica que os custos de análise RCM podem ser reduzidos em um fator de 2 a 4 em relação a uma aplicação clássica de RCM, e com resultados de alta qualidade. Os três métodos simplificados produziram resultados praticamente idênticos entre si (SMITH et al., 2004).

Desde que estes relatórios do EPRI foram publicados em 1995, vários métodos simplificados ou otimizados de RCM, e outras variações têm sido observados na literatura, no Quadro 1 é apresentada a pesquisa bibliográfica realizada com algumas destas variações do

método RCM. Estes métodos alternativos visam atender a diferentes setores ou estudar alternativas para melhor aplicação do RCM.

Quadro 1 - Variações do Método RCM Clássico

Métodos/Referências:	Descrição do trabalho:
RCM 2 (MOUBRAY, 1997)	Com o livro RCM 2, Moubray (1997) popularizou o método RCM, adaptando-o as necessidades das indústrias, assim, o RCM passou a ser amplamente aplicado aos mais variados setores em todo mundo. Sua obra é reconhecida pela norma SAE JA1011 SAE (1999), como legítima detentora dos princípios RCM que foram introduzidos originalmente por Nowlan e Heap (1978). Neste trabalho, Moubray apresenta de forma fiel e prática o que é o RCM e como ele pode ser aplicado, atualizou também com conceitos de monitoramento da condição, erro humano, uma nova tratativa na lógica de decisão para falhas múltiplas e ocultas, bem como para o uso demasiado de tarefas de busca por falhas, entre outras atualizações.
Otimização do Programa de Manutenção (PMO) ³ (JOHNSON, 2001)	Em seu trabalho Johnson (1995) formaliza um método de otimização do PMP que se tornou referência para muitos outros trabalhos sobre o tema. A partir de seu trabalho, este método ficou conhecido como PMO e vem sendo aplicado em muitas empresas ao redor do mundo, principalmente na área nuclear onde surgiu. Trata-se de um método estruturado que consiste em uma reavaliação dos Planos de Manutenção já existentes nos PMPs, com base nos princípios do RCM. O PMO tem por característica, a possibilidade de realizar projetos de melhoria no PMP com aplicações menores e focadas em objetivos específicos, por exemplo, um projeto de melhoria no PMP para apenas um determinado tipo de equipamento, ou atacar os PMs mais onerosos em razão de suas altas frequências. Enfim, é um método interessante, pois através dele pode-se estabelecer um projeto e aplicar o método PMO atacando pontualmente os problemas do PMP existente.
RCM Probabilístico (EISINGER; RAKOWSKY, 2001)	Nesta abordagem, os autores promovem uma discussão quanto à forma como são dadas as respostas da Árvore Lógica de Decisão do RCM, pois alegam que em alguns casos, a resposta "Sim ou Não" no fluxograma, não são adequadas ou limitam o analista para a escolha da melhor estratégia sem considerar outros contextos mais complexos. Neste método é proposta a substituição da LTA do RCM por uma "Árvore de Eventos", onde as respostas são percentuais e não apenas baseadas em respostas de "Sim ou Não". Desta forma, com base nas análises probabilísticas, ao fim deste processo é possível ter uma relação de diferentes opções de estratégias de manutenção com as respectivas probabilidades de sucesso para a adoção de cada estratégia. Deste modo, é possível optar por uma "boa estratégia" que atenda às necessidades e que seja de mais fácil aplicação, ao invés da "melhor estratégia" com a maior probabilidade, mas que pode consumir grande quantidade de recursos e seja demasiadamente custosa.

³ Nota: Por se tratar do método escolhido para a aplicação prática deste trabalho, os conceitos básicos deste método estão melhor explicados no item 2.5, e seu modelo de aplicação possui um capítulo específico neste trabalho, o capítulo 4.

Métodos/Referências:	Descrição do trabalho:
Streamlined RCM (EPRI, 2002a)	O processo <i>Streamlined RCM</i>, desenvolvido no setor nuclear de energia, segue os mesmos passos do RCM Clássico, porém focaliza suas análises nos ESCs com funções consideradas como mais importantes para a segurança e disponibilidade da planta. Este método consiste primeiramente na classificação dos ESCs como "Críticos" e "Não-críticos", dando diferentes tratativas para cada grupo. As análises de FMEA e LTA do RCM Clássico são agrupadas em um documento único, deste modo, permite uma análise de vários modos de falha associados a um mesmo ESC, identifica quais efeitos são dominantes (críticos) e, finalmente, com base na causa do modo de falha, decidir sobre a melhor estratégia de manutenção que mitiga a falha funcional deste ESC "crítico". Para os itens considerados como "Não-críticos", são avaliadas através de passos específicos, qual estratégia de baixo custo pode ser adotada ou, se possível, adotar a estratégia do "Rodar até falhar" (manutenção Corretiva). Um grupo de trabalho é constituído de especialistas das áreas de engenharia, operação, manutenção e planejamento, que a partir de documentos da experiência operacional, falhas postuladas em equipamentos e entrevistas no chão de fábrica são empregados para dar suporte as classificações de criticidade dos ESCs e para ponderar as decisões quanto às estratégias de manutenção.
Programa de Otimização da Manutenção da Planta (IAEA, 2008)	A otimização da função manutenção é importante não só para revisar os processos de manutenção, mas também a gestão adotada, a cultura de trabalho, o conjunto de habilidades necessárias, a motivação da força de trabalho, e o uso eficiente das tecnologias. Portanto, a Otimização de Manutenção da Planta é um programa para criar um ambiente de trabalho que otimiza o uso dos recursos, processos de manutenção, as habilidades e tecnologia, com a finalidade de cumprir os objetivos de manutenção, melhorar a utilização dos recursos das usinas e aumentar a rentabilidade para as empresas de geração.
Manutenção Centrada na Experiência (ECM) (SMITH et al., 2004)	No capítulo 7 do livro "RCM - Porta de entrada para Manutenção Classe Mundial", o autor apresenta métodos alternativos de RCM, incluindo o processo de Manutenção Centrada na Experiência (ECM - <i>Experience-Centered Maintenance</i>). Este método é sugerido para situações onde pretende-se fazer uma análise rápida em determinados sistemas da planta, onde pretende-se gastar uma quantidade mínima de esforço de análise para determinar se as tarefas do PMP empregadas são realmente aplicáveis e eficazes. E, em seguida, verificar algum possível PM que possa ter sido esquecido e ofereça alguma razoável oportunidade de ganho rentável. Por último, pode ser feita também uma análise de risco quantos as tarefas do PMP. Um processo ECM típico deve levar cerca de 2 a 4 dias utilizando uma equipe técnica experiente, familiarizada com os equipamentos e com a operação do sistema.
RCM com Análise Probabilística de Segurança (APS) (JIEJUAN; DINGYUAN; DAZHI, 2004)	APS é um modelo de análise integrada de risco específico para cada planta, que estima a probabilidade de danos ao núcleo e/ou a probabilidade de grande liberação de radiação que possa ocorrer como resultado de eventos como falhas isoladas ou associadas. Conforme em Brewer e Canady (1999), o APS é um programa permanente de monitoramento do risco às funções críticas de segurança da planta através de cálculos de probabilidades. O APS identifica os ESCs relacionados à segurança e faz o controle de probabilidades de possíveis eventos indesejáveis à segurança com base na indisponibilidade (isolada ou associada) destes ESCs. Neste trabalho de Jiejuan, Dingyuan e Dazhi (2004), os autores apresentam um estudo piloto utilizando técnicas de APS no RCM. Neste estudo é feita uma discussão sobre como a indisponibilidade de componentes devido às atividades de manutenção, tais como testes periódicos e manutenções preventivas, pode refletir no modelo APS. Com base nesta discussão, um modelo de RiscoXCusto de manutenção é estabelecido como base para uma otimização geral do PMP em uma usina nuclear de energia. Um algoritmo genético é aplicado para resolver tal modelo e, assim, obter a estratégia de manutenção otimizada geral.

Métodos/Referências:	Descrição do trabalho:
Sistema Inteligente de Análise RCM (IRCMAS) (CHENG et al., 2008)	Para melhorar a eficiência das análises de RCM, foi adotado neste trabalho uma lógica baseada em casos, como um modelo de tecnologia de inteligência artificial (IA). Esta abordagem foi introduzida com sucesso no processo de análise de RCM e deste modo, é estudada uma estrutura de análise RCM inteligente (IRCMA). A ideia base do IRCMA baseia-se no fato de que os registros históricos de análise RCM anteriores podem ser referenciados e utilizados sobre itens semelhantes para as análises RCM de novos itens. Pois é observado que muitas informações comuns ou semelhantes dos equipamentos normalmente são analisadas no processo RCM, assim, tarefas repetidas nas análises RCM podem ser consideravelmente simplificadas ou evitadas através de uma revisão automatizada de casos semelhantes na condução de análises RCM de novos itens e/ou revisão dos antigos. Com base nesta teoria, é desenvolvido por Cheng et al., (2008) um protótipo de Sistema de Análise Inteligente do RCM (IRCMAS). Este trabalho centrou-se na descrição e definição de princípios básicos de uma estrutura de IRCMA, assim como uma análise crítica das técnicas na aplicação do IRCMAS. Finalmente, o protótipo IRCMAS é aplicado em um estudo de caso, onde é concluído como um sistema factível para melhorar a qualidade e eficiência das análises RCM.
RCM considerando o conceito de Manutenção Radical (RM) (LI; GAO, 2010)	Neste artigo, o autor propõe a inclusão da Manutenção Radical (RM) como uma das possíveis saídas do processo RCM, entre as escolhas de estratégias de manutenção. A RM é um conceito de manutenção preventiva que tem por objetivo identificar e atuar na causa raiz das falhas, não apenas restabelecer a função do sistema, por exemplo, na manutenção convencional um rotor de turbina com alta vibração é balanceado novamente, na RM a causa raiz da vibração deve ser investigada, caso identificada como acúmulo de sujeira por exemplo, este rotor é limpo ou, ainda, a água que gera o vapor é melhor tratada. A RM é mais indicada para ESCs que exigem uma alta confiabilidade e direciona uma série de trabalhos de manutenção proativas, porém, com diferente objetivo. O uso da análise RCM direciona quanto à necessidade ou não de adotar o RMA ou não para cada caso. Esta pesquisa mostra que o uso de RM no RCM pode ajudar atribuir recursos de manutenção de forma mais racional e melhorar a qualidade das estratégias de manutenção adotadas.
Manutenção Centrada na Confiabilidade e Risco (RRCM) (SELVIK; AVEN, 2011)	No RCM, como o próprio nome indica, a confiabilidade é o principal ponto de referência para o planejamento das estratégias de manutenção. No entanto, o RCM aborda de forma limitada questões referentes às incertezas nas suas análises e aos riscos associados a elas. Neste artigo é sugerido uma extensão da abordagem RCM para Manutenção Centrada na Confiabilidade e Risco (RRCM - <i>Reliability and Risk Centered Maintenance</i>), com o risco considerando nas análises. Segundo o autor, estas incertezas estão presentes nas fases de seleção de tarefas e na definição das frequências. Através de uma análise qualitativa destas incertezas, é sugerido uma fase de avaliação e "ranqueamento" das decisões com maiores incertezas e riscos e, desta forma, revisar a estratégia adotada para o modo de falha. Também inclui uma fase de avaliação gerencial, que consiste na avaliação dos trabalhos de seu time na condução das análises RCM, através das incertezas apuradas. Como demonstrado no estudo de caso apresentado neste artigo, o método RRCM pode ser muito útil para avaliar o processo RCM já existente. Pode trazer melhorias nas análises e decisões RCM e, assim, trazer ganhos de confiabilidade para o PMP das empresas.

Fonte: Autoria própria.

Também são encontrados na literatura, alguns trabalhos que criticam estas simplificações otimizadas do RCM, para Clarke (2001) por exemplo, o surgimento dessas técnicas “*Fast Tracking*” ou “*Streamlined*” de RCM não distorcem o que é o RCM. Segundo ele, estas técnicas na verdade não deveriam ser chamadas por RCM, pois o RCM na sua forma original, tal como consagrado na obra de Stanley Nowlan e Howard F. Heap, está padronizado pela norma SAE JA-1011 - "Critérios de Avaliação de Processos de Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM)", SAE (1999). E esta padronização ocorreu justamente para definir o que pode ou não ser chamado "RCM", o que envolve considerável rigor aos requisitos e definição dos objetivos pretendidos.

Para Smith e Hinchcliffe (2004), os resultados expressivos apresentados pelo EPRI e que deram origem a onda de simplificações do RCM, foram baseados em uma comparação de custos das análises de três métodos simplificados contra os custos médios das análises de RCM clássicas realizadas anteriormente em sistemas grandes e complexos, porém restrições de recursos teriam impedido uma comparação mais direta nos mesmos sistemas. E, portanto, para ele, não há nenhuma evidência sólida disponível para suportar estes resultados. Entretanto, apesar das críticas a simplificação do RCM, Smith e Hinchcliffe (2004) também apresentam em seu trabalho dois novos métodos simplificados; *Abbreviated Classical RCM Process* e *Experience Centered Maintenance (ECM)*.

Muitas organizações e autores têm apresentado estas técnicas de RCM simplificado sob a máxima de que é possível “alcançar 80% dos benefícios com apenas 20% do esforço” de um RCM formal. Disseminando uma má fama de que o RCM é um processo demasiadamente demorado e um "mostro devorador de recursos". Um exame mais detalhado desses projetos fracassados de aplicação do RCM formal, muitas vezes revela que muito mais do que devido a qualquer problema intrínseco a forma como o RCM se processa, a "culpa" na verdade recai sobre as deficiências organizacionais, tais como: objetivos mal definidos do projeto, recursos insuficientes ou inadequados, falta de treinamento, ou planejamento de projetos e gestão inadequada (CLARKE, 2001).

Apesar das argumentações contrárias, os métodos simplificados ou otimizados do RCM, entre outras variações, vêm sendo largamente aplicados e readaptados em diversos setores e empresas ao longo dos anos, vêm acompanhando a evolução da função manutenção. E, como podem ser observados em alguns dos trabalhos apresentados, resultados considerados como positivos vêm sendo relatados e publicados na literatura.

2.5 A Otimização do Programa de Manutenção (PMO)

Este conceito de RCM simplificado denominado Otimização do Programa de Manutenção (PMO, do inglês: *Preventive Maintenance Optimization*), segundo Darragi e Georges (2004), tem sido amplamente experimentado. O PMO vem se desenvolvendo ao longo dos anos e tem sido adotado de maneiras diferentes principalmente pela indústria nuclear, atualmente este conceito é considerado como um dos métodos mais viáveis para a melhoria da confiabilidade em equipamentos, pois é mais simplificado e apresenta resultados expressivos e mais rápidos, bem como utiliza-se de estratégias mais específicas que atendem às necessidades e exigências da indústria nuclear. Enquanto o RCM clássico baseia-se em análises funcionais e sistemáticas para construção de um novo PMP, o conceito PMO é dirigido para a análise e otimização do PMP existente e pode ser aplicado apenas em modos de falha dominantes, otimizando tarefas específicas do PMP.

Para Johnson (2001), a PMO é uma abordagem mais otimizada de RCM simplificado. Pois este, em sua essência, realiza as análises por sistemas, subsistemas ou componentes, identifica ESCs críticos, recomenda tarefas proativas e, em seguida, compara suas recomendações com as tarefas já existentes no PMP quando, a partir de então, as recomendações finais são feitas. Diferentemente do conceito RCM, o PMO começa na extremidade oposta, ou seja, a partir do PMP existente, que é desdobrado em tarefas. Estas tarefas são identificadas e relacionadas quanto às falhas para as quais estão destinadas a prevenir, seus dados são levantados e analisados para que as devidas alterações em tarefas sejam feitas conforme as recomendações finais do projeto PMO.

O PMO utiliza muitas (se não todas) as etapas do processo RCM, porém com menos revisão em profundidade. Um projeto PMO pode ter um objetivo específico como, por exemplo, otimizar os Planos de Manutenção (PM) de um determinado tipo de ESC, independente do sistema ao qual pertença. Desse modo, são desenvolvidas práticas que “Cruzam” através dos sistemas, revisando de forma padronizada os PMs de um determinado tipo de equipamento. Entretanto, são considerados para cada ESC individualmente, suas condições de serviço, determinações de criticidade, taxa de utilização, ou seja, seu contexto operacional (IAEA, 2008).

Quadro 2 - Estratégia PMO sobre equipamento específico

Sistemas:	Sistema X	Sistema Y	Sistema Z
Equipamentos E Componentes	Motor Tipo1	Válvula 2 vias	Selo da Bomba
	~~Motor Tipo2~~	Solenoides	Bomba alta pressão
	Bomba de dreno	~~Motor Tipo2~~	Bomba volumétrica
	Válvula 3 vias	Sensor de nível	Manômetro
	Retentor do eixo	Bomba de Recalque	~~Motor Tipo2~~
	Anel de vedação	Correla em “V”	Panel de comando
	Gaxetas	Atuador da válvula	Inversor de frequência
	...	...	...

Fonte: Autoria própria

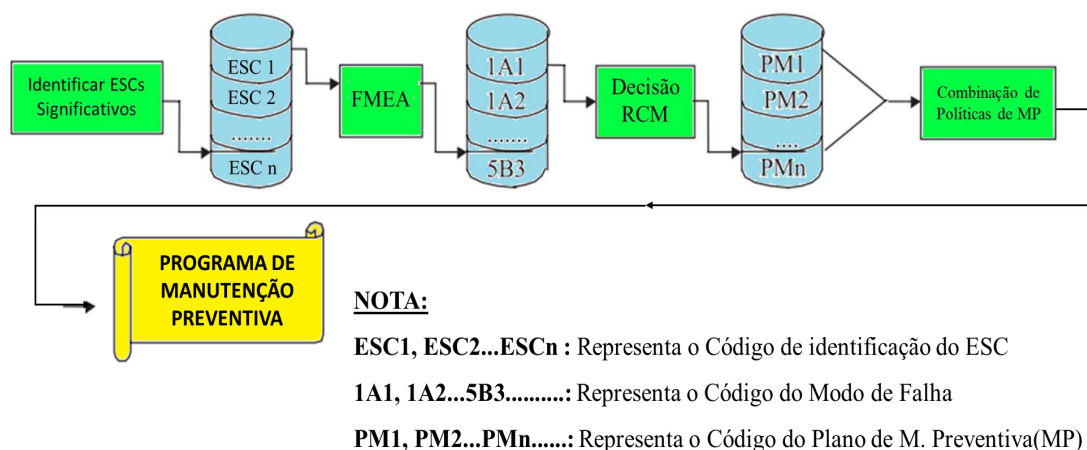
No Quadro 2, por exemplo, um projeto PMO que tem por objetivo otimizar os Planos de Manutenção (PMs) de um determinado “Motor tipo 2”, pode ser aplicado sobre cada motor individualmente, independente do sistema ao qual pertença. E não sobre uma variedade de ESCs, sistema após sistema (“Sistemas X, Y e Z”). Deste modo, ganha-se dinamismo e objetividade no processo PMO, pois as tarefas PMs referentes a um único tipo de motor podem ser padronizadas e analisadas com maior foco. Entretanto, considerando o contexto operacional de cada motor na especificação de tarefas.

Um novo projeto RCM clássico não é indicado quando já existe uma implantação RCM realizada previamente na planta ou quando se pretende redefinir Planos de Manutenção para equipamentos típicos e rotineiros da planta, tais como: bombas, motores, válvulas, cilindros hidráulicos, etc. Pois é muito desgastante passar por todo o processo de análise se já são conhecidos em detalhes estes equipamentos e seus modos de falha (IAEA, 2008).

Para Darragi e Georges (2004) e para Cheng et al., (2008), o processo RCM, de um modo geral, começa com a identificação dos limites dos sistemas, funções e padrões de desempenho, modos de falha, causas e efeitos, criticidade de componente e se conclui com recomendações de manutenção proativas e comparação de tarefas. Tudo em uma abordagem prática que pode ser resumida basicamente em três passos essenciais, conforme Figura 4.

- 1- Análise funcional e Identificação dos ESCs Significativos;
- 2- Análises dos Modos de falha e Efeitos (FMEA);
- 3- Seleção de estratégias de manutenção por meio da lógica de decisão.

Figura 4 - Processo RCM resumido



Fonte: Cheng et al. (2008)

Na primeira etapa da figura, são identificados os ESCs significativos com base na sua função prestada ao sistema. Na área nuclear esta etapa, em geral, tem sido cumprida com base nas funções críticas de segurança nuclear. Que são as funções dos sistemas que asseguram, entre outras, a integridade das barreiras físicas e a refrigeração do núcleo do reator. Os modelos de Análise Probabilística de Segurança (APS)⁴ têm sido usados para apoiar estas escolhas. Para o RCM, além dos equipamentos relacionados à segurança, também são selecionados os ESCs cujas funções estejam relacionadas a possibilidades de perda de potência e/ou afetam a produtividade das plantas.

Na segunda etapa, são realizadas através do FMEA as análises dos modos de falha, causas e efeitos pelos quais o ESC pode falhar em cumprir suas funções conforme os padrões de desempenho estabelecidos, com base entre outros nos históricos de manutenção, manuais de fabricante e condições de operação.

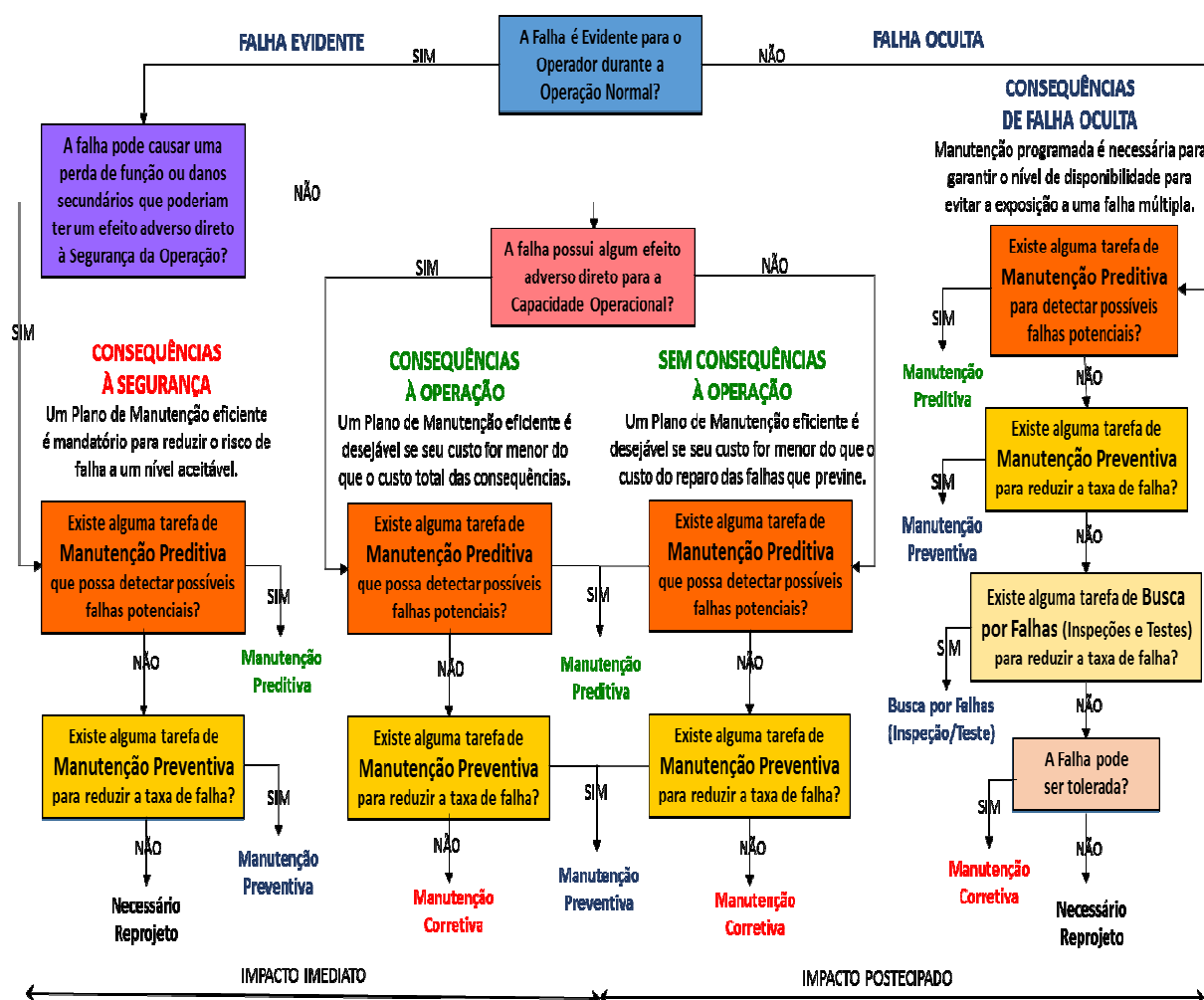
Na terceira etapa, são analisadas e selecionadas as estratégias de manutenção proativas que melhor possam mitigar cada um dos modos de falha levantados, atuando em suas causas

⁴ O APS é um programa permanente de monitoramento do risco às funções críticas de segurança da planta. Através de uma relação específica de ESCs, basicamente, o APS faz cálculos e controla as probabilidades de possíveis eventos indesejáveis à segurança com base na indisponibilidade (isolada ou associada) destes ESCs relacionados à segurança.

raízes. Nesta etapa, uma lógica de decisão é normalmente utilizada para auxiliar quanto à melhor estratégia de manutenção que deve ser adotada para cada modo de falha e, deste modo, criando um “mix” de tarefas com Planos de Manutenção (PMs) com diferentes políticas ou estratégias que formam o PMP (BALABA; IBRAHIM; GUNAWAN, 2012).

A Figura 5, ilustra uma Árvore Lógica de Decisão (LTA, do inglês: *Logic Tree Analysis*), que através de um fluxograma recomenda tarefas apropriadas com base nas características da falha funcional sob análise, podendo esta ser uma falha evidente; cujo efeito do modo de falha é facilmente perceptível ao operador do equipamento, ou uma falha oculta; cujo efeito do modo de falha não é aparente ao operador do equipamento, sendo percebido apenas quando a função do ESC é solicitada.

Figura 5 - Árvore Lógica de Decisão (LTA) para seleção de tarefas



Fonte: Johnson (2004)

Em seguida os modos de falha e seus efeitos são avaliados quanto às suas consequências à segurança da operação, sua taxa de falha e a busca pela melhor estratégia de manutenção. Deste modo, a LTA tem como saídas: tarefas de manutenção preditivas, preventivas, tarefas de inspeção, rondas e testes funcionais. Quando não são encontradas estratégias que possam atenuar as consequências da falha, a LTA recomenda o reprojetado do ESC. Ou ainda, para os casos em que as consequências da falha são consideradas insignificantes ou toleráveis, a LTA recomenda a Manutenção Corretiva, ou seja, “Rodar até falhar”.

É importante destacar que em todas as análises da LTA, deve ser considerada a razão custo-benefício, em linhas gerais os custos envolvidos no plano de manutenção, no mínimo, não devem ser maiores que os custos relativos aos efeitos ou consequências das falhas, caso estas venham a ocorrer, exceto para os casos que envolvem fatores críticos à segurança da operação.

“O processo PMO envolve avaliação de falhas de equipamentos, tanto históricas quanto previstas, os custos associados às perdas de produção e aos custos de manutenção corretiva, incluindo todos os custos de trabalho e materiais relacionados...” (KEE et al., 2012, p.348).

Por experiência, segundo Darragi et al. (2005), cerca de 60% do tempo necessário para realizar uma análise RCM clássico é dedicado a dois passos principais:

- a) Análise dos Modos de Falha e Efeitos (FMEA), onde é feita a identificação dos modos pelos quais os equipamentos podem falhar em cumprir sua função e os efeitos ou consequências desta falha;
- b) Árvore Lógica de Decisão (LTA), onde são selecionadas as tarefas manutenção mais viáveis e efetivas para evitar modos de falha de componentes críticos que possam causar falha funcional do ESC.

O processo PMO vem ganhando mais popularidade, pois os custos de um projeto caem significativamente com base na otimização das análises funcionais e de FMEA, principalmente se comparado ao método RCM clássico. Neste processo simplificado, a etapa de análise funcional é simplificada para se concentrar apenas em sistemas com funções importantes. Na verdade, o processo RCM clássico funciona trabalhando o FMEA para todas as funções dos sistemas, independentemente da sua importância, enquanto na abordagem RCM simplificado, apenas as funções importantes são analisadas. Desta forma, o tempo

utilizado para realizar a análise FMEA para chegar a uma estratégia de manutenção é poupado.

Para conseguir maior efetividade na fase de análise da Árvore Lógica de Decisão, em que são determinadas as tarefas PM mais adequadas, a indústria nuclear tem desenvolvido o conceito de "Modelo Padrão" para os Planos de Manutenção, muitas vezes utilizados através de interfaces padrões em seus *Softwares* de gerenciamento da manutenção, que normalmente são específicos para um determinado componente ou tipo de equipamento. Deste modo, esta abordagem simplificada de RCM proporciona grandes economias adicionais em relação ao processo RCM clássico (DARRAGI; GEORGES, 2004).

Na fase de desenvolvimento de um Modelo Padrão, várias características dos equipamentos são consideradas, tais como: taxa de utilização, ambiente operacional de serviço e a importância funcional do ESC. Cada modelo padrão recomenda tarefas apropriadas para um determinado tipo de ESC, como por exemplo, tarefas de manutenção preditiva, preventivas e tarefas de inspeção, ronda, testes, entre outras. Esta abordagem proporciona grandes economias adicionais (DARRAGI et al., 2005; EPRI, 2009).

O Modelo Padrão para o Plano de Manutenção é classificado conforme sua taxa de utilização como: "operação em prontidão" ou "operação contínua". As condições de serviço, como operação em: "ambiente abrigado" ou "exposto à intemperes". Estes fatores podem ter uma influência sobre os intervalos de tarefa ou na necessidade de uma tarefa de Manutenção Preventiva (EPRI, 1998).

O PMO atingiu sua maturidade após o início do projeto Base de Dados de Planos de Manutenção (PMBD, do inglês: *Preventive Maintenance Basis Database*) do EPRI, ilustrado na Figura 6. Nos últimos 20 anos, a indústria nuclear tem desenvolvido seus Modelos Padrões de manutenção em cerca de 80 grandes componentes ou equipamentos considerados essenciais em termos de segurança e geração de energia. Estes modelos padrões foram elaborados através de um trabalho em equipe envolvendo fabricantes, pessoas da indústria nuclear e especialistas do EPRI e, deste modo, vem compartilhando a experiência operacional, integrando e disponibilizando uma Base de Dados destes equipamentos para consulta e apoio nas análises e elaboração de planos de manutenção para as usinas nucleares em todo o mundo (PANSRISU, 2010; EPRI, 2002a, 2002b, 1998; HEO et al., 2014).

Figura 6 - *Software PMBD®* para acesso aos Modelos Padrões do EPRI



Fonte: EPRI (2009).

O projeto PMBD foi desenvolvido em 1998 pelo EPRI. A equipe de realização do projeto foi constituída de consultores do EPRI, especialistas de manutenção e fabricantes. Eles vêm compilando informações de 49 usinas nucleares americanas ao longo de 20 anos sobre suas experiências na área nuclear. O banco de dados PMBD® recomenda tarefas PM ideais, seus intervalos de acordo com: Criticidade, condições de serviço e ciclos de trabalho. Oferece também uma base de dados extensiva, que vem ajudando nas análises dos mecanismos de degradação, fatores de estresse e temporização de falhas que vem apurando oportunidades preventivas, entre outras.

No capítulo 4 é apresentado em maior profundidade o método de aplicação de um projeto PMO, onde o processo de aplicação é explicado etapa por etapa, tal qual deve ser seguido posteriormente no capítulo 5 em uma aplicação prática realizada sobre o Sistema de Injeção de Alta Pressão (JND) da Usina Angra 2.

3. A empresa ELETROBRAS ELETRONUCLEAR

A Eletronuclear, criada em 1997, é uma empresa de economia mista subsidiária da Eletrobras. Sua geração corresponde a aproximadamente 3% da energia elétrica consumida no País e é distribuída pelo sistema elétrico interligado nacional e chega aos principais centros consumidores do país. Essa energia corresponde, por exemplo, a mais de 30% da eletricidade consumida no Estado do Rio de Janeiro, estado onde está localizada a Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA), na cidade de Angra dos Reis (ELETRONUCLEAR, 2015b).

Figura 7 - Complexo CNAAA, Usinas Angra 1, Angra 2 e Angra 3



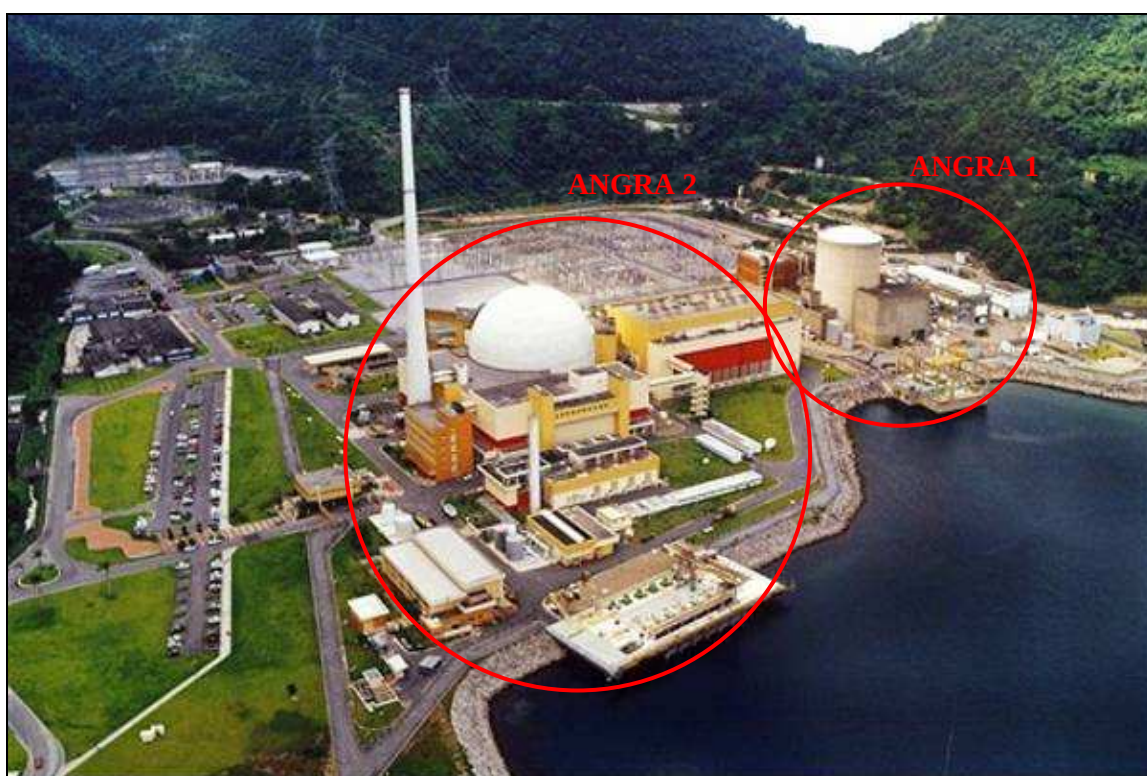
Fonte: ELETRONUCLEAR (2015b)

A Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA), ilustrada na Figura 7 possui três usinas de geração: Angra 1, Angra 2 e Angra 3. Atualmente estão em operação as Usinas Angra 1, com capacidade para geração de 640 MW elétricos. A Usina Angra 2, com geração de 1350 MW elétricos. A Usina Angra 3, que está em fase de construção, possui as mesmas características construtivas de Angra 2 (exceto pela incorporação de avanços tecnológicos mais atuais), e tem previsão para gerar 1405 MW elétricos (ELETRONUCLEAR, 2015b).

3.1 A Usina Nuclear Angra 2

A Usina Angra 2, ilustrada na Figura 8 (ao centro), e ao lado de Angra 1 (a sua direita), é a segunda usina nuclear a entrar em operação comercial no Brasil. Angra 2 é fruto do acordo nuclear entre Brasil e Alemanha, assinado em 1975, começou a ser construída em 1981, mas teve o ritmo das obras desacelerado a partir de 1983, devido à crise econômica que assolava o país naquele momento, parando de vez em 1986. A construção da unidade é retomada no final de 1994 e concluída em 2000.

Figura 8 - CNAAB – Usinas Angra 2 e Angra 1



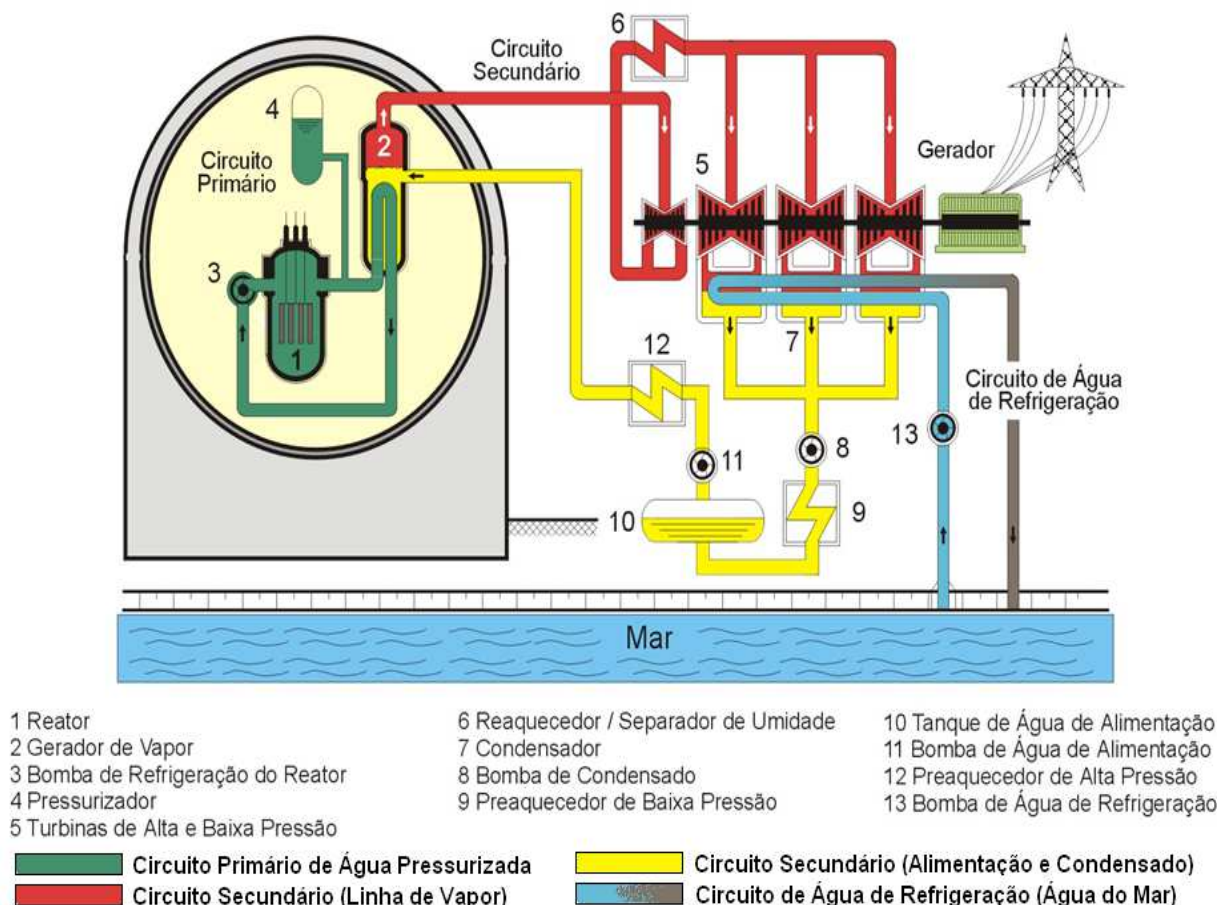
Fonte: ELETRONUCLEAR (2015b)

O desempenho da Usina tem sido exemplar desde o início de sua operação, estando entre as mais eficientes do mundo. Sua entrada em operação no final de 2000 e no início de 2001 foi providencial para o País, pois coincide com a crise hídrica e o racionamento de energia ocorrido naquele momento, especialmente na região Sudeste que é o maior centro de consumo do país. Pois permite economizar água dos reservatórios das hidrelétricas brasileiras, amenizando assim maiores consequências (ELETRONUCLEAR, 2015b).

3.1.1 Funcionamento básico da Usina Angra 2

A Usina Angra 2, conta com um reator de água pressurizada do tipo PWR (*Pressurized Water Reactor*), é concebido com tecnologia alemã da empresa Siemens/KWU (atual Areva NP), e seu funcionamento básico é ilustrado esquematicamente pela Figura 9.

Figura 9 - Reator à água pressurizada tipo PWR



Fonte: ELETRONUCLEAR (2015a)

O líquido de refrigeração do circuito primário (linha verde) com água desmineralizada é bombeado sob alta pressão para dentro do núcleo do Reator (1), onde é aquecido pela energia liberada pela fissão nuclear dos elementos combustíveis de urânio, deste modo a energia nuclear é convertida em energia térmica. A água aquecida flui através do circuito primário para o Gerador de Vapor (2), onde a energia térmica do circuito primário é transferida para o sistema secundário através de trocadores de calor, que por sua vez provoca uma evaporação, gerando um fluxo de vapor no sistema secundário (linha vermelha) sem que haja qualquer mistura ou contaminação entre o líquido refrigerante do primário para o secundário, apenas troca térmica.

O vapor gerado gira um conjunto de Turbinas de alta e baixa pressão (5) que convertem a energia térmica do vapor em energia cinética através do eixo da turbina girando o Gerador Elétrico, que por sua vez converte esta energia cinética em energia elétrica, a energia gerada segue para as linhas de transmissão da rede nacional. O vapor após passar pelas Turbinas (5) é então conduzido ao Condensador (7) onde é resfriado pelo circuito de refrigeração com água do mar (linha azul fria e cinza aquecida) através de trocadores de calor e, é condensado novamente em água de alimentação (linha amarela). Basicamente desta forma, fecha-se o ciclo termodinâmico da Usina.

Algumas características de projeto da Usina Angra 2:

- Potência Térmica do Reator: 3771 MW
- Potência Elétrica Bruta: 1350 MW
- Potência Elétrica Líquida: 1280 MW
- Rendimento Térmico: 35,8%

3.1.2 Controle e segurança de um reator PWR

A energia nuclear produzida no reator é liberada na forma de calor e radiação ionizante através da reação de fissão do núcleo dos átomos de Urânio. As fissões nucleares dos átomos de Urânio liberam nêutrons livres que, moderados pela água, se chocam com outros núcleos de átomos de Urânio e, assim, são também fissionados liberando mais nêutrons em um processo de reação nuclear em cadeia, estabelecendo um fluxo neutrônico dentro do núcleo do reator. Os elementos combustíveis de Urânio são estruturas constituídas de varetas que contém as pastilhas de Urânio enriquecido, que por sua vez estão dispostos geometricamente e são arranjados dentro do núcleo de modo a favorecer a reação nuclear em cadeia.

A taxa de reatividade nuclear ideal é mantida através do controle do fluxo neutrônico dentro do reator. Isso é feito através de inserção ou remoção de barras de controle compostas por elementos absorvedores de nêutrons nos elementos combustíveis, ou seja, ao inserir mais as barras de controle nos elementos combustíveis, o fluxo neutrônico é reduzido e a reação nuclear por sua vez é reduzida. O controle da reação também é feito através da concentração de Boro (que é um elemento absorvedor de nêutrons) que é dissolvida na água do circuito primário, ou seja, aumentando a concentração de boro na água do primário, reduz o fluxo neutrônico e, assim, a reação nuclear.

Contudo, além do controle da reatividade no nuclear, para uma operação segura da Usina é também fundamental a constante remoção da carga térmica gerada pelo reator no circuito primário, para que não haja um superaquecimento e/ou sobrepressão de tal intensidade que poderia levar a um acidente nuclear. Por este motivo, em operação normal, o circuito secundário tem fundamental importância na remoção do calor do circuito primário. Todo o sistema de controle do reator é computadorizado e extremamente preciso, dividido em três níveis independentes de segurança: Sistema de Controle (JS), que exerce ações de controle em operação normal; o Sistema de Limitação (JT), que monitora e atua em caso sejam excedidas limitações operacionais específicas; e Sistema de Proteção do Reator (JR), que assume todo o controle e promove o imediato desligamento seguro do reator.

Para o caso de acidentes ou situações que atentem contra as funções de segurança da planta, o Sistema de proteção do reator (JR) precisa contar com o bom funcionamento de uma série de sistemas auxiliares de emergência. Estes sistemas têm por objetivo realizar o desligamento seguro do reator e a remoção de calor residual do circuito primário. Neste trabalho, é tomado como exemplo as bombas e válvulas pertencentes ao Sistema de Remoção de Calor Residual (JN), que em uma situação de emergência tem por função básica a injeção a alta pressão de água desmineralizada com alta concentração de Boro dentro do núcleo do reator de modo a remover a reatividade e carga térmica residual do núcleo do reator.

Especificamente, é tomado como exemplo para aplicação do método PMO, as bombas do Sistema de Injeção de Segurança (JND), que pertence ao Sistema JN. Estas bombas e o sistema JND são apresentados e melhor explicados no capítulo 5, onde é realizada a aplicação prática do método PMO, com objetivo de otimizar os PMs destas bombas. Estas bombas foram escolhidas como exemplo caso deste trabalho em razão de sua relevância para a segurança da Usina, seus custos elevados de manutenção no PMP de Angra 2 (incluindo contratação de mão de obra estrangeira) e, também, por se tratar de um equipamento que trabalha parado em regime de prontidão, ou seja, com características de falha oculta e, assim, tornando-se didaticamente interessante para exemplificar as abordagens do método.

3.1.3 Considerações determinísticas de segurança

O reator nuclear de Angra 2 possui, por concepção de projeto, quatro sistemas ou circuitos primários redundantes completos, chamados por Redundâncias. Cada Redundância conta com todos os demais sistemas de apoio da Usina (sejam eles sistemas auxiliares, de alimentação elétrica ou emergência), separados fisicamente e operando de forma independente entre si, por Redundância.

Compreende-se por falha simples uma ocorrência que faz com que certos componentes ativos ou passivos dos sistemas de segurança percam a capacidade de cumprir sua função com relação ao controle de um determinado acidente. Trata-se de uma ocorrência casual que não surge como consequência do acidente nem é conhecida antes deste ter acontecido.

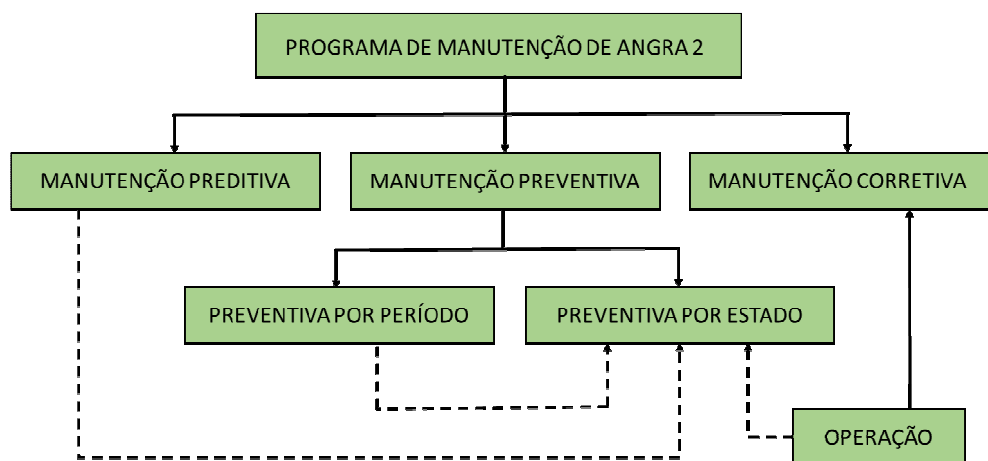
A Usina Angra 2 está concebida para atender o critério de segurança definido como Critério de Falha Simples (CFS). Os sistemas de segurança instalados para controlar determinados acidentes, em caso de necessidade, devem poder preencher as funções de segurança que lhes são exigidas, ainda que no momento do desencadeamento ou durante a sequência de medidas necessárias surja uma falha simples. De acordo com o CFS, é exigido que o projeto tenha uma redundância simples, isto é, deve-se instalar um “trem” ou uma “redundância” a mais do que seria preciso para o caso de necessidade. Fala-se também em um projeto “n + 1”, no qual “n” designa a quantidade de trens necessários.

É deste critério (CFS) que resulta que o sistema JN deve ser constituído fundamentalmente de “trens” redundantes. Além disso, uma vez que é exigido que certos componentes do sistema JN possam ser retirados de funcionamento para reparos, inclusive durante a operação em potência, chega-se a um projeto que se configura como “n + 2”, deste modo, cada uma das quatro redundâncias do sistema JN tem uma capacidade equivalente de 50% em relação às suas funções operacionais. Ou seja, cada sistema continua atendendo 100% de suas funções operacionais, mesmo com a indisponibilidade de duas de suas quatro redundâncias, seja uma indisponibilidade causada por falha simples e/ou outra por motivo de manutenção programada (ELETRONUCLEAR, 2001).

3.2 O Programa de Manutenção de Angra 2

O PMP de Angra 2 está oficializado desde 2005 pela Gerência de Manutenção Integrada da Usina (GMI.O), e é aplicável a todas as Estruturas, Sistemas, Componentes e Equipamentos (ESCs) da Usina Angra 2, possuem relevâncias operacionais e de segurança. O Programa de Manutenção de Angra 2, ilustrado pelo fluxograma da Figura 10, é baseado em 3 tipos básicos de manutenção: Manutenção Preditiva, Manutenção Preventiva e Manutenção Corretiva. A Manutenção Preventiva, por sua vez, pode ser ainda dividida em Preventiva por Período ou Preventiva por Estado, também chamadas por Manutenções Eletivas, como é explicado a seguir (ELETRONUCLEAR, 2005).

Figura 10 - Programa de Manutenção de Angra 2



Fonte: ELETRONUCLEAR (2005)

3.2.1 Manutenção Preventiva

Trata-se de ações de manutenção planejadas, periódicas e preventivas tomadas para manter o equipamento dentro de suas condições de operação de projeto, bem como para estender o quanto possível sua vida útil nestas condições. O PMP prevê as atividades de manutenção preventiva, inspeções e testes baseados em períodos de tempo ou ciclos nos ESCs da Usina, previamente selecionados e cadastrados no sistema de gerenciamento da manutenção (*Software MAXIMO®*), que é apresentado mais adiante. A Manutenção Preventiva de Angra 2 é subdividida em:

- Preventiva por período, realizada em períodos de tempo pré-determinados;
- Preventiva por estado (Eletivas), com base na condição do ESC.

Nas atividades de Manutenção Preventiva por período, também chamada apenas por Manutenção Preventiva, o intervalo de tempo para a manutenção é pré-determinado em termos de dias, semanas ou ciclos corridos, ou também, em função do tempo que o ESC esteve de fato em uso, ou seja, desconsiderando o tempo que esteve parado em prontidão ou indisponível por qualquer motivo.

Estes intervalos ficam estabelecidos nas tarefas com Planos de Manutenção (PMs) que são vinculados para cada ESC considerado no PMP. As definições dos intervalos têm normalmente por base: os dados históricos de manutenção; recomendações de fabricantes, especialistas e projetistas; informações da experiência operacional, nos modelos padrões da base de dados do EPRI; códigos ou normas operacionais.

As atividades de Manutenção Preventiva baseada na Condição, também chamadas por Manutenção Eletiva, são geradas a partir de inspeções programadas, ronda de operação ou “*Walkdown* de Engenharia” (inspeções de campo da Engenharia de Sistemas), de monitoramentos de Manutenção Preditivas (é comentada adiante) e a partir de Tarefas de busca por falha como, por exemplo, testes funcionais periódicos. Enfim, tarefas que tem por objetivo detectar quaisquer defeitos ou anormalidades nos ESCs e, assim, evitar que um defeito venha a se tornar uma falha funcional.

As tarefas de manutenção eletivas (preventivas com base na condição) são intervenções programadas a partir da detecção de uma anormalidade na condição do ESC, mas que não necessariamente exija uma intervenção ou tarefa de Manutenção Corretiva imediata, pois ainda não há falha ou perda da função do ESC. Manutenção Eletiva é qualquer trabalho de manutenção em um ESC, nos quais seja identificada degradação real ou potencial de pouca gravidade, que não ameace os padrões de desempenho e nem as funções de projeto. Uma vez que necessárias, as tarefas de Manutenção Eletiva devem ser abertas através de Solicitações de Ordens de Trabalho (SOTs) no Sistema de Gerenciamento da Manutenção (*Software MAXIMO®*) da Usina Angra 2. (ELETRONUCLEAR, 2005).

3.2.2 Manutenção Preditiva

A Manutenção Preditiva baseia-se no diagnóstico e monitoração periódica ou contínua de parâmetros físicos mensuráveis com a finalidade de detectar a degradação do componente de forma que uma manutenção planejada necessária seja executada antes da falha do equipamento.

Muitas tecnologias de manutenção preditiva são utilizadas na indústria nuclear. A seleção das técnicas que são utilizadas em Angra 2 é feita através de uma análise de custo benefício pela gerência da Usina. Estas quatro tecnologias são amplamente utilizadas e comprovadas na indústria nuclear, e já estão plenamente implantadas em Angra 2:

- Diagnóstico e Monitoração de Vibração: técnica utilizada para monitoração e análise dos equipamentos rotativos da Usina. Esta técnica é usada para analisar parâmetros de deslocamento, velocidade e aceleração, com o intuito de prever a necessidade de correção de problemas, tais como: mancais defeituosos, desalinhamentos, desbalanceamentos, entre outros.
- Análise de Óleo Lubrificante, Ferrografia e Análise de Graxa: técnicas utilizadas para detectar desgastes anormais e degradação de lubrificantes.
- Termografia infravermelha: técnica baseada no fato de que toda superfície com temperatura acima do zero absoluto emite radiação infravermelha que varia com sua temperatura. Inspeções termográficas podem ser realizadas em equipamentos que produzam calor, tais como: motores, disjuntores, baterias, transformadores, painéis elétricos, além de áreas com isolamento térmico para monitorar altas resistências, conexões frouxas ou falhas no isolamento. Adicionalmente, esta técnica pode ser utilizada para localizar entrada de ar no condensador e vazamentos em válvulas.
- Análise da potência dos Motores de Válvulas Moto-Operadas (MOV): técnica baseada na análise da curva de potência do motor ao longo do curso da válvula. Através da curva de potência do motor que aciona as válvulas moto-operadas, é possível identificar problemas de torque de abertura e fechamento das válvulas ao longo do curso, os coeficientes de fricção da válvula, tempo decorrido para execução de cada ação, checagem dos ajustes dos limites de torque, entre outras.

Durante o processo de análise de dados os analistas de cada tecnologia preditiva fazem a comparação entre os dados adquiridos recentemente com os dados anteriores para detectar qualquer degradação nas condições do equipamento. Se a degradação indicar que a integridade do equipamento pode ser comprometida, ou se os critérios de aceitação não estiverem mais sendo cumpridos, uma Solicitação de Ordem de Trabalho (SOT) para Manutenção Eletiva e/ou Manutenção Corretiva deve ser aberta no Sistema de Gerenciamento da Manutenção (*Software MAXIMO®*) da Usina Angra 2.

A frequência com que as atividades de manutenção preditiva são realizadas nos ESCs depende de vários fatores, tais como: requisitos de regulamentos ou especificações técnicas, recomendações de fabricantes, regime de operação contínua ou parado em prontidão, condição de serviço abrigada ou exposta ao tempo e, também, análises técnicas da Engenharia de Desempenho de Sistemas (GDD.O). Adicionalmente, a importância relativa do ESC para a operação geral da Usina pode ser considerada na determinação da frequência apropriada da manutenção preditiva (ELETRONUCLEAR, 2002).

3.2.3 Manutenção Corretiva

A Manutenção Corretiva consiste normalmente no reparo imediato ou programado do ESC, dependendo de sua gravidade, uma vez que ocorra de uma falha funcional do mesmo. Esta estratégia de manutenção é indesejada, e vem sendo minimizada ao longo do tempo com a constante evolução das técnicas de Manutenção Preventivas e Preditivas, uma vez que a perda da função de um equipamento pode paralisar operações importantes da planta.

Entretanto, a Manutenção Corretiva tem uma importante função entre as estratégias de manutenção, para itens não relacionados à segurança ou que não impactam a disponibilidade da planta, ou seja, para os casos em que os benefícios da aplicação da Manutenção Preventiva ou Preditiva descritos anteriormente não compensem seus custos. Assim, ganhos econômicos podem ser obtidos ao se aplicar a estratégia de Manutenção Corretiva por demanda, ou seja, a intervenção só é feita no item quando ocorre a sua falha funcional. Este processo de manutenção corretiva é também conhecido como estratégia do “Rodar até falhar”.

O PMP de Angra 2 adota também este tipo de manutenção para os casos pertinentes, ao ser identificada a necessidade de uma Manutenção Corretiva na planta, uma Solicitação de Ordem de Trabalho (SOT) deve ser aberta no Sistema de Gerenciamento da Manutenção (*Software MAXIMO®*) da Usina Angra 2.

3.2.4 Sistema de Gerenciamento da Manutenção (*Software MAXIMO®*)

O PMP de Angra 2 estabelece uma sistemática computadorizada através do Sistema de Gerenciamento da Manutenção (*Software MAXIMO®*) da empresa IBM (UNITED TECHNOLOGIES, 2015), ilustrado na Figura 11. Este *Software* tem por objetivo facilitar o controle, planejamento, execução e avaliação das tarefas de manutenções do PMP cadastradas no *Software*, além de manter um arquivo histórico das manutenções realizadas em cada ESC, auxiliando o PMP de Angra 2 no sentido de manter a incidência de tarefas de manutenção corretiva a níveis razoáveis e/ou aceitáveis (ELETRONUCLEAR, 2005).

Figura 11 - Software IBM MAXIMO®



Fonte: UNITED TECHNOLOGIES (2015)

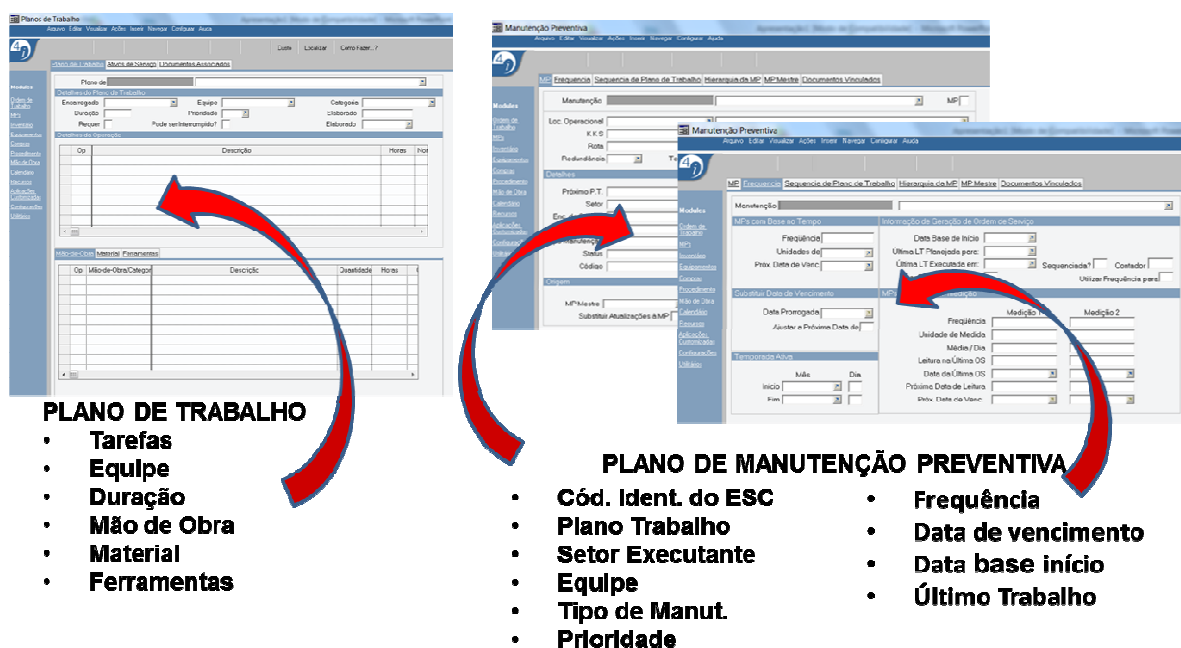
A primeira etapa, após sua instalação, é o cadastramento dos ESC nos bancos de dados do sistema MAXIMO®, com todas as informações técnicas relevantes, bem como a localização de cada ESC dentro da planta.

Em seguida, é feito o cadastro de atividades no MAXIMO®, conforme ilustrado pela Figura 12, esta fase é dividida em duas etapas:

- Criação do Plano de Trabalho (PT), onde são descritas detalhadamente as tarefas e a sequência em que devem ser executadas, os recursos previstos para a execução destas tarefas, tais como mão de obra, duração em homens x horas (hh), ferramentas, equipamentos de segurança, peças sobressalentes e insumos a serem usados no trabalho;

- Criação do Plano de Manutenção (PM); onde são cadastradas todas as tarefas periódicas do PMP, sejam elas atividades de Manutenção Preventivas, Preditivas, Inspeções, rondas de operadores e “Walkdown” da engenharia dos sistemas e Testes periódicos. Para cada PM criado, devem ser inseridas informações como: a Frequência da tarefa, Planos de trabalho (PTs) associados, tipo de manutenção aplicado, setor executante, prioridade da tarefa, entre outras.

Figura 12 - Telas de cadastro dos PTs e PMs no MAXIMO®



Fonte: ELETRONUCLEAR (2014)

Ou seja, nos Planos de Trabalho (PTs) são definidas as tarefas em si, e como devem ser executadas. Enquanto que no PM são estabelecidas, basicamente, as frequências e os parâmetros para a emissão automatizada das SOTs nas datas corretas. O sistema MAXIMO® prevê também outros controles, entretanto, não são de interesse para este trabalho e não serão abordados em maior profundidade.

Para cada Plano de Manutenção (PM) cadastrada no sistema MAXIMO®, deve-se associar um ou mais Planos de Trabalho (PT) previamente cadastrados no sistema. Por exemplo, em um PM de revisão anual de uma determinada bomba podem estar previstos diferentes trabalhos, como um PT de relubrificação da bomba e outro PT de alinhamento da bomba ao motor. A sequência com que estes PTs devem ser executados também pode ser configurada no PM.

Todavia, um mesmo PT também pode estar incluído em diferentes tarefas PM. Por exemplo, um PT que descreve como deve ser feita a lubrificação de um determinado tipo de bomba, pode ser associado a duas diferentes tarefas PM por possuírem diferentes frequências de manutenção. Estas bombas de mesmo tipo e com um mesmo PT podem ter diferentes PMs por terem diferentes frequências de manutenção, devido às diferentes aplicações e/ou as condições de trabalho.

No sistema MAXIMO®, além das SOTs criadas e agendadas automaticamente pelas tarefas PM, também são criadas SOTs manualmente sempre que, a qualquer momento ou após a execução da tarefa PM, for observada a necessidade de programação de uma tarefa de Manutenção Corretiva ou Eletiva.

3.2.5 Programação Semanal de Trabalho (PST)

A programação semanal de trabalho (PST) define quais tarefas devem ser executadas em cada uma das 52 semanas do ano. Cada PST é preparada com uma antecedência de 8 semanas e é aprovada pelos departamentos envolvidos. Após serem aprovadas, as SOTs tornam-se Licenças de Trabalho (LTs), que com auxílio do sistema MAXIMO® são emitidas, assinadas e distribuídas para os setores executantes: Manutenção Elétrica, Mecânica, Instrumentação e Controle, Preditiva, e para os demais departamentos envolvidos em atividades como rondas de inspeção de campo.

Na PST estão contidas todas as SOTs geradas automaticamente pelas tarefas PM, bem como aquelas geradas manualmente (Tarefas Eletivas e Corretivas), sendo esta PST montada seguindo seu grau de prioridades, ilustrado pela Figura 13. Este índice de prioridades é definido pela gravidade das consequências dos modos de falha aos quais pretendem mitigar.

Para toda SOT gerada manualmente deve ser imputado um grau de prioridade de 1 a 5, enquanto que toda SOT gerada automaticamente pelas tarefas PM, já nasce com o grau de prioridade 4 imputado, pois se tratam de tarefas proativas que são programadas periodicamente antes da falha funcional do ESC, por isso não acarretam um risco imediato e, portanto, apesar de importantes não possuem uma urgência na sua execução (ELETRONUCLEAR, 2014).

Figura 13 - Prioridades das SOTs

Prioridades de Solicitações de Ordem de Trabalho (SOTs):	
1 - EMERGÊNCIA:	Trabalho com impacto direto e imediato na saúde e segurança do público e/ou pessoal da Usina, impondo um risco operacional significativo ou que requeira atenção imediata para prevenir a deterioração da condição da Usina para possíveis níveis de insegurança ou instabilidade. Deve ser iniciado imediatamente.
2 - URGÊNCIA:	Trabalho deve ser programado e iniciado dentro de 24h.
3 - RELEVANTE:	Trabalho que deve ser programado e iniciado dentro de duas semanas, com exceção para equipamentos que necessitem acesso à redundâncias, onde o início da tarefa deve ocorrer em até 4 semanas.
4 - PROGRAMÁVEL:	Tarefas que devido a característica do defeito ou falha apresentada, pode ser programada para um início num prazo de até 8 semanas ou anteriormente, de acordo com a disponibilidade de mão de obra, porém seguindo os critérios de preparação de pacotes de trabalho e liberação de serviços.
5 - PEQUENA MANUTENÇÃO:	Tarefas de pequena monta sem substituição de partes ou materiais em equipamentos convencionais e que não requerem testes funcionais ou operacionais após sua execução. Esta classificação deve ser preferencialmente feita pelo Grupo de Controle de Trabalhos e programado quando mais oportuno.

Fonte: ELETRONUCLEAR (2014)

Durante a elaboração das tarefas PM do PMP, bem como na composição de cada PST, uma harmonização das periodicidades das tarefas de manutenção se faz necessária, de forma que as diferentes tarefas referentes a um mesmo ESC possam ser agrupadas de preferência em uma mesma semana ou data, sejam elas tarefas de manutenção elétricas, mecânicas ou instrumentação, reduzindo assim a quantidade de isolamentos e o tempo de indisponibilidade deste ESC. A harmonização das frequências de programação das tarefas envolve certa complexidade devido às inúmeras restrições que precisam ser respeitadas, abaixo seguem algumas destas restrições mais importantes.

Os ESCs que são submetidos a testes periódicos devem ter as datas de execução dos testes harmonizadas com as datas das demais tarefas de manutenção da Usina, de modo a evitar interferências mútuas, desde que as condições operacionais exigidas para os testes sejam as mesmas das tarefas de manutenção. Por exemplo, existem testes que precisam ser realizados com o ESC em funcionamento, enquanto que outras tarefas PM precisam deste ESC parado e isolado, o que impossibilita o agrupamento destas tarefas.

Cada uma das 52 semanas do ano está designada para trabalhos de manutenção da PST divididos em ciclos entre as quatro redundâncias da Usina (Redundâncias 10, 20, 30 e 40), pois por questões de segurança nunca se pode ter duas redundâncias isoladas na mesma semana. Portanto, as tarefas de manutenção também devem ser distribuídas de acordo com as

semanas das Redundâncias, por exemplo, uma tarefa em um ESC pertencente à Redundância 30, deve ser programada preferencialmente (ou obrigatoriamente dependendo do caso) para uma das 13 semanas do ano ($52/4 = 13$) que está designada para trabalhos na Redundância 30.

Quando aplicável, também deve ser respeitado o programa de rotatividade de equipamentos que está estabelecido pela Operação da Usina. Este programa prevê uma rotatividade de operação entre o equipamento que está em uso e o seu respectivo reserva (equipamento *Stand By*), quando existente e instalado.

As atividades com ciclo anual devem ser cadastradas com um período de 336 dias, de forma que sejam excluídas as 4 semanas em que a Usina é desligada para a parada geral de recarga de combustível no núcleo do reator e de modo que a execução de uma tarefa recaia sempre na semana da redundância do ESC em questão. Ou seja, para um ano são considerados 364 dias (múltiplo de 4) descontados os 28 dias referentes às 4 semanas de parada para recarga do combustível ($364 - 28 = 336$ dias). Assim, qualquer tarefa de manutenção com frequência anual é programada a cada 336 dias, pois é considerado apenas o período em que de fato o equipamento operou, e também se garante que a próxima execução estará programada na respectiva redundância a qual o ESC pertence, pois estará respeitado o ciclo das 4 redundâncias.

No período das Paradas Gerais para recarga do combustível também são programados uma série de tarefas em ESC importantes que somente ficam parados e disponíveis para manutenção quando a Usina está completamente parada e desligada. O tempo entre cada Parada Geral para recarga de combustível no núcleo é chamada de Ciclo de Recarga e decorre em torno de 14 meses. Existem tarefas PM cuja frequência é dada em ciclos de recarga, pois consideram estas necessidades de Parada Geral da Usina para serem executadas.

3.3 O Programa de Monitoração da Eficácia da Manutenção (PMEM)

O Programa de Monitoramento da Eficácia da Manutenção (PMEM) é um programa departamentalizado que está subordinado a Gerência de Manutenção Integrada das Usinas (GMI.O) da Eletronuclear. Através da aderência e adequação às normas, regulamentações e boas práticas do setor nuclear internacional, o PMEM vem promovendo na Usina Angra 2 a mesma evolução dos processos de manutenção ocorridos nas usinas nucleares americanas e europeias, através de processos de confiabilidade de equipamentos e manutenção baseada na condição, na busca contínua pela excelência da função manutenção.

Durante o licenciamento da Usina Angra 2, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), uma autarquia federal vinculada ao Ministério da Ciência e Tecnologia e que regulamenta o uso da energia nuclear no Brasil, a partir da Portaria CNEN PR 049 de 28/07/2006 em seu artigo 1º II no item “c”, estabelece a necessidade de implantação de um Programa de Monitoramento da Eficácia da Manutenção (PMEM) como uma das condições para a renovação da Autorização de Operação Inicial (AOI) (VAJGEL, 2009).

O modelo RCM implantado pelo PMEM em Angra 2 é o *Streamlined RCM*. Teve sua introdução iniciada em 2007, juntamente com a criação do PMEM, para sistematizar a análise de dados, revisar e otimizar o PMP já existente e, assim, promover a melhoria contínua na confiabilidade dos sistemas da Usina.

Para tanto, são aplicadas pelo PMEM as estratégias definidas nos documentos IAEA TECDOC-1590 – “Aplicação do RCM para otimização operacional e de manutenção em plantas nucleares” e o IAEA TECDOC-1551 – “Implementação de estratégias e ferramentas para a manutenção baseada na condição em plantas nucleares” (IAEA, 2007, 2008). São aplicados, também, o guia EPRI TR-1020645 – “Guia para monitoramento de sistemas pela engenharia de sistemas.” (EPRI, 2010), e como modelo para o gerenciamento das atividades do PMEM, é aplicado o documento INPO AP-913 – “Descrição de processos de confiabilidade de equipamentos.” (INPO, 2001). Para a seleção de ESCs no escopo do PMEM são adotados os critérios definidos na norma NRC10CFR 50.65^a (NRC, 1996).

Estes são os principais documentos adotados com a finalidade de promover a melhoria contínua dos programas de manutenção, bem como atender as exigências dos órgãos fiscalizadores, nacionais e internacionais, atendendo requisitos das Normas Regulatórias Nacionais CNEN-NE-1.26 e CNEN-NE-1.21 (CNEN, 1991, 1997) e a norma internacional IAEA NS-G-2.6 (IAEA, 2002), e para garantir o cumprimento dos objetivos do PMEM.

3.3.1 Os objetivos do PMEM

Os principais objetivos do PMEM são:

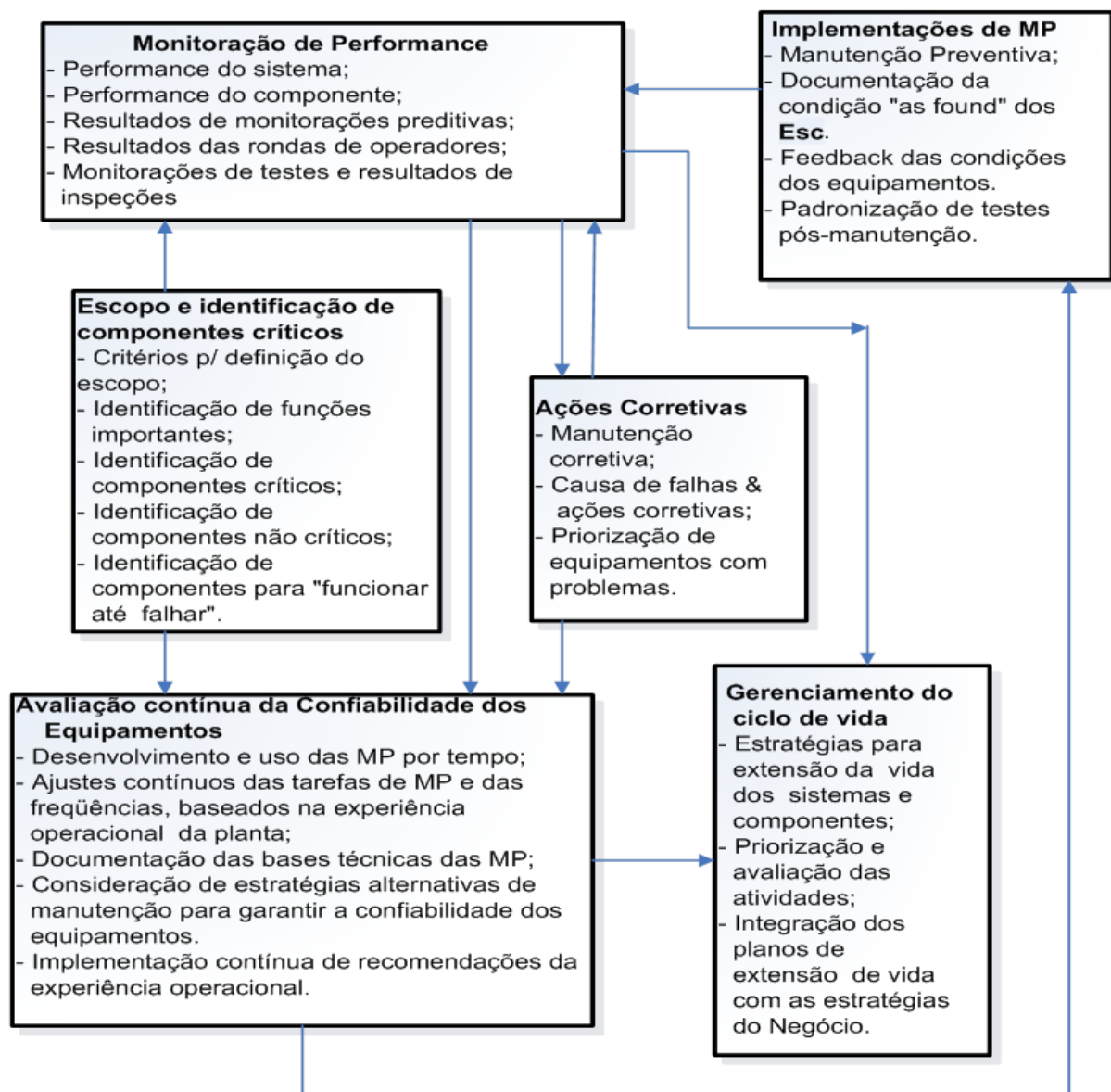
- Assegurar que os ESCs (Estrutura, Sistema ou Componente) pertencentes aos Grupos de Confiabilidade⁵ dos sistemas sejam capazes de cumprir suas funções previstas por projeto;
- Selecionar através dos critérios estabelecidos, quais os ESCs deverão entrar para o escopo de monitoramento do PMEM, distinguindo-os e agrupando-os em trechos funcionais no sistema de controle da manutenção;
- Controlar e compilar a base de dados através de análises dos históricos de manutenção e documentos da experiência operacional para determinação de ocorrências de falha potencial, falha funcional e indisponibilidades dos ESCs, enquadrados no escopo do PMEM;
- Estabelecer padrões de desempenho e atuar na elaboração dos Planos de Manutenção (PMs) para cada ESC do programa, bem como, realizar a reavaliação das tarefas PM estabelecidas;
- Tomar ações corretivas quando o comportamento dos ESCs não for adequado, monitorando a efetividade destas ações definidas no PTs mediante o cumprimento dos padrões de desempenho pré-fixados;
- Monitorar a eficácia da manutenção, mediante a análise do comportamento dos ESCs e seus mecanismos de degradação, buscando um equilíbrio entre Confiabilidade e Disponibilidade;
- Monitorar e divulgar, na forma de relatórios finais de ciclo, os resultados do programa (PMEM), em termos da Confiabilidade e Disponibilidade dos ESCs e seus trechos funcionais controlados;
- Estabelecer os padrões de desempenho a fim de avaliar a eficácia do PMEM, garantindo a confiabilidade e a disponibilidade da Usina, bem como a sua operação segura.

⁵ Grupo de Confiabilidade: Agrupamento de ESCs com as mesmas características funcionais, para os quais a falha funcional de um componente é a falha funcional do Grupo.

3.3.2 Estrutura de gerenciamento das atividades do PMEM

Ao adotar a estrutura de gerenciamento conforme INPO AP913, o PMEM coloca a manutenção da Usina Angra 2 em uma estrutura alinhada com as boas práticas internacionais do setor, representada pelo fluxograma da Figura 14.

Figura 14 - Gerenciamento do PMEM



Fonte: ELETRONUCLEAR⁶ (2007 apud INPO, 2001)

⁶ ELETRONUCLEAR. 2PA-MG 30: Bases Técnicas do PMEM, Angra dos Reis, 2007 apud

INPO - INSTITUTE OF NUCLEAR POWER OPERATIONS. INPO - AP 913: Equipment Reliability Process Description, INPO, Atlanta, USA, 2001.

Esta estrutura de gerenciamento é subdividida em seis grupos de atividades principais, que estão relacionados entre si para melhor monitorar e avaliar as atividades no escopo de responsabilidades do PMEM, estes seis grupos são:

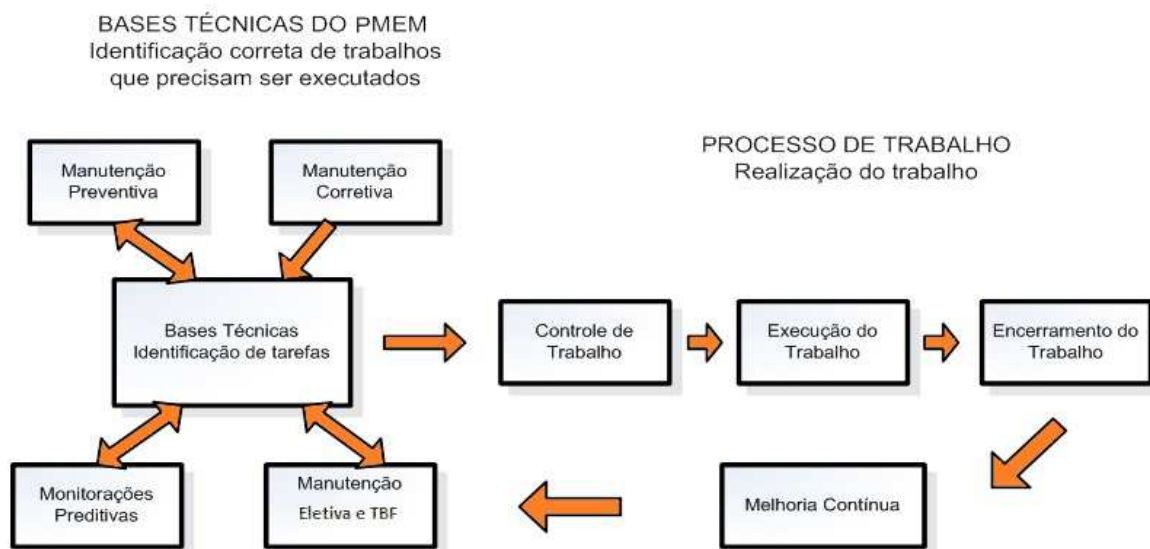
- **Monitoramento de Desempenho:** Consiste nas atividades de coleta de dados de campo quanto ao desempenho dos ESC e os resultados das tarefas PM, Rondas de inspeções e Testes funcionais;
- **Escopo e Identificação de Componentes Críticos:** Consiste na definição de critérios e na seleção de ESC significativos que devem estar no escopo de monitoração do PMEM, pois são ESCs cujos modos de falha impactam a segurança e/ou ao desempenho da planta;
- **Avaliação Contínua da Confiabilidade dos Equipamentos:** Consiste na avaliação dos dados de monitoração e experiência operacional, formação das bases de técnicas do PMEM para a definição das melhores estratégias de manutenção para cada modo de falha de cada ESC no escopo. Neste grupo de atividades são elaboradas as tarefas PM e definidas ou redefinidas as suas frequências. É avaliada a efetividade das tarefas PM, bem como os respectivos PTs associados no atendimento aos padrões de desempenho definidos;
- **Implantação de tarefas PM:** Consiste na formalização e implantação de PMs junto ao PMP de Angra 2. É importante a documentação de todos os dados quanto à condição de estado atual do ESC para posterior avaliação da efetividade das tarefas PM aplicadas;
- **Ações Corretivas:** Conforme tratado anteriormente, a Manutenção Corretiva tem sua importância estratégica, e apesar de ter seu uso minimizado e ser considerada como indesejada em ESCs considerados importantes, falhas funcionais podem ocorrer e uma tratativa para estes casos devem estar previstas. Análises de causas raízes e seus respectivos planos de ação corretiva devem ser formulados e priorizados para evitar que tais problemas voltem a ocorrer;
- **Gerenciamento do Ciclo de Vida:** Consiste basicamente na busca de estratégias que visam a extensão da vida útil dos ESC e da planta como um todo. Esta função visa, também, a continua integração das estratégias de manutenção do PMEM com as estratégias de negócio da empresa, sintonizando e priorizando suas ações neste sentido.

3.3.3 Interfaces do PMEM

O PMEM promove interfaces com outros processos e departamentos da empresa e com sua base técnica pode contribuir para a melhoria de desempenho dos seguintes processos: Gerenciamento do Ciclo de Vida, Gestão de ativos e Planejamento e Controle de Trabalho, que serão melhor detalhados a seguir.

- Gerenciamento do Ciclo de Vida (LCM, do inglês: *Life Cycle Management*), o PMEM possibilita estabelecer estratégias para extensão do ciclo de vida da Usina; avaliar e priorizar as tarefas de manutenção e integrar os planos de extensão de vida com as análises de custo. Possibilitando interface e o alinhamento às estratégias de negócio da empresa;
- A Gestão de Ativos é um tema extremamente importante no atual cenário das usinas nucleares, sendo o PMEM responsável pela otimização do PMP de Angra 2, que possibilita o gerenciamento do consumo e aquisição de sobressalentes; aquisição, aferição e aluguel de ferramentas; qualificação de fornecedores; melhoria na administração de contratos; controle da cotação de fornecedores; melhoria no controle da orçamentação para aquisição de bens e serviços; e no diligenciamento;
- O setor de Planejamento e Controle de Trabalho é responsável, entre outras, pelo acompanhamento dos processos de trabalho, pelo controle do sistema MAXIMO[®], pela harmonização de programação das tarefas e elaboração dos PSTs. Deste modo, contribui significativamente para a formação das Bases Técnicas do PMEM através dos registros e históricos de manutenção, pareceres técnicos de engenharia e experiência operacional, reduzindo assim as ocorrências de falhas funcionais. Este processo permite também obter o “feedback” (informação de retorno) das manutenções realizadas para melhoria contínua dos processos de manutenção. A Figura 15 apresenta o funcionamento deste processo.

Figura 15 - Planejamento e Controle de Trabalho

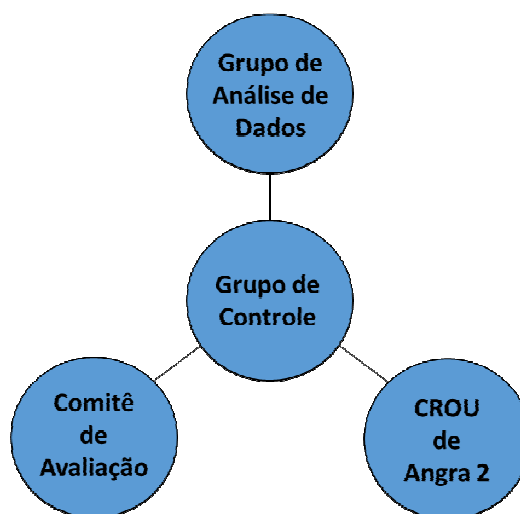


Fonte: ELETRONUCLEAR (2007)

3.3.4 Estrutura de trabalhos do PMEM

A dinâmica de trabalhos do PMEM forma uma ligação multidisciplinar que está dividida entre quatro grupos de trabalho com funções distintas, sendo o Grupo de Controle o articulador das ações, conforme ilustrado na Figura 16.

Figura 16 - Estrutura de trabalhos do PMEM



Fonte: ELETRONUCLEAR (2007)

O Grupo de Controle forma o elo multidisciplinar de trabalhos com o grupo de Análise de dados e o Comitê de Avaliação, levando os resultados para aprovação final na Comissão de Revisão da Operação da Usina (CROU) de Angra 2. O Grupo de Controle é constituído de um corpo técnico composto de um supervisor, dois engenheiros e três técnicos, além de um titular e um suplente de cada departamento envolvido no programa. As principais atividades do Grupo de Controle são:

- a) Controlar e compilar a base de dados do Programa de Monitoração da Eficácia da Manutenção de Angra 2;
- b) Realizar as análises dos históricos de manutenção juntamente com o Grupo de Análise de Dados para determinação das ocorrências de falha potencial, falha funcional e indisponibilidades dos Sistemas no escopo do PMEM de Angra 2.

O Comitê de Avaliação é um grupo multidisciplinar com conhecimento na metodologia do PMEM, cujos participantes apresentam uma formação básica nas áreas de sua especialidade (Manutenção, Operação, Engenharia de Sistemas e Reator e grupo APS - Análise Probabilística de Segurança). Suas principais atividades são:

- a) Assessorar o Grupo de Controle em todas as questões que requerem o estabelecimento de critérios ou tomadas de decisões a nível técnico;
- b) Monitorar, acompanhar e aprovar por consenso toda a documentação gerada nas etapas do desenvolvimento do PMEM.

O Grupo de Análise de Dados é responsável por realizar as análises dos históricos de manutenção e documentos da experiência operacional juntamente com o Grupo de Controle, para determinação das ocorrências de falha potencial, falha funcional e indisponibilidades dos ESCs no escopo do PMEM de Angra 2.

Por fim, a Comissão de Revisão da Operação da Usina (CROU), tem por objetivo assessorar o Chefe da Usina em todas as matérias relacionadas com a segurança nuclear, bem como monitorar continuamente as atividades da operação. A CROU estabelece subcomissões de análises sempre que for necessário revisar, investigar ou discutir quaisquer assuntos específicos, cujo resultado possa ter impactos à segurança nuclear, que servirão como base para deliberações da CROU. Sendo assim, qualquer decisão ou modificação nas estratégias de manutenção que tenham sido discutidas e definidas entre o Grupo de Controle, Grupo de Análise de Dados e Comitê de Avaliação, deverão passar por uma subcomissão de aprovação da CROU, para que possa ser analisada, deliberada e formalizada no PMP de Angra 2.

4. Método de implantação do PMO

A necessidade de aplicação de um projeto PMO normalmente surge em decorrência de ineficiências observadas no PMP, ou pela busca da melhoria contínua do PMP e dos padrões de desempenho na gestão do ciclo de vida dos ativos. Um projeto PMO pode ter como fator de motivação inúmeras possibilidades, como: sobrecarga no PMP, baixa efetividade operacional, taxa alta de falhas, base de dados pouco consistente e ganhos obtidos com projetos RCM anteriores, são os típicos motivos para aplicação de um projeto PMO.

A iniciativa de iniciar um projeto PMO deve ser tomada a partir de uma avaliação prévia quanto sua viabilidade e, normalmente, é feita considerando sua contribuição para os objetivos estratégicos da organização, avaliando a importância deste novo projeto nos âmbitos:

- Da aplicação; se é aplicável ao problema observado no PMP em questão;
- Eficiência; se oferece real ganho de eficiência em relação às tarefas existentes;
- Riscos intrusivos; se a nova tarefa oferece maior risco de falhas inseridas;
- Custo-benefício; os custos envolvidos não devem superar o benefício ganho;
- Frequência das atividades; os intervalos de intervenções devem ser adequados;
- Criticidade; orientação quanto aos riscos dos modos de falha, que podem ser de caráter oculto ou evidente e crítico à segurança ou à operação.

(JOHNSON, 2001)

Para definir sobre quais projetos devem ser priorizados, a avaliação prévia de criticidade é normalmente usada como base e, também, o nível geral de rigor exigido para cada análise. Sistemas com criticidades mais elevadas tendem a ser aqueles que terão impactos das seguintes maneiras:

- Ter um risco considerado como elevado em termos de alcançar objetivos de segurança e/ou ambientais;
- Ter um impacto significativo para o rendimento da planta, impacto operacional ou elevado custo de manutenção devido a interrupções e falhas funcionais, ou ainda, estar consumindo recursos excessivos para operar e manter.

(DARRAGI; GEORGES, 2004)

Esta etapa inicial prevê a referência para os indicadores que são utilizados para calcular os benefícios de uma aplicação PMO. Deve-se considerar os seguintes aspectos principais:

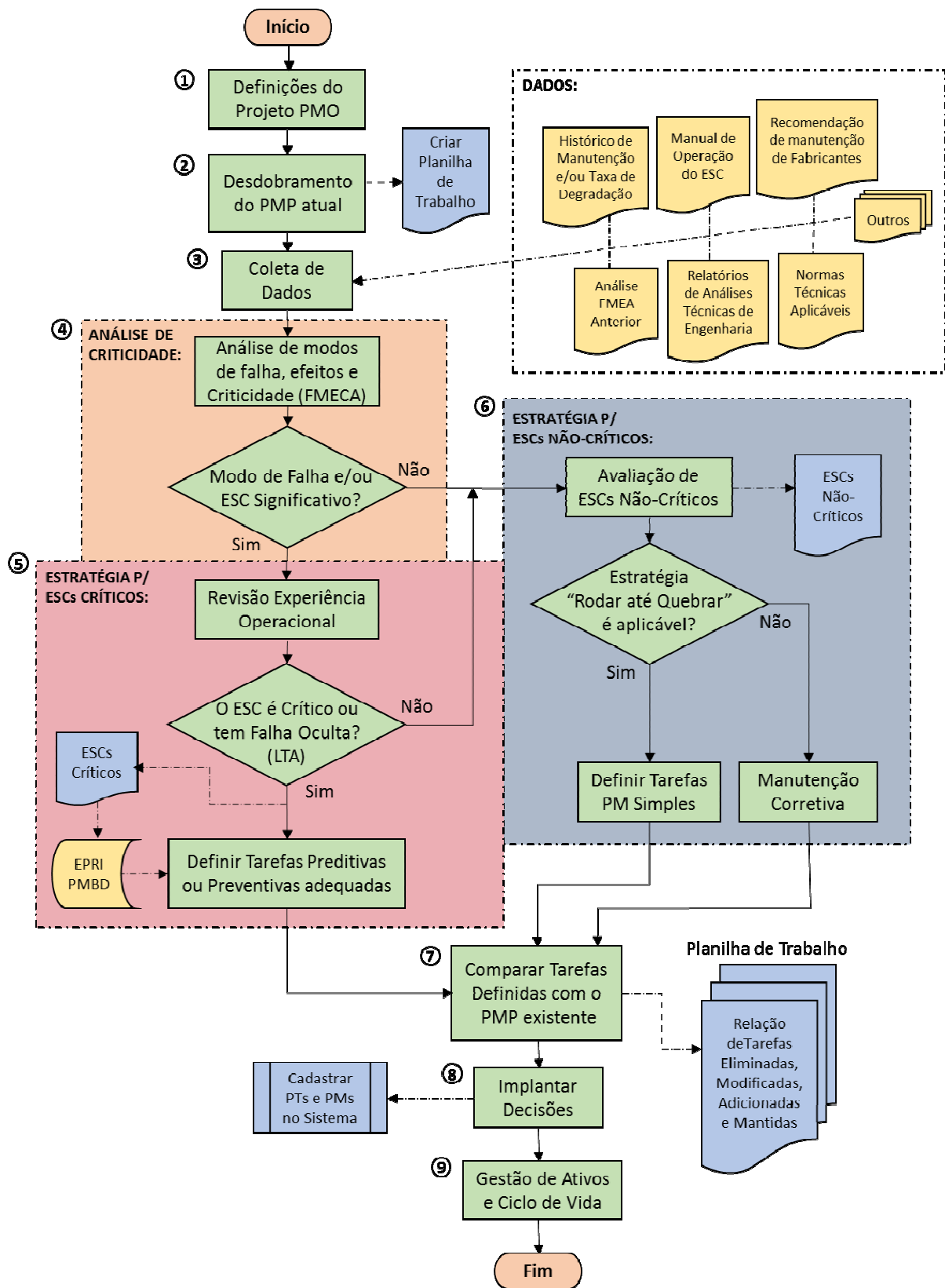
- Segurança/significância do Risco: avaliar a importância relativa de um ESC com base em informações probabilísticas e determinísticas de risco;
 - Exigência de regulamentação: Pode haver um requisito regulamentar obrigatório para proceder inspeções intrusivas em um ESC, por exemplo, devido a uma especificação técnica de seu design de projeto original ou por sua incapacidade para mitigar consequências específicas de falha;
 - Confiabilidade e Disponibilidade: Garantir que qualquer sistema significativo esteja disponível e pronto para operar caso seja solicitado em serviço. E que ao ser solicitado este cumpra sua função eficientemente dentro dos padrões de desempenho esperados, mesmo após longos períodos em prontidão;
 - Metas de manutenção: Estabelecer metas realistas para manutenção;
 - Custos: É cada vez mais necessário analisar os custos totais e otimizar.
- (IAEA, 2003)

É recomendado que a otimização da manutenção seja tratada com um enfoque de processo. O qual é requerido pelo desequilíbrio entre as necessidades de manutenção (normativas, econômicas, técnicas, etc.) e pelos recursos utilizados (pessoas, peças sobressalentes, consumíveis⁷, equipamentos, instalações, etc.). Este processo consiste no detalhamento de como a seleção de técnicas de manutenção é obtida para a aplicação do tipo mais apropriado de manutenção para cada ESC e em qual periodicidade, de modo a atender os requisitos das regulamentações, as metas de manutenção em termos de segurança, confiabilidade, disponibilidade e custos (IAEA, 2003, p.3).

Após avaliadas as questões de viabilidade e selecionado o projeto considerado como mais relevante para os objetivos da organização, pode-se ter início a implantação do projeto PMO. Para tanto, pode-se adotar as seguintes etapas enumeradas de 1 a 9, conforme ilustrado pelo fluxograma da Figura 17:

⁷ Consumíveis: Entende-se por consumíveis de manutenção, matérias de uso geral não reaproveitáveis empregados nas tarefas, como por exemplo: óleos, graxas, desengripantes, colas, tintas, solventes, trapos, luvas descartáveis, entre outros materiais.

Figura 17 - Fluxograma de aplicação de projeto PMO



Fonte: Darragi et al. (2005); EPRI (2002a); IAEA (2003, 2007a); Johnson (2004) e Pansrisu (2010)

Etapa 1 – Definições do projeto PMO;

Nesta etapa são feitas as definições do projeto PMO, tais como o sistema a ser otimizado e suas delimitações, o escopo do projeto, objetivos e metas, estratégia de otimização, cronograma de trabalho, recursos necessários, grupo de trabalho e divisão de tarefas e responsabilidades, entre outras.

Etapa 2 – Desdobramento do PMP atual;

Nesta etapa, o PMP é desdobrado em tarefas ou PMs referentes ao sistema escolhido ou conforme a estratégia definida para o projeto. A estratégia pode estar baseada, por exemplo, em determinados tipos de ESCs, atuar em tarefas PM com frequências mais altas de execução, em sistemas mais significativos para a segurança, sistemas menos importantes com grande número de tarefas, entre outras.

Etapa 3 – Coleta de Dados;

Uma coleta de dados técnicos e históricos de manutenção é fundamental para apoiar as decisões a serem tomadas nas etapas subsequentes. Históricos de ocorrência de falhas e manutenções corretivas, dados referentes à taxa de degradação do ESC, manuais técnicos e recomendações de fabricantes, normas técnicas obrigatórias, especificações técnicas, experiências operacionais externas, entre outras.

Etapa 4 – Análise de Criticidade;

Nesta etapa é feita uma análise quanto às funções críticas das tarefas de manutenção. Cada tarefa PM é reavaliada identificando que função do ESC, os modos de falha, efeitos ou consequências e causas (FMEA) a tarefa PM está destinada a prevenir. Com base na importância das funções e seus modos de falha, os ESCs considerados como significativos são relacionados.

Etapa 5 – Definir Estratégias de Manutenção para ESCs “Críticos”;

Esta etapa é a mais importante no processo, onde através da lógica PMO/RCM as estratégias de manutenção que devem ser adotadas para cada modo de falha são selecionadas. Primeiramente, é importante que os ESCs significativos sejam classificados como críticos ou não-críticos através de uma nova revisão pela Experiência Operacional. Também são classificados como Críticos, os modos de falha dos ESCs que apresentam características de falhas ocultas (cuja falha funcional pode incorrer em falhas múltiplas de sistemas). Então, é gerada uma relação de ESCs “Críticos”, que pode ser comparada com os Modelos Padrões do EPRI. Em seguida, com auxílio de uma Árvore Lógica de Decisão (LTA) podem ser

selecionadas as melhores estratégias de manutenção (Preventiva, Preditiva, Rondas de engenharia ou Inspeções e Testes) para manter a função do sistema, e as tarefas PM definidas.

Etapa 6 – Definir Estratégias de Manutenção para ESCs “Não-críticos”;

Esta etapa consiste na avaliação dos ESCs considerados como não-críticos. Primeiramente, é gerada uma relação dos ESCs considerados como “Não-Críticos”. Em seguida é analisada a possibilidade de eliminação de PMs, com adoção da estratégia de “Rodar até falhar”, ou seja, manutenção corretiva. Contudo, é importante ter em vista que em alguns casos, uma tarefa PM básica pode ser mais adequada ou rentável mesmo em se tratando de um ESC com pouca importância funcional.

Etapa 7 – Comparação de Tarefas;

Nesta etapa é feita a comparação entre os PMs selecionados através do método PMO, com os PMs existentes no PMP. Então é feito um balanço entre as tarefas Eliminadas, Modificadas, Adicionadas e Mantidas. Este balanço é reportado as áreas envolvidas para as devidas análises críticas.

Etapa 8 – Implantar Decisões;

Aprovadas as alterações nos PMs otimizados, as mesmas podem ser implantadas e cadastradas no sistema de gerenciamento da manutenção, onde são feitas as alterações ou inclusões de tarefas com Plano de Manutenção (PM) e Planos de Trabalho (PTs).

Etapa 9 – Programa de Gestão de Ativos e Ciclo de Vida:

Após implantadas no sistema, as alterações nas tarefas PM entram no programa de gestão de ativos, ciclo de vida e riscos da Usina. E, se for o caso, passam a ter monitoramento quanto sua eficácia no PMP pelo PMEM.

Em seguida, estas nove etapas explicadas de forma resumida, são detalhadas em maior profundidade nos subitens de 4.1 a 4.9 deste capítulo:

4.1 Definições do projeto PMO

A abordagem geral para a implantação do projeto PMO implica em um comprometimento substancial de recursos. Para otimizar a utilização desses recursos e gerar benefícios no mais breve prazo possível, deve ser adotada uma abordagem de gerenciamento de projeto. E como em qualquer projeto, nesta primeira etapa de implantação, se faz necessário o estabelecimento de uma estruturação sólida para condução de sua implantação. Esta estrutura consiste em definir, de forma clara e concisa, aspectos tais como:

- Escopo do projeto: objetivos e metas, escolha do sistema e suas delimitações para o projeto PMO, estratégia de aplicação, condições e requisitos, divisão de tarefas e responsabilidades, estrutura de trabalho e entregas;
- Qualidade: Controle de qualidade das análises e documentação dos processos de implantação do projeto;
- Cronograma: datas e prazos para entrega das etapas do projeto;
- Recursos: Definição dos grupos de trabalho com a disponibilização de mão de obra especializada e infraestrutura suficiente para condução dos trabalhos;
- Orçamento: disponibilidade de recursos e orçamentos suficientes para custeio do investimento no projeto;
- *Stakeholders* (partes interessadas no projeto): participação, definição clara, informação e envolvimento de todas as pessoas, departamentos internos, prestadores de serviços e/ou público externo em geral, todos aqueles que de alguma forma sejam interessados ou afetados pelo projeto;
- Análise de riscos: em todo projeto deve-se realizar continuamente uma análise de riscos quanto à segurança, legislação, operacional, meio ambiente e pessoas;
- Comprometimento da alta direção: é fundamental o envolvimento e apoio da alta direção, não apenas para garantir a alocação de recursos, mas também para a motivação e direcionamento dos grupos de trabalho (IAEA, 2007a).

4.1.1 Objetivos e metas do projeto

A definição clara dos objetivos do projeto é essencial para estabelecer os elementos críticos para o sucesso em todas as suas fases, através do cumprimento de cada meta ou marco do projeto. A clara definição de objetivos e metas é importante, pois estabelece a direção do

projeto e ajuda a equipe a manter um senso de finalidade, permitindo manter o claro foco nas atividades de trabalho. Os objetivos e metas de qualquer projeto devem estar alinhados com os objetivos estratégicos da empresa.

Durante o desenvolvimento de um projeto de otimização surgem situações imprevistas e desconhecidas às quais a adequada aplicação de ferramentas pode auxiliar. Entretanto, os objetivos e metas bem definidas fornecem uma base sólida sobre a qual o projeto PMO fica estabelecido, evitando que saia de seu curso pela dispersão de interesses e recursos. O Quadro 3 apresenta os típicos objetivos e metas para um projeto PMO em uma usina nuclear.

Quadro 3 - Típicos objetivos e metas de projetos PMO

OBJETIVOS	METAS
Segurança	Prevenir problemas no sistema de segurança através de PMs
	Simplificação de tarefas de modo a reduzir a exposição de trabalhadores à radiação
	Reduzir o risco de danos ao núcleo do reator
	Reduzir o risco devido aos vazamentos descontrolados de refrigerante contaminado
	Reduzir o risco de liberação de rejeitos radiológicos descontrolados
Confiabilidade	Evitar falhas funcionais de equipamentos críticos
	Melhorar o desempenho de equipamentos
	Reduzir perdas de carga não planejadas (reduções de potência da planta)
	Reduzir falhas decorrentes de intervenções intrusivas
	Minimizar o risco devido a testes em sistemas de proteção
	A detecção precoce de mecanismos de degradação acentuados
Redução de Custos	Reduzir os custos gerais de manutenção
	Melhorar a eficiência de geração da planta
	Otimizar horários de interrupção
	Eliminar perdas não planejadas
	Otimizar o uso de peças de reposição
	Alcançar retorno de investimento para projetos RCM anteriores.
Disponibilidade	Reduzir a indisponibilidade devido às atividades de manutenção
	Reduzir a indisponibilidade de componentes devido a possíveis falhas funcionais
	Melhorar os padrões de desempenho dos sistemas de segurança
	Maximizar a disponibilidade da unidade
	Otimizar duração de interrupções
Aprimoramento Tecnológico	Substituição de técnicas de manutenção por técnicas atualizadas e mais avançadas
	Maior utilização de técnicas de manutenção não intrusivas (como técnicas preditivas, raio-x, ultrassom, micro câmeras, entre outras)

Fonte: IAEA (2003)

4.1.2 Estratégia e cronograma de implantação

Uma vez estabelecidos os objetivos e metas esperadas com a implantação do projeto PMO, o próximo passo é estabelecer uma estratégia, ou modo como estes objetivos e metas serão alcançados, bem como o estabelecimento de etapas ou marcos do projeto, com datas ou prazos factíveis para cada etapa.

A elaboração de uma estratégia para alcançar os objetivos do projeto pode ter por base critérios para a seleção dos ESCs ou PMs alvos que compõem o escopo do projeto PMO. Estes critérios podem ser inúmeros, conforme os objetivos da empresa, por exemplo: a otimização de ESCs idênticos em diferentes sistemas, otimização completa de um determinado sistema, apenas ESCs com alta frequência de tarefas, entre outras.

O estabelecimento de um cronograma, com os marcos do projeto e seus respectivos prazos, também é de extrema importância para um bom gerenciamento do projeto e a otimização de recursos. O cumprimento deste cronograma pode garantir uma abordagem de sucesso, com rápido retorno dos investimentos, melhor uso dos recursos e respeito aos limites orçamentários previstos para o projeto.

Importante começar com atividades que trazem "ganhos rápidos" para estimular um maior apoio da gestão e do pessoal de planta. Trabalhos de otimização, normalmente, trazem mudanças que podem afetar alguns padrões culturais existentes, incluindo modificações em certas vantagens entendidas por alguns. Por outro lado, a falta de resultados esperados em curto prazo pode desestimular ou mesmo comprometer o sucesso do projeto. Há também o risco de surgirem expectativas irrealistas em relação aos resultados, que podem ser gerados por meio de atividades de "ganhos rápidos". Portanto, o gestor do projeto deve estar atento para moderar estes aspectos (DARRAGI et al., 2005).

4.1.3 Qualidade nos trabalhos de implantação

O estabelecimento de métricas para acompanhamento das atividades e análises de implantação permite estabelecer um controle de qualidade para o projeto. Este controle é importante uma vez que a condução do projeto envolve mudanças nas práticas de manutenção e nas relações de trabalho entre as diferentes funções envolvidas nas atividades durante um período prolongado de tempo. E, por isso, estas métricas devem ser devidamente formalizadas para assegurar uma implantação consistente. Métricas típicas têm por objetivo avaliar:

- Se as recomendações são formalmente aprovadas;
- Se as tarefas a serem executadas são precisamente descritas;
- Se as alterações em procedimentos operacionais e de manutenção são sujeitas a processos formais de revisão e aprovação;
- Se as alterações são efetivamente identificadas e controladas;
- Pacotes de trabalho emitidos para execução possuem controles de revisões;
- Todos envolvidos são efetivamente treinados nas atividades exercidas;
- Métricas de comunicação (IAEA, 2003).

4.1.4 Comprometimento e apoio da direção

O comprometimento e apoio dos níveis hierárquicos superiores da planta é um elemento essencial de sucesso em todas as fases do projeto. É importante não apenas por questões de provisão orçamentária de recursos, mas também em manter estabelecida uma visão global dos benefícios advindos de uma implantação bem-sucedida do projeto. Um apoio gerencial claro e conciso no projeto evita possíveis perdas de foco e interesse por parte dos grupos de trabalho, bem como reafirmar a todos os envolvidos que o projeto é de real interesse para a organização (IAEA, 2003).

A introdução de um processo sob o conceito RCM, inicialmente, impõe uma demanda significativa de recursos finitos. Os métodos tradicionais e relacionamento serão desafiados; novas ferramentas e técnicas terão de ser desenvolvidos para apoiar o processo. Em resumo, a adoção de uma abordagem RCM para manutenção envolverá a necessidade de uma mudança de cultura dentro das organizações envolvidas. Para tal, o envolvimento da liderança é vital no exercício de gestão das mudanças. Esse compromisso deve incluir uma declaração de política, demonstração pessoal de envolvimento e comprometimento de recursos. Para o engajamento eficaz das métricas da força de trabalho que devem ser empregadas para assegurar uma implantação eficiente, para que os benefícios das mudanças sejam demonstrados para os envolvidos (IAEA, 2007a).

A direção deve designar os responsáveis pelo projeto, formalizar o grupo de trabalho, incluindo um gerente de projeto para centralizar as decisões e conduzi-lo do início ao fim.

4.1.5 Organização, papéis e responsabilidades

O grupo de trabalho deve ser estruturado com funcionários em dedicação de tempo integral, deve ser composto por “funcionários-chaves” de áreas ou sistemas com os quais eles têm um conhecimento particular. Os papéis e responsabilidades da equipe devem ser claramente definidos, tal que o núcleo da equipe ofereça a base técnica necessária, incluindo competências especializadas associadas às várias técnicas de manutenção. Isto permite ao grupo de trabalho concentrar-se nas metas do projeto, usar suas bases de conhecimento e competências para entregar cada etapa específica do projeto dentro das métricas satisfatórias de qualidade (IAEA, 2003).

O desempenho de qualquer aplicação PMO/RCM em um sistema implica em um esforço coordenado entre o grupo principal e profissionais da planta. Tipicamente, o núcleo do grupo de trabalho principal é composto por pessoal de engenharia, operação, planejamento e manutenção, incluindo supervisores, encarregados e pessoal de chão de fábrica. Estes profissionais devem estar habilitados a tomar decisões e implantar mudanças no PMP existente. O trabalho em conjunto dessas equipes cria um impulso importante e permite capturar o conhecimento não documentado altamente valioso do pessoal da planta.

A fim de obter informações mais completas e precisas em suas avaliações, os analistas do grupo de trabalho devem solicitar a participação de pessoas experientes de diferentes áreas. Para isso acontecer, o gerente responsável pelo projeto deve coordenar os horários de uma forma que seja mais favorável para o projeto, conciliando com a disponibilidade destas áreas. O grupo de trabalho também precisa contar com a participação especialistas de cada sistema sob estudo, e assegurar que estes profissionais possam estar disponíveis. Durante as reuniões das equipes é igualmente importante manter o foco e a objetividade das análises, que não devem se aprofundar mais que o necessário. Lembrando que o custo em horas de profissionais especializados é caro para a empresa e, portanto, não deve ser desperdiçado.

Muitas vezes, as análises de criticidade são revisadas com apenas representantes experientes da equipe de operação. Isto é aceitável, uma vez que a criticidade é uma determinação funcional com base nos efeitos das falhas sobre a operação da usina. No entanto, a revisão e determinação da criticidade, atividades de seleção e comparação tarefas de tarefas devem envolver, preferencialmente, todos os membros do grupo principal, pois desta forma fica garantido o entendimento de todos os membros da equipe quanto ao raciocínio por trás de cada análise.

4.2 Desdobramento do PMP atual

Conforme descrito anteriormente, o processo PMO começa na extremidade oposta ao RCM clássico, a partir das tarefas ou PMs existentes no PMP atual. Os PMs de cada ESC ou Sistema selecionado e delimitado, conforme estratégia de otimização definida, são desdobradas em suas atividades ou plano de trabalho. Cada atividade, por sua vez, é analisada e relacionada aos respectivos modos de falha que estão destinadas a prevenir.

Com este desdobramento, pode-se ter uma visão geral destas atividades e seus modos de falha, de maneira que favoreça o relacionamento de dados e as análises destas tarefas do PMP existente. Dados e análises, a partir das quais recomendações de tarefas serão feitas ao final. Uma análise mais aprofundada quanto à descrição e função dos sistemas não é estritamente necessária para o processo PMO, o que caracteriza um afastamento do método RCM clássico, onde é exigida uma documentação rigorosa das funções do sistema e suas falhas funcionais como o primeiro passo no processo de avaliação.

A intenção do processo PMO é avançar o mais rapidamente possível com as avaliações de tarefas, confiando no conhecimento e na experiência da equipe de análise do grupo de trabalho, bem como na avaliação técnica independente de todas as recomendações de tarefas. Pouco se ganha com uma exaustiva documentação de informações que são de amplo conhecimento dos membros da equipe e que já estão disponíveis juntamente com outros documentos da planta (JOHNSON, 2004).

Nesta fase é desejável criar uma planilha de trabalho, conforme exemplo apresentado no ANEXO A, onde é feito o desdobramento de todas as tarefas ou PMs por cada ESC estudado, onde pode-se agrupar todas as informações e análises pertinentes. O desdobramento de cada tarefa PM pode ter vários planos de trabalho associados, portanto, todos os Planos de Trabalho (PTs) associados a cada tarefa PM identificada devem, também, ser relacionados na Planilha de trabalho. O processo PMO se dá sobre cada PT relacionado.

O desdobramento das tarefas PM para cada ESC afetado conforme a seleção e as delimitações de análises, objetivos e estratégias definidas para o projeto PMO podem ser feitas através da Planilha de Trabalho, conforme exemplificado pelo Quadro 4. A Planilha de Trabalho pode conter informações de cabeçalho de modo que favoreça a identificação documental, rastreabilidade dos dados e análises desenvolvidas pelo grupo de trabalho, tais como: a identificação da Empresa e unidades envolvidas, identificação do grupo de trabalho

responsável, paginação e revisões do documento, identificação e localização do sistema ou componente sob análise, entre outras informações que se julguem pertinentes.

Abaixo do cabeçalho, a Planilha de Trabalho pode trazer definições quanto às funções do ESC em questão e, em seguida, são relacionadas todas as tarefas definidas para este ESC. É pertinente que cada tarefa PM seja identificada e desdobrada em suas subatividades sequenciadas e identificadas pelos Planos de Trabalho (PTs), conforme o exemplo ilustrativo apresentado no Quadro 4. As sequências dos PTs são importantes, e por isso devem estar presentes na Planilha de Trabalho.

Quadro 4 - Desdobramento de tarefas do PMP existente na Planilha de Trabalho

Empresa:	ELETRONUCLEAR - ANGRA 2	Relatório/Ver.:	-	Elaboração:	Grupo de Trabalho	Data:	-	Classificação do ESC:	
ESCs:	VENTILADORES DE EXAUSTAO XYZ	Localização:	EDIFÍCIO AUXILIAR DO REATOR	Código Id.:					
Funções do ESC:								Análise de Criticidade:	
Tarefa PM:	Freq.	Equipe:	Plano de Trabalho (PT):	Modos de falha:	Efeitos:	FEC:	EPRI:	CRÍTICO:	
MANUTENÇÃO PREVENTIVA DO VENTILADOR	3M	Mecânica	AJUSTE DE TENSIONAMENTO DE CORREIAS DO VENTILADOR						
			ACOPLAMENTO C/ LUBRIFICAÇÃO MANCAIS VENTILADOR						
			DESMONTAGEM E LIMPEZA DE HÉLICES DO VENTILADOR						
AJUSTE DA DISTANCIA DO SENSOR VELOCIDADE	6M	Instrum. e Controle	INSPEÇÃO DA DISTANCIA DO SENSOR DE VELOCIDADE.						
			CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE VELOCIDADE						
RELUBRIFICAR OS ROLAMENTOS DO MOTOR	1A	Mecânica	RELUBRIFICAÇÃO DO MANCAL DO MOTOR C/PINO GRAXEIRO						
MANUTENÇÃO PREVENTIVA NO MOTOR	2A	Elétrica e Mecânica	PREVENTIVA ELÉTRICA DO MOTOR DE BAIXA TENSÃO						
			TROCA DE ESCOVAS E ROLAMENTOS DO MOTOR						
			TROCA DE ROLAMENTOS DO MOTOR						
			RELUBRIFICAÇÃO DOS MANCAIS DO MOTOR						
			ACOPLAMENTO E ALINHAMENTO DO MOTOR						
MANUTENÇÃO PREVENTIVA DA GAVETA	4A	Elétrica	REPARO PREVENTIVO DA GAVETA ELÉTRICA DISJUNTORA						
CALIBRAÇÃO DO RELÉ DE FALHA À TERRA	8A	Instrum. e Controle	CALIBRAÇÃO DO RELÉ DE FALHA À TERRA STt DA INEPAR						

Fonte: Autoria própria

4.3 Coleta de dados

Os bancos de dados dos históricos de manutenção da planta e ou dados técnicos do fabricante existentes são as principais fontes de dados sobre as quais as análises PMO estão baseadas. As tarefas do analista de dados incluem avaliar a adequação e a integridade dos dados que irão formar sua base de técnica de análise, bem como, antever e solicitar as informações necessárias para atender as atividades de análises futuras. Sua base de dados pode, ainda, ser suplementada com informações obtidas através de entrevistas com os experientes operadores e executantes das tarefas de manutenção (IAEA, 2003).

Nesta etapa de coleta de dados, deve se focar nas informações pertinentes as tarefas relacionadas na Planilha de Trabalho, pois serão fundamentais para consolidar a base técnica documental das decisões tomadas sobre o PMP. A coleta de dados consiste na obtenção de informações, tais como:

- Históricos de manutenção;
 - o Falhas funcionais do ESC e Tarefas Corretivas executadas;
 - o Tarefas Eletivas executadas com base na condição de degradação.
 - o Tarefas Eletivas executadas com base em rondas de inspeção
 - o Tarefas Preventivas executadas e suas frequências
 - o Tarefas Preditivas executadas e suas frequências
 - o Inspeções e testes periódicos executados e suas frequências
 - o Relatórios de análises de manutenção preditiva
 - o Relatórios de rondas de inspeção
- Documentos técnicos internos;
 - o Manual descritivo do equipamento
 - o Diagramas elétricos de instrumentação e controle
 - o Unifilares elétricos e de instrumentação
 - o Manual de manutenção do equipamento
 - o Fluxograma e Instruções de montagem
 - o Desenhos mecânicos e Diagrama Geral dos Sistemas
 - o Manual de Operação da Usina (MOU)
 - o Procedimentos internos de manutenção e operação
 - o Histórico de modificações de projeto
 - o Diagrama da Árvore de Falhas do ESC (FTA)

- Históricos de Experiência Operacional Internas e Externas;
- Normas regulatórias e padrões obrigatórios;
- Requisitos de contrato de seguro da planta;
- Recomendações de fabricantes;
- Recomendações e guias de boas práticas de órgãos como IAEA, EPRI, INPO, WANO, entre outros;
- Base de dados do EPRI;
- Entre outros.

Não necessariamente serão utilizados todos estes documentos citados para apoiar as análises ao longo do processo PMO, portanto, o início da busca por determinados dados ou documentos pode ser solicitado pelo grupo de trabalho conforme sua necessidade. Um grupo de pessoas pode ser designado exclusivamente para fazer a coleta de dados, e deste modo, esta atividade pode seguir em paralelo as demais etapas do processo.

4.4 Análise de criticidade

O objetivo desta fase é classificar os ESCs em dois grupos distintos: “Críticos” e “Não-críticos”, para que deste modo, cada grupo possa ser analisado com tratativas diferenciadas, de modo a agilizar os processos de seleção de tarefas. Esta etapa consiste basicamente em realizar a análise dos modos de falha, efeitos e criticidade (FMECA), onde cada tarefa de manutenção deve ser analisada e ter identificados os respectivos modos de falha que se destinam a prevenir. Em seguida, é realizada a análise de criticidade dos PMs com base nos efeitos ou consequências destes modos de falha para a planta. Este processo se dá a partir das respostas para as seguintes perguntas:

- Quais as funções primárias e secundárias do ESC?
- Quais modos de falha cada tarefa está destinada a prevenir?
- Quais seriam os efeitos para os sistemas no caso de ocorrência da falha?
- Estas consequências de falhas são aceitáveis?

As respostas a estas perguntas podem ser compiladas em maiores detalhes através da Planilha de Trabalho, de modo a facilitar a condução do processo PMO. Primeiramente, é feita uma análise funcional onde ficam estabelecidas as funções do ESC. Em seguida, uma análise das tarefas e seus respectivos modos de falha, e por fim, são analisados os efeitos das falhas e sua criticidade para planta, a partir da qual os ESC são classificados como “Críticos” e “Não-críticos”. Mesmo ESCs pertencentes a Sistemas que cumprem funções críticas de segurança, podem vir a ser classificados como “Não-Críticos” se sua falha funcional não traz consequências que impactam na função crítica do Sistema (JOHNSON, 2004).

4.4.1 Análise funcional

Os sistemas funcionais de interesse são aqueles que apoiam diretamente o objetivo do PMP, cada ESC tem uma ou mais funções a desempenhar e o objetivo da manutenção é garantir que esse ativo continue a desempenhar as suas funções dentro dos padrões de desempenho estabelecidos. Os ESCs, normalmente, têm uma função primária que muitas vezes já está definida pelo próprio nome do ESC, como por exemplo, “Bomba de Extração de Condensado”, cuja função primária é extrair o condensado. As funções secundárias não são tão evidentes ou fáceis de identificar, mas são também fundamentais e precisam ser identificadas para o sucesso do processo PMO (IAEA, 2007a).

Nesta etapa, o processo PMO requer que as funções do ESC sejam definidas, porém sem muita análise em profundidade. Informações quanto às funções dos ESCs podem ser obtidas através da documentação técnica como manuais e descritivos funcionais dos sistemas. Após identificadas as Funções do ESC, estas devem ser inseridas na Planilha de Trabalho, conforme ilustrado no Quadro 5:

Quadro 5 - Funções de interesse do ESC

Empresa:	ELETRONUCLEAR - ANGRA 2	Relatório/Ver.:	-	Elaboração:	Grupo de Trabalho		Data:	-	Classificação do ESC:
ESCs:	VENTILADORES DE EXAUSTAO XYZ	Localização:	EDIFÍCIO AUXILIAR DO REATOR			Código Id.:			
Funções do ESC:	- Suprir os edifícios do reator com ar externo e manter as condições especificadas de temperatura e umidade do ar nas salas, de forma a criar condições ambientais favoráveis para o pessoal de operação e para os equipamentos; - Manter pressões negativas nas salas e a direções de fluxo de ar, de modo a evitar o espalhamento do material radioativo ou fumaça (em caso de acidentes) para áreas acessíveis da usina, bem como a filtragem destas partículas para um descarga segura dentro dos rígidos padrões.								Análise de Criticidade:
Tarefa PM:		Freq.	Equipe:	Plano de Trabalho (PT):		Modos de falha:	Efeitos:	FEC:	EPRI: CRÍTICO:
MANUTENÇÃO PREVENTIVA DO VENTILADOR		3M	Mecânica	AJUSTE DE TENSIONAMENTO DE CORREIAS DO VENTILADOR					
				ACOPLAMENTO C/ LUBRIFICAÇÃO MANCAIS VENTILADOR					
				DESMONTAGEM E LIMPEZA DE HÉLICES DO VENTILADOR					
AJUSTE DA DISTANCIA DO SENSOR VELOCIDADE		6M	I&C	INSPEÇÃO DA DISTANCIA DO SENSOR DE VELOCIDADE.					
				CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE VELOCIDADE					
RELUBRIFICAR OS ROLAMENTOS DO MOTOR		1A	Mecânica	RELUBRIFICAÇÃO DO MANCAL DO MOTOR C/PINO GRAXEIRO					
MANUTENÇÃO PREVENTIVA NO MOTOR		2A	Elétrica e Mecânica	PREVENTIVA ELÉTRICA DO MOTOR DE BAIXA TENSÃO					
				TROCA DE ESCOVAS E ROLAMENTOS DO MOTOR					
				TROCA DE ROLAMENTOS DO MOTOR					
				RELUBRIFICAÇÃO DOS MANCAIS DO MOTOR					
				ACOPLAMENTO E ALINHAMENTO DO MOTOR					
MANUTENÇÃO PREVENTIVA DA GAVETA		4A	Elétrica	REPARO PREVENTIVO DA GAVETA ELÉTRICA DISJUNTORA					
CALIBRAÇÃO DO RELÉ DE FALHA À TERRA		8A	I&C	CALIBRAÇÃO DO RELÉ DE FALHA À TERRA STt DA INEPAR					

Fonte: Autoria própria

4.4.2 Análise dos modos de falha

A identificação de falhas funcionais é necessária para cada uma das funções de interesse dos sistemas. Modos de falha identificam os modos pelos quais os sistemas podem falhar e como isso afetar as funções de interesse. Identificação de modos de falha de componentes está diretamente relacionada com o funcionamento do sistema e à forma como um ESC dá suporte a uma função de interesse.

Os modos de falha, associados às funções do ESC, devem ser identificados e inseridos na Planilha de Trabalho, conforme ilustrado pelo Quadro 6:

Quadro 6 - Análise de Modo de Falhas

Empresa:	ELETRONUCLEAR - ANGRA 2	Relatório/Ver.:	-	Elaboração:	Grupo de Trabalho		Data:	-	Classificação do ESC:		
ESCs:	VENTILADORES DE EXAUSTAO XYZ		Localização:		EDIFÍCIO AUXILIAR DO REATOR		Código Id.:				
Funções do ESC:	- Suprir os edifícios do reator com ar externo e manter as condições especificadas de temperatura e umidade do ar nas salas, de forma a criar condições ambientais favoráveis para o pessoal de operação e para os equipamentos; - Manter pressões negativas nas salas e a direções de fluxo de ar, de modo a evitar o espalhamento do material radioativo ou fumaça (em caso de acidentes) para áreas acessíveis da usina, bem como a filtragem destas partículas para um descarga segura dentro dos rígidos padrões.								Análise de Criticidade:		
Tarefa PM:		Freq.	Equipe:	Plano de Trabalho (PT):		Modos de falha:		Efeitos:	FEC:	EPRI:	CRÍTICO:
MANUTENÇÃO PREVENTIVA DO VENTILADOR		3M	Mecânica	AJUSTE DE TENSIONAMENTO DE CORREIAS DO VENTILADOR		Evitar correia patinar					
				ACOPLAMENTO C/ LUBRIFICAÇÃO MANCAIS VENTILADOR		Vibração e/ou Falha no Rolamento					
				DESMONTAGEM E LIMPEZA DE HÉLICES DO VENTILADOR		Vibrações					
AJUSTE DA DISTANCIA DO SENSOR VELOCIDADE		6M	Instrum. e Controle	INSPEÇÃO DA DISTANCIA DO SENSOR DE VELOCIDADE.		Perda de monitoração e Falta de alarme					
				CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE VELOCIDADE		Perda de referencia					
RELUBRIFICAR OS ROLAMENTOS DO MOTOR		1A	Mecânica	RELUBRIFICAÇÃO DO MANCAL DO MOTOR C/PINO GRAXEIRO		Vibração e/ou Falha no Rolamento					
MANUTENÇÃO PREVENTIVA NO MOTOR		2A	Elétrica e Mecânica	PREVENTIVA ELÉTRICA DO MOTOR DE BAIXA TENSÃO		Perda de isolamento do indutor					
				TROCA DE ESCOVAS E ROLAMENTOS DO MOTOR		Perda na transferencia de energia para o indutor					
				TROCA DE ROLAMENTOS DO MOTOR		Vibração e/ou Falha no Rolamento					
				RELUBRIFICAÇÃO DOS MANCAIS DO MOTOR		Vibração e/ou Falha no Rolamento					
				ACOPLAMENTO E ALINHAMENTO DO MOTOR		Vibrações					
MANUTENÇÃO PREVENTIVA DA GAVETA		4A	Elétrica	REPARO PREVENTIVO DA GAVETA ELÉTRICA DISJUNTORA		Danos nos comandos elétricos					
CALIBRAÇÃO DO RELÉ DE FALHA À TERRA		8A	Instrum. e Controle	CALIBRAÇÃO DO RELÉ DE FALHA À TERRA STt DA INEPAR		Perda de proteção					

Fonte: Autoria própria

Para cada função do ESC descrita, deve haver pelo menos um modo de falha associado. A falha de um componente, tal como: a não abertura ou fechamento de uma válvula ou a falha na partida ou parada de uma bomba, por exemplo, são denominados pelos analistas como "modos de falha" uma vez que descrevem a natureza das falhas, e não as causas da falha.

Esta confusão é comum entre profissionais de manutenção, que normalmente, tendem a ir mais além e definir o porquê da falha, ou seja, suas causas. Por exemplo, ao invés de identificar um modo de falha como "falha no atuador da válvula", um profissional de manutenção identificaria o modo de falha como "Desgaste do fuso da válvula". Nas

definições do RCM, o termo “modo de falha” normalmente é utilizado para descrever a condição do ESC, tais como, “falha ao abrir” ou “falha ao fechar”, enquanto que o termo “causas de falha”, são usados, tipicamente, para descrever o mecanismo de degradação que dá origem ao modo de falha.

4.4.3 Racionalização de tarefas

Esta etapa consiste, também, em fazer uma análise rápida nas tarefas desdobradas na Planilha de Trabalho, com objetivo de encontrar tarefas redundantes e/ou desnecessárias, bem como tarefas faltantes que, em uma análise preliminar, deveriam constar na relação. Através do agrupamento de dados dos modos de falha na Planilha de trabalho, tarefas duplicadas podem ser facilmente identificadas, elas ocorrem quando o mesmo modo de falha é atacado por mais de uma tarefa PM, por exemplo, quando tarefas são adicionadas ao PMP por diferentes áreas da manutenção como: mecânica, elétrica e instrumentação, sem uma análise mais cuidadosa e integrada das tarefas de manutenção do ESC, tarefas redundantes podem ser inseridas (TURNER, ?). O Quadro 7 ilustra este caso:

Nesta etapa, podem também ser acrescentados novos modos de falha não identificados anteriormente, a relação de modos de falha faltantes pode ser gerada através de uma análise de dados do histórico de falhas, documentação técnica ou documentos da experiência operacional. Também ficam evidentes PMs que, por exemplo, aparecem para um determinado ESC da Redundância 10, mas não aparecem para o mesmo ESC da Redundância 20. Ou seja, ao serem comparadas as análises de ESC semelhantes de diferentes redundâncias, tarefas desnecessárias ou faltantes também podem ser facilmente identificadas. Todavia, é sabido que o histórico de falhas e as condições de trabalhos a que estão submetidos podem justificar diferenças nas estratégias de manutenção de ESCs semelhantes.

Quadro 7 - Racionalização de tarefas

Empresa:	ELETRONUCLEAR - ANGRA 2	Relatório/Ver.:	-	Elaboração:	Grupo de Trabalho	Data:	-	Classificação do ESC:
ESCs:	VENTILADORES DE EXAUSTAO XYZ	Localização:	EDIFÍCIO AUXILIAR DO REATOR	Código Id.:				
Funções do ESC:	- Suprir os edifícios do reator com ar externo e manter as condições especificadas de temperatura e umidade do ar nas salas, de forma a criar condições ambientais favoráveis para o pessoal de operação e para os equipamentos; - Manter pressões negativas nas salas e a direção de fluxo de ar, de modo a evitar o espalhamento do material radioativo ou fumaça (em caso de acidentes) para áreas acessíveis da usina, bem como a filtragem destas partículas para um descarga segura dentro dos rígidos padrões.						Análise de Criticidade:	
Tarefa PM:	Freq.	Equipe:	Plano de Trabalho (PT):	Modos de falha:	Efeitos:	FEC:	EPRI:	CRÍTICO:
MANUTENÇÃO PREVENTIVA DO VENTILADOR	3M	Mecânica	AJUSTE DE TENSIONAMENTO DE CORREIAS DO VENTILADOR	Evitar correia patinar				
			ACOPLAMENTO C/ LUBRIFICAÇÃO MANCAIS VENTILADOR	Vibração e/ou Falha no Rolamento				
			DESMONTAGEM E LIMPEZA DE HÉLICES DO VENTILADOR	Vibrações				
AJUSTE DA DISTANCIA DO SENSOR VELOCIDADE	6M	Instrum. e Controle	INSPEÇÃO DA DISTANCIA DO SENSOR DE VELOCIDADE.	Perda de monitoração e Falta de alarme				
			CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE VELOCIDADE	Perda de referencia				
RELUBRIFICAR OS ROLAMENTOS DO MOTOR	1A	Mecânica	RELUBRIFICAÇÃO DO MANCAL DO MOTOR C/PINO GRAXEIRO	Vibração e/ou Falha no Rolamento				
MANUTENÇÃO PREVENTIVA NO MOTOR	2A	Elétrica e Mecânica	PREVENTIVA ELÉTRICA DO MOTOR DE BAIXA TENSÃO	Perda de isolamento do indutor				
			TROCA DE ESCOVAS E ROLAMENTOS DO MOTOR	Perda na transferencia de energia para o indutor				
			TROCA DE ROLAMENTOS DO MOTOR	Vibração e/ou Falha no Rolamento				
			RELUBRIFICAÇÃO DOS MANCAIS DO MOTOR	Vibração e/ou Falha no Rolamento				
			ACOPLAMENTO E ALINHAMENTO DO MOTOR	Vibrações				
MANUTENÇÃO PREVENTIVA DA GAVETA	4A	Elétrica	REPARO PREVENTIVO DA GAVETA ELÉTRICA DISJUNTORA	Danos nos comandos elétricos				
CALIBRAÇÃO DO RELÉ DE FALHA À TERRA	8A	Instrum. e Controle	CALIBRAÇÃO DO RELÉ DE FALHA À TERRA STt DA INEPAR	Perda de proteção				

Fonte: Autoria própria

É importante uma participação ampla neste processo de racionalização das tarefas, incluindo tanto os operadores de chão de fábrica quanto os executantes das tarefas das áreas de manutenção. Pois, em muitas empresas, uma boa parte das atividades do PMP é feito por iniciativa dos executantes, que incorporam em suas rotinas de trabalho e executam atividades extras de manutenção não documentadas formalmente. Nesta situação, a compilação destas informações na Planilha de trabalho pode enriquecer as análises do projeto PMO e fornecem uma oportunidade para correção de condutas ou a formalização destas atividades quando pertinentes.

4.4.4 Avaliação dos efeitos de falha e criticidades

Nesta etapa o grupo de trabalho analisa, para cada modo de falha compilado na Planilha de Trabalho, quais seriam os efeitos ou consequências para a planta ou para os sistemas caso a falha funcional viesse a ocorrer, e com base nesta análise, avaliar o quão críticas estas consequências seriam. E, deste modo, cada ESC deve ser classificado como “Crítico” ou “Não-crítico”. Os efeitos de falha também são inseridos na Planilha de controle conforme ilustrado pelo Quadro 8:

Quadro 8 - Análise dos efeitos de falhas

Empresa:	ELETRONUCLEAR - ANGRA	Relatório/Ver.:	-	Elaboração:	Grupo de Trabalho	Data:	-	Classificação do ESC:
ESCs:	VENTILADORES DE EXAUSTAO XYZ	Localização:		EDIFÍCIO AUXILIAR DO REATOR	Código Id.:			
Funções do ESC:	- Suprir os edifícios do reator com ar externo e manter as condições especificadas de temperatura e umidade do ar nas salas, de forma a criar condições ambientais favoráveis para o pessoal de operação e para os equipamentos; - Manter pressões negativas nas salas e a direções de fluxo de ar, de modo a evitar o espalhamento do material radioativo ou fumaça (em caso de acidentes) para áreas acessíveis da usina, bem como a filtragem destas partículas para um descarga segura dentro dos rígidos padrões.							Análise de Criticidade:
Tarefa PM:	Freq.	Equipe:	Plano de Trabalho (PT):	Modos de falha:	Efeitos:	FEC:	EPRI:	CRÍTICO:
MANUTENÇÃO PREVENTIVA DO VENTILADOR	3M	Mecânica	AJUSTE DE TENSIONAMENTO DE CORREIAS DO VENTILADOR	Evitar correia patinar	Baixa eficiência			
			ACOPLAMENTO C/ LUBRIFICAÇÃO MANCAIS VENTILADOR	Vibração e/ou Falha no Rolamento	Falha no Ventilador ou baixa eficiência			
			DESMONTAGEM E LIMPEZA DE HÉLICES DO VENTILADOR	Vibrações	Baixa eficiência			
AJUSTE DA DISTANCIA DO SENSOR VELOCIDADE	6M	Instrum. e Controle	INSPEÇÃO DA DISTANCIA DO SENSOR DE VELOCIDADE.	Perda de monitoração e Falta de alarme	Falha no Ventilador			
			CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE VELOCIDADE	Perda de referencia	Baixa eficiencia			
RELUBRIFICAR OS ROLAMENTOS DO MOTOR	1A	Mecânica	RELUBRIFICAÇÃO DO MANCAL DO MOTOR C/PINO GRAXEIRO	Vibração e/ou Falha no Rolamento	Falha no motor ou baixa eficiência			
MANUTENÇÃO PREVENTIVA NO MOTOR	2A	Elétrica e Mecânica	PREVENTIVA ELÉTRICA DO MOTOR DE BAIXA TENSÃO	Perda de isolamento do indutor	Falha do motor			
			TROCA DE ESCOVAS E ROLAMENTOS DO MOTOR	Perda na transferencia de energia para o indutor	Falha no motor ou baixa eficiência			
			TROCA DE ROLAMENTOS DO MOTOR	Vibração e/ou Falha no Rolamento	Falha no motor ou baixa eficiência			
			RELUBRIFICAÇÃO DOS MANCAIS DO MOTOR	Vibração e/ou Falha no Rolamento	Falha no motor ou baixa eficiência			
			ACOPLAMENTO E ALINHAMENTO DO MOTOR	Vibrações	Falha no motor ou baixa eficiência			
MANUTENÇÃO PREVENTIVA DA GA	4A	Elétrica	REPARO PREVENTIVO DA GAVETA ELÉTRICA DISJUNTORA	Danos nos comandos elétricos	Falha do sistema			
CALIBRAÇÃO DO RELÉ DE FALHA À T	8A	Instrum. e Controle	CALIBRAÇÃO DO RELÉ DE FALHA À TERRA STt DA INEPAR	Perda de proteção	Afeta Segurança			

Fonte: Autoria própria

Primeiramente, deverão ser identificados os possíveis efeitos das falhas funcionais sobre questões de segurança; como a segurança nuclear, segurança do trabalho, proteção do meio ambiente e do público externo. Em seguida, os possíveis efeitos de falha sobre o desempenho operacional da planta, por exemplo, redução de potência da Usina ou outras perdas de produtividade. Também são analisados alguns modos de falha que, apesar de não afetarem a segurança e nem o desempenho operacional, suas consequências impactam em perdas e/ou resultados financeiros significativos e, portanto, também requerem especial atenção.

Considerando estes aspectos apresentados, poderiam ser considerados como “Críticos”, por exemplo, modos de falha que tenham como consequências:

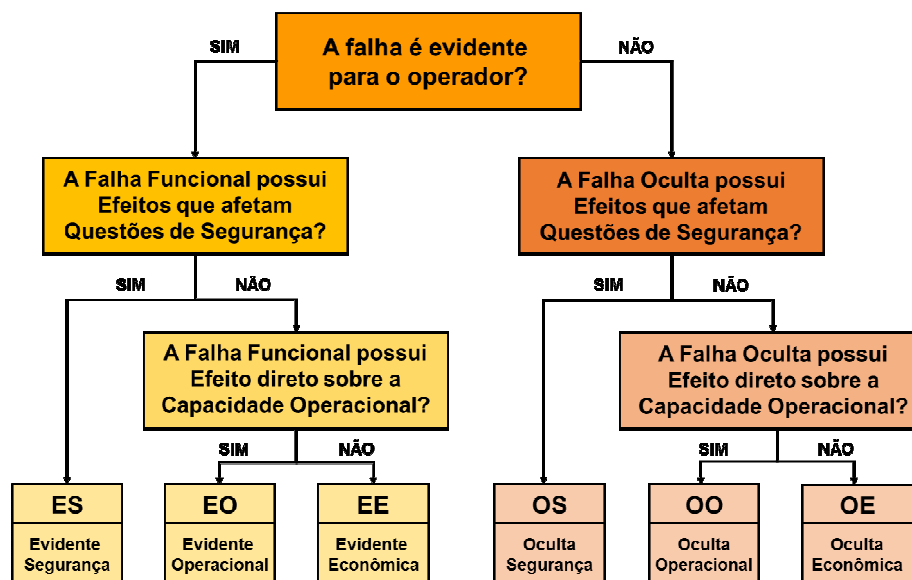
- Falha de ESCs que possa resultar em desligamento forçado do reator;
- Falhas que resultem em perda de potência ou eficiência do Gerador Elétrico;
- Violação em exceder um limite de especificação técnica da planta;
- A falha resultar em um aumento do risco para a segurança das pessoas;
- A falha resultar em danos significativos para as instalações externas;
- Resultar em uma violação dos limites de emissões para o ambiente;
- A falha resulta em um incêndio nas dependências da usina.

Ao avaliar a criticidade dos modos de falha, o grupo de trabalho também deve levar em conta as demais redundâncias do ESC, caso existam. Por exemplo, em uma aplicação onde existam duas bombas redundantes com capacidade de 100% cada e que podem ser operadas independentemente uma da outra, as bombas não seriam consideradas como “Críticas”, se ao falhar de uma bomba a outra possua pronta disponibilidade para partir. Neste caso, é importante ter em vista que o analista avalia apenas uma única falha por vez, portanto, é possível considerar na análise crítica que a segunda bomba estaria disponível. Em tal situação, o dispositivo lógico ou válvula que tem por função fazer a comutação imediata de uma bomba falhada para a outra, este deve ser considerado como “Crítico” ao ser analisado.

Além disso, alguns modos de falha podem não ser considerados como “Críticos” quando a função de um ESC puder ser cumprida por outro ESC, ainda que não sejam redundantes entre si. Por exemplo, se uma válvula “falhar ao abrir” durante uma operação de enchimento de um tanque do sistema, e este tanque puder ser abastecido desviando-se o fluxo através de outras válvulas do mesmo sistema, esta válvula poderia ser considerada como “Não-crítico” (IAEA, 2003).

Para auxiliar na análise de criticidade dos ESCs, o fluxograma de Categorização do Efeito de Falha (FEC) pode ser utilizado conforme ilustrado na Figura 18:

Figura 18 - Categorização dos Efeitos de Falha (FEC)



Fonte: ELETRONUCLEAR (2009)

Neste fluxograma, cada modo de falha é analisado para classificar as falhas como: falhas evidentes ou falhas ocultas. Para falhas ocultas é feita uma análise mais aprofundada quanto aos riscos ou consequências operacionais envolvidas. Em seguida, os modos de falha são avaliados em relação aos seus efeitos sobre questões de segurança. E, caso não impactem em questões de segurança, os mesmos são avaliados quanto seus efeitos sobre a capacidade operacional, ou seja, se a falha funcional do ESC prejudica ou impede funções operacionais importantes e/ou a produtividade da planta. Deste modo, pela classificação FEC, cada modo de falha pode ter as seguintes categorizações:

- ES – Evidente Segurança; Falha evidente que afeta segurança;
- EO – Evidente Operacional; Falha evidente que afeta questões operacionais;
- EE – Evidente Econômica; Falha evidente que afeta apenas questões econômicas;
- OS – Oculta Segurança; Falha oculta que afeta questões de segurança
- OO – Oculta Operacional; Falha oculta que afeta questões operacionais
- OE – Oculta Econômica; Falha oculta que afeta apenas questões econômicas

Na Planilha de Trabalho, os modos de falha também podem ser classificados através do Quadro Funcional do EPRI. Esta classificação fornece uma avaliação do ESC quanto à sua importância funcional, taxa de utilização e condições de serviço, conforme Quadro 9:

Quadro 9 - Classificação funcional EPRI

CLASSIFICAÇÃO FUNCIONAL DO EPRI								
IMPORTÂNCIA FUNCIONAL	CRÍTICAL				MINOR			
TAXA DE UTILIZAÇÃO	HI	LO	HI	LO	HI	LO	HI	LO
CONDIÇÃO DE SERVIÇO	SEVERE		MILD		SEVERE		MILD	
CLASSIFICAÇÃO EPRI	CHS	CLS	CHM	CLM	MHS	MLS	MHM	MLM

Fonte: EPRI (1998)

- Importância funcional;
 - o Crítica: **Critical (C)**: ESC funcionalmente importante, significativo para o risco, necessário para a produção de energia, relacionado com a segurança ou que atende outras exigências regulamentares.
 - o Menor: **Minor (M)**: ESC não é importante funcionalmente, mas é importante economicamente por qualquer um dos seguintes motivos: alta frequência de manutenção corretiva, resultando ser mais caro substituir ou reparar do que fazer a manutenção preventiva ou apresentar um elevado potencial para causar a perda da função de outro equipamento crítico ou economicamente importante. Não estão contemplados nesta classificação os ESCs que podem "funcionar até falhar".
- Taxa de utilização;
 - o Alta: **High (H)**: Operação contínua.
 - o Baixa: **Low (L)**: Operação em prontidão (*stand by*), uma partida por mês e/ou 100 horas de funcionamento por ano para teste.
- Ambiente operacional ou Condição de serviço;
 - o Severa: **Severe (S)**: Operação em local desabrigado, ou sujeito a alta umidade, temperaturas excessivas (alta/baixa) ou variações de temperatura, condições ambientais agressivas (sal, alta radiação, spray, vapor, ar de sucção de baixa qualidade, corrosivo) ou alta vibração.

- o Moderada: **Mild (M)**: Operação em local abrigado, ou área limpa (não necessariamente com ar-condicionado), com temperaturas dentro das especificações ou condições ambientais normais.

Deste modo, os ESCs podem ser classificados como:

- CHS – Importância Crítica, Utilização Alta e Condição Severa;
- CLS – Importância Crítica, Utilização Baixa e Condição Severa;
- CHM – Importância Crítica, Utilização Alta e Condição Moderada;
- CLM – Importância Crítica, Utilização Baixa e Condição Moderada;
- MHS – Importância Menor, Utilização Alta e Condição Severa;
- MLS – Importância Menor, Utilização Baixa e Condição Severa;
- MHM – Importância Menor, Utilização Alta e Condição Moderada;
- MLM – Importância Menor, Utilização Baixa e Condição Moderada.

As categorizações FEC se referem aos resultados de análises quanto aos efeitos e consequências para cada modo de falha, enquanto que as classificações funcionais do EPRI se referem aos resultados de análises quanto à importância e severidade operacional a qual os ESCs estão submetidos. Ambas são inseridas na Planilha de Trabalho de modo a facilitar a análise preliminar e identificação dos modos de falha “Críticos” e “Não-críticos” que, por fim, são classificados quanto à Criticidade, com “S” para Sim e “N” para Não.

Para dar dinamismo as análises desta etapa e, considerando as próximas etapas do processo PMO, itens que possuem características de falha oculta (categorias FEC: OS, OO e OE), podem ser classificados diretamente como “Críticos”. É importante que o grupo de trabalho tenha uma postura conservadora em relação aos itens avaliados como “Não-críticos”, uma vez que estes terão uma tratativa menos criteriosa no que diz respeito à aplicação de estratégias de prevenção de falhas. Ou seja, nos casos em que existam dúvidas ou uma maior dificuldade de classificação, onde sejam necessárias análises mais profundas e criteriosas, estes itens devem ser classificados como “Críticos”. Pois estas análises poderão ser revisadas posteriormente com apoio da Experiência Operacional.

Por fim, o objetivo desta etapa é realizar uma classificação preliminar dos modos de falha, distinguindo-os entre “Críticos” e “Não-Críticos”. O ESC sob análise é classificado como “Crítico” caso um de seus modos de falha sejam avaliados como “Crítico”. O Quadro 10 ilustra as análises de criticidade feitas nesta etapa, compilando-as na Planilha de Trabalho:

Quadro 10 - Análise de Criticidade na Planilha de Trabalho

Empresa:	ELETRONUCLEAR - ANGRA	Relatório/Ver.:	-	Elaboração:	Grupo de Trabalho	Data:	-	Classificação do ESC:
ESCs:	VENTILADORES DE EXAUSTAO XYZ	Localização:		EDIFÍCIO AUXILIAR DO REATOR	Código Id.:			CRÍTICO
Funções do ESC:	- Suprir os edifícios do reator com ar externo e manter as condições especificadas de temperatura e umidade do ar nas salas, de forma a criar condições ambientais favoráveis para o pessoal de operação e para os equipamentos; - Manter pressões negativas nas salas e a direções de fluxo de ar, de modo a evitar o espalhamento do material radioativo ou fumaça (em caso de acidentes) para áreas acessíveis da usina, bem como a filtragem destas particulares para um descarga segura dentro dos rígidos padrões.							Análise de Criticidade:
Tarefa PM:	Freq.	Equipe:	Plano de Trabalho (PT):	Modos de falha:	Efeitos:	FEC:	EPRI:	CRÍTICO:
MANUTENÇÃO PREVENTIVA DO VENTILADOR	3M	Mecânica	AJUSTE DE TENSIONAMENTO DE CORREIAS DO VENTILADOR	Evitar correia patinar	Baixa eficiência	EO	CHM	NÃO
			ACOPLAMENTO C/ LUBRIFICAÇÃO MANCAIS VENTILADOR	Vibração e/ou Falha no Rolamento	Falha no Ventilador ou baixa eficiência	ES	CHM	SIM
			DESMONTAGEM E LIMPEZA DE HÉLICES DO VENTILADOR	Vibrações	Baixa eficiência	EO	CHM	NÃO
AJUSTE DA DISTANCIA DO SENSOR VELOCIDADE	6M	Instrum. e Controle	INSPEÇÃO DA DISTANCIA DO SENSOR DE VELOCIDADE.	Perda de monitoração e Falta de alarme	Falha no Ventilador	ES	CHM	SIM
			CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE VELOCIDADE	Perda de referencia	Baixa eficiencia	EO	CHM	NÃO
RELUBRIFICAR OS ROLAMENTOS DO MOTOR	1A	Mecânica	RELUBRIFICAÇÃO DO MANCAL DO MOTOR C/PINO GRAXEIRO	Vibração e/ou Falha no Rolamento	Falha no motor ou baixa eficiência	ES	CHM	SIM
MANUTENÇÃO PREVENTIVA NO MOTOR	2A	Elétrica e Mecânica	PREVENTIVA ELÉTRICA DO MOTOR DE BAIXA TENSÃO	Perda de isolamento do indutor	Falha do motor	ES	CHM	SIM
			TROCA DE ESCOVAS E ROLAMENTOS DO MOTOR	Perda na transferencia energia para o indutor	Falha no motor ou baixa eficiência	ES	CHM	SIM
			TROCA DE ROLAMENTOS DO MOTOR	Vibração e/ou Falha no Rolamento	Falha no motor ou baixa eficiência	ES	CHM	SIM
			RELUBRIFICAÇÃO DOS MANCAIS DO MOTOR	Vibração e/ou Falha no Rolamento	Falha no motor ou baixa eficiência	ES	CHM	SIM
			ACOPLAMENTO E ALINHAMENTO DO MOTOR	Vibrações	Falha no motor ou baixa eficiência	ES	CHM	SIM
MANUTENÇÃO PREVENTIVA DA GAVETA	4A	Elétrica	REPARO PREVENTIVO DA GAVETA ELÉTRICA DISJUNTORA	Danos nos comandos elétricos	Falha do sistema	OS	CLM	SIM
CALIBRAÇÃO DO RELÉ DE FALHA À TERRA	8A	Instrum. e Controle	CALIBRAÇÃO DO RELÉ DE FALHA À TERRA STt DA INEPAR	Perda de proteção	Afeta Segurança	OS	CHM	SIM

Fonte: Autoria própria

Também é interessante observar que os dois últimos modos de falha, referentes às tarefas de “Manutenção da gaveta” e “Calibração do Relé”, possuem características de Falha Oculta, uma vez que uma degradação acentuada ou falhas funcionais não estariam evidentes caso venham a ocorrer. E, portanto, somente por estes modos de falha o ESC já pode ser classificado como “Crítico” nesta etapa de classificação preliminar.

4.5 Definir estratégias de manutenção para ESCs “Críticos”

4.5.1 Avaliação da Experiência operacional

Durante esta etapa os ESCs pré-classificados como “Críticos” são revisados com base na significância ao risco para as funções críticas de segurança. Todas as informações e dados coletados sobre os ESCs são cuidadosamente reavaliados nesta etapa, de modo que possam ser confirmados ou, se necessário, corrigidos todos os modos de falha, efeitos e definições de criticidade definidos para o ESC, agora sob a ótica de sua significância ao risco segundo a experiência operacional da planta.

Todas as informações são coletadas como, por exemplo, históricos de manutenção, base técnica dos ESCs, relatórios de eventos internos e externos, bem como os relatórios das entrevistas com o pessoal de operação e manutenção da planta podem ser inseridos na Planilha de trabalho, como pressupostos que serão analisados ao longo das análises do PMO.

Nesta fase, tarefas atuais são comparadas com as funções críticas para assegurar que os mecanismos de degradação e falhas adequados estão sendo tratados. Isto é apropriado para um PMP já existente e maduro. O processo PMO trabalhou os modos de falha destas tarefas atuais até aqui, assumindo que o desempenho passado e histórico de manutenção tem ditado o conteúdo do programa atual. No entanto, isso não impede a adição de tarefas, quando observada a necessidade segundo a experiência operacional de plantas ou experiências da indústria (JOHNSON, 2001).

A Análise Probabilística de Segurança (APS) também pode ser usada em combinação com abordagens deterministas, para a otimização do PMP, mantendo o mesmo nível de segurança da planta. APS pode ser usado nas três atividades seguintes:

- Seleção de ESCs baseada na sua significância ao risco para a segurança operacional;
- Avaliação de estratégias alternativas de manutenção com base na identificação dos ESCs críticos do sistema;
- Avaliação do impacto das mudanças propostas nas atividades de manutenção para o risco da planta.

As probabilidades de falhas de componentes utilizados nos modelos APS são determinados utilizando dados referentes às taxas de degradação dos componentes. As falhas individuais específicas que são usadas como entradas para os modelos APS de probabilidade de falha precisam ser reexaminadas sob a ótica do processo de RCM. Pois, uma vez que o modelo APS tem objetivos estritamente ligados à segurança, pode utilizar diferentes delimitações de sistemas e componentes se comparados aos objetivos de um PMP.

Com base nas informações sobre as atividades de manutenção atualmente realizadas para componentes críticos e não críticos, bem como as análises de criticidade realizadas podem ser elaboradas várias estratégias para modificações das atividades. Entretanto, a determinação do impacto das mudanças nas atividades de manutenção propostas requer uma avaliação de risco quanto à segurança planta. Os impactos potenciais destas alterações podem resultar de uma das seguintes fontes:

- Confiabilidade de componentes;
- Disponibilidade de componentes;
- Erros humanos em intervenções.

4.5.2 Análise dos mecanismos de falha para Seleção de tarefas

Um processo de trabalho é, normalmente, acompanhado por engenheiros de modo que possam obter informações relevantes que os ajudem a desenvolver, descrever e justificar suas decisões sobre cada tarefa PM que é definida para cada tipo de ESC. A premissa básica pela qual uma tarefa PM tem determinado escopo, foco e intervalo de tempo, pode ser entendida através de uma análise de causas raízes dos principais modos de falha e o entendimento dos mecanismos de degradação atuam por trás de cada causa de falha.

Com o entendimento destes mecanismos de falha, normalmente, obtidos através de um acompanhamento de longo prazo por parte de engenheiros de componentes, engenheiros de sistemas, engenheiros de manutenção e técnicos experientes. E, através do estudo da documentação técnica e dos históricos de manutenção dos ESCs. Pode-se entender estes mecanismos de falha e, assim, determinar uma tarefa de manutenção que melhor possa mitigar as consequências destas falhas.

Através deste conhecimento, outras informações podem ser discutidas, tais como:

- Quais partes dos equipamentos normalmente podem degradar ou falhar primeiro?

- Quais mecanismos são geralmente responsáveis pela degradação?
- Quais fatores no ambiente físico ou operacional têm mais efeito na iniciação da degradação ou podem torná-la mais grave?
- E quanto tempo a deterioração pode ser tolerada antes que se torne inaceitável ou resulte em uma falha ou perda de eficiência?

Posteriormente, a esta discussão pode-se passar para os tipos de técnicas ou tarefas PM que têm a melhor chance de descobrir as condições degradadas e, considerando o custo benefício de cada uma, é possível definir a melhor estratégia a ser aplicada para mitigar as consequências destes mecanismos de degradação, conforme é apresentado no próximo tópico.

Quando estes dados são obtidos e suas análises documentadas, formam uma base técnica de dados rastreáveis de consulta, que justificam cada tarefa PM através dos tipos mais comuns de degradação e as falhas funcionais. Estas análises de uma determinada tarefa PM auxiliam nas decisões tomadas para outras tarefas que estão sujeitas aos mesmos mecanismos de degradação e condições de aplicação. Esta análise também identifica um intervalo de tempo lógico para cada tarefa, que é determinado pelas taxas de degradação destes mecanismos de falha, que podem ser atualizadas ou confirmadas pelo histórico de manutenção destes ESCs (EPRI, 1998).

4.5.3 Seleção de tarefas de manutenção

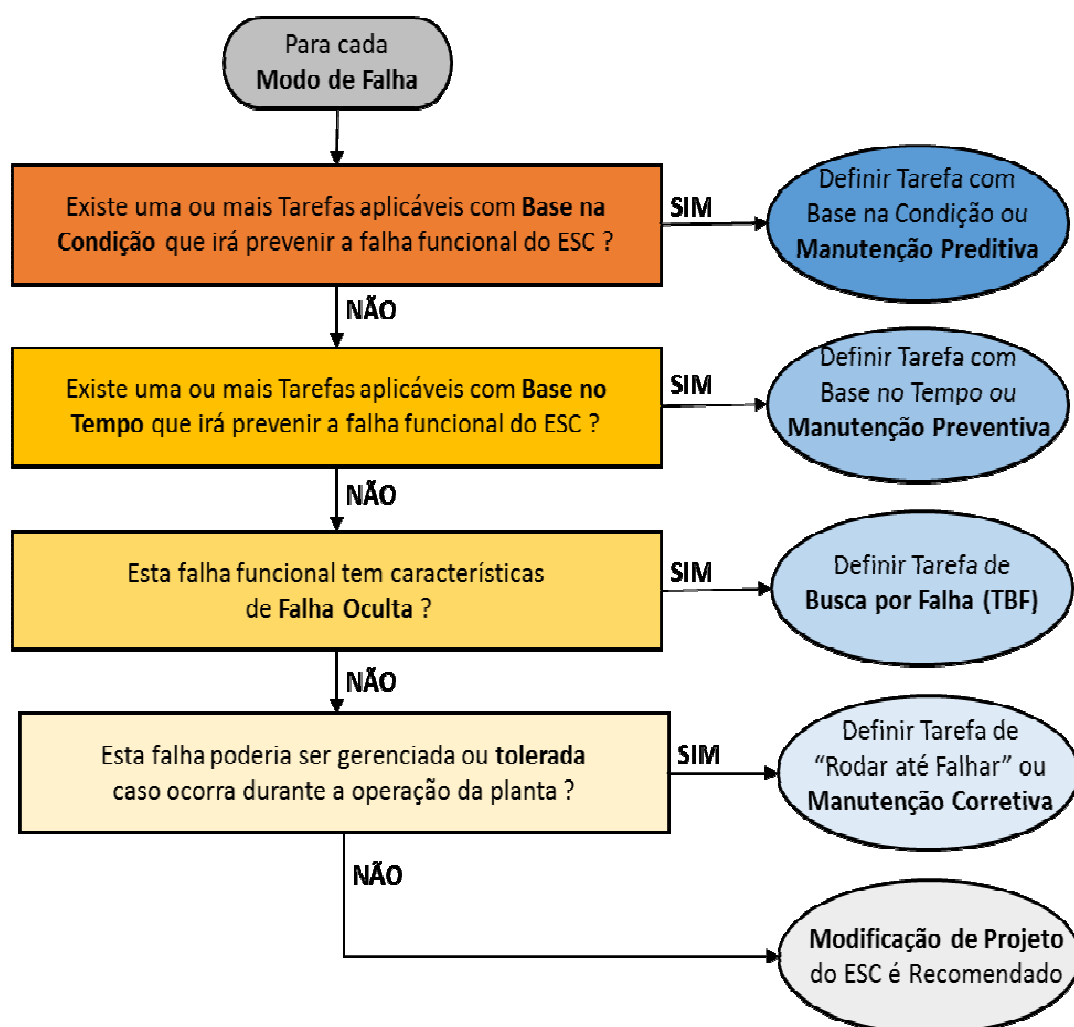
Para a determinação das tarefas é importante lembrar que o objetivo, segundo os princípios do RCM, não é a preservação do ESC, mas sim preservar sua função dentro dos padrões de desempenho estabelecidos. Para garantir que o PMP tenha por base estes princípios durante o processo de seleção de tarefas deve seguir as seguintes diretrizes:

- Identificar tarefas que tratam especificamente os mecanismos de falha dominantes;
- Identificar problemas de confiabilidade existentes;
- Identificar abordagens que possam resolver problemas de confiabilidade e indisponibilidade existentes;
- Não use seleção de tarefa para justificar o PMP existente;
- Não presuma que as frequências de tarefas de manutenção atuais estão corretas apenas porque apresenta baixa ocorrência de falhas, a frequência pode estar alta;

- Identificar tarefas com foco em mitigar os efeitos ou consequências de falha, não para prevenir a falha do equipamento (Preservar as funções importantes);
- Não é recomendado definir tarefas que apenas irão estender o tempo médio entre falhas ou identificar uma falha oculta (Sem focar nas consequências).

A Árvore Lógica de Decisão (LTA) é normalmente a ferramenta utilizada para determinar as estratégias ou tipos de manutenção mais aplicáveis de manutenção para a prevenção das falhas funcionais dos ESCs, considerando o custo-eficácia. Um exemplo de LTA é ilustrado na Figura 19.

Figura 19 - Árvore Lógica de Decisão (LTA)



Fonte: IAEA (2007a)

- Tarefas com base na condição: Incluem tarefas de manutenção preditiva, como análise de vibrações, análise de óleo lubrificante, termografia, ultra-som, corrente elétrica, entre outras);
- Tarefas com base no tempo: Incluem tarefas preventivas periódicas como relubrificação, reparos, rondas de inspeções, limpeza, verificação de calibração e ajustes;
- Tarefas de busca por falhas (*Surveillance*): Tarefas como Testes funcionais periódicos nos equipamentos, normalmente utilizados para identificar falhas ocultas que não são possíveis identificar através das técnicas anteriores;
- Tarefas corretivas ou “Rodar até falhar”: É a estratégia de manutenção, normalmente, mais econômicas. É aplicada quando as consequências da falha são toleráveis e nenhuma outra tarefa com custo-eficaz pode ser identificada;
- Modificação de projeto: É recomendada quando nenhuma tarefa viável pode ser identificada e cujas consequências do modo de falha são inaceitáveis.

4.5.4 Hierarquia na seleção de tarefas de manutenção

Existe uma hierarquia com relação aos tipos de tarefa que normalmente deve ser seguida. Esta hierarquia tem por objetivo minimizar os custos gerais de manutenção, mantendo a confiabilidade e disponibilidade dos ESCs da planta. Tipos de tarefa devem ser selecionadas a partir da seguinte ordem de preferência:

- (1) Tarefas de monitoramento de desempenho (por exemplo, inspeções visuais, parâmetros do processo monitorados; como temperatura, pressão, vazão, entre outros);
- (2) Manutenção Preditiva (por exemplo, análise de vibrações, termografia, análise de óleo lubrificante);
- (3) Não-intrusivas de manutenção (por exemplo, limpeza técnica, troca de óleo, troca de graxa, tensionamento de correias, entre outras);
- (4) Intrusivas de manutenção (por exemplo, com desmontagem para inspeção interna);
- (5) Reparos (por exemplo, a substituição de rolamento, revisão completa).

De modo a otimizar o uso de recursos, preferencialmente, as estratégias de manutenção devem ser definidas segundo o nível de responsabilidade técnica dos executantes, conforme está listado a seguir:

- (1) Inspeção visual: os operadores podem executar, pois são parte de sua ronda normal;
- (2) Teste funcional: operadores podem executar, passa a ser parte de suas rotinas;
- (3) Lubrificação e ajustes simples: ações que requerem habilidades técnicas mínimas;
- (4) Inspeção detalhada: ações que requerem trabalho técnico qualificado;
- (5) Reparos preventivos: a manutenção intrusiva baseada em tempo.

Ambas as listas hierárquicas acima baseiam-se no mesmo princípio de selecionar tarefas preferencialmente de menos intrusivas para mais intrusivas, de menos mão de obra intensiva para mais mão de obra intensiva, bem como do menos ao mais caro.

Um PMP de custo-eficaz deve utilizar atividades existentes quando possível. Por exemplo, um operador que é bastante familiarizado com o funcionamento do equipamento pode executar tarefas como monitoramento de temperaturas e pressões, bem como pode executar também testes funcionais no equipamento como parte de sua rotina. Designar uma tarefa PM deste tipo para uma equipe de manutenção especializada, talvez não seria um melhor uso de mão de obra. Para ter um PMP bem-sucedido e otimizado, todos os departamentos envolvidos devem assumir responsabilidades e estabelecer uma confiança mútua quanto às inspeções e teste que serão feitos, e de que respostas rápidas serão fornecidas se anormalidades forem observadas.

Ao minimizar inspeções intrusivas e intervenções de reparos nos ESCs, há menos chance de introdução de falhas devido a erro humano e a “mortalidade infantil” de novas peças. Além disso, os custos gerais de manutenção são reduzidos (Inspeções e reparos, onde normalmente a desmontagem do ESC é necessária, são geralmente dispendiosos em termos de mão de obra, materiais e tempo de parada da planta) (IAEA, 2007a).

4.5.1 Modelos Padrões de tarefas (EPRI)

As tarefas selecionadas devem considerar, além das características de projeto do ESC, outros aspectos como a sua importância para a planta, sua taxa de utilização e o ambiente de serviço. Mesmo com o uso da Árvore Lógica de Decisão (LTA), diferentes analistas podem fazer diferentes recomendações de tarefas para ESCs iguais com semelhantes aplicações. Variações no grau de experiência dos analistas também podem contribuir no tempo necessário para encontrar as tarefas mais apropriadas para cada tipo específico de componente.

Para alcançar uma maior agilidade, eficiência e coerência entre os analistas na determinação de tarefas, os Modelos Padrões do EPRI podem ser utilizados. Cada modelo identifica as tarefas de manutenção mais aplicáveis e eficazes, e as suas respectivas frequências indicadas considerando sua classificação EPRI quanto à Importância, a Utilização e a Condição de Serviço (EPRI, 2009).

Os modelos padrões são como uma ferramenta de apoio, que servem de referência para auxiliar os analistas em suas tomadas de decisão. Entretanto, nem todas as tarefas recomendadas pelo modelo padrão têm de ser adotadas. As tarefas selecionadas são influenciadas pelas consequências que provocam na planta e o grupo de trabalho é quem analisa e determina se o modo de falha é dominante e digno de prevenção. Determina se tal tarefa deve integrar o PMP, se combinado com a filosofia de manutenção na relação de custo-eficácia do “mix” de estratégias de manutenção da planta. Apesar da padronização ajudar imensamente na disseminação de técnicas mais eficazes, cada empresa possui uma cultura própria e peculiaridades técnicas e operacionais que precisam ser consideradas.

4.5.2 Revisão das tarefas selecionadas

Os resultados da seleção de tarefas precisam ser revisados com as áreas envolvidas, e nesta fase, também é desejável que haja um forte diálogo entre o grupo de trabalho e as pessoas do chão de fábrica, pois além de assegurar que todos estão de acordo com as tarefas selecionadas, esta iniciativa cria uma maior inclusão e integração entre as pessoas e, assim, uma maior boa vontade e comprometimento com as mudanças feitas no PMP. Esta medida assegura também que os PMs definidos são razoáveis e capazes de serem implantadas na prática. Esta revisão, tanto no escopo das tarefas quanto nas frequências selecionadas, é feita com base em recomendações como:

- Modelos Padrão do EPRI: comparar atividades, frequências e/ou duração entre as tarefas atuais e as propostas pelo modelo padrão da Base de dados EPRI;
- Consulte histórico de trabalhos de manutenção corretivas e de tarefas PM executadas sobre o componente ao longo dos anos. Modos de falha dominante e/ou mecanismos de degradação ocorridos no passado que podem não estar cobertos pelas tarefas selecionadas;
- Consulte os documentos de referências dos organismos de fomento do setor, como o EPRI, WANO, INPO, IAEA, entre outros, de modo a obter informações

quanto aos relatórios de eventos, modos de falha graves e mecanismos de degradação que tenham ocorrido em outras plantas ao redor do mundo, mas que podem não estar cobertas pelas tarefas selecionadas;

- Outras fontes como tarefas recomendadas pelo fabricante do ESC, experiências externas de consultores e pareceres de especialistas e peritos;
- Consulte também se as tarefas selecionadas entram em conflito com normas regulatórias, exigências de seguro da planta ou especificações técnicas de equipamentos. Entre outros documentos que estabelecem atividades de caráter obrigatório.

Quando a análise de revisão das tarefas é concluída, fica estabelecido o mais eficiente e eficaz método para gerenciar a manutenção do ativo, estando considerados os fatores do contexto operacional local e outras restrições as quais o ativo está submetido. Um dos grandes benefícios de usar a abordagem RCM através do processo PMO é a revisão das tarefas e suas frequências, bem como a avaliação quanto à manutenibilidade e a eficiência do ESC em relação às melhorias que podem ser feitas. Igualmente importante é a documentação das recomendações de modificação no PMP e as análises preliminares de custo-benefício realizadas neste processo.

O Quadro 11 demonstra, de forma ilustrativa, como as tarefas e frequências definidas nesta etapa de seleção de tarefas são compiladas na Planilha de Trabalho. E, neste exemplo ilustrativo, as avaliações para seleção de tarefas são feitas considerando as análises de criticidade, os modos de falha e seus efeitos. São também consideradas todas as bases técnicas e os históricos do ESC obtidos na coleta de dados. Neste exemplo, considera-se que cada atividade PT de cada tarefa PM é analisada cuidadosamente. E, sobre esta base, pode-se observar que a maior parte das atividades estão adequadas e devem ser mantidas como estão, tanto em termos de escopo como em frequência.

Entretanto, são observadas também oportunidades de otimização para algumas tarefas. A primeira tarefa PM proposta: “Calibração do Sensor de velocidade”, por exemplo, é definida analisando-se sua criticidade, base técnica e o histórico de manutenção, onde observa-se que nas últimas cinco calibrações não são encontradas variações significativas na referência do sensor. Esta calibração no sensor está sendo executada em conjunto com o ajuste de distância do sensor, mas são atividades independentes entre si.

A proposta é desvincular estas duas atividades, criando uma nova tarefa PM de “Calibração do Sensor de velocidade” com diferente frequência. Em se tratando de um modo de falha evidente e “Não-crítico”, avalia-se que sua frequência pode ser reduzida de 6 meses para 2 anos (aumento de intervalo).

Quadro 11 – Definição de tarefas na Planilha de Trabalho

Empresa:	ELETRONUCLEAR - ANGRA 2	Relatório/Ver.:	-	Elaboração:	Grupo de Trabalho		Data:	-	Classificação do ESC:
ESCs:	VENTILADORES DE EXAUSTAO XYZ			Localização:	EDIFÍCIO AUXILIAR DO REATOR		Código Id.:	-	CRÍTICO
Funções do ESC:	- Suprir os edifícios do reator com ar externo e manter as condições especificadas de temperatura e umidade do ar nas salas, de forma a criar condições ambientais favoráveis para o pessoal de operação e para os equipamentos;				Análise de Criticidade:		Definir Estratégias de Manutenção:		
Modos de falha:		Efeitos:		FEC:	EPRI:	CRÍTICO	Tarefa PM Proposta:	Freq.:	Equipe:
Evitar correia patinar		Baixa eficiência		EO	CHM	NÃO			
Vibração e/ou Falha no Rolamento		Falha no Ventilador ou baixa eficiência		ES	CHM	SIM			
Vibrações		Baixa eficiência		EO	CHM	NÃO			
Perda de monitoração e Falta de alarme		Falha no Ventilador		ES	CHM	SIM			
Perda de referencia		Baixa eficiencia		EO	CHM	NÃO	CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE VELOCIDADE	2A	INSTRUM. E CONTROLE
Vibração e/ou Falha no Rolamento		Falha no motor ou baixa eficiência		ES	CHM	SIM			
Perda de isolamento do indutor		Falha do motor		ES	CHM	SIM			
Perda na transferencia energia para o indutor		Falha no motor ou baixa eficiência		ES	CHM	SIM			
Vibração e/ou Falha no Rolamento		Falha no motor ou baixa eficiência		ES	CHM	SIM			
							MONITORAMENTO COM ANÁLISE DE VIBRAÇÕES	2A	PREDITIVA
Vibração e/ou Falha no Rolamento		Falha no motor ou baixa eficiência		ES	CHM	SIM			
Vibrações		Falha no motor ou baixa eficiência		ES	CHM	SIM			
Danos nos comandos elétricos		Falha do sistema		OS	CLM	SIM	INSPEÇÃO NA GAVETA ELÉTRICA DISJUNTORA	5A	ELÉTRICA
Perda de proteção		Afeta Segurança		OS	CHM	SIM			

Fonte: Autoria própria

A tarefa PM proposta de “Monitoramento com análise de vibrações”, em se tratando de uma nova tarefa PM, esta é inserida em uma nova linha na Planilha de Trabalho. Após a análise da base técnica e com base na observação de que os rolamentos ainda apresentam boas condições de uso quando são substituídos, segundo os últimos três registros no histórico de manutenção e entrevistas com os executantes da tarefa. É recomendado que esta tarefa seja eliminada e uma nova tarefa de Manutenção Preditiva de “Monitoramento com análise de vibrações” seja adicionada, de modo que se possa prever o momento mais apropriado para troca dos rolamentos.

Com a eliminação da tarefa de troca dos rolamentos e a aplicação da análise de vibrações, a subsequente tarefa PM atual “Relubrificação dos mancais do motor”, pode ser eliminada também, uma vez que os rolamentos apenas são substituídos em momento oportuno, quando determinado pelas análises de vibração. Entretanto, conforme análise de racionalização de tarefas demonstrada no Quadro 7 do item 4.4.3 deste trabalho, esta tarefa já seria eliminada de qualquer forma em razão de sua duplicidade.

Na tarefa PM proposta “Inspeção na gaveta elétrica disjuntora”, é analisado que, hipoteticamente, o escopo de atividades da tarefa atual consiste em um reparo intrusivo e desnecessário na gaveta disjuntora. Este reparo seria desnecessário devido às boas condições encontradas nesta gaveta ao longo dos últimos quatro reparos da mesma. Neste caso é recomendada uma modificação de escopo da tarefa, substituindo-o por uma tarefa de inspeção que consiste em verificar as condições da gaveta antes de desmontar e trocar componentes, bem como a redução de frequência da tarefa PM (ou aumento do intervalo) de 4 para 5 anos.

Na seleção das três tarefas, são seguidas as hierarquias de tarefas do processo PMO conforme definido no item 4.5.4 deste trabalho, o que fica evidenciado pela aplicação de tarefas de monitoramento e inspeções, manutenção preditiva, inspeção não intrusiva e redução de frequência de tarefas. Deste modo, garantindo um melhor custo-eficácia das tarefas do ESC exemplo, o ventilador.

4.6 Definir estratégias de manutenção para ESCs “Não-Críticos”

Para os ESCs considerados como “Não-críticos”, tarefas PM podem ser definidas apenas se forem simples e/ou de custo-eficaz. Se nenhuma tarefa de custo-eficaz pode ser definida, deve-se adotar para os ESCs “Não-críticos” a estratégia de “Rodar até falhar”. Isto não significa que o ESC deve rodar até a destruição total ou outro efeito grave similar, isto significa que não há nenhuma tarefa PM aplicável a custo-eficaz que possa ser definida para o ESC, significa que as consequências de “Rodar até falhar” são toleráveis e, também, que esta falha é evidente (de fácil detecção para operadores ou pessoal de manutenção).

Ao definir a estratégia de “Rodar até falhar” para um ESC, ou seja, uma Manutenção Corretiva, isto não significa que o ESC está abandonado à própria sorte. Na verdade, deve-se considerar como uma decisão estratégica da empresa sobre um de seus ativos, que está sob controle pelo Sistema de Gestão de Ciclo de Vida da planta. E, em se tratando de uma estratégia deste sistema, deverão estar previstas a disponibilidade de peças sobressalentes e consumíveis para pronta substituição do ESC ao falhar, conhecidas suas taxas de degradação e reposição, previsão de mão de obra e orçamentária de recursos, entre outras.

Alguns critérios que, normalmente, são usados para determinar se a estratégia de “Rodar até falhar” é aplicável para o ESC “Não-crítico” são:

- Existe um alto custo de reposição ou manutenção se o ESC “Rodar até falhar”?
- A falha do ESC pode provocar outras falhas em ESCs críticos (falha oculta)?
- Existe uma tarefa PM simples que impeça uma degradação severa do ESC (por exemplo, lubrificação, limpeza do filtro)?
- A falha funcional do ESC pode acarretar em perigo potencial para o pessoal da planta se o ESC “Rodar até falhar” (por exemplo, executar uma tarefa PM pode ser menos perigoso do que a execução da ação corretiva quando ocorrer a falha)?
- O funcionamento do ESC é necessário para dar apoio ou garantir condições específicas para a execução de uma atividade crítica de manutenção, ou é significativo para os operadores?
- O histórico de manutenção apresenta uma excessiva frequência de ocorrência de Manutenção Corretiva realizada sobre ESC que deve ser mitigada (isto é, a aplicação de uma tarefa PM poderia ser menos dispendiosa em termos de mão de obra e materiais de reposição do que o regime de manutenção atual)?

Uma resposta afirmativa a uma destas questões implica que uma tarefa PM deve ser selecionada para o ESC “Não-crítico”. Se não houver respostas afirmativas para qualquer um desses critérios, então a melhor opção para o componente é “Rodar até falhar”. E, neste caso, as tarefas PM definidas para este ESC, caso existam no PMP atual, devem ser eliminadas.

4.7 Comparação de tarefas de manutenção

A seleção de tarefas está concluída e revisada, então, nesta fase final de análises, é feita a comparação entre as tarefas selecionadas ou desenvolvidas ao longo do processo PMO com as tarefas PM do atual PMP. O objetivo desta comparação é identificar as mudanças necessárias no PMP existente e, assim, otimizá-lo. Esta comparação fornece, também, uma nova oportunidade de verificação das análises para garantir a validade dos pressupostos e a completude ou lacunas remanescentes entre as análises PMO e o PMP existente e em funcionamento. Neste passo ficam evidentes, por exemplo:

- Os elementos do PMP atual que são rentáveis, e aqueles que não são e precisam ser eliminados;
- Que tarefas seriam mais eficazes e menos onerosas se tivessem políticas baseadas na condição, em vez de baseadas no tempo ou vice-versa;
- Que tarefas são desnecessárias e precisam ser removidos do PMP;
- Que tarefas seriam mais eficazes se fossem feitas em outras frequências;
- Que falhas seriam prevenidas de forma mais adequada com o uso de tecnologias mais avançadas, ou ainda, mais simples;
- Que dados podem ser monitorados de modo a prever a vida útil do equipamento mais precisamente;
- O que deve ser eliminado pela análise de causa raiz.

Para executar corretamente a Comparação de tarefas, todo o sistema de informações referente às tarefas PM deve estar disponível para cada componente: tarefas com base no tempo, monitoramento ou testes funcionais, testes de desempenho e atividades de rondas de operadores. Também é importante dispor das informações obtidas em entrevistas pessoais na planta, em especial atividades de manutenção informais que possam ser rotineiramente realizadas.

A comparação de tarefas é realizada pelo analista em nível de componente, o que garante maior rigor das análises e fornece um retrato mais preciso do PMP em seu estado atual. Os resultados desta etapa estão nas seguintes categorias de ação:

- **MANTER:** tarefas PM existentes cujo processo PMO de seleção de tarefas recomenda exatamente as mesmas tarefas PM (em conteúdo e frequência). Também devem ser mantidas as tarefas existentes que dizem respeito às normas regulamentares, especificações técnicas, exigências de seguradoras, entre outros códigos de caráter obrigatório;
- **MODIFICAR:** tarefas existentes no PMP que diferem, ainda que pouco, no conteúdo das atividades ou frequência das tarefas PM recomendadas pelo processo de seleção de tarefas, cuja modificação a torna mais aplicável e eficaz;
- **APAGAR:** tarefas existentes no PMP, que podem ser substituídas por outras tarefas PM mais aplicáveis e eficazes recomendadas pelo processo PMO de seleção de tarefas. Bem como, tarefas existentes que sejam redundantes entre si, ou ainda, tarefas PM onde a aplicação da estratégia de “Rodar até falhar” tenha sido recomendada pelo processo PMO;
- **ADICIONAR:** novas tarefas PM destinadas a prevenir ou mitigar falhas funcionais identificadas, cujas tarefas existentes não sejam adequadas. A adição de novas tarefas também se aplica a todos os ESCs para os quais não existem tarefas PM estabelecidas, mas que são identificadas durante o processo PMO, tarefas aplicáveis e eficazes.

O Quadro 12 demonstra, de forma ilustrativa, como são realizadas as comparações e como estas são compiladas na Planilha de Trabalho:

Quadro 12 - Comparação de tarefas de manutenção

Empresa:	ELETRONUCLEAR - ANGRA 2			Elaboração:		Grupo de Trabalho		Data:	-	Classificação do ESC:
ESCs:	VENTILADORES DE EXAUSTAO XYZ			Localização:		EDIFÍCIO AUXILIAR DO REATOR		Código Id.:	-	CRÍTICO
Funções do ESC:	- Suprir os edifícios do reator com ar externo e manter as condições especificadas de temperatura e umidade do ar nas salas, de forma a criar condições ambientais favoráveis para o pessoal de operação e para os equipamentos;			Análise de Criticidade:			Definir Estratégias de Manutenção:			Comparação de Tarefas:
Tarefa PM:		Freq.	Equipe:	FEC:	EPRI:	CRÍTICO:	Tarefa PM Proposta:	Freq.:	Equipe:	Ações:
MANUTENÇÃO PREVENTIVA DO VENTILADOR		3M	Mecânica	EO	CHM	NÃO				MANTER
				ES	CHM	SIM				MANTER
				EO	CHM	NÃO				MANTER
AJUSTE DA DISTANCIA DO SENSOR VELOCIDADE		6M	Instrum. e Controle	ES	CHM	SIM				MANTER
				EO	CHM	NÃO	CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE VELOCIDADE	2A	INSTRUM. E CONTROLE	MODIFICAR
RELUBRIFICAR OS ROLAMENTOS DO MOTOR		1A	Mecânica	ES	CHM	SIM				MANTER
MANUTENÇÃO PREVENTIVA NO MOTOR		2A	Elétrica e Mecânica	ES	CHM	SIM				MANTER
				ES	CHM	SIM				MANTER
				ES	CHM	SIM				ELIMINAR
							MONITORAMENTO COM ANÁLISE DE VIBRAÇÕES	2A	PREDITIVA	ADICIONAR
				ES	CHM	SIM				ELIMINAR
				ES	CHM	SIM				MANTER
MANUTENÇÃO PREVENTIVA DA GAVETA		4A	Elétrica	OS	CLM	SIM	INSPEÇÃO NA GAVETA ELÉTRICA DISJUNTORA	5A	ELÉTRICA	MODIFICAR
CALIBRAÇÃO DO RELÉ DE FALHA À TERRA		8A	Instrum. e Controle	OS	CHM	SIM				MANTER

Fonte: Autoria própria

Após terem sido revisadas todas as tarefas PM atuais e propostas definidas para o ESC, é possível avaliar as mudanças sofridas no PMP do ESC e definir os planos de ação que deverão ser implantados.

Algumas tarefas definidas permanecerão como uma atividade PT dentro da mesma tarefa PM, como é o caso da “Inspeção da gaveta elétrica disjuntora”. Já no caso da nova tarefa “Monitoramento com análise de vibrações”, apesar de ter sido mantida a mesma frequência, esta tarefa provavelmente deve formar uma nova tarefa PM uma vez que passa a ser controlada pela manutenção preditiva, que normalmente é formada por uma equipe diferente. A nova tarefa “Calibração do sensor de velocidade”, também deve formar uma nova tarefa PM sendo desmembrada da sua atual tarefa PM, devido à diferente frequência de aplicação.

Este exemplo ilustrativo teve por objetivo demonstrar de forma prática como a Planilha de Trabalho pode ser utilizada para concentrar todas as análises do processo PMO, tornando-o mais eficaz e dinâmico.

4.8 Implantar as decisões

As propostas de alteração do PMP em “Manter”, “Modificar”, “Eliminar” ou “Adicionar” tarefas, devem ser revisadas e aprovadas por um comitê de análise que, em geral, é formado por especialistas das áreas Operação, Manutenção, Engenharia de Sistemas e Equipamentos ou outras partes interessadas para possíveis revisões e/ou comentário.

Sendo aprovadas pelo comitê, a implantação é o passo que normalmente costuma demandar um tempo considerável devido a dificuldades que variam com a complexidade da organização, como o número de turnos e diferentes grupos de trabalho e departamentos de manutenção, principalmente, em organizações que possuem uma cultura de resistência a mudanças. Uma liderança forte e atenção aos detalhes são necessários para que esta etapa seja bem-sucedida (TURNER, ?).

As revisões das propostas de alteração do PMP devem levar em conta fatores que requerem uma especial atenção, tais como:

- Observar se tarefas de caráter obrigatórias que devem ser preservadas, como especificações técnicas, exigências de seguradoras, códigos ou requisitos regulamentares;

- Elaborar relatório de impactos das mudanças sobre o PMP, como recursos de mão de obra necessários, impacto sobre a disponibilidade e confiabilidade das plantas e o impacto na redução de custos de manutenção;
- Tarefas PM para ESCs “Não-críticos” (independentemente da redundância) devem ser tratadas como exceções e revisadas com cautela, pois pela filosofia de otimização PMO, em geral, seriam “Rodar até falhar”. Especial atenção também para as tarefas PM eliminadas, é importante documentar toda a base técnica específica para estas alterações;
- Acompanhar a implantação no que diz respeito às mudanças necessárias de modo a instruir os elaboradores e revisores dos novos procedimentos e para os programadores do Sistema de Gestão da Manutenção, estabelecendo uma estrutura de documentação e revisão que evite erros de cadastramento das alterações;
- Antes da incorporação das mudanças no PMP deve-se verificar se as bases técnicas finais de tarefas PM estão embasadas com a devida documentação pertinente, se são encaminhadas para análise do comitê e se estão todas com aprovação;
- Documentar e arquivar permanentemente todas as etapas do processo e os resultados das avaliações, para posterior utilização em futuros ciclos de revisão.

O cadastramento das alterações nas tarefas PM aprovadas, normalmente é feito em um “*Software*” de controle, ou seja, um sistema de gerenciamento e controle das tarefas do PMP. Algumas informações que, normalmente, são encontrados no cadastramento de tarefas PM são:

1. Título de tarefa PM;
2. Número da tarefa PM;
3. Frequência da tarefa;
4. Duração da tarefa;
5. Mão de obra necessária (Homens x Horas - HH);
6. Prioridade de execução;
7. Materiais e consumíveis utilizados;
8. Nome do(s) ESC(s);

9. Número de Identificação do ESC;
10. Coordenação responsável;
11. Precauções especiais de segurança e instruções de trabalho;
12. Informações de isolamento de trabalho do ESC;
13. Ferramentas utilizadas (padrão e especial);
14. Outras informações;
15. Objetivos Tarefa;
16. Tarefa com Etapas detalhadas;
17. Requisitos dos testes de pós manutenção;
18. Perguntas de Eficácia da tarefa PM:
 - "Tarefa foi executada totalmente como o planejado?" Sim / Não/ Porque?
 - "O ESC poderia ter rodado mais tempo antes de fazer esta tarefa?" Sim / Não
 - "Poderia a eficácia deste PM ser melhorada? " Sim / Não/ Como?

4.9 Programa de Gestão de Ativos e Ciclo de Vida

Esta etapa reflete ao objetivo estratégico de criar uma organização que visa à busca constante da melhoria de seus métodos de avaliação de tarefas que possam comprometer seu desempenho, bem como cada falha funcional não prevista que venha a ocorrer. Este objetivo requer um programa que possui sua força de trabalho adequadamente treinada em técnicas de análise, que possui uma equipe que é encorajada a mudar práticas para melhorar a sua própria satisfação no trabalho e reduzir os custos de produção com o uso inteligente de recursos.

Através dos passos de 1 a 8 ilustrados pelo fluxograma da Figura 17 e desenvolvidos ao longo dos Itens 4.1 a 4.8 deste trabalho, o processo PMO estabeleceu um método para obtenção de um PMP mais otimizado e com custo-eficaz. Ao incorporar as alterações no Programa de Gestão de Ativos e Ciclo de vida, o PMP fica consolidado e a planta sob controle. Com a incorporação destes pontos de melhoria no PMP, a planta passa a contar com uma eficiente gestão de ativos. Pois conforme os recursos são poupados, estes podem ser reinvestidos, por exemplo, em reprojatos de ESCs com falhas de projeto ou ampliação de limitações operacionais, expandindo sua capacidade com maior disponibilidade e confiabilidade.

Vários processos vitais para a gestão eficiente dos ativos podem ser concebidos ou ajustados conforme os benefícios das melhorias são obtidos. Estes processos incluem:

- Estratégia de produção e manutenção;
- A medição do desempenho;
- Relatórios de histórico de falhas e eliminação de defeitos;
- Planejamento e programação;
- Avaliação de sobressalentes;
- Práticas de oficina e manutenção.

O sucesso da implantação do processo PMO é condição para garantir duas fases essenciais da gestão de ativos e confiabilidade de equipamentos da planta:

- Monitoramento de desempenho; Definição de planos de monitorização, de componentes, monitorando o desempenho por meio de indicadores de degradação, cross-análise de sistemas, monitoramento indireto através de indicadores de manutenção e confiabilidade.
- Aplicação do PMP e do Programa de Ciclo de vida; Planos de ação de acompanhamento, ações corretivas e análise de causa raiz aparente, estado atual dos equipamentos, ajuste de padrões de desempenho de equipamentos e, finalmente, medir o desempenho do processo PMO e os lucros associados (DARRAGI et al., 2005).

Os seguintes indicadores de desempenho de manutenção são recomendados:

- Taxa de interrupções forçadas da planta;
- Disponibilidade do mesmo ESC em diferentes sistemas;
- Disponibilidade de sistemas de segurança;
- Alarmes automáticos não simulados;
- Taxa de acidentes de trabalho do pessoal que realiza a manutenção;
- Taxa de exposição à radiação do pessoal que realiza atividades de manutenção;
- Carteira de Manutenção (razão entre nº de tarefas Corretivas x Proativas);
- As horas extraordinárias efetuadas pelo pessoal que realiza a manutenção;
- Os resultados de avaliação em áreas de manutenção (IAEA, 2003).

5. Aplicação PMO na Usina Angra 2

Esta aplicação do método PMO está concebida de modo que possa ser validada como uma ferramenta que ajude a promover a otimização do PMP da Usina Angra 2. Conforme apresentado no item 3.3.2 deste trabalho, a estrutura de gerenciamento das atividades do PMEN, com base a norma INPO AP-913 (INPO, 2001), estabelece a necessidade de uma ferramenta que possibilite a auto avaliação e melhoria contínua do PMP existente na Usina, otimizando seus padrões de desempenho de forma continuada e, também, reconstruindo a base técnica documental de cada tarefa do Plano de Manutenção (PM) que venha a ser otimizada.

Neste capítulo é demonstrado em etapas como as análises do projeto PMO são desenvolvidas sob a luz dos preceitos do RCM, bem como são aplicadas sobre sistemas significativos para a segurança da Usina Angra 2. As etapas do processo PMO desenvolvidas neste capítulo, seguem as mesmas etapas do método de aplicação definido no capítulo 4 deste trabalho.

5.1 Definições do projeto de aplicação na Usina Angra 2

Este projeto PMO teve por motivação oportunidades de melhoria observadas através do monitoramento de indicadores de manutenção realizados pelo PMEM. Através destes indicadores observa-se que as taxas de confiabilidade e indisponibilidade referentes aos sistemas auxiliares de segurança, como o Sistema de Remoção de Calor Residual (JN), poderiam ser melhoradas apesar de estarem dentro dos limites estabelecidos de segurança.

Outros fatores motivadores que chamam a atenção para uma análise mais aprofundada quanto à viabilidade de aplicação deste projeto PMO, são:

- Fator de relevância do sistema: que é essencialmente ligado à segurança da Usina e que, portanto, exige a aplicação de um processo de otimização muito bem estruturado;
- Fator de falha oculta: por se tratar de um sistema com operação em prontidão, ou seja, que permanece parado em espera para ser usado somente em uma situação de emergência, portanto, é desejável que tenha sua disponibilidade maximizada;
- Fator de custo: uma vez que é observada uma oportunidade potencial para uma redução significativa de custos de manutenção destes sistemas.

Nesta análise preliminar quanto à viabilidade do projeto é observada que as taxas de confiabilidade e indisponibilidade se devem, em parte considerável, à realização de testes periódicos obrigatórios nas bombas e válvulas destes sistemas, onde são realizadas a desmontagem quase que completa destes ESCs para realização de inspeções da integridade estrutural interna da bomba, bem como, uma revisão geral com inspeções de componentes e troca preventiva de sobressalentes internos.

5.1.1 Seleção e delimitações de sistemas para aplicação PMO

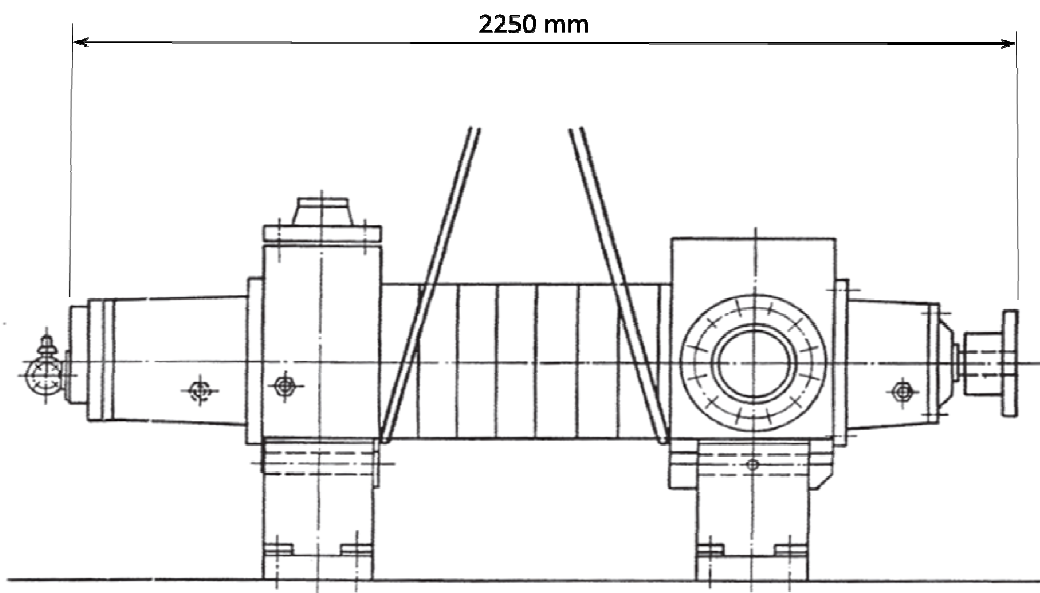
Como descrito anteriormente, a realização deste projeto PMO na Usina Nuclear Angra 2 tem por base os resultados de indicadores monitorados continuamente pelo PMEM. Estes indicadores demonstram oportunidades de melhoria em tarefas de manutenção de sistemas importantes, como o Sistema de Remoção de Calor Residual (JN). Com base nestas observações, um projeto PMO é delimitado de modo a atuar somente nos pontos de melhoria identificados no PMP atual. E, portanto, não se pretende através deste projeto de aplicação rever todo o PMP existente.

O PMP existente na Usina Angra 2 tem mais de vinte anos de experiências em operação. Em 2007 foi revisado completamente por uma implantação do *Streamlined RCM*, que está incorporada ao programa de gestão de ativos e ciclo de vida da planta. Portanto, é pressuposto nesta aplicação do método PMO que a maioria das tarefas PM existentes já cobrem os ESCs funcionalmente mais importantes da Planta. E, assim, o esforço de otimização através deste projeto PMO se limita aos ESCs no âmbito do PMP existente.

De modo a demonstrar as etapas do processo PMO em detalhes, é selecionada como exemplo de aplicação a Bomba de Injeção de Segurança do Sistema de Injeção de Alta Pressão (JND). Ao longo de cada etapa do processo PMO, conforme definido no capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos e a discussão destes resultados.

A Bomba de Injeção de Segurança e seus componentes auxiliares, ilustrada pela Figura 20, é o principal equipamento do Sistema de Injeção de Alta Pressão (JND), que por sua vez pertence ao Sistema de Remoção de Calor Residual (JN). O sistema JN, incluindo seus subsistemas, conforme introduzido no item 3.1.2 deste trabalho, tem por função primária a remoção de calor residual do núcleo do reator após acidente com perda de refrigerante do circuito primário, promovendo um resfriamento de emergência no núcleo. Além de outras funções operacionais secundárias.

Figura 20 - Bomba de Injeção de Segurança



Fonte: ELETRONUCLEAR (2001)

Este projeto PMO abrange, também, outras bombas e válvulas pertencentes aos sistemas relacionados e subsistemas do JN. Entretanto, este trabalho limita-se a demonstrar em detalhes apenas as etapas de desenvolvimento sobre as Bombas de Injeção de Segurança do Sistema JND, pois uma demonstração repetitiva do mesmo método sobre os demais subsistemas seria desnecessária aos objetivos do trabalho. Por fim, são apresentados os resultados globais do projeto PMO aplicado às demais bombas e válvulas dos demais sistemas relacionados e subsistemas do JN. Estes resultados globais são discutidos e são feitas as considerações sobre a metodologia e a estratégia PMO adotada neste trabalho.

5.1.2 Objetivos e metas do projeto de aplicação PMO

O objetivo para o projeto PMO aplicado neste trabalho é a otimização das tarefas PM das bombas e válvulas do sistema JN para, deste modo, reduzir custos de manutenção mantendo ou superando seus níveis de confiabilidade e disponibilidade, através de:

- Reavaliação de escopo de atividades;
- Reavaliação de frequências das tarefas PM existentes;
- Avaliação a eliminação de tarefas intrusivas nos ESCs;
- Redução de erros processuais por inadequações técnicas e/ou erro pessoal.

O objetivo do projeto está alinhado aos objetivos estratégicos de gestão de ativos e ciclo de vida da planta, que é estender a vida útil de operação da planta a longo prazo, e visa manter o padrão de desempenho dos equipamentos em “tão bom quanto novo” e prosseguir com os programas de melhoria do PMP existente. Espera-se atingir as seguintes metas da gestão de ativos da planta:

1. Garantir que os ESCs da planta sejam mantidos adequadamente de forma proporcional à sua importância para a segurança, confiabilidade e disponibilidade;
2. Otimizar o número e o desempenho de tarefas PM, mantendo um equilíbrio apropriado entre custo e benefício;
3. Tomada de decisão quanto às tarefas e frequências de manutenção baseada em fatos e dados concretos do histórico de manutenção do ESC, bem como, documentação técnica pertinente e experiência operacional;
4. Estabelecer uma base técnica documentada para o PMP;
5. Maximizar o uso de técnicas de monitoramento da condição quando adequado e economicamente viável;
6. Garantir uma transição suave das mudanças feitas no PMP, de modo que estas mudanças sejam entendidas e assimiladas por todas as partes envolvidas no programa de gestão de ativos e ciclo de vida da planta e, assim, garantir que os resultados obtidos com o projeto PMO sejam devidamente mantidos até o final de vida da planta e seu descomissionamento.

5.1.3 Estratégias do projeto PMO

A estratégia adotada para alcançar os objetivos deste projeto PMO, consiste em uma aplicação do processo PMO sobre componentes específicos, as bombas e válvulas dos sistemas relacionados e subsistemas do JN. Ou seja, este projeto visa angariar esforços em apenas dois tipos semelhantes de ESCs, independentemente dos sistemas aos quais pertençam, conforme conceito estratégico ilustrado pelo Quadro 2 no item 2.5 deste trabalho.

Esta estratégia é escolhida devido aos fatores de motivação do projeto PMO, uma vez que as oportunidades de melhoria observadas através do monitoramento da manutenção indicam para um tipo específico de ESC com tarefas semelhantes e, que devido aos testes periódicos com desmontagem para inspeção internas, apresentam indicadores que podem ser melhorados. Entretanto, ainda que semelhantes, neste trabalho cada ESC deve ser analisado

individualmente, pois possuem diferentes históricos de manutenção e estão sob diferentes condições operacionais. E, deste modo, podem ter como resultado diferentes tratativas de manutenção ao fim do processo PMO.

Primeiramente, o método é aplicado nas quatro bombas de injeção de segurança do sistema JND (cada uma das quatro bombas pertence a uma das quatro redundâncias do sistema JND). Em seguida, esta aplicação é replicada para os demais sistemas relacionados ao JN, em um total de 53 bombas e 72 válvulas destes sistemas. A aplicação é demonstrada em detalhes apenas nas quatro bombas redundantes do sistema JND, pois ainda que os resultados da aplicação sejam diferentes para cada ESC de cada subsistema, o método PMO adotado é o mesmo, e neste trabalho pretende-se demonstrar como o método PMO pode otimizar o PMP existente, trazendo ganhos à organização. Não é interesse deste trabalho mostrar os resultados individuais de todas as 53 bombas e 72 válvulas.

5.1.4 Organização do projeto PMO

Este projeto PMO implantado em Angra 2 faz parte do programa de melhoria da gestão de ativos e ciclo de vida da Usina, que é de responsabilidade do PMEM. Toda a base de dados e recursos específicos necessários para configurar e implantar este projeto PMO já se encontram disponíveis como parte da estrutura e das rotinas de trabalho do PMEM.

A equipe de trabalho é constituída por vários níveis de experiência, conhecimento e habilidades, é composta pelo Grupo de Controle do PMEM, por pessoal da operação da planta, profissionais da manutenção e departamentos de engenharia. Entretanto, ao ser adotada a estratégia de atuar em determinado tipo específico de ESC, este grupo ficou mais enxuto, não exigindo uma participação mais abrangente de especialistas em diversas áreas de outros departamentos, apenas especialistas no tipo específico de ESC selecionado.

A divisão das atividades, responsabilidades e grupos de trabalho se deu conforme estabelecido pela estrutura de trabalho do PMEM, definido no item 3.3.4 deste trabalho, que conta com um Grupo de Análise de Dados, Comitê de Avaliação e o Grupo de Controle do PMEM, sendo as decisões finais aprovadas pela Comissão de Revisão da Operação da Usina (CROU) de Angra 2.

5.2 Desdobrando do PMP existente das bombas do JND

As informações do PMP referentes aos ESCs da Usina encontram-se devidamente armazenadas nos bancos de dados do Sistema de Gerenciamento da Manutenção (*Software MAXIMO®*) de Angra 2 que, conforme apresentado no item 3.2.4 deste trabalho, faz todo o controle do PMP, desde a emissão das Licenças de Trabalho (LTs), registros de execução e arquivamento da LT para fins de histórico.

Nesta etapa, as informações das tarefas PM e as atividades dos Planos de Trabalho (PTs) referentes às Bombas de Injeção de Segurança do JND são extraídas do Sistema MAXIMO® e “desdobradas” na Planilha de Trabalho, conforme ilustrado pelo Quadro 13:

Quadro 13 - Desdobramento do PMP das bombas do JND

Empresa:	ELETRONUCLEAR - ANGRA 2	Relatório/Ver.:	-	Elaboração:	Grupo de análise de dados - PMEM	Data:	-	Classificação do ESC:
ESCs:	BOMBAS DE INJEÇÃO DE SEGURANÇA	Localização:	EDIFÍCIO AUXILIAR DO REATOR	Código Id.:				
Funções do ESC:								Análise de Criticidade:
	Tarefa PM:	Freq.	Equipe:	Nome do PT:	Modos de falha:	Efeitos:	FEC:	EPRI: CRÍTICO:
	TESTE PERIÓDICO CONFORME SURVEILLANCE 1JND5001	4 Ciclos	Mecânica	REVISÃO GERAL DA BOMBA				
	CALIBRAÇÃO DO RELÉ DE PROTEÇÃO DO MOTOR	2 Ciclos	Elétrica	CALIBRAÇÃO DO RELÉ DE PROT. DE MOTOR MOD. IMM7990				
	CALIBRAÇÃO RELÉ FALHA A TERRA	2 Ciclos	Elétrica	CALIBRAÇÃO DO RELÉ FALHA À TERRA ESTATOR MOD.7SN94				
	MANUTENÇÃO PREVENTIVA NO MOTOR	2 Ciclos	Elétrica e Mecânica	PREVENTIVA ELÉTRICA DO MOTOR DE MÉDIA TENSÃO				
	MANUTENÇÃO PREVENTIVA DISJUNTOR 3AC	2 Ciclos	Elétrica	REVISÃO GERAL DOS DISJUNTORES TIPO 3AC DA SIEMENS				
	MANUTENÇÃO PREDITIVA DE LUBRIFICAÇÃO	84 Dias	Preditiva	PMEM - ANÁL. LUBRIF. OILVIEW / INSPEÇÃO VISUAL				
	INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA	168 Dias	Preditiva	PMEM - INSPEÇÃO E ANÁLISE TERMOGRÁFICA				
	MANUTENÇÃO PREDITIVA DE VIBRAÇÃO	84 Dias	Preditiva	PMEM - MANUTENÇÃO PREDITIVA DE VIBRAÇÃO				

Fonte: ELETRONUCLEAR (2009)

Esta Planilha de Trabalho segue o mesmo modelo apresentado no ANEXO A, porém, alguns campos que não são de interesse imediato, como itens de cabeçalhos e “Códigos de identificação” são suprimidos a cada etapa para que as informações fiquem mais visíveis. Ao desdobrar o PMP da bomba, pode-se observar que há apenas um único Plano de Trabalho (PT) associado a cada tarefa PM atual. Por este motivo, têm “Nomes” semelhantes e, também, são suprimidos da Planilha de Trabalho nas próximas etapas.

Pode-se observar que todas as quatro redundâncias das Bombas de Injeção de Segurança do Sistema JND apresentam o mesmo PMP, ou seja, possui exatamente as mesmas tarefas com as mesmas frequências e, por este motivo, somente está sendo apresentada a Planilha de Trabalho de uma das bombas como representação das etapas do processo PMO para as demais. Também pode-se observar na Planilha apresentada, que as frequências de algumas tarefas PM são dadas em “Ciclos de Operação”.

Um “Ciclo de Operação” compreende o período de aproximadamente quatorze meses transcorridos entre as datas de retorno em operação após as Paradas da Usina para recarga de elementos combustíveis no núcleo do reator. Cada Parada tem uma duração aproximada de quatro semanas, e neste período são realizadas diversas atividades de manutenção que somente podem ser feitas com os equipamentos desligados.

Na Planilha de trabalho, algumas tarefas apresentam frequências de 84 dias e 168 dias, estas equivalem respectivamente a períodos de 3 meses (90 dias) ou 6 meses (180 dias). Estas frequências são cadastradas no Sistema MAXIMO® desta forma porque é descontado em cada tarefa PM cadastrada o tempo proporcional médio de parada da usina, de aproximadamente um mês. Ou seja, como se o ano tivesse aproximadamente onze meses e, assim, cada mês teria menos dias, proporcionalmente. Deste modo, o Sistema MAXIMO® considera como tempo de degradação, o período em que os equipamentos estão de fato em funcionamento.

Também é importante esclarecer que, por exemplo, a tarefa PM “Teste Periódico conforme *Surveillance* 1JND50.0/1-4” que tem uma frequência de 4 ciclos e, como são quatro bombas redundantes neste sistema, as mesmas são programadas no Sistema MAXIMO® de modo que sejam executadas uma bomba diferente a cada ciclo, assim, ao fim de quatro ciclos todas as bombas terão sido executadas, então os testes recomeçam na mesma sequência novamente.

5.3 Coleta de dados para o projeto PMO

A coleta de dados é feita, em sua maior parte, pelo Grupo de análise de dados, conforme introduzido no item 3.2.4 deste trabalho. Os dados históricos de manutenção, como ações de manutenção corretivas, eletivas e tarefas PM executadas, são extraídos do banco de dados do Sistema MAXIMO® de Angra 2 e contemplam os dados referentes aos Ciclos de Operação de número 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8. Nesta etapa, também são consultados dados nos manuais técnicos de suporte do fabricante das bombas, bem como são feitas entrevistas com colaboradores das equipes de manutenção e operadores envolvidos nas atividades relacionadas às bombas.

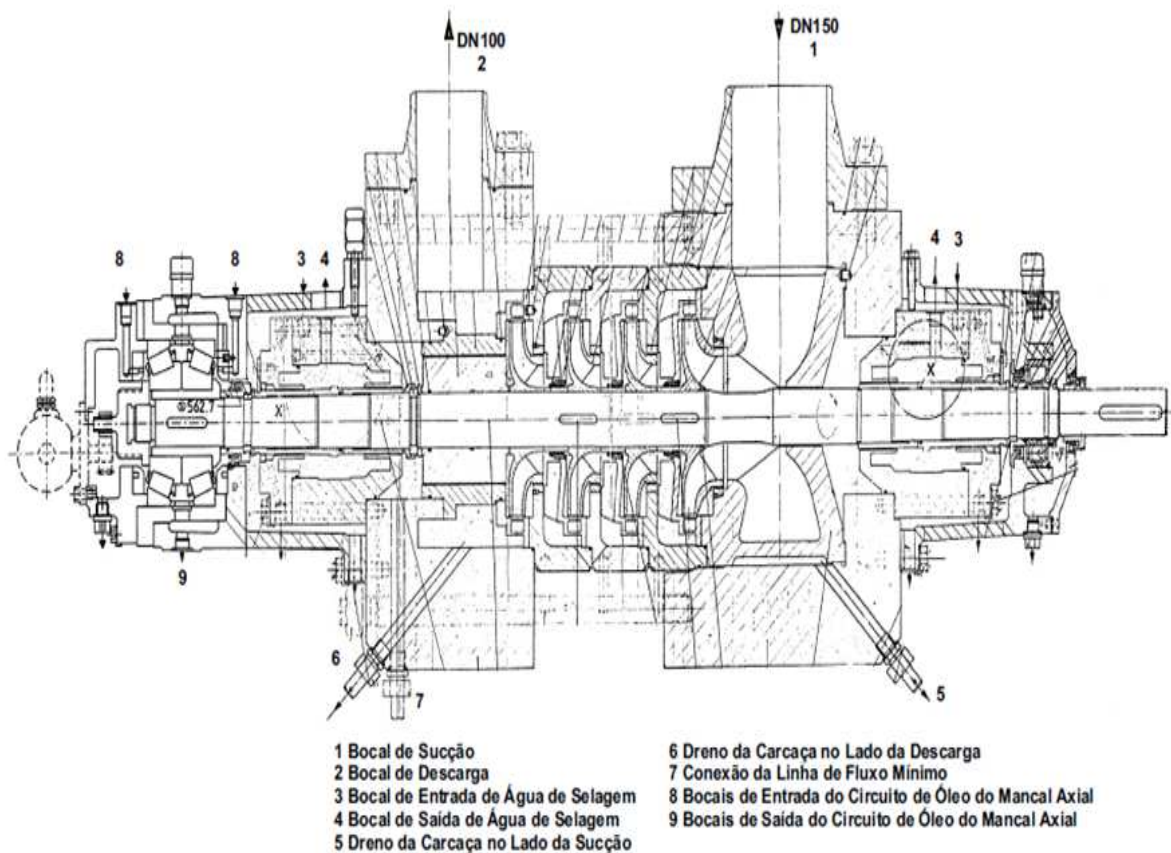
A estratégia adotada de aplicar o método PMO em tipos específicos de ESCs simplifica, também, a fase de coleta de dados, uma vez que reduz substancialmente a gama de documentos necessários para a realização das análises do processo PMO.

5.3.1 Descritivo técnico da bomba do sistema JND

As Bombas de Injeção de Segurança, ilustradas com mais detalhes pela Figura 21, são bombas horizontais centrífugas de multiestágios com 9 impelidores em aço austenítico. São acionadas pelo acoplamento com um motor elétrico de 538 kW de potência, e estão projetadas para operar com pressão de 145 bar e temperatura de 100 °C. Sua vazão é de 62,5 kg/s de solução a 2000 ppm de ácido bórico em água desmineralizada.

A vedação dos bocais de sucção e de descarga se dá por meio de “O-rings” (anéis de vedação), com seu eixo suportado em ambos os lados em mancais de rolamento. O equilíbrio do empuxo axial é conseguido por meio de um pistão de balanceamento e um mancal de rolamento axial. O suprimento de óleo dos mancais é assegurado através de um sistema de óleo cuja bomba é acionada pelo próprio eixo da bomba. A vedação do eixo nas duas extremidades ocorre por meio de selos hidrodinâmicos duplos com anéis bombeadores, os selos hidrodinâmicos são supridos com água desmineralizada a 9 bar, proveniente do Sistema de Suprimento de Água de Selagem da Usina. O fornecimento de energia das bombas ocorre tanto por meio da rede elétrica de suprimento normal, como por meio da rede de suprimento de emergência.

Figura 21 - Corte longitudinal da Bomba de Injeção de Segurança



Fonte: ELETRONUCLEAR (2001)

Dados operacionais da bomba do sistema JND

- Tempo estimado de vida em serviço: 10.000 horas de operação
- Potência do motor: 450 kW
- Pressão atm./temp. na sucção: 0-14/35-80 bar/°C
- Pressão atm./temp. na descarga: 30-125/35-80 bar/°C
- Com 30 bar de contrapressão no SRR:
 - Vazão: 62,5 kg/s
 - Altura manométrica: 500 m
- Com 1 bar de contrapressão no SRR:
 - Vazão 77 kg/s
 - Altura manométrica 300 m

5.3.2 Histórico de manutenção da bomba do sistema JND

No Quadro 14 encontram-se uma síntese do histórico completo das ocorrências de Manutenção Corretivas e Eletivas ocorridas sobre as quatro bombas do sistema JND até a aplicação deste projeto. Estas informações são extraídas do banco de dados do sistema MAXIMO[®] pelo grupo de análise de dados sendo agrupadas conforme o número de ocorrências.

Quadro 14 - Principais ocorrências nas bombas

OCORRÊNCIAS	ESC	NÚMERO DE OCORRÊNCIAS
Queima de selo mecânico	BOMBA 10	0
	BOMBA 20	0
	BOMBA 30	1
	BOMBA 40	1
Desarme por alta temperatura no mancal	BOMBA 10	3
	BOMBA 20	1
	BOMBA 30	0
	BOMBA 40	1
Contaminação ferrosa do óleo	BOMBA 10	6
	BOMBA 20	9
	BOMBA 30	3
	BOMBA 40	4
Desgaste por atrito do labirinto ⁸	BOMBA 10	0
	BOMBA 20	1
	BOMBA 30	0
	BOMBA 40	1
Vazamento de óleo	BOMBA 10	11
	BOMBA 20	4
	BOMBA 30	11
	BOMBA 40	8

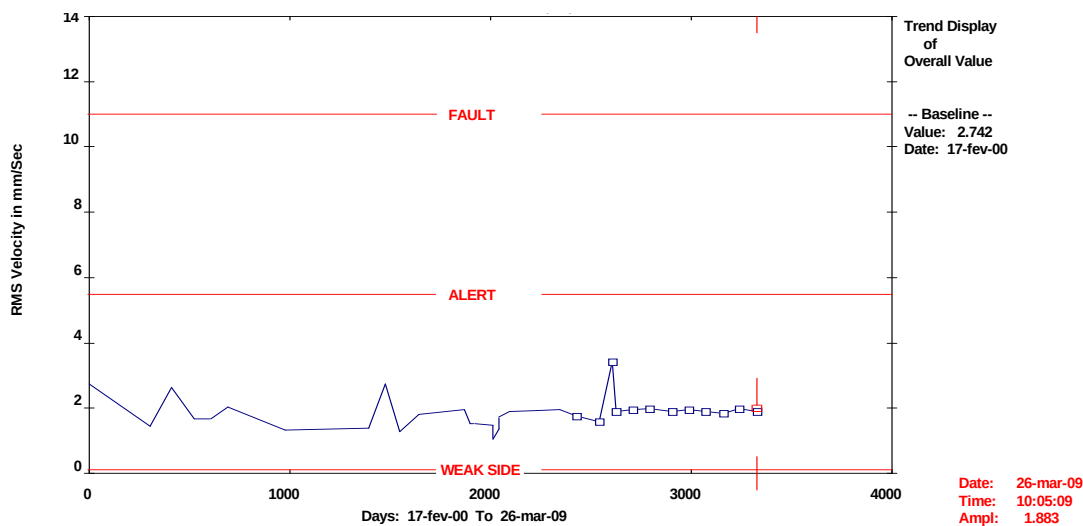
Fonte: ELETRONUCLEAR (2009)

⁸ Labirinto é um conceito de selo mecânico de mancais que, através de um sistema de contrapressões de óleo, garantem a selagem destes mancais impedindo vazamentos de óleo pelos mesmos.

5.3.3 Histórico de manutenção preditiva da bomba do sistema JND

Bomba 10: A análise preditiva de vibração no gráfico da Figura 22, mostra que a bomba apresenta níveis globais de vibrações normais, conforme as normas ISO 2372 e VDI 2056.

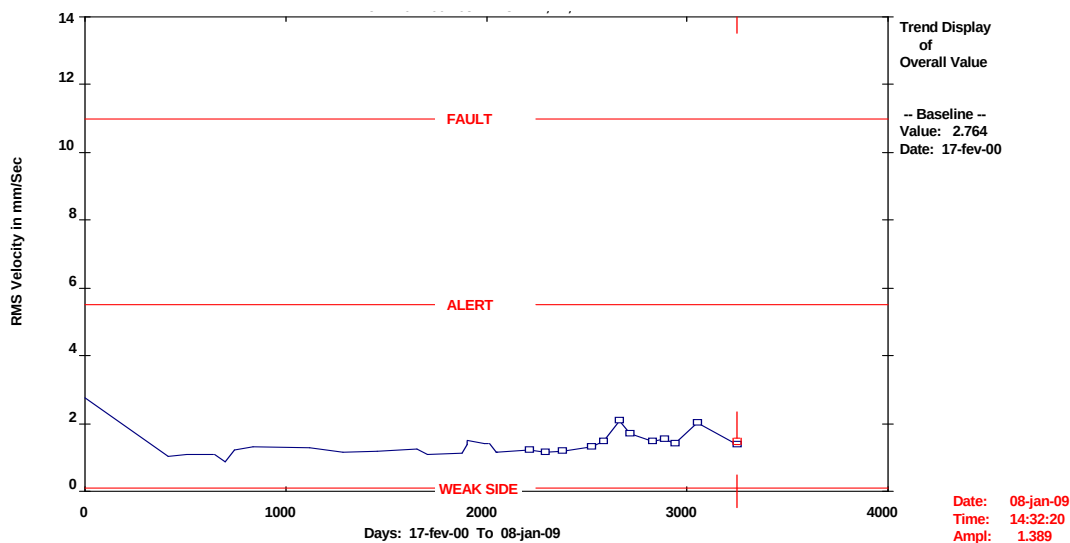
Figura 22 - Análise preditiva de vibração Bomba 10



Fonte: ELETRONUCLEAR (2009)

Bomba 20: A análise preditiva de vibração no gráfico da Figura 23, mostra que a bomba apresenta níveis globais de vibrações normais, conforme as normas ISO 2372 e VDI 2056.

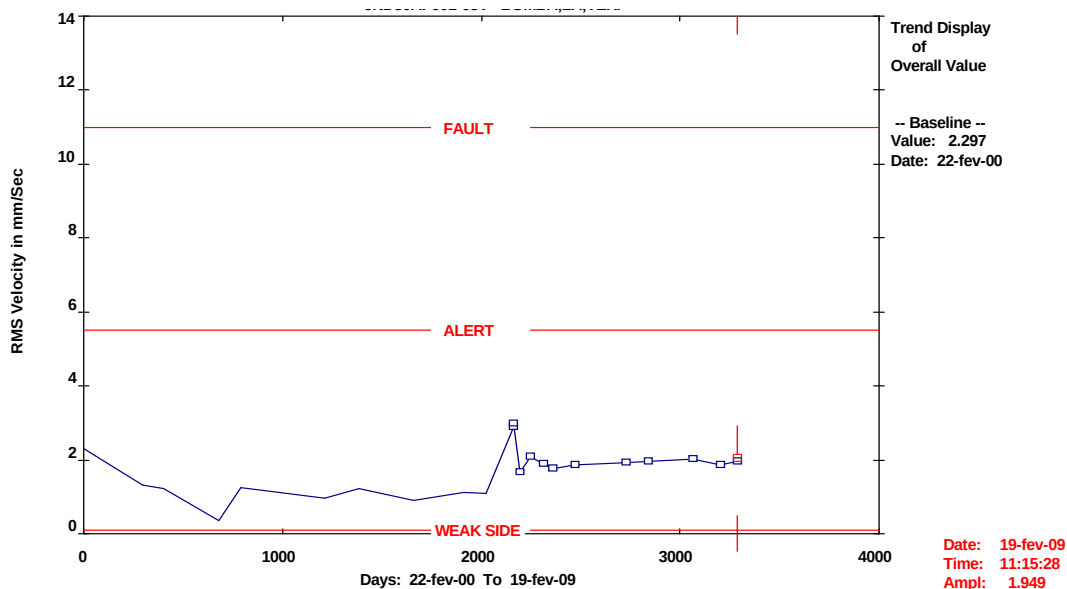
Figura 23 - Análise preditiva de vibração Bomba 20



Fonte: ELETRONUCLEAR (2009)

Bomba 30: A análise preditiva de vibração no gráfico da Figura 24, mostra que a bomba apresenta níveis globais de vibrações normais, conforme as normas ISO 2372 e VDI 2056.

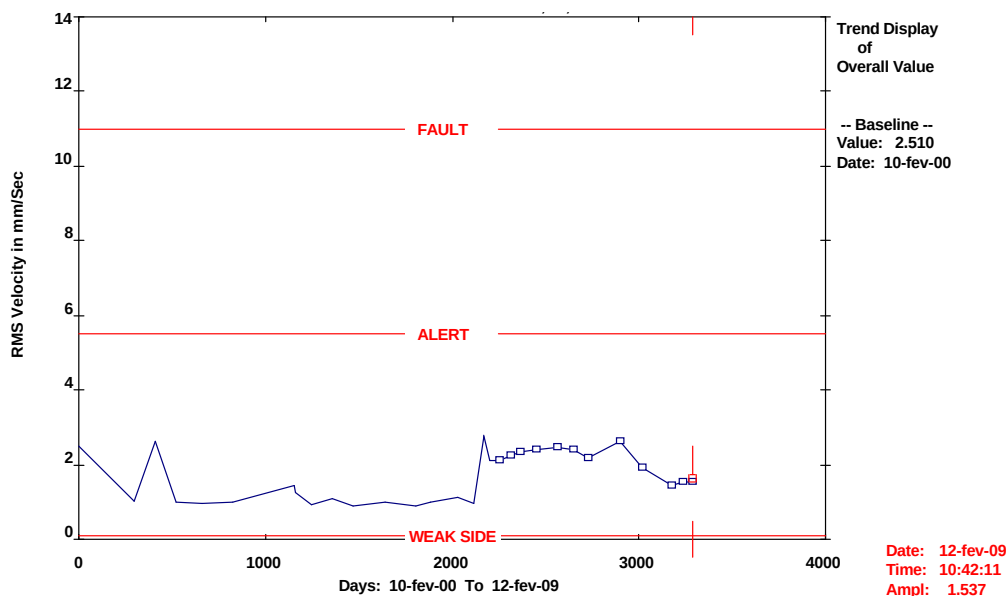
Figura 24 - Análise preditiva de vibração Bomba 30



Fonte: ELETRONUCLEAR (2009)

Bomba 40: A análise preditiva de vibração no gráfico da Figura 25, mostra que a bomba apresenta níveis globais de vibrações normais, conforme as normas ISO 2372 e VDI 2056.

Figura 25 - Análise preditiva de vibração Bomba 40



Fonte: ELETRONUCLEAR (2009)

5.4 Análise de criticidade do Sistema de Remoção de Calor Residual (JN)

5.4.1 Análise funcional

O Sistema de Remoção de Calor Residual (JN) (com seus subsistemas) é um sistema essencialmente de segurança, mas que também preenche determinadas funções operacionais (ELETRONUCLEAR, 2001).

Funções primárias de segurança:

- Promover a inundação do núcleo do reator durante acidentes com perda de refrigerante do circuito primário. O sistema deve ser capaz de controlar desde pequenos vazamentos até a ruptura total da tubulação principal do refrigerante do primário;
- Promover a remoção de calor residual a longo prazo depois de um acidente envolvendo perda do refrigerante, que possa comprometer a capacidade do circuito primário em remover e transferir o calor do núcleo do reator ao circuito secundário;
- Promover a remoção de calor residual da piscina de elementos combustíveis usados, depois de um evento externo (como terremotos, maremotos, tsunamis, ataques terroristas, ataques de forças hostis, acidentes aéreos, entre outros).

Funções operacionais secundárias:

- Promover a remoção de calor residual durante a parada normal da Usina, quando a remoção de calor por meio do gerador de vapor já não é conveniente ou possível;
- Promover a remoção de calor residual do núcleo do reator durante fases de interrupção de funcionamento (troca de elemento combustível, reparos);
- Promover a remoção de calor residual dos elementos combustíveis irradiados armazenados na piscina de elementos combustíveis;
- Promover a inundação das cavidades do reator para troca dos elementos combustíveis;

- Promover o esvaziamento das cavidades do reator após a troca dos elementos combustíveis, por meio da bomba do Sistema de Purificação da Piscina de Elementos Combustíveis (FAL).

5.4.2 Análise dos modos de falha, efeitos e criticidade (FMECA)

A Planilha de Trabalho ilustrada no Quadro 15 apresenta a análise FMECA referente aos modos de falha aos quais cada tarefa do PMP atual se destina a mitigar. São analisadas e inseridas na planilha: as funções primárias do ESC, os modos de falha e efeitos, bem como as análises de Criticidade pela categorização FEC e EPRI. Por fim, com base nestas análises, a bomba do JND é classificada como “Crítico”.

Quadro 15 - Análise FMECA nas bombas do sistema JND

Empresa:	ELETRONUCLEAR - ANGRA 2	Relatório/Ver.:	-	Elaboração:	Grupo de análise de dados - PMEM	Data:	-	Classificação do ESC:
ESCs:	BOMBA DE INJEÇÃO DE SEGURANÇA			Localização:	EDIFÍCIO AUXILIAR DO REATOR	Código Id.:	-	CRÍTICO
Funções do ESC:	Promover a inundação do núcleo do reator durante acidentes com perda de refrigerante do circuito primário com pressão e vazão suficiente para promover a remoção de calor residual a longo termo e a remoção de calor residual da piscina de elementos combustíveis usados, depois de um acidente.							Análise de Criticidade:
Tarefa PM:	Freq.	Equipe:	Modos de falha:		Efeitos ou Consequências:		FEC:	EPRI:
TESTE PERIÓDICO CONFORME SURVEILLANCE 1JND5001	4 Ciclos	Mecânica	Danos e/ou quebra de componentes, desgastes do rotor e paredes internas da bomba, folgas em rolamentos, oxidações e vazamentos		Falha funcional ou ineficiência do Sistema		OS	CLM
CALIBRAÇÃO DO RELÉ DE PROTEÇÃO DO MOTOR	2 Ciclos	Elétrica	Sobrecarga elétrica e/ou queima do motor		Falha funcional do Sistema e/ou princípio de incêndio		OS	CLM
CALIBRAÇÃO RELÉ FALHA A TERRA	2 Ciclos	Elétrica	Falha no aterramento e/ou queima do motor		Falha funcional, princípio de incêndio e/ou risco de choques elétricos		OS	CLM
MANUTENÇÃO PREVENTIVA NO MOTOR	2 Ciclos	Elétrica e Mecânica	Sobreaquecimento, queima das escovas, vibrações excessivas ou queima do motor		Falha funcional ou ineficiência do Sistema		OS	CLM
MANUTENÇÃO PREVENTIVA DISJUNTOR 3AC	2 Ciclos	Elétrica	Não abertura dos disjuntores, sobreaquecimento e erosão dos contatos e/ou danos nos comandos		Falha funcional do Sistema e/ou danos ao sistema elétrico da planta		OS	CLM
MANUTENÇÃO PREDITIVA DE LUBRIFICAÇÃO	84 Dias	Preditiva	Desgaste excessivo de componentes internos e rolamentos dos mancais da bomba		Falha funcional ou ineficiência do Sistema		OS	CLM
INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA	168 Dias	Preditiva	Sobreaquecimento da bomba, motor, mancais e contatos elétricos		Falha funcional e/ou ineficiência do Sistema e/ou princípio de incêndio		OS	CLM
MANUTENÇÃO PREDITIVA DE VIBRAÇÃO	84 Dias	Preditiva	Desgastes e folgas em rolamentos e componentes internos		Falha funcional ou ineficiência do Sistema		OS	CLM

Fonte: ELETRONUCLEAR (2009)

Fazendo uma racionalização das tarefas PM existentes, pode-se observar que não há tarefas duplicadas ou desnecessárias. Apesar de existirem diferentes tarefas PM que previnem efeitos de falha iguais, estas se justificam porque seus modos de falha são diferentes. Fazendo uma análise preliminar e com base em entrevistas com pessoal de “chão de fábrica”, não é possível identificar novos modos de falha que não estivessem cobertos pelo PMP atual. E mesmo comparando as tarefas PM das quatro bombas redundante, todas contam com exatamente as mesmas tarefas PM entre si. Portanto, é adotado neste trabalho, de forma ilustrativa, que a Planilha de Trabalho apresentada no Quadro 15 representa cada uma das quatro bombas do sistema JND.

Todos os efeitos ou consequências de falha analisados no Quadro 15 resultam em uma falha funcional para o sistema JND, ou seja, uma falha funcional da Bomba de Injeção de Segurança resulta na perda da função primária do sistema de segurança JND na redundância. Portanto, este ESC é “Crítico”, uma vez que se trata de um sistema que cumpre função crítica de segurança. Pode-se observar que os modos de falha identificados têm como principais mecanismos de degradação, componentes internos da bomba e, também, se observam falhas elétricas referentes aos mecanismos de degradação do motor elétrico da bomba, como sobreaquecimentos, queima das escovas, entre outras. Bem como perdas de referências de calibração, com ajuste de relés e disjuntores de proteção. Existem também aplicações de manutenção Preditivas com o objetivo de identificar antecipadamente o estado da bomba em relação aos mecanismos de degradação Mecânicos e Elétrico mencionados.

A análise de criticidade da Bomba de Injeção de Segurança, segundo os critérios FEC ilustrado pela Figura 18 do item 4.4.3 deste trabalho, possui uma categorização máxima “OS”, pois pertence a um sistema que cumpre funções de segurança. E, também, porque possui características de falha oculta, uma vez que opera em regime de prontidão. Com relação à classificação EPRI, a bomba é classificada como “CLM” conforme Quadro 9 do item 4.4.3, pois sua importância funcional é Crítica (C). Sua Taxa de Utilização é baixa (L), uma vez que permanece parada em regime de prontidão de emergência. E sua Condição de Serviço é Moderada (M), pois trabalha em ambiente climatizado, limpo e muito bem protegido.

Pelos princípios do RCM adotados pela Usina, qualquer ESC pertencente a este sistema, que cumpre funções críticas de segurança e que contribua diretamente para a manutenção de suas funções como é o caso da Bomba de Injeção de Segurança. Devem, portanto, ser considerados como “Críticos”. E, neste caso, o sistema deve ser monitorado pelo PMEM tendo como padrões de desempenho a Confiabilidade e Disponibilidade do sistema.

5.5 Definir estratégias de manutenção para o PMP

Nesta etapa, são feitas análises quanto aos mecanismos de falhas das bombas com base nos seus históricos de manutenção, documentos técnicos e experiência operacional, com o objetivo de selecionar um “mix” ótimo de tarefas PM para as Bombas de Injeção de Segurança do JND através da lógica RCM, comparando e revisando o PMP existente. Todo este processo é devidamente documentado e atualizado no Programa de gestão de ativos e ciclo de vida da Usina.

A importância do Sistema de Remoção de Calor Residual (JN) para a segurança exige uma alta disponibilidade e confiabilidade. Ele deve ser capaz de cumprir plenamente suas funções, mesmo quando surgir uma falha simples durante funcionamento normal ou de emergência do sistema. Além disso, tendo em vista uma alta disponibilidade da Usina, exige-se que partes do sistema JN possam ser reparadas mesmo durante o funcionamento da planta (ELETRONUCLEAR, 2001).

5.5.1 Avaliação da experiência operacional

Através da revisão do histórico de manutenção das quatro bombas do sistema JND é possível observar que todas as tarefas PM previstas para as bombas vêm sendo executadas adequadamente e conforme as periodicidades estabelecidas. Entretanto, estão relatadas nos históricos de manutenção ocorrências com ações eletivas e corretivas, conforme apresentado no Quadro 14 do item 5.3.2, são elas:

- Contaminação ferrosa do óleo;
- Desgaste por atrito do labirinto;
- Vazamento de óleo;
- Queima de selo mecânico;
- Desarme por alta temperatura no mancal.

Ao analisar estes modos de falha, é possível observar que as ocorrências de: “Contaminação ferrosa do óleo”, “Desgaste por atrito do labirinto” e “Vazamento de óleo”, já se encontram relacionadas entre os modos de falha listados na Planilha de Trabalho e que, portanto, já estariam cobertas pelas tarefas PM existentes, principalmente, pelo “Teste Periódico conforme *Surveillance* 1JND50.0/1-4”, que prevê atividades que mitigam estes modos de falha.

Pois as Bombas de Injeção de Segurança estão enquadradas neste Teste Periódico, o qual requer inspeção interna com abertura e desmontagem dos componentes internos das bombas. Neste teste são realizadas, principalmente, inspeções periódicas obrigatórias para identificar possíveis desgastes ou danos por oxidação ou corrosão das paredes internas das volutas das bombas que possam comprometer sua integridade estrutural. Neste teste, também estão previstas inspeções nos componentes internos com medição de folgas, com troca de componentes como: rolamentos, selos, juntas, anéis de vedação, entre outros.

Os trabalhos previstos no Plano de Trabalho (PT) desta tarefa têm duração de 7 dias, trabalhando à 24h (em dois turnos de 12h). Dado o grau de complexidade deste trabalho, o serviço de abertura e desmontagem destas bombas é realizado por uma empresa especializada estrangeira, o que incorre em dificuldades de agendamento e elevados custos de contratação do serviço.

Como pode ser observado no histórico de manutenção, este tipo de intervenção intrusiva aumenta consideravelmente a probabilidade de ocorrências de falhas durante o teste pós-manutenção, bem como o aumento no número de ocorrências após a execução destas inspeções. Após a desmontagem, inspeções e reparos das bombas, as mesmas precisam ser montadas e postas novamente em operação. Entretanto, seu retorno vem sendo sempre problemático, pois necessitam de uma série de difíceis ajustes. Estas dificuldades de retorno em operação ocorrem devido à complexidade dos equipamentos, bem como pela “mortalidade infantil” e acomodação dos novos componentes, como por exemplo, falhas em selos, juntas de vedação diversas, entre outros problemas, que acabam por ser considerados como “falhas inseridas” pela manutenção.

Com relação às ocorrências de “Desarme por alta temperatura no mancal” e “Queima de selo mecânico”, estas são causadas por uma deficiência na refrigeração dos mancais devido à falha na execução da purga ou na ventagem do sistema. Trata-se de um procedimento que consiste na retirada de todo ar do sistema através da circulação de água para retorno da bomba em operação após intervenções de manutenção. Este modo de falha já havia sido identificado como uma falha de projeto, e já se encontra sanado por modificação de projeto, bem como realizada a substituição dos acoplamentos e instalação de um acumulador de desaeração. Portanto, estas ocorrências de desarmes e queima do selo não tem relação direta com as intervenções intrusivas devido aos Testes Periódicos. Entretanto, de forma indireta, a não abertura da bomba implica na não necessidade de realização de ventagem na bomba.

5.5.2 Análise dos mecanismos de falhas das bombas do sistema JND

Durante a execução das tarefas PM definidas, a gerência de manutenção vem aplicando todas as ferramentas possíveis para melhorar a manutenibilidade destes equipamentos como a adoção da estratégia de manutenção baseada na condição, como a utilização de técnicas de manutenção preditiva para “predizer” as tendências de falhas. Também se tem buscado o constante aperfeiçoamento tecnológico, por exemplo, com a introdução de técnicas avançadas para efetuar o alinhamento entre motor e bomba, como o uso de alinhadores a laser mais precisos que promovem redução dos esforços axiais e radiais dos conjuntos, reduzindo desgastes e vibrações. Ou seja, ações vêm sendo empreendidas contra os mecanismos de degradação das bombas com o objetivo de aumentar seu tempo de vida útil e propiciar uma melhor manutenibilidade destes equipamentos.

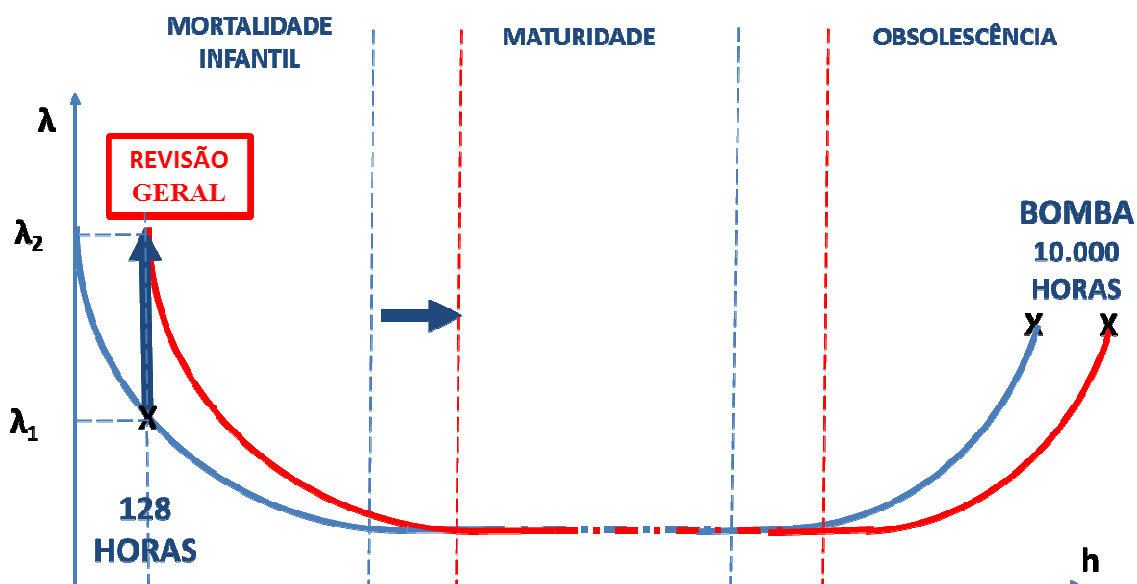
Entretanto, apesar destes esforços da equipe de manutenção e das boas práticas adotadas, ocorrências de manutenção corretiva e eletivas estão relatadas no histórico das bombas. Apesar destes modos de falha estarem cobertos pela tarefa “Teste Periódico conforme *Surveillance* 1JND50.0/1-4”. Estas ocorrências vinham sendo observadas, principalmente, após a execução deste Teste Periódico. Estas intervenções intrusivas podem propiciar, ainda, a ocorrência de “falhas inseridas por manutenção”, seja por falha humana ou por falha precoce de novos componentes.

Os relatórios das inspeções executadas nestes Testes Periódicos comprovam que não vinham sendo encontrados desgastes relevantes de peças, bem como não relatam nenhum mecanismo de degradação que possa comprometer a função primária destas bombas. Apesar destas observações, estes Testes Periódicos vinham sendo executados a cada ciclo (até o ciclo 8), comprometendo a confiabilidade destes equipamentos, pois não havendo tendência de degradação ou falhas funcionais constatadas, não haveria necessidade de efetuar tais intervenções e com tal frequência.

No manual do fabricante existe a recomendação de revisão geral das bombas a cada cinco anos, acreditando ser este o período previsto de aumento da probabilidade de falha por desgaste da mesma. Contudo, consta também no manual do fabricante um período esperado de vida útil em serviço de dez mil horas (10.000 h). Porém, estas bombas permanecem paradas em regime de prontidão de emergência e somente funcionam por 32 h a cada ciclo, devido aos testes funcionais de partida e parada das bombas. Portanto, pode-se concluir que estas intervenções a cada quatro ciclos por bomba vêm sendo realizadas dentro do período de

“mortalidade infantil” dos componentes da bomba, o que pode aumentar significativamente a probabilidade de ocorrência de falhas na bomba, conforme ilustrado pela “curva da banheira” da Figura 26.

Figura 26 - Curvas de degradação pós manutenção



Fonte: ELETRONUCLEAR (2009)

Na figura 26 pode-se observar que existem duas “curvas da banheira” sobrepostas, com os eixos do gráfico representando a “Taxa de falhas X Tempo de operação”. A primeira (na cor azul) representa a curva da bomba antes da revisão geral e a segunda (na cor vermelha) representa a curva após a revisão geral. Ou seja, considerando que esta bomba é acionada por apenas 32 h por ciclo e que sua vida útil estimada é de 10.000 h, e considerando que a defasagem de tempo entre as duas curvas é de apenas quatro ciclos (ou 128 h). Perpetua-se, deste modo, uma condição de permanência da bomba na fase de “mortalidade infantil”, onde a probabilidade de ocorrência de falhas retorna a uma condição original mais alta, devido à introdução de novos componentes e aos novos ajustes a cada nova revisão.

5.5.3 Modelo Padrão do EPRI

Com relação à Base de Dados de Planos de Manutenção (PMBD) do EPRI, são levantadas as seguintes recomendações de Tarefas e Frequências para o tipo de bomba em estudo, segundo sua classificação EPRI “CLM” definida no item 5.4.2, seguem os dados do *software* PMBD® apresentados no Quadro 16.

Quadro 16 - Base de Dados EPRI sobre bomba horizontal

PMBD EPRI - MODELO PADRÃO BOMBA HORIZONTAL	CRÍTICAL				MINOR			
	HI	LO	HI	LO	HI	LO	HI	LO
	SEVERE		MILD		SEVERE		MILD	
TAREFAS RECOMENDADAS:	CHS	CLS	CHM	CLM	MHS	MLS	MHM	MLM
Análise de Vibração	1M	1M	1M	1M	3M	3M	3M	3M
Análise de óleo	3M	18M	3M	18M	18M	18M	18M	AR
Monitoramento de performance	6M	6M	6M	6M	6M	6M	18M	18M
Troca de filtro de óleo, inspeção e limpeza	18M	AR	18M	AR	18M	AR	18M	AR
Inspeção do acoplamento	18M	5Y	18M	5Y	AR	AR	AR	AR
Inspeção não destrutiva do bocal	10Y	NR	10Y	NR	10Y	NR	10Y	NR
Ronda de engenharia ("Walkdown")	1Y	1Y	1Y	1Y	1Y	1Y	1Y	1Y
Desmontagem parcial	AR	AR	AR	AR	AR	AR	AR	AR
Reparos de condicionamento	AR	AR	AR	AR	AR	AR	AR	AR
Testes funcionais	AR	AR	AR	AR	AR	AR	AR	AR
Monitoramento de corrente do motor	3M	3M	3M	3M	6M	6M	6M	6M
Ronda do operador	1S	1S	1S	1S	1D	1D	1D	1D
Análise de Termografia	6M	6M	6M	6M	6M	6M	AR	AR
LEGENDA: S: Turnos D: Dias M: Meses Y: Anos NR (Não Recomendado): tarefa não é aplicável para a condição indicada AR (Conforme Especificação): Ocorre em duas situações: 1- A tarefa não possui um intervalo regular, é realizada apenas em resposta a ocorrência de uma outra tarefa ou observação. 2- A tarefa é realizada apenas em resposta a uma norma, regulamento ou especificação técnica obrigatória.								

Fonte: EPRI (2009)

É importante lembrar que este quadro de dados do EPRI foi concebido por especialistas através de dados compartilhados de ESC de diversas plantas. Entretanto, este modelo padrão funciona apenas como uma referência ou um guia de boas práticas e não, necessariamente, deve ser seguido como uma “verdade absoluta”. Cada empresa monta seu PMP da maneira que julgar mais adequado a sua realidade (utilização, criticidade e suas taxas de falhas) e seus resultados obtidos ao longo do tempo, buscando otimizar a relação custo-eficácia do seu PMP.

Ao avaliar as tarefas do modelo padrão do EPRI para bombas horizontais, é possível observar que as recomendações feitas são seguidas quase em sua totalidade pelo PMP atual das bombas do JND. Com relação às frequências recomendadas, pode-se observar diferenças a serem consideradas, entretanto, uma vez que as bombas do JND apresentam uma utilização extremamente baixa devido ao regime de prontidão. E, por este motivo, a frequência de

algumas tarefas precisam se adequar a frequência dos testes funcionais de partida e parada das bombas, pois algumas tarefas como “Análises de vibrações”, por exemplo, somente podem ser realizadas com a bomba em funcionamento.

As tarefas recomendadas pelo modelo padrão do EPRI são analisadas a seguir:

- “Análise de Vibração”, “Análise de óleo” e “Análise de Termografia”, constam no PMP atual e são executadas pela equipe de Manutenção Preditiva, entretanto, em diferentes frequências conforme explicado. Os resultados dos históricos das “Análises de vibração” das bombas estão apresentados no item 5.3.3 deste trabalho. As “Análises de óleo” têm sido feitas com uma frequência maior que a recomendada devido à elevada ocorrência de contaminação ferrosa no óleo observada no histórico apresentado no item 5.3.2 deste trabalho. As “Análises de Termografia” têm sido executadas com a mesma frequência das “Análises de Vibração”, e pelo mesmo motivo;
- Ao analisar as tarefas recomendadas de “Troca de filtro, Inspeção e Limpeza”, “Inspeção do acoplamento”, “Inspeção não destrutiva do bocal”, “Desmontagem parcial” e “Reparos de recondicionamento”, com frequências recomendadas “AR”, “5Y”, “NR”, “AR” e “AR”, respectivamente. Com exceção da tarefa de “Inspeção do acoplamento”, todas as demais não possuem uma frequência estabelecida, em sua maioria apresentam frequência “AR”. Entretanto, todas estas tarefas estão contempladas no PMP atual através da tarefa PM “Teste Periódico conforme *Surveillance* 1JND50.0/1-4”, onde está previsto a realização de todas estas atividades;
- Os “Testes Funcionais” recomendados no Quadro também são executados nas Bombas de Injeção de Segurança, porém esse tipo de teste não faz parte do PMP, pois trata-se de um teste essencialmente operacional, não sendo considerado como tarefa de manutenção. A execução destes testes funcionais é controlada pela operação e, quando for o caso, cabe ao PMP adequar as suas frequências de modo a coincidir com os testes funcionais;
- O “Monitoramento de corrente do motor” não está contemplado no PMP existente, pois esta técnica preditiva não está implantada dentre as técnicas de domínio da equipe de Manutenção Preditiva, definidas no item 3.2.2 deste trabalho, bem como, não é considerada como uma tarefa de grande relevância pela empresa;

- A tarefa de “Rondas de engenharia (*Walkdown*)” também constam no PMP atual, entretanto, não no PMP específico da bomba. Estas tarefas são emitidas por setor ou edifício, de modo que os engenheiros façam inspeções em diversos ESCs em uma única ronda. Já as “Rondas dos operadores”, estas não constam no PMP, mas são feitas como parte de suas rotinas e condutas de trabalho;
- Não há uma tarefa no PMP atual para o “Monitoramento de performance” da bomba, pois esta atividade é realizada pelo programa de Testes Funcionais da Engenharia de Desempenho de Sistemas (GDD.O).

5.5.4 Seleção, Revisão e Comparação de tarefas propostas

Nesta etapa, é desenvolvida a seleção de tarefas e a revisão destes resultados e, em seguida, é realizada a comparação destas tarefas propostas selecionadas com as tarefas já existentes do PMP atual. A seleção de tarefas se dá pelas análises dos modos de falha, seus respectivos efeitos e criticidades para determinar qual tarefa pode garantir da melhor forma as funções do ESC, considerando uma relação otimizada de custo-eficácia. As seguintes propostas, apresentadas na Planilha de Trabalho do Quadro 17, estão elaboradas para o PMP das Bombas de Injeção de Segurança do sistema JND.

Quadro 17 - Seleção e comparação de tarefas de manutenção

Empresa:	ELETRONUCLEAR - ANGRA 2		Relatório/Rev.:	-		Elaboração:	Grupo de análise de dados - PMEM		Data:	-		Classificação do ESC:
ESCs:	BOMBA DE INJEÇÃO DE SEGURANÇA					Localização:	EDIFÍCIO AUXILIAR DO REATOR		Código Id.:	-		CRÍTICO
Desdobramento do PMP atual						Análise de Criticidade:			Definir Estratégias de Manutenção:			Comparação de Tarefas:
Tarefa PM:		Freq.	Equipe:	FEC:	EPRI:	CRÍTICO:	Tarefa PM Proposta:		Freq.:	Equipe:	Ações:	
TESTE PERIÓDICO CONFORME SURVEILLANCE 1JND5001		4 Ciclos	Mecânica	OS	CLM	SIM					ELIMINAR	
							INSPEÇÃO VISUAL SELETIVA CONFORME KTA 3211.4		8 Ciclos	Mecânica	ADICIONAR	
							REVISÃO GERAL DA BOMBA		8 Ciclos	Mecânica	ADICIONAR	
CALIBRAÇÃO DO RELÉ DE PROTEÇÃO DO MOTOR		2 Ciclos	Elétrica	OS	CLM	SIM	CALIBRAÇÃO DO RELÉ DE PROTEÇÃO DO MOTOR		2 Ciclos	Elétrica	MANTER	
CALIBRAÇÃO RELÉ FALHA A TERRA		2 Ciclos	Elétrica	OS	CLM	SIM	CALIBRAÇÃO RELÉ FALHA A TERRA		2 Ciclos	Elétrica	MANTER	
MANUTENÇÃO PREVENTIVA NO MOTOR		2 Ciclos	Elétrica e Mecânica	OS	CLM	SIM	MANUTENÇÃO PREVENTIVA NO MOTOR		2 Ciclos	Elétrica e Mecânica	MANTER	
MANUTENÇÃO PREVENTIVA DISJUNTOR 3AC		2 Ciclos	Elétrica	OS	CLM	SIM	MANUTENÇÃO PREVENTIVA DISJUNTOR 3AC		2 Ciclos	Elétrica	MANTER	
MANUTENÇÃO PREDITIVA DE LUBRIFICAÇÃO		84 Dias	Preditiva	OS	CLM	SIM	MANUTENÇÃO PREDITIVA DE LUBRIFICAÇÃO		112 Dias	Preditiva	MODIFICAR	
INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA		168 Dias	Preditiva	OS	CLM	SIM	INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA		112 Dias	Preditiva	MODIFICAR	
MANUTENÇÃO PREDITIVA DE VIBRAÇÃO		84 Dias	Preditiva	OS	CLM	SIM	MANUTENÇÃO PREDITIVA DE VIBRAÇÃO		112 Dias	Preditiva	MODIFICAR	
							TESTE DE MEDIÇÃO DE VAZÃO E PRESSÃO DA BOMBA		112 Dias	Preditiva	ADICIONAR	

Fonte: ELETRONUCLEAR (2009)

Dentre as tarefas propostas, pode-se observar que a principal mudança ocorreu entorno da tarefa PM atual “Teste Periódico conforme *Surveillance* 1JND50.0/1-4”, pois com base nas análises de criticidade realizadas, análises dos mecanismos de degradação da função do ESC, análise do modelo padrão da base de dados do EPRI e, principalmente, na avaliação da experiência operacional, ficou evidenciado que:

- Esta tarefa vem sendo executada em uma frequência demasiadamente grande, provavelmente dentro da fase de mortalidade infantil das bombas;

- Os resultados das inspeções realizadas nesta tarefa não refletem indícios de degradação que possam comprometer a função primária da bomba;
- Esta tarefa aumenta significativamente a indisponibilidade do sistema JND, que é crítico para a segurança da planta, por este motivo é realizada durante as paradas gerais da usina para recarga de combustível, onde a programação de atividades já é bastante restrita;
- Após a execução desta tarefa, é observado um aumento no número de ocorrências de intervenções Eletivas e Corretivas, que comprometem a confiabilidade do Sistema JND;
- Esta tarefa gera impactos econômicos consideráveis para a empresa, seja pela substituição de peças, pela alocação de recursos de mão de obra interna e pela contratação de empresas estrangeiras especializadas.

De posse destas evidências levantadas é proposto um plano de ação que consiste no desmembramento desta tarefa em duas outras, porém com frequências condicionadas a resultados de análises de confiabilidade. No escopo da Tarefa PM atual “Teste Periódico conforme *Surveillance* 1JND50.0/1-4” estão previstas atividades de desmontagem e inspeções internas estruturais e de componentes. As inspeções estruturais são exigidas por normas obrigatórias, que tem por objetivo garantir a integridade das paredes internas de modo que a bomba não venha a romper devido a oxidações, desgastes ou corrosão das paredes quando solicitada a operar. As demais inspeções dos componentes internos e reparos de recondicionamento com substituição de sobressalentes, não são obrigatórias e não há recomendações técnicas que estabeleçam que estas atividades devem ser executadas obrigatoriamente ou que não possam ser feitas de forma menos intrusiva.

Deste modo, a proposta consiste na “Eliminação” da tarefa PM “Teste Periódico conforme *Surveillance* 1JND50.0/1-4”, desmembrando-a em duas novas Tarefas PM “Adicionadas” ao PMP das bombas:

1) INSPEÇÃO VISUAL SELETIVA CONFORME KTA 3211.4 (KTA, 1996): Através desta tarefa fica resguardada a inspeção estrutural obrigatória das paredes internas das bombas. A norma KTA 3211.4 estabelece como deve ser feita e os critérios para a realização da inspeção seletiva nestas bombas. O conceito de inspeção seletiva estabelece que, por base estatística, a inspeção possa ser realizada em apenas uma das quatro bombas e, por similaridade de condições, os resultados desta inspeção podem ser inferidos para as demais

bombas de mesma construção e sob o mesmo contexto operacional. Deste modo, a frequência para esta tarefa fica estabelecida da seguinte forma, a tarefa deve ser executada em uma única bomba dentro de um intervalo de 5 ciclos (aproximadamente 8 anos), o que garante entre outras, uma maior confiabilidade e disponibilidade destas bombas;

2) REVISÃO GERAL DA BOMBA: Consiste na execução de inspeções completas em componentes internos, reparos de recondicionamento com troca de sobressalentes, entre outras atividades. E a frequência passa a ser também de 5 ciclos (aproximadamente 8 anos). Porém, sua execução não obrigatória passa a ser condicionada aos resultados dos estudos de confiabilidade com o uso de técnicas de manutenção preditiva. Tornando-os mais seletivos, ou seja, atuando somente nos componentes das bombas que indicarem problemas.

Nesta etapa, também são apresentadas propostas de “Modificação” nas frequências das tarefas de Manutenção Preditiva: “Análise de Vibração”, “Análise de óleo” e “Análise de Termografia”, passando todas estas tarefas para 112 dias (ou aproximadamente quatro meses). Esta adequação é necessária, pois estas tarefas necessitam ser executados durante os Testes funcionais das bombas, ou seja, necessitam da bomba em funcionamento para serem executadas. E, deste modo, houve a necessidade de adequar suas frequências desta forma, respeitando também o ciclo de rotatividade de Redundâncias disponíveis para testes funcionais de partida e parada.

Na análise das atividades do Modelo Padrão do EPRI para a bomba, existe a recomendação de tarefa de “Monitoração de desempenho” da bomba. Esta tarefa PM não é contemplada no PMP atual da bomba. Portanto, após uma análise mais cuidadosa é proposto a “Adição” de uma nova tarefa PM: “TESTE DE MEDIÇÃO DE VAZÃO E PRESSÃO DA BOMBA”, com frequência também de 112 dias, e através destas medições é possível monitorar a performance de funcionamento da bomba de forma mais específica.

O Comitê de avaliação juntamente com o Grupo de controle do PMEM revisa as propostas de alteração no PMP atual, faz a comparação das tarefas propostas com as tarefas atuais, e avalia todos os possíveis impactos e implicações sobre outros sistemas e tarefas do PMP da planta. São avaliados em maior profundidade questões referentes ao cumprimento de especificações técnicas obrigatórias em relação às inspeções estruturais internas, entretanto, a solução proposta é considerada satisfatória. E, por fim, as propostas são aprovadas para serem deliberadas e oficializadas pela CROU, de onde seguem para implementação no programa de gestão de ativos e ciclo de vida e, também, para documentação das bases técnicas do PMEM.

5.6 Implantar decisões no programa de gestão de ativos da planta

Nesta etapa, todo o processo de decisão e desenvolvimento do projeto PMO é documentado e devidamente arquivado na base técnica do PMEM. As alterações aprovadas no PMP são, então, cadastradas no Sistema MAXIMO® e passam a ser controladas pelo PMEM no Programa de Gestão de Ativos e Ciclo de Vida de Angra 2, deste modo, estas novas tarefas são avaliadas através de padrões de desempenho do programa.

E, em se tratando de ESCs considerados como “Críticos”, as Bombas de Injeção de Segurança do Sistema JND são monitoradas pelo PMEM através de padrões de desempenho de confiabilidade e indisponibilidade, definidos da seguinte forma:

- Padrão de Confiabilidade: Este indicador é dado pelo número de falhas funcionais (FF) por ciclo de operação da Usina. O padrão de desempenho de aceitação para sistemas “Críticos” estabelece que a taxa de confiabilidade para cada ciclo de operação não deve superar a 1 FF.
- Taxa de Confiabilidade: $\leq 1 \text{ FF/Ciclo}$ (apurado ciclo a ciclo);
- Padrão de Indisponibilidade: Este indicador é dado pela taxa percentual calculada pela razão entre o tempo em que o trecho funcional do sistema fica indisponível e o tempo total de disponibilidade esperado a cada ciclo. Ou seja, o tempo em que o ESC está impedido de cumprir suas funções (seja por manutenção programada, corretiva, testes, entre outras), sobre o tempo útil em que é esperado que sua função possa ser demandada dentro de um ciclo (excluindo o tempo de Parada Geral da Usina quando for o caso). O padrão de desempenho para aceitação, considerado dentro da normalidade, em sistemas “Críticos” estabelece que:
- Taxa de indisponibilidade: $< 5\%$ (apurado ciclo a ciclo);

A transição de entrada das novas tarefas nas práticas de manutenção do PMP de Angra 2 transcorre normalmente e sem maiores dificuldades. As equipes de manutenção e demais departamentos envolvidos são comunicados quanto à oficialização das novas tarefas. Uma vez que o projeto tem foco em um ESC específico, estas alterações envolvem poucos profissionais e, de certa forma, já são esperadas por estas equipes uma vez que participam do processo de otimização. Deste modo, o processo de entendimento e aceitação das mudanças fica facilitado.

5.7 Análise dos resultados do projeto PMO aplicado

Os resultados diretos e indiretos obtidos com a aplicação destas melhorias no PMP das bombas podem ser apurados de médio a longo prazo, como é comum em aplicações RCM. Estas alterações no PMP são oficializadas e passam a ser seguidas a partir do Ciclo 8 de operação da Usina. O número de ocorrências vem sendo acompanhado pelo PMEM durante os Ciclos 8, 9, 10, 11 e 12 subsequentes, e é possível fazer uma comparação destes resultados com os Ciclos 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7, conforme apresentado no Quadro 18.

Quadro 18 - Comparativo entre números de ocorrências

OCORRÊNCIAS:	ESC	ANTES DO CICLO 8	APÓS O CICLO 8
Queima de selo mecânico	BOMBA 10	0	0
	BOMBA 20	0	0
	BOMBA 30	1	0
	BOMBA 40	1	0
Desarme por alta temperatura no mancal	BOMBA 10	3	0
	BOMBA 20	1	0
	BOMBA 30	0	1
	BOMBA 40	1	0
Contaminação ferrosa do óleo	BOMBA 10	6	0
	BOMBA 20	9	1
	BOMBA 30	3	11
	BOMBA 40	4	0
Desgaste por atrito do labirinto	BOMBA 10	0	0
	BOMBA 20	1	0
	BOMBA 30	0	0
	BOMBA 40	1	0
Vazamento de óleo	BOMBA 10	11	2
	BOMBA 20	4	5
	BOMBA 30	11	8
	BOMBA 40	8	3

Fonte: (ELETRONUCLEAR, 2015c)

5.7.1 Resultados de Confiabilidade

Ao analisar estes históricos de manutenção antes e após o Ciclo 8, de forma geral, é possível observar uma melhoria sensível em relação às ocorrências anteriores. Entretanto, com relação às ocorrências de “Vazamento de óleo”, esta não apresenta melhora significativa, piorando no caso da bomba da redundância 20. Bem como, é possível observar uma ocorrência acentuada de “Contaminação Ferosa no óleo” para a bomba 30. Também pode se observar uma ocorrência de “Desarme por alta temperatura no mancal” nesta mesma bomba.

Com relação aos “Vazamentos de óleo” observados neste curto período de análises (a partir do Ciclo 8), não são observadas reduções nestas ocorrências. Vazamentos de óleo vêm ocorrendo nestas bombas desde o início de operação da Usina, são pequenos e considerados como normais pelo fabricante da bomba. Entretanto, uma modificação de projeto que consiste na instalação de capas protetoras para os mancais, já se encontra em implantação.

A ocorrência de “Desarme por alta temperatura do mancal” ocorrida durante um Teste funcional da bomba 30, é considerada como uma Falha Funcional (FF), pois com esta falha o sistema perde a capacidade de cumprir sua função. A causa da FF é identificada como um “falso alarme” do sensor de temperatura (PT100) danificado instalado no mancal da bomba. Os Testes Funcionais são realizados mensalmente em todas as bombas, são tarefas que têm por finalidade mitigar falhas ocultas como estas e o padrão de desempenho estabelece como aceitável até 1 FF/Ciclo. Portanto, esta falha no sensor de temperatura deve continuar sendo monitorada, a princípio, sem a necessidade de definir uma tarefa PM específica para verificação periódica do sensor. As demais ocorrências relatadas a partir do Ciclo 8 não são consideradas como FF, pois não causam a perda da função do sistema (ELETRONUCLEAR, 2015c).

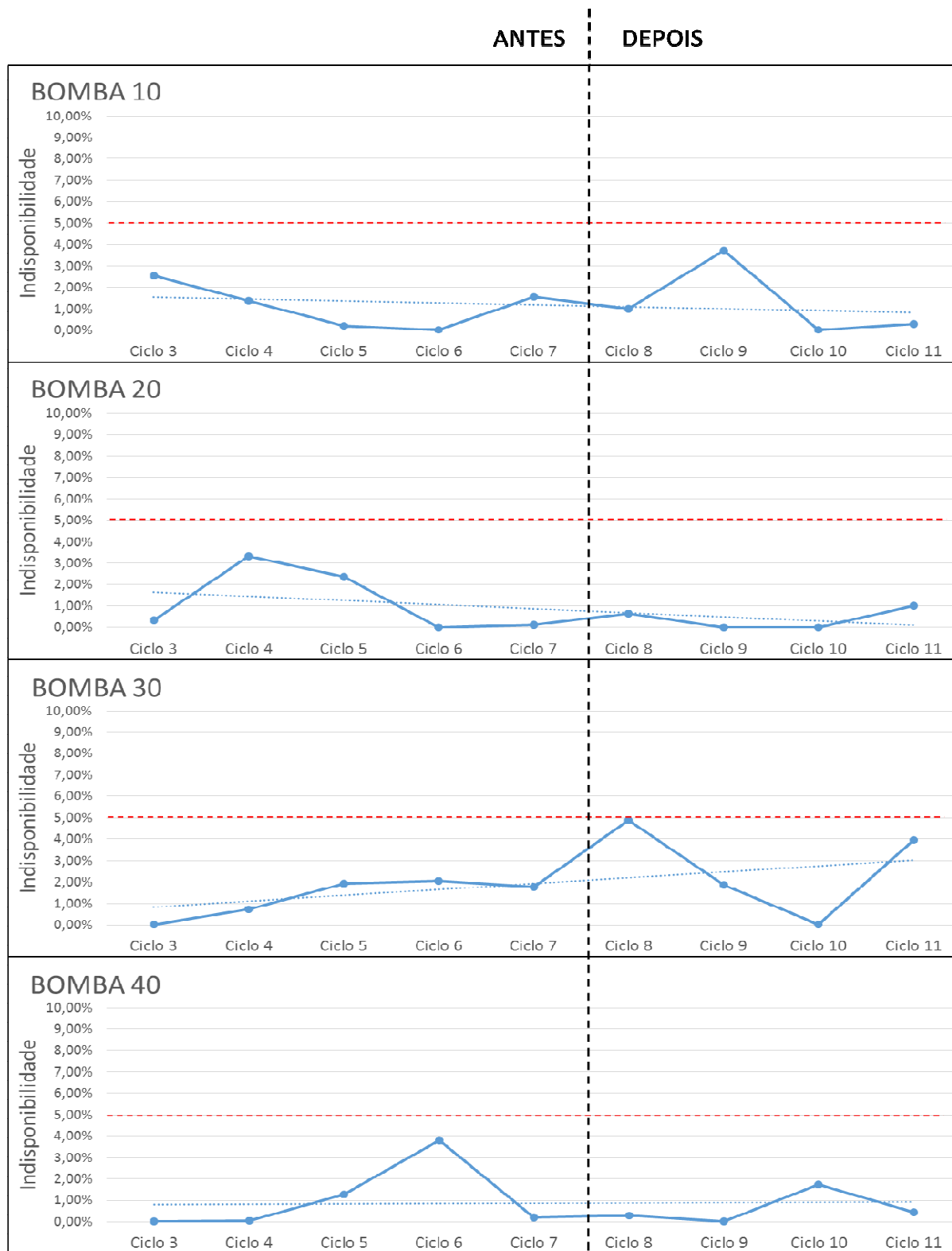
Ao analisar as ocorrências de “Contaminação Ferrosa no Óleo”, observado na bomba 30 após o Ciclo 8, é constatado um desgaste interno causado devido à falha de um rolamento do mancal. O rolamento falhado causa o desgaste da caixa do mancal por atrito com a pista externa do rolamento. Este desgaste provoca aumento na “Contaminação ferrosa do óleo” e uma folga entre o rolamento e sua sede na caixa do mancal, o que é confirmado pela análise preditiva de vibração no mancal. A troca da caixa do mancal devido ao desgaste e folga interna, bem como a substituição do rolamento falhado pode ser programada e realizada durante a próxima Parada Geral da Usina e, portanto, a falha do rolamento não é uma FF, não exige uma parada para ação corretiva imediata (ELETRONUCLEAR, 2015c).

Em relação ao indicador de confiabilidade do sistema, que é dado pelo número de FFs por ciclo, pode-se observar a ocorrência de apenas 1 FF em 5 ciclos (a partir do Ciclo 8) contra 5 FF em 7 ciclos (anteriores ao Ciclo 8), referentes às falhas de “Desarme por alta temperatura no mancal”. E, com base nesta observação, pode-se observar uma significativa melhoria na taxa de confiabilidade do sistema JND após o Ciclo 8, ou seja, após a aplicação do projeto PMO. E que, mesmo antes do projeto, os padrões de desempenho de confiabilidade estabelecidos para este sistema “Crítico” (de até 1 FF/Ciclo), sempre estiveram atendidos.

5.7.2 Resultados de Indisponibilidade

Já em relação às taxas de indisponibilidades, apresentados pelos gráficos da Figura 27:

Figura 27 - Taxas de Indisponibilidade das Bombas do JND



Fonte: ELETRONUCLEAR (2015c)

Ao analisar os gráficos apresentados, pode-se observar que as taxas de indisponibilidade depois do projeto PMO (após o Ciclo 8), não são suficientes para traçar uma tendência confiável de pós-projeto. Não são suficientes, pois estes resultados estão ainda sob a influência das revisões gerais realizadas nos ciclos anteriores, onde grandes números de componentes foram substituídos e, assim, foram retomadas às suas fases iniciais de “mortalidade infantil”. Pode-se observar, também, que a taxa limite de indisponibilidade de 5% não é atingida em nenhum momento por nenhuma das bombas.

Com relação à Bomba 30, é observada uma elevação nas taxas de indisponibilidade, mesmo depois da aplicação do projeto PMO. Esta elevação se deve as tarefas corretivas executadas devido à troca de caixa do mancal do rolamento, uma vez que estas atividades tiveram de ser executadas eletivamente dentro do ciclo, ou seja, não dentro do intervalo de Parada Geral da Usina onde o tempo de indisponibilidade não é considerado como período útil no cálculo para estas bombas. Apesar deste problema, as taxas de indisponibilidades da bomba 30 estão dentro dos padrões de desempenho esperados, portanto, são satisfatórios.

Outro ponto importante a ser observado, é que as ações corretivas ocorridas após o Ciclo 8 têm sido programadas, planejadas e executadas de forma pontual. Ou seja, somente sobre componentes que venham a falhar, e não mais na forma de revisão geral periódica como anteriormente. Trazendo uma sensível redução para os custos de manutenção destas bombas.

5.7.3 Resultados econômicos diretos

Após este projeto piloto sobre as bombas do sistema JND, este projeto é reaplicado aos demais sistemas relacionados e subsistemas do Sistema de Remoção de Calor Residual (JN) da Usina Angra 2, totalizando 53 bombas e 73 válvulas. E, ao analisar os indicadores de confiabilidade e indisponibilidade destes sistemas, os mesmos se mostram com perfis similares e igualmente satisfatórios.

Um PMP otimizado implica, de forma geral, em tarefas menos complexas e mais eficazes o quanto possível, o que por sua vez impacta positivamente no planejamento e programação de atividades da Planta, ou seja, tarefas otimizadas e menos complexas podem ser encaixadas em “janelas” menores de programação. O planejamento e o controle de trabalhos são especialmente delicados para tarefas que necessitam ser realizadas durante a Parada Geral da Usina para recarga de elementos combustíveis, pois cada Parada Geral deve ser o mais breve quanto possível, uma vez que cada dia excedente de parada da planta significa perdas enormes em termos produtivos na geração de energia.

Portanto, em relação aos resultados obtidos com este projeto de otimização, obtém-se reduções significativas nas frequências de execução das Revisões Gerais destas bombas e válvulas, reduzindo de 1(uma) Revisão Geral por Parada (ou ciclo) para 1 (uma) Revisão a cada 5 (cinco) Paradas (ou ciclos), considerando todos os sistemas relacionados e subsistemas do JN. E, por conseguinte, obtém-se uma redução considerável no escopo de atividades planejadas para as Paradas Gerais da Usina e que, desta forma, trazem significativos ganhos econômicos para a empresa, totalizados com o projeto PMO, referentes à:

- Redução de custo de contratação de mão de obra estrangeira para a execução das revisões gerais: € 600.000 por ciclo (sem impostos);
- Redução do custo de aquisição de sobressalentes: € 400.000 por ciclo (sem impostos);
- Redução de custos administrativos de manutenção (valor não apurado).

5.7.4 Outros ganhos e resultados indiretos

O método PMO garante um PMP mais eficaz, com o tipo correto de manutenção em um intervalo adequado, mesmo para ESCs significativos à segurança. Garante uma hierarquia na seleção de tarefas que permite, na medida do possível, a adoção de políticas de manutenção mais econômicas e menos intrusivas, minimizando também riscos de falhas por “mortalidade infantil” ou falhas por performance humana na execução de tarefas.

A aplicação recorrente do método PMO como uma ferramenta de melhoria contínua, garante o exercício e aperfeiçoamento das técnicas de monitoramento de desempenhos, técnicas de avaliação de criticidade e mecanismos de degradação, técnicas de manutenção, uma melhor formação de conhecimentos e desenvolvimento de competências do pessoal da planta. Garante também a rastreabilidade da base técnica de decisão, que permite a qualquer momento buscar o entendimento para justificar ou melhorar o PMP.

Em termos de segurança no trabalho, de forma geral, a otimização de tarefas reduz o tempo de execução e, deste modo, menor exposição do pessoal de planta a riscos de acidentes de trabalho. Em alguns casos, riscos de periculosidades elétricas, insalubridades e exposições radiológicas. Também reduz impactos ambientais, com a redução na produção de resíduos como peças substituídas, óleos e graxas usadas, consumíveis descartados, entre outros. Principalmente quando se tratam de rejeitos contaminados por elementos radioativos, onde a tratativa é diferenciada, limitada, fiscalizada e onerosa para a empresa.

6. CONCLUSÃO

Com base nos resultados apresentados pode-se concluir que os objetivos gerais e específicos deste trabalho estão alcançados. A pesquisa bibliográfica realizada revela que o método Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM) é, ainda hoje, base para os programas de gestão dos ativos no setor nuclear de geração de energia e seus preceitos são referências que direcionam as decisões quanto às políticas de manutenção adotadas pelo setor. A pesquisa revela, ainda, que existem “correntes” divergentes quanto a variações do método RCM original. Com base nos resultados obtidos neste trabalho, bem como nos demais trabalhos referenciados nesta pesquisa, pode-se concluir que os métodos simplificados do RCM trazem ganhos significativos para as organizações com uma aplicação de recursos e tempos reduzidos.

Com base na pesquisa bibliográfica realizada conclui-se, também, que o método de Otimização do Programa de Manutenção (PMO) desenvolvido neste trabalho, segue uma estrutura de processos que utiliza muitos (se não todos) os passos de uma aplicação RCM clássica. E, conta ainda, com uma estrutura de revisões com base na experiência operacional das Usinas, o que fornece maior credibilidade às alterações no Programa de Manutenção da Planta (PMP), mesmo para itens “Críticos” à segurança. Conforme recomendado na literatura, o método PMO é aplicado como uma ferramenta de melhoria do PMP, onde já existe uma implantação RCM prévia e, portanto, a avaliação e identificação de modos de falha de itens “Não Críticos” não são abordadas em maior profundidade, dando maior dinamismo ao processo.

Com base nos resultados obtidos com a aplicação do projeto PMO para otimização do PMP das bombas e válvulas do Sistema de Remoção de Calor Residual (JN) e seus sistemas relacionados, pode-se concluir que o método PMO é válido como uma ferramenta de análise e otimização, pois é de fato um método robusto que traz ganhos para o Programa de Gestão de Ativos e Ciclo de Vida da planta. Bem como, é um método flexível, com capacidade de atuação especificamente nos pontos que necessitam ser otimizados dentro do PMP, desta forma, contribuindo de modo significativo para maximizar a vida útil da planta até seu descomissionamento.

A estratégia adotada para o projeto PMO neste trabalho, que consiste em aplicar o método em apenas dois tipos específicos de itens (bombas e válvulas) dentro dos diferentes sistemas relacionados e subsistemas do sistema JN, se mostra vencedora. Permite que o

modelo desenvolvido para uma bomba possa ser replicado para as demais, principalmente quando são bombas redundantes de um mesmo sistema, agilizando consideravelmente os processos de análises do método e reduzindo a alocação de recursos, tais como:

- Redução na alocação de mão de obra especializada. Com esta estratégia fica possível trabalhar com um grupo reduzido de profissionais convidados de outros departamentos. O grupo de trabalho é formado apenas por engenheiros, técnicos e operadores experientes e/ou especialistas nestes tipos de ESCs (Estruturas, Sistemas ou Componentes). Além de contar com a equipe do Programa de Monitoração da Eficácia da Manutenção (PMEM) da Usina, que é um grupo dedicado e experiente neste tipo de projeto.
- A adoção desta estratégia permite a compilação de um volume menor de informações e documentos, pois ficam restritos à apenas aqueles referentes aos ESCs de interesse do projeto. Reduzindo, desta forma, os trabalhos nas etapas de coleta, compilação e análise de dados.
- Os modelos padrões do EPRI também se mostram como uma importante ferramenta para agilizar o processo, principalmente na formação do primeiro modelo desenvolvido pelo método PMO e, com esta estratégia adotada, a consulta e análise de sua base de dados fica facilitada.
- Na literatura observa-se recomendações para utilização de softwares específicos para compilação de dados em aplicações RCM. Esta estratégia adotada com dados reduzidos, gera também economias na não-aquisição de novos Softwares e treinamentos, pois fica possível o uso de uma Planilha de Trabalho elaborada no Software Microsoft Excel®, de maior domínio público.

Ganhos indiretos também podem ser observados, uma vez que o processo PMO gera um maior comprometimento pessoal dos profissionais envolvidos, principalmente quando há o envolvimento do pessoal de “chão de fábrica”. Pois, deste modo, as pessoas envolvidas não precisam apenas aceitar as mudanças em suas rotinas e tarefas, se sentem como parte do processo de mudança. O processo PMO se mostra nesse projeto como um importante veículo de fomento à cultura do negócio, seja na busca pela melhoria continua dos processos, desenvolvimento de uma melhor comunicação interna, sensibilização das pessoas quanto às necessidades estratégicas da empresa e a promoção de conhecimentos, competências e habilidades em relação às técnicas de manutenção.

Os resultados dos indicadores de desempenho monitorados pelo PMEM demonstram que o projeto PMO aplicado traz melhorias significativas em termos de confiabilidade para todo o Sistema de Remoção de Calor Residual (JN) e seus sistemas relacionados. No caso exemplo deste trabalho a melhoria obtida é da ordem de cinco Falhas Funcionais (FF) em sete ciclos contra uma FF em cinco ciclos (5 FF /7 Ciclos X 1 FF /5 Ciclos). Já quanto às taxas de indisponibilidade, os resultados obtidos neste caso exemplo não são expressivos, porém são satisfatórios e encontram-se dentro dos padrões de desempenho estabelecidos de 5%.

De forma geral, em se tratando de sistemas diretamente ligados à segurança como é o caso do Sistema JN e seus sistemas relacionados, pode-se concluir que os ganhos de confiabilidade e disponibilidade obtidos com este trabalho refletem diretamente em uma operação mais segura da Usina Angra 2. Bem como, tem um impacto muito positivo para o planejamento, controle de trabalhos, gestão de riscos e programação de tarefas referentes às Paradas Gerais da Usina Angra 2, trazendo ganhos econômicos na ordem de um milhão de Euros a cada ciclo de operação (€ 1.00.000,00 /Ciclo), referentes à:

- Redução de custo de contratação de mão de obra estrangeira para a execução das revisões gerais: € 600.000 por ciclo (sem impostos);
- Redução do custo de aquisição de sobressalentes: € 400.000 por ciclo (sem impostos).

Por fim, chega-se à conclusão de que a aplicação do método PMO pode trazer ganhos para a segurança das operações e retornos econômicos expressivos para as empresas, seja com a redução de custos operacionais de manutenção, com incrementos na produtividade da planta e/ou com a otimização de processos internos. E, portanto, este método deve ser integrado como uma ferramenta válida no Programa de Gestão de ativos e Ciclo de Vida da Usina Angra 2 e, deste modo, ser aplicado para outros sistemas em futuros projetos de otimização.

Fim.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADOGHE, A. U.; AWOSOPE, C. O. A.; EKEH, J. C. Asset maintenance planning in electric power distribution network using statistical analysis of outage data. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 47, p. 424–435, maio 2013.
- ALEBRANT MENDES, A.; DUARTE RIBEIRO, J. L. Establishment of a maintenance plan based on quantitative analysis in the context of RCM in a JIT production scenario. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 127, p. 21–29, jul. 2014.
- ARNO, R. et al. What Is RCM and How Could It Be Applied to the Critical Loads? **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 51, n. 3, p. 2045–2053, maio 2015.
- BALABA, B.; IBRAHIM, M. Y.; GUNAWAN, I. **Utilisation of data mining in mining industry: Improvement of the shearer loader productivity in underground mines**. In: IEEE 10th International Conference on Industrial Informatics. **Anais...**Beijing, China: IEEE, jul. 2012. p. 1041-1046.
- BERGMAN, W. J. Reliability centered maintenance (RCM) applied to electrical switchgear. **IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.99CH36364)**, v. 2, 1999.
- BOWLER, D. J. Economic evaluation of reliability-centred maintenance (RCM): an electricity transmission industry perspective. **IEEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution**, v. 142, n. 1, p. 9, 1995.
- BREWER, H. D.; CANADY, K. S. Probabilistic safety assessment support for the maintenance rule at Duke Power Company. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 63, n. 3, p. 243–249, mar. 1999.
- CASTRO, D. A. **Confiabilidade, mitos e realidades**. In: 12º Congresso Brasileiro de Manutenção. 1997, São Paulo. **Anais...**Rio de Janeiro: ABRAMAN – Associação Brasileira de Manutenção, 1997.
- CHENG, Z. et al. A framework for intelligent reliability centered maintenance analysis. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 93, n. 6, p. 806–814, jun. 2008.
- CHINESE, D.; GHIRARDO, G. Maintenance management in Italian manufacturing firms. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, 12 abr. 2013.
- CLARKE, P. **The argument against “ Streamlined ” Reliability-centred Maintenance (RCM)**. Disponível em: <[http://www.ircm.com.pk/Argument against streamline.pdf](http://www.ircm.com.pk/Argument%20against%20streamline.pdf)>. Acesso em: 14 maio. 2014.
- CNEN - COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Manutenção de usinas nucleoeletricas - Norma CNEN NE 1.21 Resolução CNEN 03/91**. BRASIL, 1991.
- CNEN - COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Segurança na operação de usinas nucleoeletricas - Norma CNEN NE 1.26 Resolução CNEN 04/97**. BRASIL, 1997.

CONTRI, P. Research priorities at the European Commission in relation to Maintenance Optimization and Nuclear Power Plant Life Management. **E-Journal of Advanced Maintenance**, v. 1, p. 30–43, 2009.

DARRAGI, M. et al. **Preventive Maintenance Optimization at the Gentilly 2 NGS: Initial results and lessons learned**. In: 7th CNS International Conference on CANDU Maintenance. **Anais...**Ontario, Canada: 20 nov. 2005.

DARRAGI, M.; GEORGES, A. **Equipment Reliability Process Improvement and Preventive Maintenance Optimization**. In: 25th Annual CNS Conference - Nuclear Energy: Meeting the Challenges. **Anais...**Ontario, Canada: 2004.

DEHGHANIAN, P. et al. A Comprehensive Scheme for Reliability-Centered Maintenance in Power Distribution Systems—Part II: Numerical Analysis. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 28, n. 2, p. 771–778, abr. 2013.

DESHPANDE, V. .; MODAK, J. . Application of RCM for safety considerations in a steel plant. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 78, n. 3, p. 325–334, dez. 2002a.

DESHPANDE, V. S.; MODAK, J. P. Application of RCM to a medium scale industry. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 77, p. 31–43, 2002b.

DUARTE, J. C.; CUNHA, P. F.; CRAVEIRO, J. T. Maintenance Database. **Procedia CIRP**, v. 7, p. 551–556, jan. 2013.

DUNN, S. **The fourth generation of maintenance**. Disponível em: <http://www.plant-maintenance.com/articles/4th_Generation_Maintenance.pdf>. Acesso em: 3 mar. 2015.

EISINGER, S.; RAKOWSKY, U. K. Modeling of uncertainties in reliability centered maintenance — a probabilistic approach. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 71, n. 2, p. 159–164, fev. 2001.

ELETRONUCLEAR. **CFOL1**: Sistema de Remoção de Calor Residual - 1425^a. Angra dos Reis, 2001.

ELETRONUCLEAR. **2PA-ME08**: Programa de Manutenção Preditiva. Angra dos Reis, 2002.

ELETRONUCLEAR. **ELETRONUCLEAR - EIA VOL1**. Disponível em: <http://www.eletronuclear.gov.br/hotsites/eia/v01_02_caracterizacao.html>. Acesso em: 26 jan. 2015a.

ELETRONUCLEAR. **2PA-MG05**: Programa de Manutenção Preventiva. Angra dos Reis, 2005.

ELETRONUCLEAR. **2PA-MG 30**:Bases Técnicas do PMEM. Angra dos Reis, 2007.

ELETRONUCLEAR. **PMEM-002/09**: OTIMIZAÇÃO DO PROGRAMA DE MANUTENÇÃO DOS EQUIPAMENTOS. Angra dos Reis, 2009.

ELETRONUCLEAR. **2PA-GE16**: Solicitação e Execução de Serviços - Sistemática. Angra dos Reis, 2014.

ELETRONUCLEAR. **Portal ELETROBRAS ELETRONUCLEAR**. Disponível em: <<http://www.eletronuclear.gov.br/AEmpresa.aspx>>. Acesso em: 20 abr. 2015b.

ELETRONUCLEAR. **ESTUDO DE CONFIABILIDADE DAS BOMBAS DE INJEÇÃO DE SEGURANÇA JND 10/20/30/40AP001 nos ciclos 8, 9, 10 e 11.** Angra dos Reis, 2015c.

EPRI - ELETRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. **TR-106857- R1:** Preventive Maintenance Basis. Palo Alto, USA, 1998.

EPRI - ELETRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. **AP-913:** Industry Capabilities Gap Analysis Results. Palo Alto, 2002a.

EPRI - ELETRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. **TR-1002936:** Reliability and Preventive Maintenance: Balancing Risk and Reliability: For Maintenance and Reliability Professionals at Nuclear Power Plants. Palo Alto, USA, 2002b.

EPRI - ELETRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. **PMBD v.2.1 (Preventive Maintenance Basis Database).** Palo Alto, 2009.

EPRI - ELETRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. **TR-1020645:** Plant Support Engineering: Guideline for System Monitoring by System Engineers. Palo Alto, USA, 2010.

ETI, M. C.; OGAJI, S. O. T.; PROBERT, S. D. Strategic maintenance-management in Nigerian industries. **Applied Energy**, v. 83, n. 3, p. 211–227, mar. 2006a.

ETI, M. C.; OGAJI, S. O. T.; PROBERT, S. D. Development and implementation of preventive-maintenance practices in Nigerian industries. **Applied Energy**, v. 83, n. 10, p. 1163–1179, out. 2006b.

ETI, M. C.; OGAJI, S. O. T.; PROBERT, S. D. Reducing the cost of preventive maintenance (PM) through adopting a proactive reliability-focused culture. **Applied Energy**, v. 83, n. 11, p. 1235–1248, nov. 2006c.

FACCIO, M. et al. Industrial maintenance policy development: A quantitative framework. **International Journal of Production Economics**, v. 147, p. 85–93, jan. 2014.

HEO, J. H.; KIM, M. K.; LYU, J. K. Implementation of Reliability-Centered Maintenance for transmission components using Particle Swarm Optimization. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 55, p. 238–245, fev. 2014.

IAEA - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **NS-G-2.6:** Safety Standards Series: Maintenance, Surveillance and In-Service Inspection in Nuclear Power Plants. Viena, Austria, 2002.

IAEA - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **TECDOC-1383:** Guidance for optimizing nuclear power plant maintenance programmes IAEA - International Atomic Energy Agency. Vienna, Austria, 2003.

IAEA - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **TECDOC 1590:** Application of Reliability Centred Maintenance to Optimize Operation and Maintenance in Nuclear Power Plants. Vienna, Austria, 2007a.

IAEA - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **TECDOC 1551:** Implementation Strategies and Tools for Condition Based Maintenance at Nuclear Power Plants. Vienna, Austria, 2007b.

IGBA, J. et al. A Systems Approach Towards Reliability-Centred Maintenance (RCM) of Wind Turbines. **Procedia Computer Science**, v. 16, p. 814–823, jan. 2013.

INPO - INSTITUTE OF NUCLEAR POWER OPERATIONS. **INPO - AP 913: Equipment Reliability Process Description** INPO. Atlanta, USA, 2001.

JIEJUAN, T.; DINGYUAN, M.; DAZHI, X. A genetic algorithm solution for a nuclear power plant risk–cost maintenance model. **Nuclear Engineering and Design**, v. 229, n. 1, p. 81–89, abr. 2004.

JOHNSON, L. P. **Continuous Improvement with PM Optimiization: Lessons Learned From Kewaunee Nuclear Power Plant's Living ProgramFractal Solutions**. Suwane, 2001. Disponível em: <http://www.fractalsolutions.com/Papers/PMO_LivingProgram.pdf>. Acesso em: 17 maio. 2015

JOHNSON, L. P. **PM Optimization: Improving your Existing PM Program**. In: 2004 Maintenance & Reliability Technology Summit. **Anais...USA: 2004**. Disponível em: <http://www.fractalsolutions.com/Papers/PM_Optimization.pdf>. Acesso em: 17 maio. 2015.

JOHNSTON, D. C. **Measuring RCM implementation**. In: Annual Reliability and Maintainability Symposium. 2002 Proceedings (Cat. No.02CH37318). **Anais...Cape Canaveral, USA: 2002**.

KEE, E. et al. Using Risk-Informed Asset Management for Feedwater System Preventative Maintenance Optimization. **Journal of Nuclear Science and Technology**, v. 41, n. 3, p. 347–353, 7 fev. 2012.

KTA SAFETY STANDARD. **KTA 3211.4: Pressure and Activity Retaining Components of Systems Outside the Primary Circuit**. KTA SAFETY STANDARD. Germany, 1996.

LI, D.; GAO, J. Study and application of Reliability-centered Maintenance considering Radical Maintenance. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 23, n. 5, p. 622–629, set. 2010.

MARCO, V. S. DE. **GESTÃO DE ATIVOS E O PAS 55: UM NOVO PARADIGMA?**. In: TECÉM - Tecnologia Empresarial. **Anais...Belo Horizonte: 2013a**.

MARCO, V. S. DE. **INDICADORES DE MANUTENÇÃO PARA A GESTÃO DE ATIVOS**. In: ABRAMAN - 29º Congresso Brasileiro de Manutenção e Gestão de Ativos. **Anais...Santos, São Paulo: 2013b**.

MÁRQUEZ, A. C. et al. The maintenance management framework: A practical view to maintenance management. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 15, p. 167–178, 2009.

MAUGER, P.; DUBREUIL CHAMBARDEL, A. **IAEA-CN--61/30 - Optimizing maintenance through probabilistic safety assessment in order to improve safety**. In: IAEA - International symposium on advances in the operational safety of nuclear power plants. **Anais...Vienna, Austria: 1996**.

MONCHY, F. **A função manutenção**. São Paulo: Ebras/Durban, 1989.

MOUBRAY, J. **Manutenção Centrada em Confiabilidade - RCM II**. 2. ed. Lutterworth: Aladon Ltd, 1997.

NOWLAN, F. S.; HEAP, H. F. **Report n.ADA066-579: Reliability-Centered Maintenance**. Springfield, USA National Technical Information Service, , 1978. Disponível em: <www.ntis.gov>

NUNES, E. L. **MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE (MCC): ANÁLISE DA IMPLANTAÇÃO EM UMA SISTEMÁTICA DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA CONSOLIDADA**. 2001. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

NRC - NUCLEAR REGULATORY COMMISSION - NUCLEAR ENERGY INSTITUTE. **NUMARC 93-01: Industry Guideline for Monitoring the Effectiveness of Maintenance At Nuclear Power Plants**. USA, 1996.

PANSRISU, S.; PREMRUDEEPREECHACHARN, S. **Preventive maintenance optimization for excitation system of bhumibol hydro power plant**. In: Proceedings of the International Conference on Energy and Sustainable Development: Issues and Strategies (ESD 2010). **Anais...IEEE**, jun. 2010.

PINJALA, S. K.; PINTELON, L.; VEREECKE, A. An empirical investigation on the relationship between business and maintenance strategies. **International Journal of Production Economics**, v. 104, n. 1, p. 214–229, nov. 2006.

RAUSAND, M. Reliability centered maintenance. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 60, n. 2, p. 121–132, maio 1998.

SAE - SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. **JA1011: Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes**. USA, 1999.

SELVIK, J. T.; AVEN, T. A framework for reliability and risk centered maintenance. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 96, n. 2, p. 324–331, fev. 2011.

SIQUEIRA, I. P. DE. Measuring the impacts of an RCM program on power system performance. **IEEE Power Engineering Society General Meeting**, 2005.

SMITH, A. M.; HINCHCLIFFE, G. R. Charter 7: Alternative Analysis Methods. In: **RCM-Gateway to World Class Maintenance**. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004. p. 171–182.

SQL BRASIL. **A quarta geração do gerenciamento de ativos operacionais**. Disponível em: <www.sqlbrasil.com.br>. Acesso em: 24 mar. 2015.

TURNER, S. **Introducing PM OPTIMISATION: A Tool for Getting Design and Maintenance Right First Time. OMCS**. Victoria, Austrália, [200-?].

UNITED TECHNOLOGIES. **IBM Maximo**. Disponível em: <<http://www.unitechcompany.com/softwareproducts.htm>>. Acesso em: 18 jun. 2015.

VAJGEL, S. **ABORDAGEM REGULATÓRIA DO PROGRAMA DE MONITORAÇÃO DA EFICÁCIA DA MANUTENÇÃO PARA USINAS NUCLEOELÉTRICAS**. 2009. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Nuclear – Engenharia de Reatores) - Instituto de Engenharia Nuclear, Rio de Janeiro, 2009.

YSSAAD, B.; KHIAT, M.; CHAKER, A. Reliability centered maintenance optimization for power distribution systems. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 55, p. 108–115, fev. 2014.

GLOSSÁRIO

Taxa de Falha (λ). É dada pela razão entre o número de ocorrência de falhas em equipamentos em um determinado intervalo de tempo. Esta taxa pode variar consideravelmente ao longo da vida útil do equipamento.

APS. Análise Probabilística de Segurança – É um modelo de análise integrada e específica de cada planta, que estima a probabilidade de danos ao núcleo e/ou a probabilidade de grande liberação de radiação imediata que podem ocorrer como resultado de vários eventos iniciadores.

Padrão de Desempenho. São valores previamente estabelecidos como limites, com o objetivo de aferir o desempenho de determinados ESCs.

Disponibilidade. É o tempo que um ESC está disponível, capaz de satisfazer seus requisitos de projeto, em relação ao período de tempo total que sua operação pode ser demandada.

Falha de Componente. Toda degradação ou dano que sofre o componente impedindo-o de realizar funções de projeto, sem que haja comprometimento para as funções do Trecho Funcional.

Função Crítica de Segurança. É aquela que garante a integridade dos limites de pressão do sistema primário, ou a capacidade de desligar o reator e mantê-lo nesta condição ou a capacidade de impedir ou mitigar as consequências de um acidente, que poderia resultar em uma exposição externa superior aos limites estabelecidos em normas da CNEN.

Falha Funcional (FF). É a falha de um ESC que o impeça de realizar alguma das funções classificadas no escopo do Programa de Monitoração da Eficácia da Manutenção de Angra 2, afetando as funções do Trecho Funcional.

Grupo de Confiabilidade. Agrupamento de componentes com as mesmas características funcionais, para os quais a Falha Funcional de um componente é a Falha Funcional do Grupo.

Homens x Horas (HH). É uma unidade, convencionada e subjetiva que mede o trabalho realizado por uma pessoa durante uma hora.

Indisponibilidade. É a incapacidade de um ESC para realizar sua função, ESC quando retirado de serviço para realizar alguma atividade de manutenção, testes, modificações de projeto, etc., até que seja liberado, testado e repostado em serviço.

Não significativo para o risco. O ESC não significativo para o risco é aquele cuja falha funcional não aumenta significativamente o perfil de risco da Usina. Deve ser controlado apenas através de seu padrão de desempenho.

Significativo para o Risco. O ESC significativo para o risco é aquele cuja falha funcional aumenta significativamente o perfil de risco da Usina. Deve ser controlado através de padrões de desempenho de confiabilidade e, também, de indisponibilidade.

Trecho. É um segmento de sistema, composto por um ou mais componentes e tubulações, delimitados em pontos chaves, de forma a atender a uma ou mais funções específicas no escopo do PMEM.

Trecho Funcional. Segmento de um sistema, composto por um ou mais componentes ou tubulações, delimitados em pontos chaves, de forma a atender a uma ou mais funções específicas no escopo do PMEM.

ANEXO A - EXEMPLO PARA PLANILHA DE TRABALHO PMO

Empresa:		Relatório/Rev.:		Elaboração:		Data:		Classificação do ESC:		LEGENDA: ESC - ESTRUTURA, SISTEMA OU COMPONENTE PM - PLANO DE MANUTENÇÃO PT - PLANO DE TRABALHO MF - MODO DE FALHA FEC - CARACTERIZAÇÃO DO EFEITO DE FALHA EPRI - CLASSIFICAÇÃO FUNCIONAL DO EPRI						
ESCs:				Localização:		Código Id:										
Funções do ESC:										Análise de Criticidade:			Definir Estratégias de Manutenção:			Comparação de Tarefas:
Código PM:	Tarefa PM:	Freq.	Equipe:	Código PT:	Sequência:	Plano de Trabalho (PT):	Código MF:	Modos de Falha (MF):	Efeitos ou Consequências:	FEC:	EPRI:	CRÍTICO:	Tarefa PM Proposta:	Freq.	Equipe:	Ações: