

**METODOLOGIA PARA IMPLEMENTAÇÃO DE UM PROGRAMA DE
MANUTENIBILIDADE NO CICLO DE VIDA DE UM SISTEMA NUCLEAR**

**METHODOLOGY FOR IMPLEMENTATION OF A MAINTAINABILITY
PROGRAM IN THE LIFE CYCLE OF A NUCLEAR SYSTEM**

Isaac José Antonio Luquetti dos Santos

Engenheiro

Comissão Nacional de Energia Nuclear / Instituto de Engenharia Nuclear

Divisão de Instrumentação e Confiabilidade Humana

Cidade Universitária, Ilha do Fundão, Rio Janeiro, Brasil

(21) 22098196, luquetti@ien.gov.br

RESUMO

Manutenibilidade é o conjunto das características qualitativas e quantitativas combinadas, referentes ao projeto e instalação de um sistema, que permitem o cumprimento dos objetivos operacionais com mínimas despesas, incluindo mão de obra, pessoal qualificado, equipamentos de teste, informações técnicas e facilidades, sob condições operacionais nas quais serão realizadas manutenções programadas e não programadas. A facilidade de realizar a manutenção caracteriza a incorporação dos requisitos de manutenibilidade no ciclo de vida

de um sistema. Dessa maneira, o tempo de manutenção necessário para corrigir os desvios de desempenho de um sistema, tais como falhas ou degradação de sua especificação, é uma medida de como a manutenibilidade foi incorporada nesse sistema. O objetivo desse trabalho é o de apresentar uma metodologia para implementação de um programa de manutenibilidade no ciclo de vida de um sistema nuclear. A estrutura metodológica é composta de três etapas. Na primeira etapa são definidas as principais fases do ciclo de vida do projeto de um sistema nuclear, na segunda etapa são identificadas as atividades relacionadas com o programa de manutenibilidade e na terceira etapa são alocadas as principais atividades em cada fase do ciclo de vida.

Palavras-chave: manutenibilidade, instalação nuclear, metodologia, manutenção, sistema

ABSTRACT

Maintainability is a set of qualitative and quantitative characteristics, referring to the project and installation of a system, that allow the fulfillment of the operational objectives with minimum expenditures, including workmanship, qualified staff, test equipment, information techniques and easiness, under operational conditions in which programmed and not programmed maintenance will be carried through. The easiness to carry through the maintenance characterizes the incorporation of the maintainability in the system lifecycle. In this way, the time necessary to correct the variations in the system performance, such as imperfections or degradation of its specification, is a measure of as the maintainability was incorporated in this system. The objective of this work is to present a methodology for implementation of a maintainability program in the life cycle of a nuclear system. The methodological framework is formed by three steps. In the first step to define the principal phases of the life cycle, in the second step to identify the activities related with the maintainability program and in the third step to allocate these activities in the each phase of the life cycle of a system used in a nuclear installation.

Key-words: maintainability, nuclear installation, methodology, maintenance, system

1. INTRODUÇÃO

O projeto é um conjunto de atividades que tem como principal objetivo a construção e/ou produção de um sistema. Segundo Budurka (1984), o sistema é uma combinação, em qualquer nível de complexidade de pessoas, materiais, ferramentas, máquinas, *software*, facilidades e procedimentos, projetados para trabalharem juntos por um objetivo comum e interagindo com um outro sistema externo.

Uma instalação nuclear é o local, no qual o material nuclear é produzido, processado, reprocessado, utilizado, manuseado ou estocado em quantidades relevantes. Estão, desde logo, compreendidos nesta definição: reator nuclear, usina que utiliza combustível nuclear para produção de energia elétrica, usina de reprocessamento de combustível nuclear irradiado (CNEN-NE-1.04, 2002).

O ciclo de vida de um sistema é uma seqüência de estágios ou fases na vida desse sistema. Essas fases são lógicas e seqüenciais, sendo criticamente revisadas durante todo o ciclo de vida. A duração de cada fase pode variar dependendo da natureza, complexidade e do objetivo do sistema (Blanchard et al., 1994).

Manutenibilidade é uma característica inerente ao projeto e instalação de um equipamento ou sistema, que se relaciona com as facilidades, economia, segurança e precisão no desempenho das ações de manutenção (MIL HDBK 791, 1990). A manutenibilidade, como uma característica de projeto, faz parte dos fatores que determinam a disponibilidade do sistema. A sua incorporação no ciclo de vida tem um impacto significativo na eficácia do sistema e no custo do seu ciclo de vida (Calabro, 1982).

Um dos aspectos de grande importância em um projeto de um sistema é a análise do custo total do seu ciclo de vida, que é formado pelo custo de pesquisa e desenvolvimento, de produção, de operação, de manutenção e de alienação. Os custos associados com a pesquisa, desenvolvimento e produção normalmente são conhecidos. Já os custos relacionados com a operação e manutenção são difíceis de quantificar (Niebel, 1994). Um dos objetivos é o de estabelecer um equilíbrio entre os fatores econômicos e os fatores técnicos. Os fatores econômicos estão relacionados com os benefícios, os rendimentos gerados e os custos citados anteriormente. Os fatores técnicos estão relacionados com as características de desempenho, a disponibilidade do sistema, normas e os fatores humanos.

A incorporação dos requisitos de manutenibilidade no projeto de um sistema tem um impacto significativo no custo do seu ciclo de vida, devendo ser integrada junto com outras

características importantes do projeto, como a confiabilidade, fatores humanos, segurança e impacto ambiental (Dhilton, 1999).

O projeto, desenvolvimento e construção de uma central nuclear é um processo complexo, que envolve diferentes setores com diferentes objetivos, responsabilidades e motivações, necessitando de uma abordagem sustentável, especializada, enfatizando a alocação dos requisitos de manutenibilidade desde a fase de concepção até a fase de alienação (Seminara, 1981).

O objetivo desse trabalho é o de apresentar uma estrutura metodológica para implementação de um programa de manutenibilidade no ciclo de vida do projeto de um sistema nuclear. Esta metodologia é formada por três etapas. Na primeira etapa são definidas as fases do ciclo de vida do projeto, na segunda etapa são definidas as principais atividades relacionadas com o programa de manutenibilidade e na terceira etapa cada atividade, definida anteriormente, é alocada em uma fase específica do ciclo de vida do projeto de um sistema utilizado em uma instalação nuclear.

2 PRINCIPAIS DEFINIÇÕES RELACIONADAS COM A MANUTENIBILIDADE

Essas definições têm como principal objetivo facilitar o entendimento das especificações técnicas incluídas nas atividades do programa de manutenibilidade. As equações 1 até 9 (MIL HDBK 791, 1990) são utilizadas nos cálculos de parâmetros que definem os requisitos a serem alocados no programa de manutenibilidade.

2.1 Tempo médio entre falhas (MTBF)

É definido como o período de tempo entre duas falhas consecutivas de um componente reparável.

2.2 Tempo médio entre manutenções (MTBM)

É definido como o tempo de vida útil do sistema dividido pelo número total de eventos de manutenção programada e não programada relacionado com um determinado item.

2.3 Tempo médio para reparo (MTTR)

É definido como a soma dos tempos de manutenção corretiva dividido pelo número total de falhas de um item, durante um determinado intervalo de tempo sobre determinadas condições, ou ainda, o período de tempo para recolocar um componente reparável em funcionamento.

2.4 Tempo Médio entre Substituições (MTBR)

É definido como o tempo de vida útil do sistema dividido pelo número total de itens removidos durante um determinado período de tempo.

2.5 Tempo atuação

Tempo de prontidão mais o tempo de operação

2.6 Tempo de prontidão

Tempo durante o qual o sistema está em condição de realizar as funções exigidas

2.7 Tempo de paralisação para manutenção (MDT)

É definido como a soma total dos tempos necessários para reparar e restabelecer o sistema em um nível de operação. É função dos tempos médios de manutenção preventiva e corretiva, do tempo de atraso logístico e do tempo de atraso administrativo. Portanto:

$$MDT = \bar{M} + ADT + LDT \quad \text{Eq.1}$$

onde:

\bar{M} = Tempo médio de manutenção ativa.

ADT = Tempo de atraso administrativo.

LDT = Tempo de atraso logístico.

2.8 Tempo médio de manutenção ativa (\bar{M})

É o tempo médio necessário para realizar as tarefas de manutenção preventiva e corretiva. É função da frequência relativa de ocorrência dessas tarefas.

$$\bar{M} = [(\lambda_{ct} \bar{M}_{ct}) + (f_{pt} \bar{M}_{pt})] / (\lambda_{ct} + f_{pt}) \quad \text{Eq.2}$$

onde:

\bar{M}_{ct} = Tempo médio de manutenção corretiva durante um período de tempo.

\bar{M}_{pt} = Tempo médio de manutenção preventiva durante um período de tempo.

λ_{ct} = Taxa de ocorrência da manutenção corretiva.

f_{pt} = Taxa de ocorrência da manutenção preventiva.

2.9 Tempo de atraso logístico (LDT)

É o tempo gasto esperando por recursos logísticos, tais como: Uma peça sobressalente, um equipamento de teste, uma facilidade ou uma norma.

2.10 Tempo de atraso administrativo (ADT)

É o tempo de paralisação resultante de algumas prioridades administrativas, tais como: Contratação de pessoal, procedimentos do departamento pessoal ou greves.

2.11 Tempo médio de manutenção corretiva (\bar{M}_{CT})

É o tempo gasto realizando uma tarefa de manutenção corretiva, devido a interrupção da operação do sistema ou devido a uma falha não esperada.

O tempo médio de manutenção corretiva é definido da seguinte forma:

$$\bar{M}_{ct} = \left[\sum_{i=1}^n (\lambda_i) (M_{cti}) \right] / \sum_{i=1}^n (\lambda_i) \quad \text{Eq.3}$$

onde:

λ_i = Taxa de falha do i ésimo componente.

M_{cti} = Tempo para realizar a i ésima tarefa de manutenção corretiva.

2.12 Tempo ativo mediano para manutenção corretiva (\bar{M}_{mct})

É o quinquagésimo percentil de todos os tempo de reparo. Para uma distribuição log-normal é calculado da seguinte forma:

$$\bar{M}_{mct} = \text{antilog} \left(\left[\sum_{i=1}^n (\lambda_i) (\log M_{cti}) \right] / \sum_{i=1}^n (\lambda_i) \right) \quad \text{Eq.4}$$

2.13 Tempo ativo máximo de manutenção corretiva (M_{max})

Representa o limite superior do percentual de tarefas que excedem a duração do tempo de reparo.

$$M_{\max} = \text{antilog} (\bar{\log} M_{cti} + 1,645 \sigma \log M_{cti}) \quad \text{Eq.5}$$

$$\bar{\log} M_{cti} = \sum_{i=1}^N \log M_{cti} / N \quad \text{Eq.6}$$

$$\sigma \log M_{cti} = \left[\sqrt{ \sum_{i=1}^N (\log M_{cti})^2 - \left(\sum_{i=1}^N \log M_{cti} \right)^2 / N } \right] / (N - 1) \quad \text{Eq.7}$$

N = Tamanho das amostras das tarefas de manutenção corretiva.

$\bar{\log} M_{cti}$ = Média dos logaritmos de M_{cti} .

$\sigma \log M_{cti}$ = Desvio padrão do logaritmo da amostra dos tempo de manutenção corretiva.

2.14 Tempo médio de manutenção preventiva (\bar{M}_{pt})

São atividades de manutenção programadas com a finalidade de manter um sistema em condições de operação e inclui atividades tais como: Inspeções, calibração, revisões. Não inclui os tempos de atraso logístico e administrativo.

É definido como:

$$\bar{M}_{pt} = \left[\sum_{i=1}^n (M_{pti}) (f_{pti}) \right] / \left[\sum_{i=1}^n f_{pti} \right] \quad \text{Eq.8}$$

onde:

M_{pti} = Tempo gasto na i ésima tarefa de manutenção preventiva.

f_{pti} = taxa de ocorrência da i ésima tarefa de manutenção preventiva.

2.15 Tempo ativo mediano para manutenção preventiva (\bar{M}_{mpt})

$$\bar{M}_{mpt} = \left[\sum_{i=1}^n [(f_{pti}) (\log M_{pti})] \right] / \left[\sum_{i=1}^n (f_{pti}) \right] \quad \text{Eq.9}$$

2.16 Homens-Hora de manutenção por horas de operação do sistema (MMH / OH)

É definido como sendo o número de técnicos de manutenção multiplicado pelo número de horas trabalhadas para realizar uma ação de manutenção por horas de operação do sistema.

3 MANUTENIBILIDADE NO CICLO DE VIDA DE UM SISTEMA NUCLEAR

A estrutura metodológica proposta para implementação de um programa de manutenibilidade no ciclo de vida do projeto de um sistema nuclear é composta de três etapas. Na primeira etapa são definidas as principais fases do ciclo de vida. Neste trabalho, o ciclo de vida é definido com as seguintes fases propostas por Blanchard e Fabrycky (1988): projeto conceitual, projeto inicial, projeto detalhado e desenvolvimento, produção e/ou construção, utilização pelo cliente e alienação. Na fase do projeto conceitual é feito o estudo da viabilidade de implantação, são definidas as especificações técnicas e realizado o planejamento de desenvolvimento do sistema. Na fase do projeto inicial é realizada a análise funcional do sistema, as especificações técnicas são avaliadas e revisadas. Na fase do projeto detalhado e desenvolvimento é feito o detalhamento dos subsistemas e posteriormente o desenvolvimento de um protótipo, que é testado e avaliado, com o objetivo de verificar a conformidade com os requisitos inicialmente definidos. A fase de produção e/ou construção consiste nos testes e integração dos principais subsistemas e posteriormente sua produção. Na fase de utilização pelo cliente as informações relacionadas com o uso e funcionamento do sistema são de vital importância para a implementação do melhor modelo de manutenção e de um programa de apoio logístico eficaz. Isto permite um suporte adequado durante todo o ciclo de utilização do sistema. É necessário levar em consideração a obsolescência dos principais componentes e materiais, que podem levar a alienação do sistema.

Na segunda etapa são identificadas as principais atividades relacionadas com a implementação de um programa de manutenibilidade (MIL STD 470B, 1989), ou seja, planejamento, revisão e controle de fornecedores, definições dos principais critérios, alocação, análise dos modos de falhas, análise geral, predição, demonstração, análise dos dados, ações corretivas e programa de revisão.

Na terceira etapa as atividades, identificadas anteriormente, são alocadas em cada fase do ciclo de vida do projeto de um sistema nuclear. A norma MIL STD 471A (1980) foi utilizada como referência nesta etapa.

3.1 Projeto conceitual

As principais atividades nesta fase são definidas a seguir:

- Início do planejamento do programa de manutenibilidade.

- Início da definição dos critérios de projeto relacionados com a manutenibilidade
- Identificação dos requisitos quantitativos, ou seja, identificação de parâmetros como $\bar{M}ct$, $\bar{M}pt$, MTBM, MMH / OH
- Término do planejamento do programa de manutenibilidade.

3.2 Projeto inicial

As seguintes atividades devem ser implementadas nesta fase:

- Programa de controle e revisão dos fornecedores
- Continuação do processo relacionado aos critérios de projeto de manutenibilidade
- Alocação da manutenibilidade
- Análise da manutenibilidade
- Análise dos modos de falhas, efeitos e criticalidade
- Predição da manutenibilidade
- Programa de revisão da manutenibilidade

3.3 Projeto detalhado e desenvolvimento

As seguintes atividades devem ser implementadas nesta fase:

- Continuação do programa de controle e revisão dos fornecedores
- Continuação do processo relacionado aos critérios de projeto de manutenibilidade
- Continuação da análise da manutenibilidade
- Continuação da análise do modo de falhas, efeitos e análise da criticalidade
- Continuação da predição da manutenibilidade
- Demonstração da manutenibilidade
- Análise, coleta de dados e ações corretivas
- Continuação do programa de revisão da manutenibilidade.

3.4 Produção e / ou construção

As seguintes atividades devem ser implementadas nesta fase:

- Continuação do programa de controle e revisão dos fornecedores
- Continuação da demonstração da manutenibilidade
- Continuação da análise, coleta de dados e ações corretivas
- Continuação do programa de revisão da manutenibilidade

3.5 Utilização pelo cliente

As seguintes atividades devem ser implementadas nesta fase:

- Continuação do programa de revisão e controle dos fornecedores
- Continuação da análise, coleta de dados e ações corretivas
- Continuação do programa de revisão da manutenibilidade

3.6 Alienação

O sistema é retirado de operação quando as atividades relacionadas com o programa de manutenibilidade não puderem mais ser realizadas. A obsolescência de componentes, equipamentos ou mesmo o alto custo de reposição, que talvez não compense a retomada de operação do sistema, são fatores que influenciam na alienação do sistema.

A figura 1 apresenta a identificação e a alocação de todas as atividades de um programa de manutenibilidade em cada fase do ciclo de vida do projeto de um sistema nuclear.

Atividades	Projeto conceitual	Projeto inicial	Projeto detalhado	Produção	Utilização
Planejamento					
Controle e revisão fornecedores					
Critérios de manutenibilidade					
Alocação					
Análise manutenibilidade					
Análise modos de falhas, efeitos e criticalidade					
Predição					

Demonstração					
Análise, coleta de dados e ações corretivas					
Programa de revisão da manutenibilidade					

Figura 1: Programa de Manutenibilidade

Fonte: Adaptado de MIL HDBK 791 (1990) e Blanchard e Fabrycky (1988)

4 PROGRAMA DE MANUTENIBILIDADE

Neste item são descritas as atividades relacionadas com o programa de manutenibilidade.

4.1 Planejamento do programa de manutenibilidade

É realizado durante o projeto conceitual e tem como objetivo elaborar um plano que identifique todas as atividades necessárias para a realização e execução do programa de manutenibilidade. As seguintes etapas devem ser realizadas:

- Identificação de cada atividade do programa de manutenibilidade.
- Descrição detalhada de como cada atividade de manutenibilidade é realizada.
- Procedimentos para avaliar e controlar cada atividade.
- Identificação da maneira como o programa de manutenibilidade será integrado com o setor de projeto, engenharia de confiabilidade, apoio logístico, engenharia de sistema, fatores humanos, fornecedores, teste e avaliação do sistema e custos.
- Programação do início e fim de cada atividade.
- Implementação de procedimentos ou métodos para identificação e solução de problemas
- Implementação do método que dissemina para os fornecedores e subfornecedores as exigências do programa de manutenibilidade.
- Elaboração de procedimentos para obtenção dos dados relativos ao programa.

4.2 Programa de revisão e controle dos fornecedores

A finalidade principal é a de estabelecer os requisitos relacionados com a manutenibilidade nos produtos e componentes fornecidos pelos fornecedores e subcontratados, possibilitando a avaliação e controle de suas atividades. O processo de avaliação dos fornecedores é realizado nas atividades e instalações sobre responsabilidade dos fornecedores e deve ser integrado na avaliação geral do projeto. Portanto, o cliente deve assegurar que os itens pertencentes ao projeto e adquiridos dos fornecedores sejam compatíveis com os requisitos do programa de manutenibilidade. É necessário que os fornecedores e subcontratados possuam um programa de manutenibilidade compatível com o programa geral, que providenciem o suporte técnico e administrativo necessário para todos os itens fornecidos. Um programa de controle e revisão dos fornecedores deve possuir as seguintes fases:

- Responsabilidades: Define as responsabilidades pelo desenvolvimento, projeto, fabricação, instalação, testes, operação e manutenção.
- Documentação de projeto: Abrange os documentos relacionados com os critérios de projeto, requisitos de qualificação e plano de trabalho.
- Aprovação e verificação de documentos: Nesta fase os documentos emitidos pelo cliente e pelo fornecedor devem ser mutuamente verificados. A verificação dos documentos deve ser controlada e documentada por relatórios, sendo que os responsáveis por esta atividade não devem estar participando do desenvolvimento do projeto. A figura 2 mostra a relação existente entre o fornecedor e o cliente para documentos emitidos por este.

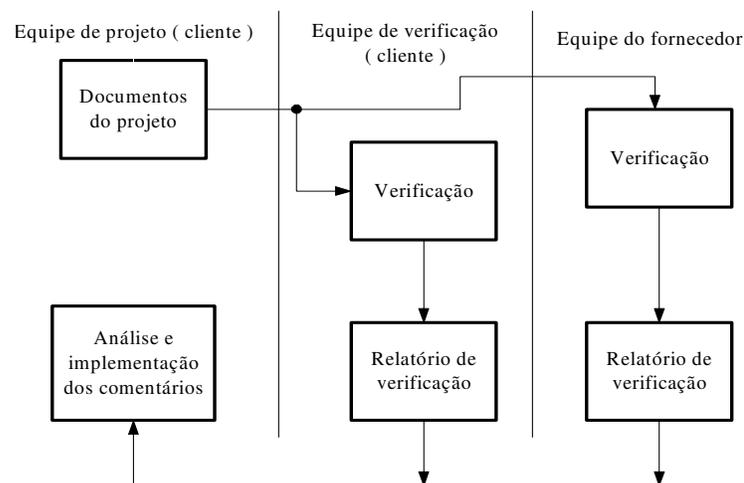


Figura 2: Documentos emitido pelo cliente

Fonte: Adaptado de Costa (1998)

- Verificação e aprovação pelo cliente: Após o envio pelo fornecedor das cópias dos relatórios com as análises e com os resultados dos experimentos, o cliente procede a verificação e se for o caso a aprovação dos documentos emitidos. A figura 3 mostra as interfaces entre o cliente e o fornecedor para documentos emitidos por este.

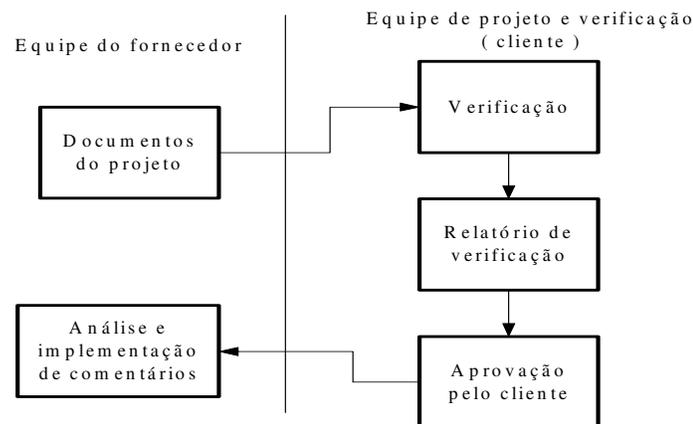


Figura 3: Documentos emitido pelo fornecedor

Fonte: Adaptado de Costa (1998)

- Implementação das verificações: A implementação das verificações em seus respectivos documentos é de responsabilidade do cliente e do fornecedor. Sempre que necessário devem ser promovidas reuniões entre o cliente e o fornecedor visando a obter esclarecimentos e dirimir dúvidas. Esses encontros devem ser documentados em atas e têm características de definição final das dúvidas.
- Documentos emitidos pelo fornecedor: Os documentos relacionados com o projeto, como por exemplo, desenhos esquemáticos, elétricos, manuais, diagramas de interligações devem ser arquivados pelo fornecedor e uma cópia enviada para o cliente.
- Testes e ensaios: Os testes e ensaios realizados pelo fornecedor, que comprovam a qualificação dos produtos devem ser realizados utilizando equipamentos de medição com calibração válida e rastreável aos padrões nacionais e internacionais. O fornecedor deve elaborar um documento contendo instruções relacionadas com a manutenção, com ênfase nos aspectos logísticos, técnicos e de qualificação, especificando os testes realizados e os

equipamentos de medição. Uma cópia deste documento deve ser enviado ao cliente para análise e aprovação.

4.3 Critérios de manutenibilidade

A compatibilidade das especificações do projeto com as exigências da manutenibilidade asseguram a adequação do sistema a finalidade exigida. A seguir são definidas as principais características de projeto relacionadas com a manutenibilidade.

4.3.1 Simplificação

Os principais itens que determinam a simplificação são citados a seguir:

- Redução do número de componentes, implicando em um menor número de ações de manutenção.
- Configuração a mais simples possível.
- Consolidação das funções. A análise de várias funções a serem realizadas pelos componentes e o tipo de hardware disponível para executar a tarefa pode levar a uma simplificação. Um exemplo típico é o da chave que liga a alimentação de um micro computador e ao mesmo tempo ativa o programa de inicialização que testa as memórias.
- Técnicas de *lay-out* especiais que possibilitem a introdução e retirada de componentes de maneira fácil e sem erros.

4.3.2 Padronização e intercambialidade

A padronização tem como objetivo restringir a um mínimo praticável a variedade de componentes, de acordo com as especificações do projeto. A intercambialidade existe quando dois ou mais componentes são fisicamente e funcionalmente intercambiáveis em todas as possíveis aplicações. A intercambialidade funcional é realizada quando um componente, independentemente de sua especificação física, realiza funções específicas de outra peça. A intercambialidade física é realizada quando duas ou mais peças com as mesmas especificações podem se montadas, conectadas e usadas efetivamente na mesma posição. Alguns princípios e vantagens estão associadas a intercambialidade: a intercambialidade funcional deve existir sempre que houver a intercambialidade física; não deve existir a intercambialidade física, quando a intercambialidade funcional não é pretendida; caso seja necessária a intercambialidade funcional, quando não existir a intercambialidade física, deve-

se providenciar adaptadores; deve-se evitar diferentes formatos, tamanho, montagem e outras características físicas para unidades funcionalmente intercambiáveis.

4.3.3 Acessibilidade

É uma característica que afeta a facilidade de acesso a uma determinada área, com a finalidade de inspeção visual ou manutenção. Para maximizar a acessibilidade é necessário cuidado com relação a duas condições limitantes:

- **Nível de acessibilidade:** Se é difícil ter acesso aos controles, pontos de testes, medidores, pontos de lubrificação, o tempo de manutenção é maior.
- **Segurança:** Por razões de segurança deve-se evitar expor o grupo de manutenção em áreas sujeitas a gases explosivos, inflamáveis, componentes sujeitos a alta-tensão, alta temperatura e fontes radioativas.

4.3.4 Modularização

O módulo é uma peça ou conjunto de componentes projetados para serem manuseados como uma unidade independente, com a função de facilitar a instalação e manutenção. A modularização é realizada através da divisão do equipamento em partes fisicamente e funcionalmente distintas. Neste caso, alguns princípios devem ser seguidos: os módulos que realizam as mesmas funções devem ser intercambiáveis sem a necessidade de ajustes para realização da manutenção; os módulos devem ser projetados com peças e componentes de tamanho e formato padrão; padronizar o tamanho das placas de circuito impresso e os conectores usados; utilizar pinos guia evitando inserções erradas; utilizar puxadores nos módulos de maneira a permitir uma rápida substituição; cada módulo deve ser projetado possibilitando que os ajustes e testes sejam realizados independentemente; as ligações dos controles e indicadores devem ser facilmente desconectadas, de maneira a facilitar a substituição.

4.3.5 Identificação

Legendas, sinais, marcas e símbolos são utilizados quando é necessário para o operador ou técnico de manutenção identificar áreas de riscos na operação e manutenção de equipamentos, subsistemas e sistemas. As principais características que devem ser seguidas são as seguintes: a distância entre a identificação e o observador; o nível de iluminação do ambiente; a posição em que a identificação deve ser escrita; a complementação da

identificação através de símbolos ou códigos; o tipo de letra utilizada; combinação de cores das letras utilizadas.

4.3.6 Testabilidade

É uma característica do projeto que permite que o *status* operacional do sistema ou do equipamento seja determinado no tempo correto e de uma maneira eficaz e não custosa, aumentando a disponibilidade. A testabilidade é realizada através da implementação dos seguintes itens: utilização de equipamentos de teste embutidos (“BITE”) e equipamentos de teste em geral; implementação de técnicas de diagnóstico de falhas e simulação de falhas.

4.3.7 Fatores humanos

Com a finalidade de utilizar o sistema de maneira mais eficiente, por um determinado grupo de pessoas, os fatores relacionados com o ser humano devem ser considerados. É necessário levar em consideração os seguintes critérios: o ser humano suas características antropométricas, físicas e psicológicas; a interação homem sistema

4.3.8 Fatores ambientais

São condições naturais e induzidas, que ocorrem ou são encontradas durante um intervalo de tempo em um determinado lugar. A combinação de certos fatores ambientais exerce efeitos em pessoas, componentes e peças. Entre os fatores naturais, a temperatura e a umidade influenciam intensamente nas condições para realizar manutenção em campo. Alta temperatura associada a alta umidade tem um efeito nocivo nas pessoas. Áreas quentes e secas geralmente produzem poeiras, que penetram nos equipamentos e causam desgaste prematuro nas engrenagens. Áreas quentes e úmidas geram o aparecimento de fungos dentro e fora dos equipamentos. Dos fatores induzidos, choque e vibração são os que geram os maiores problemas, causando danos as peças móveis.

4.4 Alocação da manutenibilidade

Consiste em transferir para os níveis hierárquicos funcionais do projeto, ou seja, sistema, subsistema, equipamentos, os requisitos quantitativos (\bar{Mct}) definidos no programa de manutenibilidade. O processo de alocação é facilitado através da formatação mostrada na tabela 1, cujos blocos são definidos a seguir:

- Bloco 1: Identifica os subsistemas ou equipamentos (S).

- Bloco 2: Quantidade de subsistemas por sistema ou equipamentos por subsistemas (Q).
- Bloco 3: Identifica os requisitos relacionados com a manutenibilidade. Neste caso a taxa de falha do subsistema ou equipamento (λ).
- Bloco 4: Indica a contribuição do requisito de manutenibilidade do subsistema ou do equipamento em relação ao sistema ou subsistema, respectivamente ($Cf = Q \lambda$).
- Bloco 5: Tempo de manutenção corretiva estimado para os subsistemas ou para os equipamentos (Mct). Valor estimado por especialistas.
- Bloco 6: Contribuição total de todos os tempos de manutenção corretiva estimados ($Ct = Cf Mct$).
- Bloco 7: Somatório da contribuição de cada requisito de manutenibilidade no subsistema ou no equipamento ($\sum Cf$)
- Bloco 8: Somatório dos valores obtidos no bloco 6.
- Bloco 9: Cálculo do tempo médio de manutenção corretiva estimado

Como exemplo, considere que o sistema instrumentação nuclear de um reator nuclear seja constituído pelos seguintes subsistemas: um (1) canal de pulsos (CP) com taxa de falha igual a 0,246, um (1) canal linear (CLIN) com taxa de falha igual a 0,166 e um (1) canal de potência (CPOT) com taxa de falha igual a 0,196. O objetivo é calcular o tempo médio de manutenção corretiva (\bar{Mct}) para o sistema instrumentação nuclear a partir dos requisitos de manutenibilidade dos subsistemas CP, CLIN e CPOT. O tempo médio de manutenção corretiva calculado para a instrumentação nuclear de um reator de pesquisa é de 4,5 horas.

Tabela 1: Alocação requisitos da manutenibilidade

Bloco 1 (S)	Bloco 2 (Q)	Bloco 3 ($\lambda \times 1000$ Hrs)	Bloco 4 ($Cf = Q \lambda$)	Bloco 5 (Mct -Hrs)	Bloco 6 ($Ct = Cf Mct$)
CP	1	0,246	0,246	6	1,476
CLIN	1	0,166	0,166	3	0,498
CPOT	1	0,196	0,196	4	0,784

Bloco 9	Bloco 7 ($\sum Cf$)	Bloco 8 ($\sum Ct$)
	0,608	2,758
$\bar{Mct} (\sum Ct / \sum Cf)$	4,5 horas	

Fonte: Adaptado de MIL STD 470B (1989)

4.5 Análise do modo de falhas, efeito e criticalidade

Assegura que os modos de falhas potenciais e suas causas e efeitos foram avaliados, identificando as ações que têm como finalidade eliminar ou reduzir a possibilidade da falha ocorrer (MIL STD 1629, 1981). São consideradas duas etapas, que combinadas geram esta análise:

- Análise do modo e efeito de falha
- Análise de criticalidade

4.5.1 Análise do modo e efeito da falha

Gera uma lista com os modos de falhas potenciais, ações de redução do risco e avalia as modificações no projeto. Esta análise é uma ação efetiva antes do evento e não após o fato. É um documento que deve ser continuamente atualizado de acordo com as modificações e informações obtidas durante a fase inicial e detalhada do projeto. Para se realizar a análise do modo e efeito da falha as seguintes etapas devem ser realizadas:

- Definir as especificações do projeto
- Realizar a análise funcional do projeto através de um diagrama funcional.
- Realizar a alocação das especificações do projeto a partir do nível do sistema até o nível do equipamento.
- Identificar os modos de falhas, ou seja, a maneira pela qual um item falha em realizar sua função. Por exemplo: Um relé que não fecha seus contatos.
- Determinar a causa da falha: O item responsável pela ocorrência da falha.
- Determinar os efeitos da falha: É necessário considerar os efeitos nos níveis hierarquicamente superior do item afetado, no processo subsequente e no usuário
- Determinar a taxa de severidade para cada modo de falha, fornecer e estabelecer as ações prioritárias corretivas: a primeira prioridade será dada à eliminação das categorias

identificadas como I (catastróficas) e II (críticas). Quando os modos de falhas identificados como sendo de categoria I ou II não puderem ser eliminados ou controlados, recomendações alternativas deverão ser apresentadas.

- Determinar a taxa de ocorrência do modo de falha, ou seja, a frequência de ocorrência de cada modo individual de falha.
- Determinar a probabilidade de que uma falha seja detectada, ou seja, probabilidade de que os equipamentos de testes incluídos no projeto, procedimentos de controle e verificação detectem os modos de falhas em potencial.

4.5.2 Análise de criticalidade

A criticalidade é função da probabilidade de ocorrência do modo de falha, da sua severidade e da probabilidade de que a falha no projeto ou no processo atinja o usuário final. A análise de criticalidade pode ser usada durante o projeto, operação ou manutenção do sistema. No projeto auxilia na avaliação da necessidade de se usar dispositivos de segurança ou de redundância, com a finalidade de aumentar a confiabilidade. Na fase de operação e manutenção identifica falhas de componentes que poderiam causar sérios acidentes. O número de prioridade de risco (NPR) é uma medida quantitativa para se avaliar e acompanhar o risco do modo de falha. O cálculo do NPR é feito pelo produto de três outras medidas quantitativas:

P - Índice de probabilidade de ocorrência

S - Índice da severidade do modo de falha

D - Índice de probabilidade de que a falha no processo ou no projeto atinja o usuário final

4.6 Análise da manutenibilidade

Esta atividade está relacionada com a realização da análise funcional do projeto e análise das tarefas de manutenção. A análise funcional é considerada como uma análise lógica e sistemática do projeto, que começa na fase definida como projeto inicial e termina na fase do projeto detalhado. O objetivo é definir os sistemas, seus principais elementos e identificar os recursos necessários. Isto é feito com o auxílio do diagrama funcional de fluxo, que analisa os recursos necessários para implementar as funções desejadas, as entradas utilizadas e as saídas desejadas. O diagrama funcional de fluxo deve ser flexível para poder incorporar informações adicionais, identificando os recursos necessários à medida que as funções sejam realizadas. As funções a serem realizadas em um diagrama funcional de fluxo podem ser

classificadas em: funções operacionais e funções de manutenção. As funções operacionais referem-se aos objetivos da missão, descrição das diversas fases da missão, dos modos de operação do sistema e sua utilização. As funções de manutenção descrevem as atividades relacionadas com a manutenção, identificando os requisitos de manutenibilidade e de suporte para o sistema analisado (Goldman e Slattery, 1997).

4.7 Predição da manutenibilidade

O objetivo da predição da manutenibilidade é o de verificar se as especificações do projeto, inicialmente alocadas, são adequadas permitindo a determinação dos níveis de confiança para o teste de demonstração da manutenibilidade. Uma das características da predição é a identificação das áreas que justificam a melhoria, modificação ou mesmo alteração do projeto. Outro objetivo é o de determinar o tempo de manutenção máximo, a quantidade de técnicos atuando na manutenção e verificar se as ferramentas e equipamentos de testes são adequados e consistentes com as necessidades operacionais do sistema. A seguir é apresentado um método de predição (MIL HDBK 472, 1990).

4.7.1 Descrição do método

O procedimento fundamental consiste na seleção randômica de uma amostra representativa de itens substituíveis da população total de peças e componentes que constituem o sistema. A amostra total de tamanho N , apresentada na equação 10, inclui peças e componentes de todos os grupos de itens utilizados (MIL HDBK 472, 1990). A amostra N é subdividida em um número de sub-amostras de tamanho n , chamada amostra tarefa. O tamanho n dessa amostra tarefa é determinado considerando a frequência relativa de falha para um grupo particular de itens substituíveis. O método utiliza três listas de verificação denominadas A, B e C relacionadas com os fatores que influenciam no projeto. A lista A está relacionada com os fatores que influenciam nas características físicas do projeto, como por exemplo, características de acesso, visualização, espaço para manutenção. A lista B está relacionada com as facilidades introduzidas no projeto, como por exemplo, equipamentos de testes externos, auxílio do pessoal de operação. A lista C está relacionada com o nível de especialização, experiência e treinamento, as características físicas, mentais e psicológicas do grupo de manutenção, como por exemplo, análise lógica, memória, paciência, acuidade visual. Esses dados são obtidos através das tarefas de manutenção simuladas. O tempo de paralisação é calculado utilizando-se as respostas das listas de verificação, que são

convertidas em pontuação e através de uma equação empírica calculado o tempo de manutenção corretiva (MIL HDBK 472, 1990).

São apresentadas a seguir as etapas envolvidas na análise deste método:

I - Determinação da amostra de tamanho N

O tamanho da amostra é calculado através da seguinte fórmula:

$$N = (\phi \sigma) / (K \bar{X}) \text{ ou } N = [Cv (\phi / K)]^2 \quad \text{Eq.10}$$

ϕ = Nível de confiança (1,645 para um nível de confiança igual a 95%)

σ = Desvio padrão da população

\bar{X} = Média da população

K = Exatidão da predição, percentual da média.

Cv = coeficiente de variação

II - Determinação das subamostras das tarefas (n)

Para calcular as subamostras das tarefas (n) é necessário determinar a contribuição da taxa de falha de cada peça e componente na taxa de falha total do sistema ou equipamento. O número esperado de falhas por 10⁶ horas é calculado multiplicando-se a taxa média de falha pela quantidade dos componentes. A contribuição para o total de falhas esperada é calculada dividindo-se o número esperado de falhas pelo valor total esperado de falhas. Considerando uma amostra N de tamanho 50, o número de falhas para cada amostra é calculado multiplicando-se cinquenta (50) pela contribuição total de falhas esperada. Dessa maneira, obtém-se o valor n das sub-amostras . Veja o exemplo na Tabela 2

Tabela 2: Determinação das subamostras das tarefas

PEÇA	QUANT.	TAXA MÉDIA DE FALHA POR 10 ⁶ HORAS	NÚMERO ESPERADO DE FALHAS POR 10 ⁶ HORAS	CONTRIB. PARA O TOTAL DE FALHAS ESPERADA	NÚMERO DE FALHAS PARA AMOSTRA N = 50	AMOSTRA REAL USADA n
MOTOR	25	1,890	47,250	0,650	0,30	0
CAPACITOR	1280	0,100	128,00	1,760	0,90	1
DIODO	4	29,83	119,32	1,640	0,80	1
CONECTOR	335	0,320	107,20	1,470	0,70	1

RELÉ	43	3,590	154,37	2,120	1,10	1
BOBINA	349	0,330	115,17	1,580	0,80	1
CHAVE	162	0,450	72,900	1,000	0,50	1
RESISTOR	2459	0,150	368,85	5,070	2,50	2
VÁLVULA	380	15,67	5954,6	81,79	40,9	41
CRISTAL	160	1,330	212,80	2,920	1,50	1
TOTAL	5197		7280,46	100 %		50

Fonte: Adaptado de MIL HDBK 472 (1990)

III - Cálculo dos pesos atribuídos as listas de verificação

Para cada pergunta da lista são atribuídos pesos de 0 a 4 (MIL HDBK 472, 1990).

IV - Cálculo do tempo de paralisação para manutenção

Isto é realizado através da inserção da pontuação das listas de verificação nas equações 11 e 12, mostradas a seguir (MIL HDBK 472, 1990).

Mct = Tempo de manutenção corretiva

A, B, C = Somatório dos pesos atribuídos a cada uma das listas de verificação.

$$Mct = \text{antilog} (3,54651 - 0,02512 A - 0,03055 B - 0,01093 C) \quad \text{Eq.11}$$

Mmax = Tempo máximo de paralisação

$$Mmax = \text{antilog} (\bar{\log} Mct + 1,645 \sigma \log Mct) \quad \text{Eq.12}$$

4.8 Programa de demonstração da manutenibilidade

O programa de demonstração é implementado através da junção de esforços do fornecedor e do cliente com a finalidade de assegurar que os requisitos de projeto estão coerentes com as especificações inicialmente definidas. O planejamento do programa de demonstração é realizado através da implantação dos seguintes itens:

- Definição e programação dos testes de simulação
- Descrição da organização, administração e controle dos testes de simulação programados.
- Definição dos recursos e elementos de suporte necessários para a realização dos testes de simulação.
- Descrição das condições e do local onde os testes de simulação serão realizados.
- Descrição da fase de preparação dos testes de simulação
- Descrição do documento de demonstração formal dos testes de simulação.

- Identificação da documentação necessária para a realização dos testes de simulação.
- Projeção dos custos necessários para a realização dos testes de simulação.
- Descrição dos recursos e das condições necessárias para a realização de um novo teste.

Os testes de simulação de falhas realizados no programa de demonstração da manutenibilidade consistem na execução de tarefas simuladas de manutenção preventiva e corretiva, sendo que os dados obtidos são utilizados nos cálculos dos parâmetros de manutenibilidade e comparados com os valores definidos no projeto, podendo então implicar em uma ação corretiva. As seguintes etapas devem ser implantadas nos procedimentos que definem o programa de demonstração: a configuração dos itens selecionados para a demonstração deve ser documentada; os equipamentos de suporte e testes utilizados durante a demonstração devem ser certificados; o sistema deve ser instalado e operacionalmente verificado no local do teste antes da demonstração e depois da simulação ter sido realizada; os técnicos que participam do programa de demonstração devem ser treinados adequadamente.; deve ser definido um grupo de teste formado pelo diretor responsável pelo teste , técnico responsável pela introdução da falha, técnico responsável pela coleta dos dados, técnico responsável pela execução das tarefas simuladas e observadores (clientes). As principais seções de um programa de demonstração de manutenibilidade são citadas a seguir:

- Informações do suporte: Condições do local onde é realizada a manutenção; facilidades disponíveis no local onde é realizada a manutenção.
- Descrição do grupo de teste : Descrição de sua organização; curriculum do fornecedor, responsáveis pela operação, manutenção e técnicos participantes; determinação das responsabilidades específicas.
- Material de apoio: Descrição das ferramentas, equipamentos de testes; material de consumo; peças sobressalentes; equipamentos de segurança; manuais técnicos.
- Descrição do estágio de preparação: Organização e formação do grupo de teste; treinamento dos técnicos.
- Descrição do estágio de demonstração: Descrição dos objetivos dos testes; programação dos testes; procedimentos para seleção das tarefas de manutenção que serão simuladas; identificação das tarefas de manutenção consideradas especiais; descrição dos métodos de testes (incluindo critérios de decisão para rejeição ou aceitação dos testes); descrição dos métodos para aquisição dos dados, métodos para análise dos dados obtidos.

- Estágio de repetição dos testes: De um maneira geral, um novo teste pode ser exigido como resultado das seguintes condições: A análise dos dados obtidos indica uma não conformidade com os requisitos inicialmente definidos possibilitando ao cliente requisitar um novo teste; o cliente pode requisitar novas simulações com a finalidade de aumentar o nível de confiança ou o cliente pode requisitar um novo teste caso a análise dos dados obtidos indique uma pequena variação em relação aos requisitos inicialmente definidos no projeto.

No final dos testes de demonstração deve ser confeccionado pelo grupo de teste um relatório de demonstração, submetido ao auditor de acordo com o planejamento inicial. Este relatório deve incluir os seguintes tópicos:

- Sumário dos dados coletados.
- Fatores que influenciam os dados coletados.
- Análise dos dados coletados.
- Resultados e conclusões, informando se os objetivos especificados foram ou não atingidos
- Avaliação dos fatores relacionados ao apoio logístico integrado, como por exemplo manuais técnicos, número de técnicos, ferramentas, equipamentos de teste
- Deficiências notadas.
- Recomendações e sugestões para melhoria.
- Resultados de novos testes.

4.9 Análise, coleta de dados e ações corretivas

As ações corretivas são modificações introduzidas em qualquer etapa do desenvolvimento ou produção de um produto, com o objetivo de evitar ou reduzir o risco de repetição de não conformidades. Sempre que ocorrer uma não conformidade deve ser estabelecida uma ação corretiva correspondente com as seguintes etapas definidas a seguir:

- Definição da ação corretiva: A ação corretiva deve ser definida após a determinação das causas que geraram a não conformidade
- Documentação: Toda ação corretiva deve ser documentada através de um relatório específico, que contém a definição das ações corretivas a serem realizadas, prazo para implementação e o responsável pela implementação.
- Verificação: Após a implementação das ações corretivas, deve ser verificado se o processo foi efetivado, evitando assim a repetição da não conformidade.

- Aprovação: Uma vez verificada e avaliada a implementação da ação corretiva, a mesma deve ser aprovada através do relatório da ação corretiva.

4.10 Programa de revisão da manutenibilidade

Ao se planejar o programa de revisão da manutenibilidade deve-se definir antecipadamente os objetivos do programa, estabelecer data e local para reunião do grupo de revisão formado por representantes dos elementos organizacionais afetados pela revisão, ou seja: Setor de engenharia de confiabilidade, manutenibilidade, engenharia elétrica, mecânica, apoio logístico, produção, fornecedores. O programa de revisão da manutenibilidade engloba as seguintes etapas:

- Revisão do projeto conceitual: É iniciada durante o projeto conceitual e termina antes do início do projeto inicial. É uma atividade coordenada que tem como objetivo a revisão da configuração escolhida do projeto.
- Revisão do projeto inicial: É realizada durante a fase inicial quando os requisitos funcionais são alocados no projeto e as especificações técnicas são detalhadas.
- Revisão do projeto detalhado e desenvolvimento: É realizada durante a fase do projeto detalhado e desenvolvimento.
- Revisão crítica do projeto: É realizada depois do projeto detalhado e antes de iniciar a produção e/ou construção do projeto.

As propostas de modificações podem ser realizadas em quaisquer das atividades do programa de manutenibilidade e iniciadas em qualquer fase do ciclo de vida. Essas modificações podem ser definidas como de rotina, urgência ou de emergência, dependendo da prioridade a ser adotada. Cada modificação é gerada por um documento definido como proposta de modificação, que deve ser revisado, avaliado e aprovado antes de sua implementação. Este documento é classificado de duas formas:

- Classe 1: Modificações realizadas no projeto com impacto no desempenho, segurança, manutenibilidade, confiabilidade e custo.
- Classe 2: Pequenas modificações que não afetam as especificações técnicas do projeto, como por exemplo: modificações na nomenclatura dos desenhos elétricos e na documentação.

Cada proposta de modificação deve conter os seguintes itens especificados a seguir:

- Descrição do problema e da proposta de modificação.
- Descrição das possíveis alternativas de modificação no projeto.

- Análise mostrando como a modificação influenciará na solução do problema e o impacto nas especificações do projeto.
- Análise comprovando que a solução proposta não causará novos problemas.
- Descrição dos recursos necessários para implementar as modificações.
- Planejamento da incorporação das modificações incluindo os elementos afetados, prazo limite para a implementação das alterações, testes de demonstração, verificação e avaliação.
- Análise identificando os possíveis riscos caso as modificações não sejam realizadas.

5 CONCLUSÕES

Manutenibilidade é uma característica inerente ao projeto e instalação de um sistema, considerando as facilidades, economia e segurança no desempenho das ações de manutenção. Os requisitos de manutenibilidade devem ser incluídos em todas as fases do ciclo de vida do projeto de um sistema. O planejamento e a implantação devem ser realizados a partir da fase do projeto conceitual e prosseguem até a fase de detalhamento e desenvolvimento do sistema. A avaliação da alocação dos requisitos tem início na fase de desenvolvimento e termina durante a fase de utilização pelo cliente.

O tema abordado é um dos mais importantes desenvolvidos na engenharia de sistemas, pois é de vital importância para o sucesso do projeto de um sistema nuclear, possuindo parâmetros que caso sejam bem avaliados e interpretados melhoram a disponibilidade do sistema, otimiza a manutenção e aumenta de forma substancial a sua vida útil. Com o aumento da competição entre as empresas em busca do mercado consumidor e devido a mudança de perfil do usuário, tornando-se mais exigente em busca de produtos com maior qualidade, menor custo e com suporte adequado durante todo o seu ciclo de vida, programas de manutenibilidade tornaram-se fundamentais. Com esta finalidade, procurou-se desenvolver uma metodologia necessária para a definição das principais atividades relacionadas com a confecção de um programa de manutenibilidade e alocação dessas atividades em cada fase do ciclo de vida do projeto de um sistema nuclear.

O trabalho destaca a importância do planejamento do programa de manutenibilidade, do controle e revisão dos fornecedores, definição dos critérios, alocação dos requisitos, da análise dos modos e feitos de falhas, da predição, do programa de demonstração, da análise e

coleta de dados, das ações corretivas e do programa de revisão. Todos os procedimentos adotados foram baseados em normas desenvolvidas por organismos e órgãos internacionais, assegurando assim a credibilidade, aplicabilidade e a eficiência da metodologia utilizada, possibilitando a implantação do trabalho realizado em várias áreas de desenvolvimento tecnológico. Portanto, com as ferramentas fornecidas espera-se ter viabilizado o planejamento, elaboração e implementação deste programa, além de ter contribuído para a continuação dos estudos relacionados com este campo de aplicação.

REFERENCIAS

- BLANCHARD, B. S. E FABRYCKY, W. J. **Systems engineering and analysis**. Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1988.
- BLANCHARD, B. S.; VERMA, D.; PETERSON, E. L. **Maintainability a key to effective serviceability and maintenance management**, 1994.
- BUDURKA, W. J. **Developing strong systems engineering skills**. IBM technical directions, v.10 (4), 1984.
- CALABRO, S. R. **Maintainability and availability, 1982**.
- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, CNEN-NE-1.04. **Licenciamento de Instalações Nucleares, 2002**.
- COSTA, J. R. **Confiabilidade de Sistemas - Curso de preparação técnica de pessoal para programas de garantia de qualidade, Nuclebrás**, 1998.
- DHILTON, D. S. **Engineering maintainability, 1999**.
- GOLDMAN, A. S. E SLATTERY, T. B. **Maintainability: A major element of system effectiveness**, 1997.
- MILITARY STANDARD HANDBOOK, MIL HDBK 791. **Maintainability design techniques**, 1990.
- MILITARY STANDARD HANDBOOK, MIL HDBK 472. **Maintainability prediction Vol. I and II**, 1990.
- MILITARY STANDARD, MIL STD 470B. **Maintainability program for systems and equipment**, 1989.
- MILITARY STANDARD, MIL STD 471A. **Maintainability verification / demonstration / evaluation**, 1980.

MILITARY STANDARD, MIL STD 1629A. **Procedures for performing a failure mode, effects and criticality analysis** , 1981

NIEBEL, B. W. **Engineering maintenance**, 1994.

SEMINARA, J. L. E PARSON, S. O. **Human factors review of power plant maintainability**. Electric power research institute, EPRI, February, 1981.