



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**ANÁLISE DA APLICAÇÃO DA MANUTENÇÃO CENTRADA  
EM CONFIABILIDADE EM UMA USINA TERMOELÉTRICA  
DE GÁS NATURAL DO NORDESTE DO BRASIL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO

POR

PEDRO HENRIQUE CAVALCANTI LINS

Orientador: Adiel Teixeira de Almeida, PhD

RECIFE, DEZEMBRO/2010

**L759a Lins, Pedro Henrique Cavalcanti**

Análise da aplicação da manutenção centrada em confiabilidade em uma usina termoeletrica de gás natural do Nordeste do Brasil / Pedro Henrique Cavalcanti Lins. – Recife: O Autor, 2010.

viii, 30 f.; il., figs., tabs.

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Curso de Engenharia de Produção, 2010.

Inclui Referências Bibliográficas.

**1. Engenharia de Produção. 2. Manutenção. 3. MCC. 4. Termoeletrica. I. Título.**

**UFPE**

**658.5**

**BCTG/2010-242**

## AGRADECIMENTOS

Ao meu pai Paulo Lins, pelo suporte, força e amor irrestritos, que sempre me dão coragem e vontade para continuar caminhando.

À minha mãe Cristina Lins (*in memoriam*), pelo amor incondicional e pelo exemplo de vida, de luta e de caráter, valores os quais me levam a nunca desistir de crescer e melhorar como pessoa e profissional.

Aos meus irmãos Felipe e Carolina e familiares, pessoas que amo e com quem compartilho esta etapa vencida com muita felicidade.

À minha namorada Rebecca Diniz, fonte de inspiração, carinho e amor, pilares importantes para seguir crescendo.

Ao meu amigo e hoje engenheiro da Petrobras Luiz Wolmer, pela amizade, suporte e incentivos dados durante todo meu percurso na universidade.

Aos meus amigos de curso, que fizeram da vida acadêmica uma obrigação prazerosa.

Aos companheiros de trabalho no CDSID, em especial a Thalles Garcez, pelas discussões construtivas e pelos bons momentos compartilhados em pesquisas, congressos, força-tarefas e no próprio laboratório.

Aos engenheiros da Iberdrola, em especial ao engenheiro de manutenção Reidson Carvalho, pelo suporte e pela orientação durante meu estágio na Termopernambuco.

Aos professores do DEP/UFPE, em especial ao meu orientador, Adiel Teixeira de Almeida, pelo conhecimento transmitido, além do apoio e dos conselhos dados durante toda a minha graduação, que me proporcionaram grande desenvolvimento pessoal e profissional.

## RESUMO

Neste trabalho, propõe-se uma análise da aplicação da metodologia MCC (Manutenção Centrada em Confiabilidade) no contexto de uma usina termoelétrica de gás natural. Inicialmente, são apresentados aspectos introdutórios acerca da metodologia MCC, do segmento de atuação da empresa, bem como do sistema em estudo, como forma de contextualizar o processo. Em seguida, apresenta-se um exame dos passos de aplicação da abordagem proposta, evidenciando-se as etapas de seleção de funções, análise dos modos de falhas e escolha das atividades aplicáveis e efetivas. Ao final, expõe-se uma síntese dos principais pontos observados no decorrer do processo de implementação da metodologia, apresentado-se uma análise dos resultados obtidos e dos itens a melhorar.

Palavras-chave: Manutenção, MCC, Termoelétrica.

# SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	vii
LISTA DE TABELAS .....	viii
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Justificativa .....	1
1.2 Objetivos .....	2
1.3 Metodologia .....	3
1.4 Organização do Trabalho .....	3
2. REVISÃO DA LITERATURA .....	4
2.1 Evolução da Manutenção .....	4
2.2 MCC – Manutenção Centrada em Confiabilidade .....	5
2.3 As questões da MCC e os seus princípios .....	6
2.4 Implementação da Manutenção Centrada em Confiabilidade .....	8
2.5 Benefícios da Manutenção Centrada em Confiabilidade .....	9
3. USINAS TERMOELÉTRICAS DE GÁS NATURAL .....	10
3.1 Usinas Termoelétricas de Gás Natural no Brasil .....	10
3.2 Usinas Termoelétricas de Ciclo Combinado .....	11
3.2.1 Turbina a Gás .....	11
3.2.2 Caldeira de Recuperação de Calor .....	12
3.2.3 Turbina a Vapor .....	12
3.3 A Empresa .....	13
4. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA MCC .....	15

4.1 Descrição do Sistema de Bypass .....	15
4.2 Seleção do Sistema e Coleta de Informações .....	17
4.3 Análise dos Modos de Falha e Efeitos.....	17
4.3.1 Ferramenta FMEA .....	17
4.3.2 Utilização da FMEA na Aplicação da MCC.....	18
4.4 Seleção de Funções Significantes .....	19
4.4.1 Determinação dos Níveis de Criticidade.....	19
4.4.2 Determinação das Funções Significantes.....	21
4.5 Seleção de Atividades Aplicáveis e Efetivas e Definição da Periodicidade.....	23
4.6 Análise dos Resultados .....	26
5. CONCLUSÕES.....	27
REFERÊNCIAS .....	27

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Mapa das principais usinas termoelétricas do Brasil .....	10
Figura 3.2 – Componentes de uma turbina a gás: o compressor, o sistema de combustão e a turbina propriamente dita.....	12
Figura 3.3 – Esquema de uma usina de ciclo combinado.....	13
Figura 4.1 – Exemplos de válvulas motorizadas tipo gaveta .....	16
Figura 4.2 – Exemplo de válvula de bypass com atuação hidráulica .....	16

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Diferenças entre a Manutenção Tradicional e a MCC.....	6
Tabela 4.1 – FMEA simplificado dos itens analisados .....	18
Tabela 4.2 – Níveis de frequência de modos de falha .....	20
Tabela 4.3 – Níveis de detectabilidade.....	20
Tabela 4.4 – Classes de danos para determinação da severidade.....	21
Tabela 4.5 – Matriz de riscos.....	21
Tabela 4.6 – Análise do Equipamento (I), Função (I), Falha Funcional (I), Modos de Falha (I), (II) e (III) .....	22
Tabela 4.7 – Análise do Equipamento (I), Função (II), Falha Funcional (II), Modos de Falha (IV) e (V).....	22
Tabela 4.8 – Análise do Equipamento (II), Função (I), Falha Funcional (I), Modos de Falha (I) a (VI) .....	23
Tabela 4.9 – Definição das ações de manutenção .....	24

## 1. INTRODUÇÃO

O aumento da competição entre as empresas, da globalização dos negócios, das constantes mudanças tecnológicas e das implicações das indústrias em questões ligadas ao meio ambiente são fatores que determinaram grandes modificações na estrutura das companhias (MOYA, 2004).

Segundo Swanson (2001), na busca por níveis de desempenho comparados aos melhores padrões mundiais, cada vez mais companhias direcionam seus esforços para que objetivos como a melhoria da qualidade e da produtividade, além da redução dos custos, sejam alcançados. De acordo com Waeyenbergh & Pintelon (2002), a manutenção contribui de forma cada vez mais significativa no alcance destes objetivos.

Manutenção efetiva, eficaz e eficiente estende o tempo de vida dos equipamentos, melhora os índices de disponibilidade e de produtividade, aumenta o nível de qualidade do produto, mantém as instalações e seus componentes em condições apropriadas de uso, além de contribuir para o alcance das exigências de segurança humana e ambiental (SWANSON, 2001; WANG *et al*, 2007).

Neste contexto, a MCC – Manutenção Centrada em Confiabilidade (tradução para português do termo inglês *Reliability-centered maintenance*, RCM) – oferece uma melhor sistemática e um processo mais eficiente de abordagem programática para otimização de uma planta industrial e da manutenção dos equipamentos (DESHPANDE & MODAK, 2002a). O objetivo principal da MCC é o de reduzir os custos de manutenção, atacando as funções mais importantes do sistema, além de evitar (ou eliminar) ações de manutenções que não são estritamente necessárias (RAUSAND, 1998).

Desta forma, é natural concluir que a implantação da metodologia trará retornos positivos à estrutura de manutenção da organização em análise, uma usina termoeletrica de gás natural, localizada no nordeste do Brasil. Apenas como ressalva, algumas informações mais detalhadas sobre o funcionamento do sistema, bem como dos componentes envolvidos são omitidos, como forma de preservar os processos da usina.

### 1.1 Justificativa

A usina termoeletrica do estudo possui três turbinas em sistema de ciclo combinado, sendo duas a gás natural e uma a vapor. Os sistemas envolvidos direta ou indiretamente no

processo de geração de energia da usina são bastante complexos e interconectados. Por isto, a falha de um desses sistemas pode facilmente vir a paralisar a planta. Neste cenário, o papel da manutenção torna-se ainda mais importante e intenso.

A implantação da MCC contribuirá positivamente para a melhoria do processo de funcionamento da planta, bem como do planejamento da manutenção.

Além disto, a MCC, apesar de ser uma abordagem bastante difundida e conceituada, não apresenta penetração muito forte no setor de atuação da empresa, de acordo com a literatura pesquisada. Fato que pode colocar a empresa em uma posição de destaque no seu ramo de atuação, contribuindo para a sua evolução.

Desta forma, aliando a busca da empresa por ferramentas que agreguem valor às suas atividades, com os já conhecidos benefícios oferecidos pela MCC, espera-se aperfeiçoar a gestão da planta industrial da usina, bem como ampliar o espaço de aplicações da Manutenção Centrada em Confiabilidade.

## 1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral a análise da implantação da abordagem de Manutenção Centrada em Confiabilidade em um subsistema de uma usina termoeletrica de gás natural. Ele servirá, também, como projeto-piloto para posteriores aplicações em outros sistemas e/ou subsistemas da planta.

Os objetivos específicos são caracterizados, naturalmente, pelo atendimento das etapas e execução das atividades estabelecidas pela própria metodologia MCC (SMITH, 1993; MOUBRAY, 1997; SIQUEIRA, 2005):

1. Selecionar o Sistema e Coletar Informações;
2. Analisar os Modos de Falha e os Efeitos;
3. Selecionar Funções Significantes;
4. Selecionar Atividades Aplicáveis;
5. Avaliar a Efetividade das Atividades;
6. Selecionar Tarefas Aplicáveis e Efetivas;
7. Definir a Periodicidade das Atividades.

Além destes, também se tem como objetivo específico comparar as atuais práticas de manutenção dentro do sistema em estudo com as sugeridas pela metodologia MCC ao final do processo de análise.

### 1.3 Metodologia

Primeiramente, por se tratar de tratar de um trabalho que busca alcançar a solução para um problema específico, embasado em conceitos pesquisados na literatura da área, o método científico conduzido é dedutivo.

De acordo com o que estabelece Cauchik Miguel (2010), a pesquisa, quanto à finalidade, será prática, pois visa a aplicar, em um contexto fabril, uma abordagem de manutenção já conhecida e conceituada. Quanto ao objetivo, será exploratória, pois se trata de uma pesquisa combinada, composta por uma primeira etapa qualitativa, na qual se busca conhecer melhor a MCC e o sistema onde será aplicada, seguida de uma etapa quantitativa, que consiste na aplicação, de fato, da ferramenta. Quanto aos dados, será bibliográfica, devido à consulta necessária à literatura, e pesquisa-ação, por se tratar de um estudo com interferência direta do pesquisador, que será parte ativa do processo de implantação da ferramenta, e com o objetivo de estabelecer um modelo de manutenção sob os moldes da metodologia proposta pela Manutenção Centrada em Confiabilidade.

### 1.4 Organização do Trabalho

O presente Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação tem seu corpo dividido em 5 capítulos, conforme apresentado abaixo:

- O capítulo 1 descreve os objetivos do trabalho, a motivação para sua realização, sua relevância na área inserida e a metodologia a ser empregada para a sua execução.
- O capítulo 2 compreende a revisão bibliográfica e a base conceitual necessárias para o entendimento de todos os conceitos utilizados na implantação da abordagem de manutenção proposta.
- O capítulo 3 trata da descrição da situação do segmento de atuação da empresa no Brasil, uma breve introdução sobre o seu funcionamento, finalizando com uma apresentação geral acerca dela própria, que objetiva explicar a realidade na qual será aplicada a MCC.
- O capítulo 4 apresenta a aplicação da metodologia MCC no sistema descrito, com uma análise dos resultados obtidos.
- O capítulo 5 traz as conclusões do trabalho, apresenta algumas percepções e fornece sugestões para melhorias em futuros trabalhos.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Evolução da Manutenção

A manutenção pode ser definida como as atividades e ações diretamente relacionadas à preservação/conservação das condições operacionais normais de um item ou ao restabelecimento destas, quando da ocorrência de uma falha.

Até meados dos anos de 1950, as ações de manutenção eram simplesmente efetuadas somente quando da deflagração da falha de um item. Em outras palavras, resumiam-se a intervenções corretivas (PARIDA & KUMAR, 2006; LU & JIANG, 2007).

De maneira gradual, como resultado do esforço de industrialização após a Segunda Guerra Mundial, a disponibilidade, a confiabilidade e a segurança das plantas, o tempo de vida dos equipamentos, o crescimento da qualidade dos produtos e, sobretudo, a necessidade de redução dos custos de operação foram incorporados ao processo de planejamento da manutenção. Neste cenário, a manutenção preventiva, baseada no tempo, e a manutenção preditiva, baseada na condição/estado, foram desenvolvidas (MOUBRAY, 1997; LU & JIANG, 2007).

Segundo Deshpande & Modak (2002b) e Siqueira (2005), atualmente, a sociedade também passou a exigir maiores garantias de desempenho dos produtos e atenção à preservação do meio ambiente. O somatório destes processos gerou as condições necessárias para o desenvolvimento da metodologia MCC – Manutenção Centrada em Confiabilidade.

Na literatura, a manutenção tem sido apresentada sob diversos aspectos. O mais estruturado destes apresenta-se na forma de duas abordagens (ALMEIDA & CAMPELLO DE SOUZA, 2001): matemática e de engenharia.

A abordagem matemática dedica-se à otimização de procedimentos. Nela, os modelos de manutenção são classificados de acordo com o número de estados, a observabilidade do estado do sistema e o número de componentes.

A abordagem de engenharia consiste no tratamento de um conjunto satisfatório de procedimentos de manutenção. Diversas visões são aplicadas para esta abordagem, sendo a visão de Manutenção Centrada em Confiabilidade a de maior destaque e que pode ser sintetizada em quatro etapas: divisão do sistema, determinação de itens significativos, classificação de falhas e determinação de ações de manutenção.

## 2.2 MCC – Manutenção Centrada em Confiabilidade

O conceito de MCC foi desenvolvido nos anos 70, pela indústria comercial de aviação dos EUA e foi endossado pela Associação de Transporte Aéreo americana, pela Associação da Indústria Aeroespacial e pela Administração da Aviação Federal dos EUA. Essa nova filosofia de manutenção foi designada MSG-1 (*Maintenance Steering Group – 1*), atualizada como MSG-2 e, mais recentemente, em uma forma revisada, MSG-3 (DESHPANDE & MODAK, 2002a; CARRETERO *et al*, 2003). O resultado desta nova filosofia foi compilado na célebre publicação de Nowlan & Heap em 1978.

Apesar de inicialmente estruturada para atender às necessidades da indústria de aviação, a MCC pode ser adaptada, segundo Deshpande & Modak (2002a) e Dowlatshahi (2008), a uma ampla gama de aplicações em manutenção, tais como instalações nucleares, tanques de óleo, plataformas de petróleo, indústrias químicas, entre outros.

Na literatura, existem diversas visões gerais e definições formais para a Manutenção Centrada em Confiabilidade. Algumas delas são apresentadas abaixo:

Para Rausand (1998), a MCC é considerada uma abordagem baseada na priorização econômica e da segurança, uma espécie de exame sistemático das funções do sistema e do modo como essas funções podem vir a falhar, cujo resultado é de identificar as tarefas aplicáveis e efetivas de manutenções preventivas. Almeida & Siqueira (2001) destacam o papel da MCC na definição de um modelo consistente para determinar a periodicidade das atividades de manutenção preventiva.

Segundo Dowlatshahi (2008), a MCC é uma abordagem que faz uso de técnicas matemáticas para prever a confiabilidade do equipamento analisado. Para August (1999), ela une de forma bastante sólida aspectos de engenharia e de matemática. É utilizada, sobretudo, em instalações onde a segurança e a saúde das pessoas podem ser afetadas.

De acordo com Moubrey (1997), a MCC é um processo usado para determinar o que precisa ser feito para garantir que qualquer componente físico continue a cumprir suas funções dentro do contexto de operação no qual se insere.

Jones (1995) afirma que a MCC é um método para desenvolvimento e seleção de alternativas de manutenção baseado em critérios operacionais, econômicos e de segurança. Esse método emprega uma perspectiva de sistema na análise das funções desempenhadas pelo sistema, das falhas destas funções e da prevenção destas falhas.

Chalifoux & Baird (1999) definem MCC como uma abordagem de manutenção que combina práticas reativas, preventivas, preditivas e proativas e estratégias para maximizar o tempo de vida das funções de um item da maneira requerida.

Uma importante diferença entre a abordagem tradicional de manutenção e aquela defendida pela MCC pode ser constatada com o auxílio das definições apresentadas. Elas retomam sempre a importância de se analisar as funções desempenhadas pelo equipamento/sistema. Esta é uma das principais evoluções da MCC sobre a manutenção tradicional, a qual foca somente nos componentes do sistema em si, pouco se preocupando com o seu papel funcional dentro do contexto operacional. A Tabela 2.1 apresenta esta e outras diferenças existentes entre as duas abordagens.

Tabela 2.1 – Diferenças entre a Manutenção Tradicional e a MCC (Fonte: Adaptado de SIQUEIRA, 2005)

<b>Características</b>	<b>Manutenção Tradicional</b>	<b>MCC</b>
Foco	Equipamento	Função desempenhada
Objetivo	Manter o equipamento	Preservar a função
Atuação	Componente	Sistema
Atividades	O que pode ser feito	O que deve ser feito
Dados	Pouca ênfase	Muita ênfase
Documentação	Reduzida	Obrigatória e sistemática
Metodologia	Empírica	Estruturada
Combate	Deterioração do equipamento	Consequência das falhas
Priorização	Inexistente	Por função

### 2.3 As questões da MCC e os seus princípios

O processo de implementação da Manutenção Centrada em Confiabilidade requer que se responda, inicialmente, a 7 perguntas sobre cada componente ou sistema em análise, conforme verificado a seguir (SMITH, 1993; MOUBRAY, 1997; SMITH & HAWKIN, 2004; SIQUEIRA, 2005):

1. Quais as funções a preservar?
2. Quais as falhas funcionais?
3. Quais os modos de falha?
4. Quais os efeitos das falhas?
5. Quais as consequências das falhas?

6. Quais as tarefas aplicáveis e efetivas?

7. Quais as alternativas restantes?

De acordo com Moubray (1997) e Rausand (1998), cerca de 1/3 de todo esforço despendido durante a implantação da metodologia MCC concentra-se na busca pela resposta à questão 1. Siqueira (2005) ressalta que se a frequência de execução das tarefas não for respondida até a pergunta 6, deve-se acrescentar uma oitava questão, objetivando o cálculo da melhor frequência das atividades:

8. Quais as frequências ideais das tarefas de manutenção?

Para iniciar o processo de análise da MCC e evitar que ele seja mal executado, é importante se conhecer os princípios da metodologia (MOUBRAY, 1997; CHALIFOUX & BAIRD, 1999; SMITH & HAWKINS, 2004):

1. Preocupa-se com a manutenção das funcionalidades do sistema.

2. Possui enfoque sistêmico, isto é, manter as funções do sistema é mais importante do que preservar um componente individual.

3. É centrada na confiabilidade e trata as estatísticas de falha de forma atuarial. Busca conhecer as probabilidades condicionais de falha em idades específicas.

4. Reconhece as limitações de projeto e buscar conservar a confiabilidade inerente do sistema.

5. Questões relativas à segurança são mais importantes do que as econômicas.

6. Falhas são definidas como quaisquer condições insatisfatórias.

7. As ações devem produzir resultados palpáveis e estar dentro da alçada de custos estabelecida. Elas devem reduzir o número de falhas ou, pelo menos, os danos devido às falhas. Em outras palavras, as ações devem ser aplicáveis e efetivas.

8. Utiliza um sistema de árvore lógica para triar as ações de manutenção. Isto provê uma abordagem consistente para a manutenção de todos os tipos de equipamento.

9. Reconhece 3 tipos básicos de ações proativas (restauração programada, substituição programada e ações de inspeção) e 3 tipos de ações padrão (procura por falhas, reprojeto e ações não programadas), além de aceitar uma combinação destas ações.

10. É um processo dinâmico e evolutivo, isto é, todas as ações adotadas são passíveis de revisão. O procedimento de retroalimentação, com dados de sucessos/falhas, é parte essencial da MCC.

11. Seu sucesso depende fundamentalmente da participação dos operadores do sistema, em conjunto com os seus mantenedores e os especialistas.

Por fim, vale salientar que se nenhuma ação aplicável for identificada, a única opção é a de esperar o sistema falhar. Do mesmo modo, se o custo de uma ação aplicável exceder os custos associados à própria falha, a recomendação é idêntica. Salvo nos casos em que questões de segurança estiverem envolvidas.

## 2.4 Implementação da Manutenção Centrada em Confiabilidade

Uma vez conhecidos os princípios da metodologia, parte-se para sua implementação. A análise da MCC pode ser realizada como uma sequência de atividades ou etapas, algumas das quais se sobrepõem no tempo. Rausand (1998) identifica a necessidade de 12 etapas para efetuar a implementação da metodologia; Deshpande & Modak (2002a), 5 etapas; Siqueira (2005), 7 etapas, as quais são listadas abaixo:

1. Seleção do Sistema e Coleta de Informações → objetiva identificar e documentar o sistema que será submetido à análise;

2. Análise de Modos de Falha e Efeitos (FMEA) → identificam-se e documentam-se todas as funções e seus modos de falha, assim como os possíveis efeitos adversos produzidos. A utilização da metodologia FMEA (do inglês, *Failure Mode and Effect Analysis*) auxilia no desenvolvimento desta etapa;

3. Seleção de Funções Significantes → analisa cada função identificada na etapa anterior de forma estruturada, e determina se uma falha tem efeito significativo, levando-se em conta aspectos humanos, ambientais, operacionais e econômicos;

4. Seleção de Atividades Aplicáveis → determinam-se as tarefas de manutenção preventiva que sejam tecnicamente aplicáveis para prevenir/corrigir cada modo de falha ou amenizar suas consequências;

5. Avaliação da Efetividade das Atividades → objetiva determinar se uma tarefa de manutenção preventiva é efetiva para reduzir, a um nível aceitável, as consequências previstas para uma falha;

6. Seleção de Tarefas Aplicáveis e Efetivas → busca-se, de forma estruturada, a melhor tarefa, baseada em resultados do processo, impactos ambientais e operacionais e segurança;

7. Definição da Periodicidade das Atividades → estabelecem-se os métodos e critérios para definição da periodicidade ou frequência de execução das atividades selecionadas, assim como o planejamento e estruturação do processo de estruturação da metodologia.

Na verdade, todas as propostas acabam por efetuar as mesmas atividades, diferenciando-se apenas pelo maior ou menor grau de detalhamento.

Segundo Moubray (1997), o processo de identificação das funções, falhas funcionais, modos de falha e efeitos das falhas frequentemente conduzem a oportunidades para o aumento do desempenho e segurança, além da eliminação do desperdício.

## 2.5 Benefícios da Manutenção Centrada em Confiabilidade

Alguns benefícios do programa MCC descritos em Tsang (1995), Moubray (1997), Chalifoux & Baird (1999) e Deshpande & Modak (2002b) são listados abaixo:

- Aumento da segurança e diminuição de impactos ambientais;
- Controle e redução de custos de operação e manutenção, através de eficiente planejamento e programação de manutenção preventiva, identificação mais precisa de peças sobressalentes e estocagem, e diminuição de manutenção corretiva;
- Redução dos custos de paradas de produção através do aumento da disponibilidade do sistema;
- Melhoramento do desempenho de operação – resultado, qualidade do produto, serviços aos consumidores;
- Maior motivação dos envolvidos na análise e melhor trabalho em equipe;
- Melhor entendimento dos modos de falhas e suas causas;
- Desenvolvimento de planos de manutenção de alta qualidade em menos tempo e com custo reduzido;
- A disponibilidade do histórico de manutenção para cada sistema é capaz de correlacionar esta experiência com partes especificadas e seus modos de falhas e criticidades;
- A garantia de que todas as partes importantes da manutenção, além dos modos de falha e criticidades, são consideradas no desenvolvimento dos requisitos de manutenção;
- Elevada probabilidade de que o nível e o conteúdo dos requisitos de manutenção sejam otimamente especificados;
- A base para rotina, informação *online* trocada entre o *staff* de engenheiros e a gerência, mesmo em organizações bastante dispersas.

### 3. USINAS TERMOELÉTRICAS DE GÁS NATURAL

#### 3.1 Usinas Termoeletricas de Gás Natural no Brasil

Segundo dados da ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica – retirados do Banco de Informações de Geração (BIG) da estatal no mês de novembro de 2010, o Brasil possui cerca de 8.500MW de capacidade instalada para geração de energia através de usinas termoeletricas de gás natural. Ao se incluir as usinas que trabalham para auto-suficiência e as destinadas ao serviço público, supera-se a marca dos 11.000MW, quantitativo que representa aproximadamente 9,5% de toda a matriz energética brasileira. Ainda de acordo com o BIG, se considerarmos as usinas em construção e as outorgadas (com a construção autorizada, mas ainda não iniciada), a expectativa é de que a capacidade de geração nesta modalidade alcance os 13.500MW em pouco tempo. A Figura 3.1 apresenta as principais usinas termoeletricas em operação no Brasil, sendo a maior parte delas de gás natural.

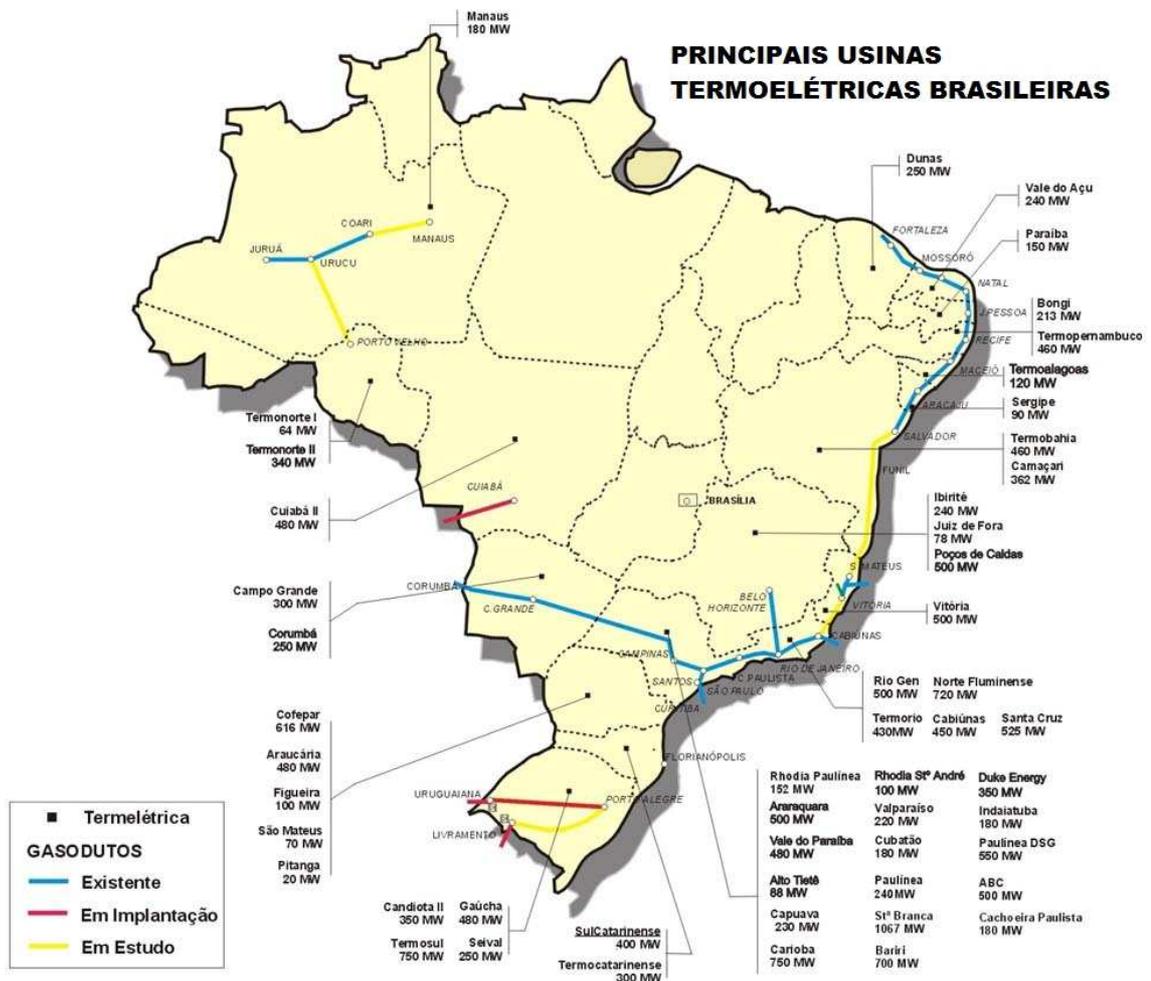


Figura 3.1 – Mapa das principais usinas termoeletricas do Brasil (Fonte: CEPA/USP, 2010)

## 3.2 Usinas Termoelétricas de Ciclo Combinado

As usinas que funcionam em um regime dito “de ciclo combinado” usam turbinas a gás e a vapor associadas em uma única planta, ambas gerando energia elétrica a partir da queima do mesmo combustível. Para isto, aproveita-se o calor proveniente dos gases de exaustão das turbinas a gás para vaporizar uma quantidade suficiente de água, de modo a acionar a turbina a vapor. Segundo Blanco *et al* (2006) e Polyzakis *et al* (2008), usinas termoelétricas que operam neste tipo de ciclo alcançam níveis de rendimento superiores, atualmente da ordem de 55%, quando comparadas com usinas convencionais, as quais não superam 38% de rendimento global. Este ganho de eficiência é devido à combinação dos ciclos de *Brayton* e *Rankine*. Veja Polyzakis *et al* (2008) para mais informações.

Existem outras configurações de usinas termoelétricas, inclusive utilizando outros tipos de combustível. Contudo, como a empresa em análise trabalha em regime de ciclo combinado e usa exclusivamente o gás natural como combustível, buscar-se-á explicar, de forma bastante sucinta, o funcionamento deste tipo de planta através da explanação dos seus principais componentes: turbina a gás, caldeira de recuperação e turbina a vapor.

### 3.2.1 Turbina a Gás

O principal elemento das termoelétricas de ciclo combinado é a turbina a gás, uma tecnologia em grande parte proveniente dos jatos desenvolvidos para as aeronaves militares e civis. Vale ressaltar, no entanto, que as turbinas a gás geralmente aparecem aos pares nas plantas em regime de ciclo combinado, pois desta forma não há limite à capacidade da usina e os riscos de paralisação são reduzidos.

Podemos distinguir três componentes principais em uma turbina a gás: o compressor, o sistema de combustão e a turbina propriamente dita (vide Figura 3.1), esta última sendo a fonte de acionamento tanto do compressor como de um gerador de energia elétrica. O ar atmosférico captado pelo compressor é comprimido no sistema de combustão à temperatura da ordem de 400°C, a qual se eleva a cerca de 1200°C a 1300°C com a queima do gás. A energia gerada na expansão que se segue à queima do gás aciona a turbina, reduzindo-se a pressão à atmosférica e a temperatura a cerca de 500°C a 600°C nos gases de exaustão da turbina (GasNet, 2010).

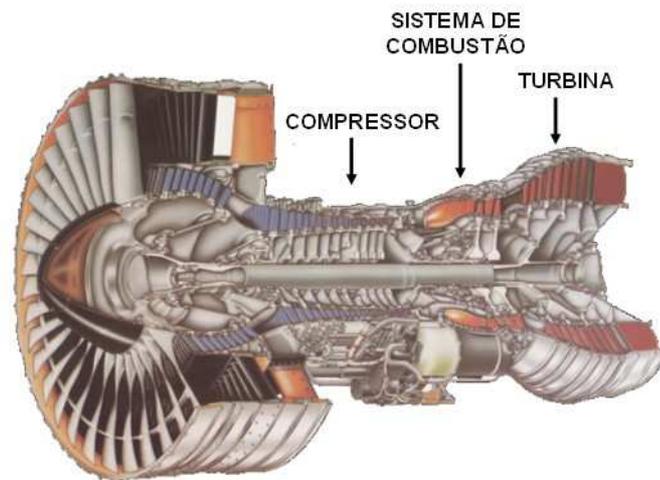


Figura 3.2 – Componentes da turbina a gás: o compressor, o sistema de combustão e a turbina propriamente dita (Fonte: HAAS *et al*, 2010)

### 3.2.2 Caldeira de Recuperação de Calor

A caldeira de recuperação de calor é a peça responsável por recuperar parte do calor dos gases de exaustão das turbinas a gás. É uma espécie de gerador de vapor. Desta forma, o rendimento térmico global eleva-se, pois o vapor assim produzido aciona a turbina a vapor, sem a necessidade de queimar combustível adicional. Observe o esquema apresentado na figura 3.2, em que HRSG (*Heat Recovery Steam Generator*) corresponde à caldeira de recuperação de calor.

A temperatura máxima que se pode obter no vapor depende da temperatura dos gases de exaustão da turbina a gás. A quantidade de vapor produzida, em geral, é suficiente para acionar uma turbina capaz de gerar a metade da energia elétrica da turbina a gás correspondente. Em consequência, um dos arranjos clássicos de uma usina de ciclo combinado constitui-se de duas turbinas a gás e uma a vapor (ALENCAR, 2010).

### 3.2.3 Turbina a vapor

O último dos principais elementos da planta de uma usina termoelétrica é a turbina a vapor, cuja função é gerar energia elétrica adicional, aumentando a eficiência energética global, a partir do vapor produzido na caldeira de recuperação de calor. O vapor aciona a turbina que, por sua vez, faz funcionar o gerador. Ao sair da turbina, o vapor passa por um

condensador, retorna ao estado líquido e volta a ser usado como água de alimentação da caldeira.

O condensador, em geral, utiliza água para resfriamento, proveniente do rio ou do mar, com passagem única. Se isto não for possível, são empregadas as torres de resfriamento.

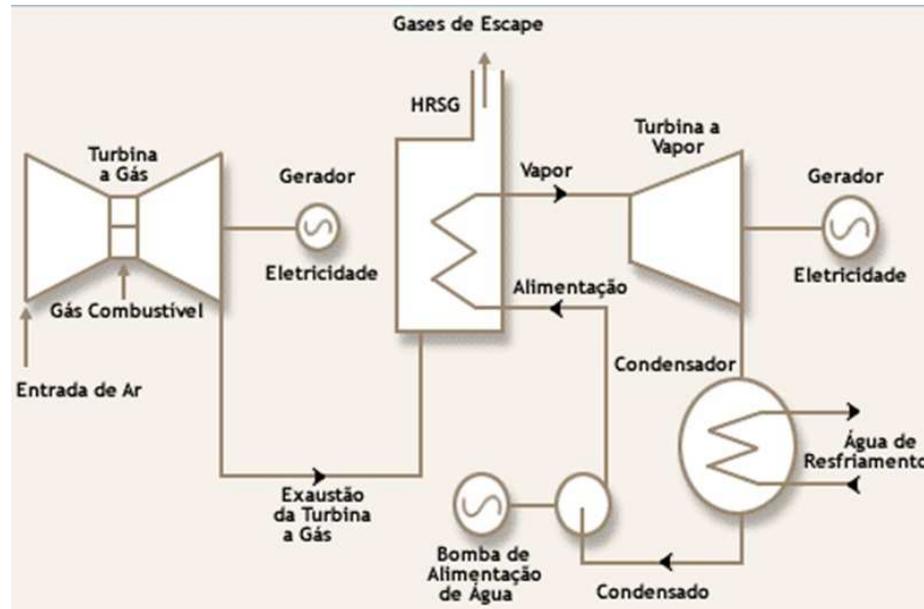


Figura 3.3 – Esquema de uma usina de ciclo combinado (Fonte: Adaptado de Alencar, 2010)

### 3.3 A Empresa

A usina termoeletrica do estudo, a Termopernambuco (UTE Termope), está situada em uma área de 14 ha, dentro do Complexo Industrial e Portuário de Suape, no município de Ipojuca-PE. A construção da UTE Termope teve início em 2001, como um empreendimento inserido no Programa Prioritário de Termoeletricidade (PPT) do Governo Federal. Foram investidos cerca de US\$ 400 milhões, sendo 30% de capital próprio e 70% de capital de terceiros. A usina entrou em operação comercial em 15 de maio de 2004, quando passou a vigorar o contrato de fornecimento de gás com a Copergás e Petrobras com um volume de 2.150.000 m<sup>3</sup>/dia, com prazo de validade de 20 anos (NEOENERGIA, 2010).

A Termopernambuco S/A é uma sociedade anônima de capital aberto, 100% controlada pela *holding* Neoenergia. A usina está conectada ao Sistema Interligado Nacional (SIN) por meio de uma linha de transmissão própria com aproximadamente 27 km de extensão. Os serviços de operação e manutenção são prestados pelas empresas Iberdrola Generación, da Espanha, e Iberdrola Energia do Brasil (TERMOPE, 2010).

A energia elétrica contratada é de 455 MW médios, sendo a capacidade instalada da ordem de 532 MW, comercializada por meio de contratos de venda de energia elétrica para duas distribuidoras do Grupo Neoenergia por um período de 20 anos: CELPE, com 390 MW médios e COELBA, com 65 MW médios (NEOENERGIA, 2010).

Em julho de 2006, a UTE Termope conquistou o Certificado ISO 14001:2004 para o seu Sistema de Gestão Ambiental (SGA), tornando-se a segunda termoelétrica a gás natural em todo o Brasil a obter tal certificação (NEOENERGIA, 2010).

## 4. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA MCC

O sistema escolhido para aplicação da metodologia MCC foi o de Vapor e Bypass, com foco no subsistema de Bypass de Alta Pressão. A decisão pelo sistema foi definida a partir de políticas e critérios internos da empresa e com o auxílio do que estabelece a metodologia MCC.

### 4.1 Descrição do Sistema de Bypass

A função principal do subsistema de bypass, em linhas gerais, é de obter as condições de pressão e temperatura do vapor requeridas pela turbina a vapor para a fase de arranque em tempos mínimos. No processo de aumento de carga ou disparo, em que se produz um excesso de vapor, o qual incrementa a pressão nas caldeiras de recuperação e nas linhas de vapor, o controle do bypass passa a controlar a pressão do vapor, dependendo dos valores alcançados, e eliminando o excesso de vapor ao condensador, até que a turbina e a caldeiras de recuperação se ajustem a nova situação de carga.

O sistema é particularmente interessante, pois se conecta a outros subsistemas da usina e serve bem ao propósito de projeto piloto para implementação da MCC em outros pontos da planta.

A aplicação da metodologia MCC no subsistema de bypass de alta pressão da usina termoelétrica ocorreu de forma integrada com os departamentos de Operação & Manutenção da usina e o pesquisador. As etapas executadas para a aplicação da metodologia estão resumidas a seguir.

É importante ressaltar que, apesar do sistema escolhido servir bem ao propósito de plano piloto para posterior implementação da metodologia em outros sistemas da planta, o número de equipamentos envolvidos é ainda grande, da ordem de 800. Sendo assim, decidiu-se por apresentar apenas uma parte dos itens analisados.

Os conjuntos de equipamentos escolhidos para apreciação são os que compõem as válvulas de isolamento motorizadas tipo gaveta, localizadas à montante de todo o sistema de bypass de alta pressão, e as próprias válvulas de bypass de alta pressão, que são os principais componentes do sistema em análise.

As válvulas de isolamento motorizadas funcionam normalmente abertas, permitindo a passagem de um pequeno fluxo de vapor para prevenir possíveis *stress* térmicos, devido ao

grande diferencial de temperatura existente no local. Estas válvulas também servem de proteção para os reaquecedores, em caso de falha das válvulas de bypass. Elas fecham quando o vapor na saída das válvulas de bypass alcança uma temperatura acima do normal. Do contrário, os reaquecedores poderão vir a ser danificados. Na figura 4.1 são apresentados exemplos de válvulas tipo gaveta com atuador motorizado.



Figura 4.1 – Exemplos de válvulas motorizadas tipo gaveta

Já as válvulas de bypass de alta pressão, permanecem fechadas durante a operação normal do sistema. Elas são abertas nas partidas, paradas e rejeição parcial ou total de carga. Também são usadas para condicionar o vapor aos parâmetros requeridos pelo sistema. Isto é feito por meio da redução multiestágios contínua da pressão através de uma série de tubos difusores integrados no corpo da válvula. Atemperação também é produzida para alcançar a entalpia de descarga necessária, pulverizando água de alimentação de média pressão através de bicos pulverizadores distribuídos ao redor da saída de exaustão, seguindo a redução da pressão no último estágio. Estas válvulas possuem atuadores hidráulicos. Na figura 4.2 é apresentado um exemplo de válvula de bypass com atuação hidráulica.



Figura 4.2 – Exemplo de válvula de bypass com atuação hidráulica

## 4.2 Coleta de Informações

O processo de coleta de informações ocorreu de maneira contínua. Ela serviu, sobretudo, para aumentar o conhecimento acerca do sistema e melhor entender seu funcionamento e importância dentro do contexto de operação. Desta forma, a interação entre o grupo de colaboradores pôde desenvolver-se de forma pró-ativa.

A coleta de informações desenvolveu-se através de estudos de materiais técnicos internos e de fabricantes, incursões na planta industrial para investigação *in loco*, além de entrevistas e reuniões com colaboradores, especialistas e profissionais com experiência de operação da usina.

## 4.3 Análise dos Modos de Falha e Efeitos

### 4.3.1 Ferramenta FMEA

A FMEA (Análise dos Modos de Falha e Efeitos, do inglês *Failure Modes and Effects Analysis*) é uma técnica de engenharia usada para definir, identificar e eliminar falhas potenciais ou conhecidas, problemas e erros do sistema, projeto, processo ou serviço antes que atinjam os usuários (STAMATIS, 2003). Segundo a norma brasileira ABNT NBR 5462:1994, o FMEA é um método qualitativo de análise de confiabilidade que envolve o estudo dos modos de falhas que podem existir para cada item, e a determinação dos efeitos de cada modo de falha sobre os outros itens e sobre a função específica do conjunto.

Como ferramenta de suporte ao FMEA, também se adotou a FTA (*Fault Tree Analysis*, do inglês, Análise de Árvore de Falhas) para melhor identificação das falhas, mas seus diagramas serão omitidos.

De acordo com Puente *et al* (2002), a FMEA consiste basicamente em dois estágios:

1. Identificação das funções, falhas funcionais, possíveis modos de falha e seus efeitos (conseqüências);
2. Determinação da criticidade dos modos de falha, para que se possa avaliá-los de uma forma estruturada. Veja o item 4.3.1 para verificar a forma de determinação dos níveis de criticidade adotada neste trabalho.

Para uso da ferramenta FMEA, faz-se necessário definir alguns dos termos por ela utilizados, os quais também aparecem na MCC (STAMATIS, 2003; SIQUEIRA, 2005):

- Função: atividade que o sistema, subsistema, equipamento, componente deve desempenhar. Em outras palavras, é o que o usuário deseja que o item execute dentro de um padrão de desempenho especificado.
- Falha: consiste na incapacidade de desempenhar uma função requerida ou esperada.
- Modo de falha: evento ou condição física que ocasiona uma falha funcional. Analogamente, é um dos possíveis estados de falha de um item, para uma dada função requerida.
- Efeito da falha: consequência da deflagração de um modo de falha.

O resultado do FMEA é uma análise dos modos de falha potenciais e de seus possíveis efeitos para os seres humanos, o meio ambiente e o sistema. Nele, as falhas são priorizadas de acordo com a magnitude de sua consequência (severidade), com a frequência de sua ocorrência e facilidade de detecção. Além disto, o FMEA auxilia no controle e documentação do conhecimento sobre as falhas e das ações sobre os seus riscos. Esta é uma importante característica da ferramenta, pois garante o estabelecimento de um processo de melhoria contínua para prevenção de falhas.

#### 4.3.2 Utilização da FMEA na aplicação da MCC

Com o auxílio da ferramenta FMEA, foi possível analisar todo o conjunto de modos de falha e efeitos produzidos, bem como ligá-los às funções desempenhadas pelo sistema e suas falhas funcionais. Os resultados apresentados na tabela 4.1 são referentes aos dois conjuntos evidenciados neste trabalho: válvulas de isolamento motorizadas tipo gaveta e válvulas de bypass de alta pressão com atuação hidráulica.

Tabela 4.1 – FMEA simplificado dos itens analisados

Sistema	Equipamento	Função	Falha Funcional	Modo de Falha	Evidência da falha
Bypass de alta pressão	Válvula de isolamento motorizada tipo gaveta (I)	Proteger o reaquecedor, em caso de falha da válvula de bypass (I)	Não proteger o reaquecedor, em caso de falha da válvula de bypass (I)	Válvula travada aberta por falha mecânica (I)	Ao atuar a válvula, obter alto tempo de resposta, com disparo de alarme
				Válvula travada aberta por falha elétrica (II)	Ao atuar a válvula, obter alto tempo de resposta, com disparo de alarme
				Válvula dando passagem (III)	Ao atuar a válvula, obter alto tempo de resposta, com disparo de alarme
		Permitir a	Não permitir a	Válvula travada	Alarme de anomalia na

		passagem de pequeno fluxo de vapor para evitar stress térmico (II)	passagem de pequeno fluxo de vapor para evitar stress térmico (II)	fechada por falha mecânica (I)	sala de controle central
				Válvula travada fechada por falha elétrica (II)	Alarme de anomalia na sala de controle central
Válvula de by-pass de alta pressão (II)	Condicionar o vapor principal de alta pressão aos parâmetros da linha de vapor reaquecido frio (I)	Não condicionar o vapor principal de alta pressão aos parâmetros da linha de vapor reaquecido frio (I)		Válvula travada fechada por falha mecânica (I)	Indicado pelo percentual de abertura ou fechamento da válvula. Em campo, é difícil a percepção do travamento
				Válvula travada aberta por falha mecânica (II)	Indicado pelo percentual de abertura ou fechamento da válvula. Em campo, é difícil a percepção do travamento
				Falha no sistema hidráulico (III)	Indicado por alarme de não atuação do sistema hidráulico. Difícil verificar em campo.
				Válvula dando passagem de vapor (IV)	Valores anormais de parâmetros em instrumentais a jusante ou a montante da válvula. Modo de Falha mais comum
				Vazamento externo de vapor pelas gaxetas (V)	Visível somente com inspeção em campo pelo operador
				Falha no sistema de Controle (VI)	Diferenças no tratamento de dados de instrumental de pressão

#### 4.4 Seleção de Funções Significantes

Foram analisadas todas as funções identificadas na etapa anterior de forma estruturada, a fim de determinar se uma falha funcional possuiria algum efeito significativo, levando-se em consideração aspectos humanos, ambientais, operacionais e econômicos, além de sua frequência e da possibilidade de ocorrência de falhas ocultas. Somente as funções identificadas como críticas nesta etapa foram analisadas pela MCC.

Antes, entretanto, faz-se necessário apresentar a forma adotada neste trabalho para determinação dos níveis de criticidade de um item.

##### 4.4.1 Determinação dos níveis de criticidade

A avaliação dos riscos do efeito de um modo de falha é, neste trabalho, efetuada através do cruzamento das informações de frequência da falha, de sua detectabilidade e de sua severidade. Desta forma, ao final, avalia-se o risco da deflagração de um determinado modo de falha.

Os níveis de frequência de modos de falha são divididos em 6, definidos a partir de taxas de ocorrência, conforme tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Níveis de frequência de modos de falha (Fonte: Adaptado de SIQUEIRA, 2005)

<b>Frequência</b>	<b>Descrição</b>	<b>Taxa de ocorrência</b>
Frequente	Esperado ocorrer com frequência. Falha ocorre de maneira contínua.	$\geq 10^{-1}/\text{ano}$
Provável	Esperado ocorrer várias vezes. Falha ocorre com certa frequência.	$< 10^{-1}/\text{ano}$ $\geq 10^{-2}/\text{ano}$
Ocasional	Possível ocorrer várias vezes. Falha ocorre ocasionalmente.	$< 10^{-2}/\text{ano}$ $\geq 10^{-3}/\text{ano}$
Remoto	Esperado ocorrer algumas vezes. Falha razoavelmente esperada.	$< 10^{-3}/\text{ano}$ $\geq 10^{-4}/\text{ano}$
Improvável	Possível de ocorrer, mas improvável. Falha ocorre excepcionalmente.	$< 10^{-4}/\text{ano}$ $\geq 10^{-5}/\text{ano}$
Muito Improvável	Essencialmente inesperado ocorrer. Falha praticamente não ocorre.	$< 10^{-5}/\text{ano}$

A detectabilidade está associada aos esforços despendidos para detecção de uma falha e dividida em cinco níveis, através de uma escala nominal, conforme tabela 4.3. Caso a falha de um item possua detectabilidade classificada como “Difícil”, recomenda-se a aplicação da metodologia MCC independente do resultado obtido nas demais análises. Esta é uma medida de precaução, pois falhas ocultas potencializam a deflagração de falhas múltiplas, as quais, por sua vez, podem causar conseqüências maiores para os seres humanos, o ambiente e o próprio sistema.

Tabela 4.3 – Níveis de detectabilidade (Fonte: Adaptado de SIQUEIRA, 2005)

<b>Nível</b>	<b>Detectabilidade</b>	<b>Descrição</b>
1	Fácil	Falha detectável por procedimento operacional
2	Razoável	Falha detectável por inspeção operacional
3	Difícil	Falha detectável por ensaio funcional
4	Muito Difícil	Falha detectável apenas por desligamento
5	Impossível	Falha totalmente oculta

A severidade, por sua vez, é definida a partir da avaliação combinada dos possíveis danos à segurança humana, ao meio ambiente, econômicos e operacionais.

Os intervalos das classes de danos econômicos e operacional foram definidos a partir dos possíveis impactos de uma falha no sistema em análise, abalizados por regulamentações às quais a empresa está sujeita, por situar-se no setor de geração de energia. As classes de danos humanos e ambientais são meramente nominais e foram definidas por um grupo de trabalho interno da empresa, permitindo uma maior representação da realidade operacional.

Tabela 4.4 – Classes de danos para determinação da severidade

<b>Humano</b>	<b>Ambiental</b>	<b>Operacional</b>	<b>Econômico</b>
Sem Acidente	Classe A	$t < 2h$	R\$ < 10.000
Acidente com afastamento	Classe B	$2h < t < 6h$	$10.000 < R\$ < 100.000$
Acidente sem afastamento	Classe C	$6h < t < 12h$	$100.000 < R\$ < 200.000$
Morte	Classe D	$t > 12h$	R\$ > 200.000

Os níveis de severidade são, em ordem crescente, definidos como Insignificante, Mínimo, Marginal, Crítico e Catastrófico. É importante ressaltar que ao se classificar o dano humano ou o dano ambiental como máximo, isto é, “Morte” ou “Classe D” respectivamente, obtém-se automaticamente o maior nível de severidade possível, independente das avaliações das demais classes.

Por fim, após efetuar todas as avaliações anteriores, observamos a matriz representada pela tabela 4.5, a qual indicará o risco associado à deflagração de um determinado modo de falha.

Tabela 4.5 – Matriz de riscos

<b>Frequência</b>	<b>Severidade</b>				
	<b>Insignificante</b>	<b>Mínima</b>	<b>Marginal</b>	<b>Crítica</b>	<b>Catastrófica</b>
<b>Frequente</b>	Indesejável	Indesejável	Indesejável	Intolerável	Intolerável
<b>Provável</b>	Tolerável	Indesejável	Indesejável	Intolerável	Intolerável
<b>Ocasional</b>	Tolerável	Tolerável	Indesejável	Indesejável	Intolerável
<b>Remoto</b>	Desprezível	Desprezível	Tolerável	Indesejável	Indesejável
<b>Improvável</b>	Desprezível	Desprezível	Desprezível	Tolerável	Tolerável
<b>Muito Improvável</b>	Desprezível	Desprezível	Desprezível	Desprezível	Desprezível

#### 4.4.2 Determinação das funções significantes

Nesta seção são apresentadas as análises de todos os modos de falha associados a cada falha funcional, a fim de se determinar se a continuidade da aplicação da metodologia MCC se faz necessária. Modos de falha com risco “Desprezível” são automaticamente excluídos do processo. Aqueles classificados como “Tolerável” não necessitam prosseguir na aplicação da MCC, mas se pode optar por aplicá-la, caso o decisor seja avesso ao risco. Modos de falha classificados como de risco “Indesejável” ou “Intolerável” são obrigatoriamente mantidos na avaliação sob a ótica da metodologia MCC.

É importante ressaltar que toda a análise está pautada nas informações obtidas com colaboradores da usina responsáveis por sua operação e manutenção. Nas tabelas 4.6, 4.7 e 4.8 são apresentados os resultados das análises.

Tabela 4.6 – Análise do Equipamento (I), Função (I), Falha Funcional (I), Modos de Falha (I), (II) e (III)

Humano	Ambiental	Econômico	Operacional	Severidade	Freq.	Detectab.	Risco
SEM ACIDENTE	CLASSE A	10K < R\$ < 100K	t < 2h	Insignificante	Provável	Fácil	Tolerável
SEM ACIDENTE	CLASSE A	10K < R\$ < 100K	2h < t < 6h	Insignificante	Provável	Fácil	Tolerável
SEM ACIDENTE	CLASSE A	R\$ < 10K	t < 2h	Insignificante	Provável	Fácil	Tolerável

Como todos os riscos apresentados na tabela 4.6 são do tipo “Tolerável”, e os modos de falha são facilmente detectáveis e com consequências mínimas ao meio ambiente e à segurança humana, resultando em uma severidade insignificante, decidiu-se por não se prosseguir com a metodologia MCC neste conjunto de modos de falha.

Tabela 4.7 – Análise do Equipamento (I), Função (II), Falha Funcional (II), Modos de Falha (I) e (II)

Humano	Ambiental	Econômico	Operacional	Severidade	Freq.	Detectab.	Risco
ACIDENTE COM AFASTAMENTO	CLASSE A	R\$ < 10K	t < 2h	Insignificante	Frequente	Fácil	Indesejável
ACIDENTE COM AFASTAMENTO	CLASSE A	R\$ < 10K	t < 2h	Insignificante	Frequente	Fácil	Indesejável

Como todos os riscos apresentados na tabela 4.7 são do tipo “Indesejável”, prosseguiu-se com a metodologia MCC neste conjunto. Seus resultados são apresentados na seção 4.5,

onde são avaliadas as ações (ou estratégias) de manutenção recomendadas pela Manutenção Centrada em Confiabilidade.

Tabela 4.8 – Análise do Equipamento (II), Função (I), Falha Funcional (I), Modos de Falha (I) a (VI)

Humano	Ambiental	Econômico	Operacional	Severidade	Freq.	Detectab.	Risco
ACIDENTE COM AFASTAMENTO	CLASSE A	R\$ > 200K	t > 12h	Catastrófica	Frequente	Razoável	Intolerável
ACIDENTE COM AFASTAMENTO	CLASSE A	R\$ > 200K	t > 12h	Catastrófica	Frequente	Razoável	Intolerável
ACIDENTE COM AFASTAMENTO	CLASSE B	R\$ > 200K	t > 12h	Catastrófica	Frequente	Fácil	Intolerável
SEM ACIDENTE	CLASSE A	R\$ < 10K	t < 2h	Insignificante	Provável	Fácil	Tolerável
ACIDENTE COM AFASTAMENTO	CLASSE A	R\$ > 200K	6h < t < 12h	Crítica	Improvável	Fácil	Tolerável
SEM ACIDENTE	CLASSE A	R\$ > 200K	2h < t < 6h	Catastrófica	Frequente	Fácil	Intolerável

Seguindo a mesma linha de raciocínio dos exemplos anteriores, para fins da aplicação da MCC, descartamos neste ponto os modos de falha (IV) e (V), com a ressalva de que o descarte do modo de falha (V) deveu-se, sobretudo, a sua freqüência bastante baixa e facilidade de detecção. Os demais, já que são classificados como “Intolerável”, são mantidos no processo para avaliação pela MCC.

#### 4.5 Seleção de Atividades Aplicáveis e Efetivas e Definição da Periodicidade

O processo de seleção das ações de manutenção é, na verdade, resultado de uma análise lógica a partir de um diagrama de decisão, descrita por diversos autores, entre eles Moubray (1997, p. 200 e 201) e Siqueira (2005, p.185).

Os resultados encontrados são confrontados com as práticas atuais da empresa. Caso seja detectada coerência nesta análise, e as atividades sugeridas sejam de cunho preventivo, parte-se diretamente para a etapa de determinação da periodicidade das ações. Do contrário, parte-se para uma avaliação mais aprofundada das implicações desta possível mudança na realidade do ambiente de manutenção da usina.

Tabela 4.9 – Definição das ações de manutenção

Sistema	Equipamento	Função	Falha Funcional	Modo de Falha	Ações de Manutenção Recomendadas
Bypass de alta pressão	Válvula de isolamento motorizada tipo gaveta (I)	Proteger o reaquecedor, em caso de falha da válvula de bypass (I)	Não proteger o reaquecedor, em caso de falha da válvula de bypass (I)	Válvula travada aberta por falha mecânica (I)	Ação não-programada (deixar falhar)
				Válvula travada aberta por falha elétrica (II)	Ação não-programada (deixar falhar)
				Válvula dando passagem (III)	Ação não-programada (deixar falhar)
		Permitir a passagem de pequeno fluxo de vapor para evitar stress térmico (II)	Não permitir a passagem de pequeno fluxo de vapor para evitar stress térmico (II)	Válvula travada fechada por falha mecânica (I)	Combinação de tarefas
				Válvula travada fechada por falha elétrica (II)	Combinação de tarefas
	Válvula de bypass de alta pressão (II)	Condicionar o vapor principal de alta pressão aos parâmetros da linha de vapor reaquecido frio (I)	Não condicionar o vapor principal de alta pressão aos parâmetros da linha de vapor reaquecido frio (I)	Válvula travada fechada por falha mecânica (I)	Reprojeto
				Válvula travada aberta por falha mecânica (II)	Reprojeto
				Falha no sistema hidráulico (III)	Reprojeto
				Válvula dando passagem de vapor (IV)	Ação não-programada (deixar falhar)
				Vazamento externo de vapor pelas gaxetas (V)	Ação não-programada (deixar falhar)
				Falha no sistema de Controle (VI)	Reprojeto

Para a válvula de isolamento motorizada (equipamento I), apenas os modos de falha associados à função de “Permitir a passagem de pequeno fluxo de vapor para evitar stress térmico” (função II) necessitaram da aplicação completa da MCC. Após analisar o diagrama de decisão para os dois modos de falha restantes, obteve-se o mesmo tipo de ação de manutenção: Combinação de Tarefas. Ao se verificar as práticas de manutenção atuais da empresa, observou-se a existência de atividades preditivas e preventivas de teste, calibração e inspeção das válvulas, as quais foram homologadas por engenheiros experientes da área. Elas

variam de simples re-apertos, verificações de estanqueidade (ausência de vazamentos), ruídos, testes de abertura/fechamento, vedação e conservação em geral, até substituições de peças e gaxetas, calibração e pintura. Em linhas gerais, estas ações condizem com as recomendações da metodologia MCC. Ao se analisar os dados históricos de falha destes equipamentos, verifica-se que atividades atuais de manutenção tem sido eficazes no combate à deflagração da falha funcional de “Não permitir a passagem de pequeno fluxo de vapor para evitar stress térmico”. Desta forma, encerra-se a análise MCC para estes modos de falha.

Para os modos de falha (I), (II) e (III) da válvula de bypass de alta pressão (equipamento II), todos relacionados a travamentos da válvula (aberta ou fechada), a ação recomendada foi de reprojetado do equipamento. Por “Reprojetado”, compreende-se qualquer atividade no sentido de revisar a funcionalidade, a posição ou as condições de uso do equipamento dentro do contexto operacional da planta, ou até mesmo questionar a própria engenharia do item (MOUBRAY, 1997). Não há nenhuma ação prevista no curto e médio prazo por parte da empresa com o propósito específico de solucionar ou mitigar as consequências da problemática relacionada, sob a ótica de um reprojetado. Entretanto, com o intuito de buscar uma combinação de tarefas de manutenção que possibilitem a eliminação da necessidade de um reprojetado, a empresa está adotando ações de cunho preventivo e preditivo nas unidades hidráulicas do item. Dentre estas atividades, encontram-se verificações da pressão do sistema e dos acumuladores hidráulicos, além da coleta de amostras de óleo para análise em laboratório especializado. A periodicidade estabelecida para estas atividades foi definida a cada 3 meses. Caso não se alcance sucesso, ainda há a possibilidade de reavaliação dos intervalos de tempo de intervenção, além da reavaliação das condições operacionais do equipamento. Se o problema persistir, o reprojetado é inevitável.

Já o modo de falha (VI) do mesmo equipamento, isto é, “Falha no sistema de controle”, também obteve “reprojetado” como ação de manutenção recomendada. Neste caso, entretanto, a falha não ocorre no equipamento em si, mas sim em um elemento eletrônico que comanda a atuação da válvula. Devido à frequência de ocorrência de falhas neste item ser relativamente alta, relatada pelos colaboradores que integram a equipe do projeto e participam da operação da planta, a empresa já determinou a revisão de todo o sistema de controle envolvido, com a finalidade de diminuir as ocorrências de falhas desta natureza, que apesar de não acarretar acidentes, nem mortes, incorre elevadas perdas financeiras e diminuição dos índices de disponibilidade do sistema.

## 4.6 Análise dos Resultados

A análise da aplicação da metodologia MCC no contexto operacional da usina termoeétrica em estudo mostrou-se bastante satisfatória, servindo para validar e formalizar algumas práticas e ações de manutenção já existentes no cotidiano de operação da planta, mas também evidenciando a existência de outras até então consideradas pouco relevantes ou até mesmo desconhecidas.

Alguns pontos negativos foram apontados como forma de se buscar resultados ainda melhores em futuras aplicações. Dentro do contexto trabalhado, a implantação da MCC algumas vezes defrontou-se com o problema de necessitar de pessoal com bastante conhecimento de operação do sistema, os quais normalmente dividem-se entre diversas outras atividades na usina, e acabam por retirar um pouco o foco da metodologia em alguns momentos, prejudicando o andamento da aplicação da MCC. Futuramente, deve-se trabalhar de forma mais eficiente o tempo de que dispõem estes profissionais.

Outro ponto observado diz respeito ao registro das falhas. A empresa já dispõe de um sistema voltado para gerenciamento das atividades manutenção, mas seu uso pode ser melhorado. Dados de falha, quando confiáveis e utilizados de forma eficiente, podem fornecer uma estrutura robusta para o desenvolvimento de um modelo estatístico do comportamento de falha dos equipamentos.

Finalmente, os resultados obtidos foram validados, as possíveis melhorias registradas e todo o processo documentado. Desta forma, este conjunto de informações poderá servir como ponto de partida para futuras aplicações da Manutenção Centrada em Confiabilidade em qualquer outro sistema da planta.

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos com a aplicação da metodologia MCC foram considerados satisfatórios pelos colaboradores que participaram do processo. Os estudos e dados levantados possibilitaram uma melhor compreensão, por parte dos colaboradores, dos modos de falhas dos equipamentos, das suas causas, dos seus efeitos, mas, principalmente, de como evitá-los. Segundo Smith & Hinchcliffe (2004), este ganho de conhecimento acerca de todo o processo é um dos principais benefícios da aplicação da metodologia MCC.

Além disto, os custos envolvidos no processo de aplicação da metodologia, bem como nas atividades de manutenção não foi considerado excessivo, a despeito de resultados encontrados em aplicações em outras indústrias de diversos setores (SMITH & HINCHCLIFFE, 2004). No médio e no longo prazo, espera-se obter uma redução nos custos totais de manutenção, com a diminuição de intervenções corretivas e um melhor controle e planejamento de todo o processo.

A fim de se atenuar o problema da ausência (ou carência) de dados de falhas de alguns itens, seja por falta de registro, seja por se trabalhar com uma planta há pouco tempo em operação, além de elevar o teor científico da abordagem, sugere-se como alternativa o processo de elicitación à priori de conhecimento de especialistas da probabilidade de falhas de itens, como forma de determinar a frequência de falhas.

Para futuras aplicações, o uso de métodos multicritério de apoio à decisão para determinação da periodicidade das ações de manutenção, dos níveis de criticidade, dos riscos associados a um modo de falha, bem como para analisar as conseqüências (efeitos) da instalação de um modo de falha, pode tornar o processo ainda mais preciso, garantindo melhores resultados e um direcionamento de esforços e recursos ainda mais eficiente. Vide Almeida (2010) para maiores detalhes sobre estes métodos e possíveis aplicações.

Por fim, atendendo a um dos propósitos iniciais do trabalho, a experiência ganha durante todo o processo de aplicação da metodologia MCC auxiliará o desenvolvimento da abordagem em outros sistemas da usina em momentos posteriores.

## REFERÊNCIAS

- ALENCAR, H. **Materiais Utilizados na Geração de Energia em Usinas Termoelétricas**. Disponível em: <http://www.foz.unioeste.br/~lamat/downcompendio/compendiov3.pdf>. Acessado em 29/10/2010.
- ALMEIDA, A. **O Conhecimento e o Uso de Métodos Multicritério de Apoio à Decisão**. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2010.
- \_\_\_\_\_; CAMPELLO DE SOUZA, F. Engenharia de Manutenção. In: \_\_\_\_\_. (Org.). **Gestão da Manutenção**: na Direção da Competitividade. Recife: Editora Universitária da UFPE, p. 3-9, 2001.
- ALMEIDA, A.; SIQUEIRA, I. Otimização da Periodicidade da Manutenção Centrada em Confiabilidade. In: ALMEIDA, A.; CAMPELLO DE SOUZA, F. (Org.). **Gestão da Manutenção**: na Direção da Competitividade. Recife: Editora Universitária da UFPE, p. 249-270, 2001.
- ANEEL. **Banco de Informações de Geração (BIG)**. Disponível no endereço eletrônico: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.asp>. Acessado em 04/11/2010.
- AUGUST, J. *Applied Reliability-Centered Maintenance*. Oklahoma: PennWell Books, 1999.
- BLANCO, J.; MENDÍA, F.; PEÑA, F. *Comparative analysis of CO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> emissions between combined and conventional cycles with natural gas and fuel oil consumption over the Spanish thermal power plants*. *Fuel*, Vol. 85, p. 1280-1285, 2006.
- CARRETERO, J.; PEREZ, J.; CARBALLEIRA, F.; CALDERON, A.; FERNANDEZ, J.; GARCIA, J.; LOZANO, A. *Applying RCM in large scale systems: a case study with railway networks*. *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 82, p. 257-273, 2003.
- CAUCHICK MIGUEL, P. (Org.) **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.
- CEPA/USP. **Centro de Ensino e Pesquisa Aplicada**. Disponível no endereço eletrônico: [www.cepa.if.usp.br/energia/energia2000/turmaA/grupo6/usina\\_termoeletrica.htm](http://www.cepa.if.usp.br/energia/energia2000/turmaA/grupo6/usina_termoeletrica.htm). Acessado em 05/11/2010.
- CHALIFOUX, A.; BAIRD, J. *Reliability-Centered Maintenance Guide*. US Army Construction Engineering Research Laboratories Technical Report, 1999.

- DESHPANDE, V.; MODAK, J. *Application of RCM for safety considerations in a steel plant. Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 78, p. 325–334, 2002.
- \_\_\_\_\_; \_\_\_\_\_. *Application of RCM to a medium scale industry. Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 77, p. 31–43, 2002.
- DOWLATSHAHI, S. *The role of industrial maintenance in the maquiladora industry: An empirical analysis. International Journal of Production Economics*, Vol. 114, p. 298–307, 2008.
- GASNET. **Termoelétricas de Ciclo Combinado**. Disponível no endereço eletrônico: [http://www.gasnet.com.br/novo\\_termoeltricas/ciclo.asp](http://www.gasnet.com.br/novo_termoeltricas/ciclo.asp). Acessado em 01/11/2010.
- HAAS, C.; TAKIMI, A.; BERGMANN, C. **Estudo da oxidação de revestimentos nanoestruturados de superligas NiCrAlY**. Disponível no endereço eletrônico: [http://www.ufrgs.br/propeq/livro3/index\\_caroline.htm](http://www.ufrgs.br/propeq/livro3/index_caroline.htm). Acessado em 01/11/2010.
- JONES, R. *Risk-based Maintenance: A Reliability-centered approach*. Houston: Gulf Professional Publishing, 1995.
- LU, L.; JIANG, J. 2007. *Analysis of on-line maintenance strategies for k-out-of-n standby safety systems. Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 92, p. 144–155.
- MOUBRAY, J. *Reliability-centered Maintenance: RCM II*. North Carolina: Industrial Press Inc., 1997.
- MOYA, M. *The control of the setting up of a predictive maintenance programme using a system of indicators. The International Journal of Management Science*, Vol. 32, p. 57-75, 2004.
- NBR 5462:1994. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), **Confiabilidade e Mantabilidade**. ABNT/CB – 03 Eletricidade, 1994.
- NEOENERGIA. **Empresas do grupo: TERMOPE**. Disponível no endereço eletrônico: <http://www.neoenergia.com/section/termope.asp>. Acessado em 04/11/2010.
- NOWLAN, F.; HEAP, H. *Reliability-Centered Maintenance*. National Technical Information Service. Springfield: US Department of Commerce, 1978.
- PARIDA, A.; KUMAR, U. *Maintenance performance measurement (MPM): issues and challenges. Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 12, p. 239-251, 2006.
- POLYZAKIS, A.; KORONEOS, C.; XYDIS, G. *Optimum gas turbine cycle for combined cycle power plant. Energy Conversion and Management*, Vol. 49, p. 551-563, 2008.

- PUENTE, J.; PINO, R.; PRIORE, P.; FOUENTE, D de L. *A decision support system for applying failure mode and effects analysis. International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 19, n. 2, p. 137-151, 2002
- RAUSAND, M. *Reliability centred maintenance. Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 60, p. 121–132, 1998.
- SIQUEIRA, I. **Manutenção Centrada na Confiabilidade**: Manual de Implementação. Rio de Janeiro: Editora Qualitymark, 2005.
- SMITH, A. *Reliability Centered Maintenance*. Nova York: McGraw-Hill Inc., 1993.
- \_\_\_\_\_; HINCHCLIFFE, G. *RCM: Gateway to World Class Maintenance*. Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004.
- SMITH, R.; HAWKINS, B. *Lean Maintenance: reduce costs, improve quality and increase market share*. Oxford: Elsevier, 2004.
- STAMATIS, D. *Failure Mode Effect Analysis: FMEA from theory to execution*. 2 ed. Milwaukee: ASQP, 2003.
- SWANSON, L. *Linking maintenance strategies to performance. International Journal of Production Economics*, Vol. 70, p. 237-244, 2001.
- TERMOPERNAMBUCO. **Empresa e História**. Disponível no endereço eletrônico: [http://www.termope.com.br/termope\\_empresa.asp](http://www.termope.com.br/termope_empresa.asp). Acessado em 04/11/2010.
- TSANG, A. H. C. *Condition-based maintenance: tools and decision making. Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 1, p. 03-17, 1995.
- WAEYENBERGH, G.; PINTELON, L. *A framework for maintenance concept development. International Journal of Production Economics*, Vol. 77, p. 299-313, 2002.
- WANG, L.; CHU, J.; WU, J. *Selection of optimum maintenance strategies based on a fuzzy analytic hierarchy process. International Journal of Production Economics*, Vol. 107, p. 151-163, 2007.