

Desenvolvimento de um Novo Modelo de Decisão para subsidiar o Planejamento da Manutenção com Base na Metodologia MCC

Cristiano A. V. Cavalcante, Ana P. C. S. Costa, Adiel T. de Almeida, André M. Cavalcanti, Marcelo H. Alencar, Thalles V. Garcez, Pedro Henrique Cavalcanti Lins, Andre Gardi Koury, Luis C. da C. Correia, Reidson M. P. de Carvalho, Ronan N. Dias, Wagner R. Lima, Juliana D. B. C. Dias

Resumo – As atividades de manutenção requerem estruturação e planejamento de forma a viabilizar os níveis de disponibilidade operacional a um menor custo possível através do uso mais eficiente dos recursos. Nesse sentido, tanto mais importante é um planejamento preciso de manutenção, quanto mais dependentes forem os impactos destas atividades nos resultados organizacionais. No contexto particular da TERMOPE, a manutenção tem papel essencial, uma vez que sua remuneração está relacionada a disponibilidade ou capacidade operativa da planta. Além desse aspecto, observa-se que existem severas punições para o não cumprimento de contrato de geração, bem como por indisponibilidade de planta. Como resultado, o projeto aqui proposto atende aos requisitos fundamentais para um incremento de eficiência das ações de manutenção no sistema, por meio de modelos de suporte a decisão que dão consistência e potencializam os efeitos proporcionados pelo uso da Manutenção Centralizada em Confiabilidade (MCC), no gerenciamento de manutenção.

Palavras-chave – Gerenciamento da Manutenção, Priorização de atividades, Definição de classes de risco e severidade

I. INTRODUÇÃO

O principal problema desenvolvido está relacionado com a proposição de procedimentos que possam melhorar a eficiência das atividades de manutenção.

Constitui as etapas da metodologia o seguinte conjunto de

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica pela Termopernamuco S.A., regulado pela ANEEL e consta dos Anais do VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VI CITENEL), realizado em Fortaleza/CE, no período de 17 a 19 de agosto de 2011.

C. A. V. Cavalcante, A. P. C. S. Costa, A. T. de Almeida, A. M. Cavalcanti, M. H. Alencar Estão vinculados a 'UFPE' (e-mails: cristiano-gesm@gmail.com; apcabral@ufpe.br; almeidaatd@gmail.com; andremarques2008@gmail.com; marcelohazin@gmail.com). T. V. Garcez, P.H.C. Lins, A. G. Koury. Estão vinculados ao 'IPSID' (e-mail: tvgarcez@gmail.com, pedrohclins@gmail.com, andregar-di@bol.com.br).

L. C. da C. Correia, R. M. P. de Carvalho trabalham na 'IBERDROLA' (e-mail: lccorreia@iberdrola.es; rpereira@iberdrola.es).

Ronan N. Dias, Wagner R. Lima, Juliana D. B. C. Dias são funcionários da Termopernamuco S.A. (Emails: ronan.dias@termope.com.br, wlima@termope.com.br, jdias@termope.com.br).

ações encadeadas:

1. Levantamento de dados e informações e identificação do sistema onde será implantada a MCC integrada a modelos de decisão;
2. Descrição do sistema;
3. Levantamento dos possíveis modos de falha associados a cada função no sistema, e os efeitos adversos produzidos por elas;
4. Desenvolvimento de modelo de classificação para definição de criticidade;
5. Identificação de ações aplicáveis;
6. Definição de modelo de priorização das ações recomendadas;
7. Desenvolvimento do modelo de suporte a definição da periodicidade;
8. Implementação computacional do protótipo;
9. Transferência de conhecimento;

O trabalho aqui descrito diz respeito ao projeto nominado "Desenvolvimento de Modelos de Decisão para subsidiar o Planejamento da Manutenção com Base na Metodologia MCC". Este projeto encontra-se ainda em fase de desenvolvimento, tendo suas atividades em plena conformidade com o cronograma do projeto. Tem como entidade executora o Instituto de Pesquisa em Sistemas de Informação e Decisão - IPSID e como empresa que empregou o suporte financeira para a realização do projeto a Termopernamuco S.A.

A fim de se poder descrever cada uma das etapas envolvidas no projeto, segue-se um brever resumo destas atividades. Inicialmente, uma complementação dos conceitos-chave envolvidos no projeto foi realizada. Como principais resultados desta etapa, pôde-se perceber que já há importantes contribuições no campo das aplicações de modelos de suporte à decisão com relação às diferentes questões envolvendo o gerenciamento da manutenção e em específico ao planejamento da manutenção preventiva. Através deste aspecto verifica-se um entendimento melhor de facetas importantes. Primeiramente, tem-se uma percepção mais geral ao se enxergar as várias soluções que estão sendo dadas a esses diversos problemas. Em segundo lugar, o discernimento mais preciso em torno das particularidades intrínsecas das diferentes aplicações da metodologia de apoio à decisão, além do mecanismo de tradução dos requisitos básicos da estrutura de um problema, sob o enfoque mais formal para os diversos passos que compõem a aplicação do MCC.

Posteriormente a Complementação da Revisão Bibliográfica, buscou-se um melhor conhecimento do sistema sob análise. Para este fim, duas atividades foram realizadas,

quais sejam: (1) a identificação do sistema e coleta de informações e (2) a descrição do sistema e de seu funcionamento. O sistema sob análise é bastante complexo, uma delimitação inicial foi proposta, o que tornou viável o avanço para as etapas subsequentes. O novo escopo do projeto foi o sistema de Vapor e By-pass. Esse sistema tem um papel fundamental para a geração de energia nas termoeletricas. O vapor superaquecido provê uma excelente fonte de energia para geração de energia mecânica. Entretanto, na maioria das vezes, o vapor não se encontra na temperatura desejável. Então um controle preciso da temperatura aumenta a eficiência energética, eliminando superaquecimento indesejável do processo, e, conseqüentemente, protegendo o processo e/ou equipamentos *downstream* expostos aos danos de altas temperaturas. O sistema utilizado para controle de temperatura em sistemas de geração de energia em ciclo combinado é chamado de *by-pass*. Ele permite obter, rapidamente, as condições de pressão e temperatura do vapor principal e do vapor reaquecido quente, requeridas para turbina de vapor para a fase de arranque, em tempos mínimos. Uma importância ainda maior é atribuída a este sistema, tendo em vista o regime que pode ser bastante variável destas termoeletricas. Em verdade, as térmicas são ativadas a fim de se manter o custo mínimo operativo do sistema interligado brasileiro. Por esta razão a demanda de operação das térmicas torna-se bastante variável. Conseqüentemente, o sistema de *by-pass* exerce papel fundamental dentro de uma instalação geradora de energia, permitindo a partida, desligamentos e paradas com rápidas respostas, protegendo o sistema da turbina de vapor. O *by-pass* permite o “desvio” do vapor superaquecido e a sua correta atemperação e redução de pressão às condições desejadas para reaquecimento ou descarte para o condensador nos casos de pressões intermediárias ou baixas. No processo de aumento de carga ou disparo, onde se produz um excesso de vapor, que aumenta a pressão nas caldeiras de recuperação e nas linhas de vapor, o *by-pass* passa a controlar a pressão do vapor principal ou reaquecido quente, dependendo dos valores alcançados, e eliminando o excesso de vapor ao condensador, até que a turbina e as caldeiras de recuperação se ajustem a nova situação de carga.

Uma vez, restringido o escopo de estudo do sistema, bem como reunidas as informações acerca do sistema, a etapa de descrição do sistema deverá ser realizada, nela o sistema será descrito esquematicamente através de diagramas de modo a revelar as funções dos seus equipamentos, recursos de redundância, dispositivos de proteção, interfaces de entrada e saída e a delimitação de suas fronteiras. Por exemplo, uma representação das interligações e relações entre os diferentes subsistemas que compõem um sistema pode ser obtida a partir da construção e visualização de diagrama de blocos. Por essa razão, além das reuniões com especialistas, em que se buscou esclarecer dúvidas sobre o funcionamento do sistema, uma sistemática que contribuiu para um melhor entendimento do sistema baseou-se na validação de diagramas de blocos construídos a partir da interpretação que a equipe executora fazia dos descritivos do sistema. Um exemplo para ilustrar a facilidade de compreensão das relações entre os diferentes sub-sistemas pode ser obtida a partir do diagrama em blocos do chamado sistema de *by-pass* de baixa pressão. Por este diagrama fica fácil perceber que o *by-pass* de baixa pressão, em situações específicas, conduz o vapor

de baixa pressão desde as linhas de vapor de baixa pressão até o condensador, bypassando a turbina de baixa pressão.

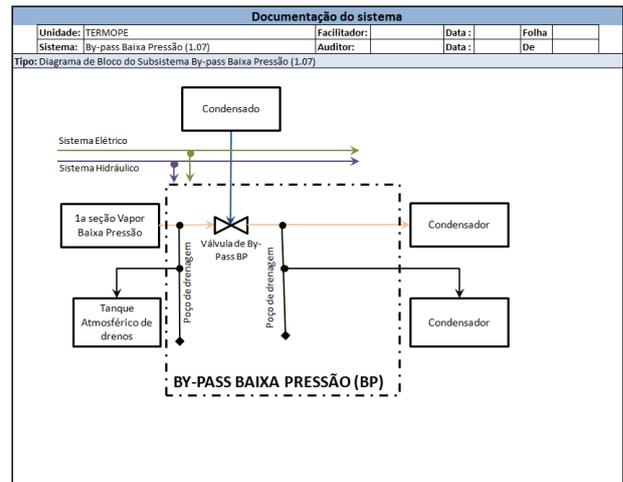


Figura 1. Diagrama de blocos do sistema de *by-pass* de baixa pressão.

Na seqüência, ainda com a finalidade de aprofundar o conhecimento sobre o sistema, uma nova etapa se faz necessária. O principal objetivo desta etapa é a partir das relações funcionais dos dispositivos, que foram levantadas anteriormente, definir os principais eventos que conduzem a falha. É válido salientar que a metodologia MCC, diferentemente de outras técnicas, esta focada na função, sendo o levantamento das funções do sistema em análise uma etapa primordial da Manutenção Centrada na Confiabilidade. O processo de levantamento das funções, como preconizado pela MCC, deve ser realizado por meio de interação com especialistas que têm o conhecimento profundo do sistema sob análise. Por este motivo, foram feitas diversas incursões a TERMOPE, que tiveram única e exclusivamente o objetivo de se discutir e coletar as funções do sistema, a fim de que se pudesse refletir sobre seus modos e efeitos das falhas funcionais. É relevante que se observe que os modos aqui são tratados como os eventos que podem levar ao estado de falha. Nesse sentido, o curso natural para que se faça o levantamento dos modos de falhas é o registro das falhas funcionais e, a partir daí, a associação dos eventos possíveis que levam os dispositivos ao estado de falho, como definido pela função. Destaca-se, também, que a partir de um exame mais detido dos modos de falha, é possível se ter elementos para construir estratégias de manutenção, a fim de restringir a repetição de tais modos de falha. Os efeitos são tratados como o que vem a ocorrer na manifestação de determinado modo de falha. Sendo assim, o processo natural para o levantamento destes efeitos depende claramente da consolidação dos modos de falha, bem como de um processo de argüição que leva a reflexão de diversos aspectos associados com a falha, tais como: Qual a evidência da ocorrência da falha? De que forma pode esta comprometer a segurança e o meio ambiente? Como pode ser afetado o processo produtivo? Quais os danos físicos que o equipamento pode sofrer? e o que deve ser feito para reparar tal falha? O resultado da ponderação sobre os questionamentos levantados anteriormente permite distinguir os modos de falha que devem ser analisados em um maior grau de detalhamento, daqueles que não são dignos de uma análise mais aprofundada. Esta distinção é basicamente

o principal objetivo da etapa relacionada ao modelo de decisão relativo a criticidade.

Para efeito de ilustração, na Tabela 1 pode ser observada a planilha padrão que foi utilizada para levantamento dos modos de falha. É importante destacar que o uso de planilhas eletrônicas é essencial durante a execução das fases relacionadas com a MCC, isto porque o número de informações é muito grande, a ausência de uma planilha estruturada elevaria bastante o grau de dificuldade em se resgatar as informações de forma rápida, bem como a possibilidade de reduzir o esforço do levantamento dos modos de falhas, pela apresentação de dispositivos com funções parecidas, não seria possível.

A quarta etapa da metodologia é o desenvolvimento de modelo de classificação para definição de criticidade do modo de falha. Para isso, buscou-se o desenvolvimento de uma análise FMEA que se ajuste às características e particularidades da termopernambuco no que concerne à sua política de segurança, custos, meio ambiente e aos seus requisitos de disponibilidade operacional. Essa etapa tem por principal objetivo distinguir os modos de falha que serão analisados (ditos críticos) daqueles que serão negligenciados (ditos aceitáveis). Ou seja, uma vez que já se decidiu aplicar a metodologia MCC incorporada de métodos de decisão e que os conjuntos de equipamentos sob estudo já foram devidamente representados em formato de diagramas, o que se deseja é definir quais os modos de falhas que são críticos e seguir com um fluxo lógico de decisão até definir as ações que deverão ser realizadas para estes.

Subsistema	Grupo/Equipamento	Função	Falha Funcional	Modo de Falha (por quê?)
By-pass de Alta Pressão	Válvula de isolamento	Isolar o VRF do VP, para proteção do reaquecedor, no caso de possível falha da válvula de by-pass.	Não Isolar o VRF do VP, para proteção do reaquecedor, no caso de possível falha da válvula de by-pass.	Válvula Travada aberta por falha mecânica
				Válvula Travada aberta por falha elétrica
	Permitir a passagem de pequeno fluxo de vapor para evitar stress térmico.	Não Permitir a passagem de pequeno fluxo de vapor para evitar stress térmico.	Válvula travada fechada por falha mecânica	
			Válvula travada fechada por falha elétrica	
	Válvula de By-pass de AP	Condicionar o Vapor Principal de Alta pressão aos parâmetros da linha de VRF.	Não Condicionar o Vapor Principal de Alta pressão aos parâmetros da linha de VRF.	Válvula travada fechada por falha mecânica
				Válvula Travada aberta por falha mecânica
Falha no sistema hidráulico				
			Válvula dando passagem de vapor	
			Vazamento externo de vapor pelas gaxetas	
			Falha no sistema de Controle	

Tabela 1. Planilha padrão usada para ajudar no processo de definição dos modos de falha.

Destaca-se que para o desenvolvimento do modelo de definição de classe de severidade e risco foi utilizado um procedimento evolutivo, como pode ser visto na figura 2.

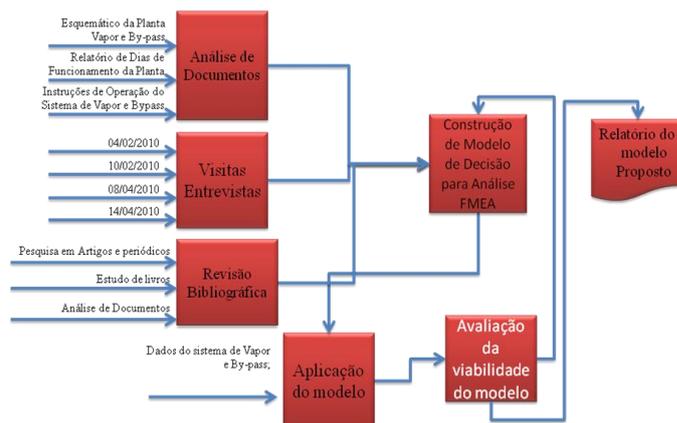


Figura 2. Fluxograma do processo de construção do modelo de definição de classe de severidade e risco

Este procedimento consistiu de alguns sub-processos, como a análise documental, visita, a revisão bibliográfica a construção propriamente dita, a aplicação do modelo construído e a avaliação de viabilidade do modelo, tendo em vista os resultados obtidos, bem como o esforço para o alcance dos resultados. O sub-processo de avaliação de viabilidade teve papel fundamental para a identificação da adequação do modelo as particularidades do sistema, bem como as questões culturais predominantes no corpo de funcionários. Vale observar que outros modelos, originários de empresas irmãs, tinham sido trazidos na tentativa de identificação dos dispositivos críticos do sistema. Contudo, alguns relatos de funcionários da empresa indicaram que havia dificuldade da implementação, bem como estes procedimentos não estavam totalmente compatíveis com as rotinas e procedimentos de manutenção da TERMOPE. Observa-se que não só o artifício de *feedback*, proporcionado pela etapa de avaliação do modelo, foi importante para garantir um destino diferente dos modelos marcados pelo insucesso. Mas foi, principalmente, devido ao conjunto dos outros sub-processos que permitiram que o modelo fosse julgado como consistente. As visitas permitiram identificar as necessidades reais dos profissionais na definição do que é crítico. A análise documental permitiu identificar alguns conceitos e critérios já disseminados dentro da empresa para análise de criticidade. A revisão bibliográfica permitiu assegurar a coerência do modelo proposto com os preceitos encontrados na literatura sobre esta temática.

Um detalhamento maior sobre o modelo propriamente dito será apresentado na seção relativa aos principais resultados relativos ao projeto.

Posterior a proposição do modelo de definição de classes de severidade e risco, foi feita uma investigação documental, bem como algumas visitas a especialistas para identificar as principais ações aplicáveis. Nessa etapa, o intuito principal foi obter, em um nível mais geral, as ações mais indicadas para o sistema sob análise. Algumas falhas podem ser recorrentes, nesse caso, o perfeito entendimento de alguns mecanismos comuns que conduzem a falha, pode ajudar bastante na definição de atividades que venham a reduzir a frequência ou a consequência destas falhas. Por exemplo, diversos problemas podem advir do seu mau funcionamento da válvula-

la de controle de vapor, válvula de pulverização e outros equipamentos do sistema. A título de ilustração, citam-se alguns destes problemas [1]:

- a) O vazamento da válvula de controle de vapor pode ocasionar o aquecimento da tubulação downstream a válvula e desencadear a operação da válvula de atemperação. Mas como os sistemas de atemperação, normalmente, não estão projetados para controlar a temperatura em tais taxas muito baixa de fluxo de vapor, o resultado é o cíclico aquecimento e resfriamento da tubulação downstream do desuperaquecedor conduzindo a um estresse térmico, que pode causar fissura.
- b) O vazamento na válvula de atemperação de água pode acumular água na válvula de controle de vapor, desuperaquecedores e tubulações danificando-as, e também o condensador.
- c) Os esguichos de pulverização podem estar incorretamente ajustados, causando superpulverização, e consequente baixo controle de temperatura, resultando no aquecimento e no esfriamento de pontos localizados no desuperaquecedor e na tubulação.
- d) O mau dimensionamento da válvula de controle de atemperação de água pode prover baixo controle da temperatura.
- e) A válvula de controle de vapor pode emperrar no assento ou no meio do caminho, isso é tipicamente causada pela expansão térmica ou contaminação do trim da válvula. O intervalo de tempo entre a abertura da válvula de vapor de água e a de atemperação da água pode ser de dois ou três minutos, em alguns sistemas de controle. A combinação do emperro da válvula e o intervalo de tempo de atuação do sistema de atemperação de água pode causar temperaturas errôneas nos desuperaquecedores.
- f) A drenagem insuficiente e a instalação incorreta dos desuperaquecedores podem gerar acúmulo de condensado e causar falhas catastróficas nas válvulas, difusores e no condensador.

Dando continuidade às etapas da metodologia empregada neste projeto, após a identificação das ações aplicáveis, a etapa de priorização é aplicada. Destaca-se que esta etapa é de fundamental importância, uma vez que na aplicação da metodologia MCC por si só não há distinção entre as ações que foram recomendadas. Isto é, entende-se que, uma vez que todos os passos da MCC foram percorridos para um conjunto de modo de falha específico e no final uma ação foi recomendada para cada modo de falha, deve-se garantir que estas ações sejam de fato aplicadas. O problema é que há diversas razões que levam a impossibilidade do cumprimento do conjunto de ações recomendadas em sua totalidade. Uma das contribuições do MCC é a análise das ações que são recomendadas. Nesse caso, as ações de manutenção devem ser escolhidas baseadas nos critérios de efetividade e custo-benefício. Efetividade diz respeito à observação de

que a atividade está cumprindo de fato o papel que lhe foi designado, ou seja, se a partir da ação é possível contribuir para a solução do problema. No critério custo benefício, observa-se que as ações proativas devem prover benefícios superiores ao montante de recursos utilizados em sua execução. Muitas vezes a análise deste aspecto não é a mais apropriada, uma vez que os custos ou impacto negativo da ação de manutenção não é explorado em sua totalidade.

O modelo de definição de prioridade as ações recomendadas será apresentado detalhadamente na seção relativa aos principais resultados.

Conforme já mencionado anteriormente, o projeto de P&D, aqui sendo descrito, está ainda em fase de desenvolvimento. Nesse sentido, contemporânea à concepção deste artigo é a fase de construção de um modelo de suporte a definição de periodicidade. Sendo assim, como algumas deliberações precisam ser feitas a fim de finalizar este modelo, o seu detalhamento não constará na seção de principais resultados do projeto. Assim também procedemos para as etapas de Implementação computacional do protótipo e de Transferência de conhecimento.

Nessa seção, nosso principal objetivo foi prover uma introdução do projeto, com um detalhamento suficiente das etapas que o compõem para um melhor entendimento dos objetivos do projeto, bem como dos resultados que se espera que sejam obtidos no cumprimento destas diferentes etapas.

Nesse sentido, este artigo é composto, além desta seção, de 4 seções. A seção II diz respeito ao levantamento do estado da arte sobre a temática principal inserida no projeto, a MCC. A seção III enaltece a importância de um processo de gestão de manutenção. A seção IV apresenta o detalhamento dos principais resultados deste projeto e sua contribuição para o aumento de eficácia das ações de manutenção. Finalmente, na seção V algumas considerações finais são apresentadas.

II. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA/ O ESTADO DA ARTE

Na literatura são diversas as definições da metodologia da Manutenção Centrada da Confiabilidade (MCC). Para [2], o MCC é uma metodologia sistemática que estabelece atividades de manutenção para componentes críticos na planta, permitindo a identificação de atividades aplicáveis e eficientes com o intuito de prevenir que estes componentes desenvolvam seus modos de falha dominantes.

Em [3], afirma-se que o MCC baseia-se na hipótese de que a confiabilidade é inerente ao projeto do equipamento/sistema ou da qualidade de construção, e que um programa de manutenção preventiva efetivo garante que essa confiabilidade seja mantida. Contudo, não aumenta essa confiabilidade do sistema além da confiabilidade de projeto, o que é conseguida, somente, através de um *redesign*.

Segundo [4], a MCC como uma técnica para a determinação de um programa de manutenção que tem a finalidade de preservar a confiabilidade inerente aos equipamentos e sistemas.

De acordo com [5], a MCC define os requisitos e tarefas a se atingir, restaurar ou manter a capacidade operacional de

um sistema ou equipamento. É realizada através da aplicação de uma lógica de decisão que possibilita uma análise sistemática dos modos de falha, além de dados de criticidade para definir requisitos de manutenção mais efetivos para itens de manutenção julgados como mais importantes. É através deste processo que a manutenção preventiva e o custo são reduzidos.

MCC é uma técnica utilizada com o objetivo de se estabelecer um plano de manutenção viável e eficiente, onde são analisadas as conseqüências das falhas que podem vir a ocorrer e as atividades que devem ser realizadas para preveni-las ([6], [7]). Ainda neste sentido, [8] afirmam que, em sua essência, a MCC pode ser definida como uma técnica para tornar mais organizadas as atividades de manutenção.

O principal foco da metodologia MCC é a determinação das ações de manutenção que são necessárias para garantir que os ativos físicos mais críticos continuem a desempenhar suas funções como projetado, monitorando os riscos de segurança e preservação ambiental, além da economia e qualidade ([8], [9], [10], [11]). Para isso, a metodologia se baseia em análise dos modos de falha e seus efeitos ([12]).

Em resumo, a metodologia MCC busca manter a confiabilidade do sistema, com níveis de performances suficientes para garantir que seus indicadores de desempenho convirjam aos objetivos estratégicos da empresa, focando sempre nos riscos sobre a segurança dos funcionários e comunidade e a preservação ambiental, além da economia (diminuição de custos).

Com este intuito, a análise da MCC busca, primeiramente, compreender os problemas enfrentados pela manutenção, desenvolvendo questionamentos que esclareçam a situação. Para tanto, procura fornecer respostas a sete questionamentos básicos [3]:

- Quais são as funções e os padrões de desempenho associado ao equipamento em seu presente contexto operacional?
- De que maneira ele falha ao cumprir a sua função?
- O que causa cada falha funcional?
- O que acontece quando cada falha ocorre?
- Qual a importância ou conseqüência de cada falha?
- O que pode ser feito para prevenir ou prever cada falha?
- O que pode ser feito se não for encontrada uma tarefa pró-ativa apropriada?

De maneira complementar, [6] consideram três objetivos principais para a MCC: assegurar segurança e confiabilidade dos sistemas ao focar em suas funções mais importantes; prevenir ou mitigar as conseqüências caso uma falha venha a ocorrer; e o último objetivo, consiste em reduzir os custos de manutenção eliminando-se as tarefas desnecessárias ou menos importantes.

Existem diversos benefícios que são advindos da implantação da metodologia MCC, tais como: o aumento da segurança e diminuição de perigos ambientais; maior controle e redução de custos de operação e manutenção; redução de custos de paradas de produção através aumento da disponibilidade do sistema; melhoramento da performance de ope-

ração; maior motivação dos envolvidos na análise, e melhor trabalho em equipe e melhor entendimento dos modos de falhas e suas causas ([13], [14]).

Ainda, [11] mencionam como benefícios da MCC o desenvolvimento de planos de manutenção de alta qualidade em menor tempo e com custo reduzido; uma disponibilidade do histórico de manutenção; a garantia de que todas as partes importantes da manutenção, além dos modos de falha e efeitos são considerados; alta probabilidade de que o nível e o conteúdo dos requisitos de manutenção sejam otimizados; e a troca de informação *online* entre o *staff* de engenheiros e a gerência, mesmo em organizações dispersas.

Por outro lado, existem alguns problemas relacionados com a prática da MCC, que é a dificuldade com a implantação da metodologia, por ela envolver uma grande quantidade de recursos, tempo e energia; o desapontamento pela falta de melhorias imediatas, pois os resultados são advindos em médio/longo prazo; a necessidade de comprometimento dos vários níveis hierárquicos, desde a alta direção, que precisa apoiar e impulsionar a metodologia MCC, aos funcionários da empresa para que, com o envolvimento de todos, se obtenham os resultados esperados. Finalmente, cita-se o fato de que aplicar a MCC a cada pequeno sistema da enorme infraestrutura da empresa pode tornar o estudo muito complexo e demorado [6].

Com base no exposto, observa-se que apesar da extensa lista de trabalhos relacionados com o tema, a MCC tem sido aplicada sob a ênfase de aspectos de segurança e tem sido abordada por muitos sob uma ótica limitadamente qualitativa, carecendo então de um maior desenvolvimento de modelos de decisão que permitam robustecer os resultados relativos aos principais anseios dos usuários de uma ferramenta de suporte ao gerenciamento de manutenção. Diversos outros problemas que carecem de um maior formalismo em termos de estruturação surgem no contexto de aplicação da MCC, como a priorização de ações de manutenção; a seleção de ações específicas diante da necessidade de intervenção sobre um item; a classificação de modos de falha segundo categorias hierárquicas de criticidade; etc. Dessa forma, este projeto inova por desenvolver, no sistema da Termopernambuco, um processo de implantação e gerenciamento da Manutenção Centrada em Confiabilidade orientado por modelos de apoio a Decisão que ofereçam suporte aos processos decisórios inerentes à MCC.

Na próxima seção apresentam-se os principais conceitos sobre o planejamento de manutenção, quais os principais requisitos para o planejamento das ações de manutenção e como este projeto vai ao encontro das principais demandas, muitas vezes mal atendidas, para uma efetiva melhoria de desempenho do sistema, através do uso otimizado dos recursos.

III. PLANEJAMENTO DA MANUTENÇÃO

Segundo [15], o planejamento da manutenção é uma prática tradicional recomendada para a preservação de máquinas, equipamentos e instrumentos, através da preparação dos

planos de trabalho e a definição das normas e padrões para a sua condução. Para [16], define-se o plano da manutenção como um conjunto estruturado de tarefas que inclui atividades, procedimentos, recursos e definição do tempo necessário para a realização das tarefas de manutenção. Estas definições explicitam o escopo do planejamento da manutenção:

- O quê deve ser feito;
- Quando deve ser feito;
- Com que ferramentas fazer.

Tanto mais acertadas sejam as respostas a esses três pontos, mais eficientes serão os planejamentos de manutenção que são decorrentes destas questões. Nesse sentido, um efetivo planejamento de manutenção permite que os dirigentes de manutenção atuem no equipamento correto, no momento certo e com as ferramentas adequadas. O sucesso na implementação das atividades de manutenção é diretamente relacionado a um planejamento prévio.

A resposta a estes questionamentos seguirão um ordenamento hierárquico. Sendo assim, inicialmente, deve-se especificar qual (quais) atividade(s) realizar para cada equipamento; posteriormente, defini-se para cada uma das atividades empregadas a cada um dos equipamentos em estudo a sua respectiva periodicidade, e, finalmente, define-se o conjunto de recursos que serão empregados.

Observa-se, porém, que há diferentes metodologias propostas para responder a apenas uma das perguntas anteriores. De fato, as questões que compõem o planejamento de manutenção não são triviais. E, em muitos casos, pode demandar uma modelagem bastante complexa.

No caso da MCC, considera-se que esta metodologia, como normalmente é usada, provê uma resposta adequada à primeira questão, acima: “O que deve ser feito?”. Em verdade, o que se quer definir, ao se fazer este questionamento, é quais as atividades que deverão ser realizadas. Nesse sentido, necessariamente, a análise da atividade envolve a observação das conseqüências que estão vinculadas aos modos de falha.

Por outro lado, por si só a metodologia MCC não fornece uma resposta adequada as outras duas questões, que também são importantes no planejamento de manutenção. Em realidade, há trabalhos que criticam o uso do MCC para dar solução aos dois outros pontos. Por esta razão, é essencial o papel desempenhado por estes modelos de suporte a decisão propostos nesse artigo.

Em primeiro lugar, como pode ser observado na próxima seção, definir bem o quão crítico é um determinado modo de falha tem impacto direto na eficiência do uso de recursos para manutenção do sistema. Erros nessa etapa podem conduzir a gastos desnecessários em ações que não surtem efeito, ou elevado índice de intervenção que poderiam ser eliminados.

Em segundo lugar, a ordenação das atividades sugeridas faz todo o sentido. Isto porque, mesmo que as ações resultantes do processo MCC já tenham considerado aspectos como meio ambiente, viabilidade econômica e danos a seres humanos e que em tese deveriam ser realizadas em sua tota-

lidade. Observa-se que as restrições de recursos é fator impeditivo para a implementação destas ações desejáveis. Ignorar tais aspectos pode incorrer no erro primário de realizar ações até que os recursos se esgotem sem que seja feita nenhuma priorização inteligente quanto às ações que mais impactariam positivamente no desempenho do sistema como um todo.

Restrições orçamentárias impõem necessariamente a reflexão do que deverá ser feito e quais atividades necessariamente deverão ser realizadas. A decisão de não fazer determinada ação ou conjunto de ações, conforme já mencionado, não é tomada com base em apenas um critério. Diversos são os fatores que deverão ser observados para definir uma lista de atividades prioritárias.

Por tudo isto, o grande diferencial deste projeto é a incorporação de modelos de decisão aos problemas vinculados com a aplicação do MCC. Estes modelos, juntamente com a aplicação da MCC, permitem um gerenciamento muito mais acertado da manutenção de sistemas complexos.

IV. DETALHAMENTO DOS PRINCIPAIS RESULTADOS

Nessa seção, um detalhamento maior dos modelos propostos no projeto é feito. Nesse caso, dois são os modelos que serão apresentados: (1) o modelo de definição de classe de severidade e risco, e (2) o modelo para determinação de prioridade de cada uma das ações recomendadas. Para uma melhor apresentação destes modelos dividiremos esta seção em duas sub-seções:

A. O modelo de definição de classe de severidade e risco

Tendo em vista a dificuldades na obtenção de dados para uma análise quantitativa, o modelo aqui proposto diz respeito a um procedimento qualitativo de análise de criticidade. Além disso, alguns autores defendem que existem dificuldades reais para implementação de alguns modelos quantitativos para suportar algumas decisões importantes relativas a manutenção, pois observa-se a quase impossibilidade real em se registrar os dados de falha no nível associado ao modo de falha, que muitos modelos exigem. Uma outra dificuldade diz respeito aos dados relacionados ao custo, que muitas vezes são vinculados a falha de um componente e não aquele modo específico de falha.

Segundo [17], a matriz de risco pode ser construída baseada em valores numéricos que são provenientes da multiplicação entre o valor da freqüência e o valor de severidade que condensa já as diferentes dimensões de conseqüências. A escala de freqüência define diferentes níveis de freqüências que são valores relativos em torno da probabilidade de uma falha operacional ocorrer. A escala de severidade geralmente é construída de forma global já agregada por diversos critérios, por exemplo, a escala baseada na norma MIL-STD-1629A (Quadro 1).

Como pode ser observado, a cada nível da escala há uma descrição sobre as diferentes dimensões de conseqüências que dá uma idéia de quão severo é um modo de falha que envolve tal nível de severidade. Devido as limitações das escalas agregadas, adicionado-se o fato de que as dimensões das conseqüências geralmente são avaliadas de forma individuais, além disso, cada dimensão tem sua relevância enal-

tecida ou reduzida em função do contexto operacional da empresa, recomenda-se observar a avaliação individual em cada dimensão e estabelecer uma regra para definir a severidade final.

Em vários trabalhos disponíveis na literatura a regra de severidade é correspondente ao máximo nível de consequência avaliada para um determinado modo de falha, ou seja, $(S) = \text{Máx}(C_1, C_2, C_3, \dots, C_n)$. Observa-se que ao invés do uso desta regra, outras regras poderiam ser mais apropriadas às especificidades do contexto particular. A motivação para o uso de regras específicas fundamentou-se no fato de que muitas vezes ao avaliar os resultados de severidade baseada na regra do máximo, se tinha uma classe de severidade máxima, mesmo quando as dimensões mais importantes tinham sido avaliadas de forma bastante positiva, ou seja, no grau mínimo de consequência.

Quadro 1. Escala de severidade segundo a norma MIL-STD-1629A

Valor Ordinal	Escala nominal	Condições
1	A – Menor	Falha não é grave o bastante para causar dano humano, a propriedade ou ao sistema, porém demanda manutenção não programada ou reparo.
2	B-Marginal	Uma falha que pode causar ferimentos leves, pequenos danos à propriedade, ou ao sistema que irá resultar em atraso ou perda de degradação a disponibilidade ou a missão.
3	C – Critico	Uma falha que pode causar ferimentos graves, danos à propriedade ou danos graves ao sistema que irá resultar em perda de missão.
4	D-Catastrófico	Uma falha que pode causar ferimentos graves danos à propriedade ou danos graves ao sistema que irá resultar em perda de missão

Nesse sentido, buscou-se definir níveis de severidade alta para os modos de falha que realmente deveriam ser assim considerados. Uma reflexão maior resultou nas seguintes diretrizes:

1. Os critérios a serem considerados para a avaliação de severidade serão critérios já usuais no contexto da empresa em que o modelo será aplicado, isto porque os critérios são consistentes com a literatura bem como retratam bem as principais dimensões de consequência (Impacto humano, ambiental, econômico);
2. O critério *downtime* (O) retrata as dificuldades relacionadas para reparar ou retomar o estado operacional. O fator custo pode ser observado pelo valor do dispositivo danificado, nesse caso, pode haver situações em que o downtime é bastante reduzido, contudo o custo associado com o modo de falha é bastante elevado.
3. Destaca-se que o número de critérios ou dimensões de consequências deve ser suficiente para retratar os aspectos mais importantes relacionados com as falhas.

Observa-se que um número elevado dificulta a formação das classes, além de tornar mais provável a existência de dependência ente os critérios.

4. Caso o modo de falha presente em uma das escalas de consequências na dimensão ambiental ou humano o nível mais grave quando comparado com os níveis das outras dimensões, isto seria traduzido para uma severidade global máxima. Ou seja, a regra do máximo permanece válida para as dimensões ambiental e humana.
5. O máximo nível de consequência para as dimensões operacional e econômica não é equivalente ao nível máximo das dimensões ambiental e humana.

Respeitando as diretrizes definidas anteriormente, bem como não transgrediu as particularidade expressas em termos preferências dos especialistas da TERMOPE foi possível definir uma regra para definição de severidade, definida pela equação:

$$\text{Máx}(H, A, \text{Média}P(O, F))$$

Ainda buscando classificar os modos de falhas críticos é preciso definir qual a classe de risco que se encontra esse modo de falha. Diversas formas são discutidas na literatura. Para o modelo proposto a parametrização inicial considerou-se a severidade obtida, como dano ambiental, dano humano, bem como os aspectos operacionais, que se refletem em termos do *downtime* e do prejuízo financeiro relacionado com a ocorrência do modo de falha. Além da severidade, considera-se a detectabilidade e a frequência. Nesse caso, optou-se pela avaliação simultânea destas três dimensões. A avaliação consistia no processo de reflexão do tipo “um modo de falha que apresenta frequência no nível (1) “extremamente improvável”; a severidade nível (4), “catastrófica”; e a detectabilidade nível (2), “parcialmente detectável”; qual a categoria de risco que deve pertencer? Nesse caso, teve-se a categorização como indesejável, já que apesar de ser extremamente improvável, sua severidade é nível 4, de uma escala de 4 níveis, bem como só o estado extremo de falha é visível, nenhum estado anterior é observável.

Como há três dimensões distintas, uma visualização gráfica não é tão fácil. Uma alternativa que ajuda o processo de definição das categorias de risco com a observação simultânea dos três critérios é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Matriz de risco final por meio de avaliação global.

		Detectabilidade				
		Totalmente Detectável (Visualização da Falha Potencial)				
		1				
		Severidade				
		Menor 1	Marginal 2	Crítico 3	Catastrófica 4	
Frequência	Frequente	5	2	3	4	4
	Razoavelmente Frequente	4	2	2	3	4
	Ocasional	3	1	2	3	4
	Remota	2	1	1	2	4
	Extremamente Improvável	1	1	1	2	3
		Detectabilidade				
		Parcialmente Detectável (Visualização da Falha)				
		2				
		Severidade				
		Menor 1	Marginal 2	Crítico 3	Catastrófica 4	
Frequência	Frequente	5	3	4	4	4
	Razoavelmente Frequente	4	2	3	4	4
	Ocasional	3	2	2	4	4
	Remota	2	1	2	3	4
	Extremamente Improvável	1	1	1	2	3
		Detectabilidade				
		Não Detectável (Falha Oculta)				
		3				
		Severidade				
		Menor 1	Marginal 2	Crítico 3	Catastrófica 4	
Frequência	Frequente	5	4	4	4	4
	Razoavelmente Frequente	4	3	4	4	4
	Ocasional	3	3	3	4	4
	Remota	2	2	3	4	4
	Extremamente Improvável	1	1	2	4	4

	1	Aceitável
	2	Tolerável
	3	Indesejável
	4	Intolerável

B. desenvolvimento de um modelo de decisão para priorização das ações

Uma proposta que visa priorizar as ações que devem ser realizadas deve ter o suporte de dados de ocorrências de falhas. Estes dados consistem em sinalizador dos problemas que continuam ocorrendo e que áreas devem sofrer um reforço para garantir melhores desempenhos.

O procedimento de priorização de ações deve ser fundamentado no potencial de redução de risco da ação como um valor que tem um significado real. Com a finalidade de dar consistência ao processo, risco é tratado como o valor esperado de prejuízo de perda financeira.

Nesse caso, todas as outras dimensões de consequência são transformadas em perda financeira, através do valor equivalente na dimensão financeira. Este modelo está muito próximo da proposta de [17].

Uma maneira mais sofisticada de tratar este processo é pela transformação de uma escala única e agregação dos diferentes critérios baseados em uma função agregação aditiva, este corresponde, por exemplo, ao procedimento SMARTS. Para isto o decisor estabelece as constantes de escala para os critérios, bem como constrói a função utilidade para cada dimensão de risco. Nesse caso, tanto mais importante é uma ação, quanto maior for a redução nas dimensões mais importantes de risco.

Uma forma simples de estabelecer as constantes de escala que estabelecem o *tradeoff*, bem como a importância relativa de cada critério é observar quanto representa o dano máximo em uma determinada dimensão, por exemplo, financeira, na dimensão em que já se observou a maior importância, no caso, dano humano. Observa-se na figura 4 que a máxima perda financeira corresponde a 10 na escala de 0 a 60 do dano humano. Este procedimento está mais bem detalhado em [18].

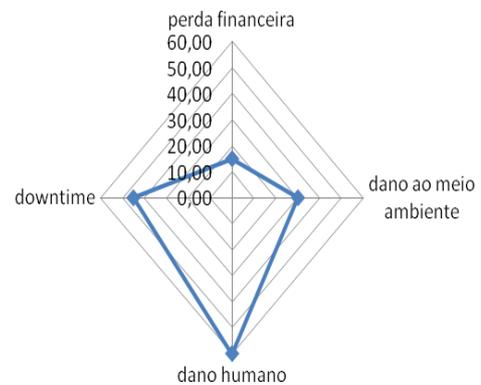


Figura 4 – definição de escala única para os critérios de avaliação

Uma vez definido o procedimento que faz a agregação das distintas dimensões de risco, seja pelo uso de uma escala unificadora, seja pela tradução de todos os outros critérios em termos monetários, o próximo passo diz respeito à avaliação das reduções que são imputadas com a realização de uma determinada ação. Esta realização é feita para todo o conjunto de alternativas.

Uma forma simples que pode ser utilizada para informar a performance das ações em cada um dos critérios, diz respeito ao uso do poder de redução percentual em cada uma das dimensões que cada uma das ações imprime, caso seja utilizada. Nesse sentido, uma alternativa será tanto mais preferida, quanto maior seja a redução dos critérios de maior peso. A cada alternativa de ação tem-se um gráfico tipo radar associado a ela.

Uma simplificação ainda maior a este procedimento é que a medida de desempenho pode ser o somatório total dos percentuais sobre o custo das ações. Com isto já se tem, de certa forma, a efetividade da ação e seu custo-benefício agregado na escala de percentual sob custo. Quanto maior o percentual mais efetiva é uma ação e sua relação de custo benefício se dá pela razão deste percentual (benefício) e seu custo, respectivo. Quanto menor o custo, melhor, em um contexto de restrição de recursos. A realização deste procedi-

mento subtende que todos os critérios têm a mesma importância, já que na soma dos percentuais não se faz nenhuma ponderação com a importância dos critérios.

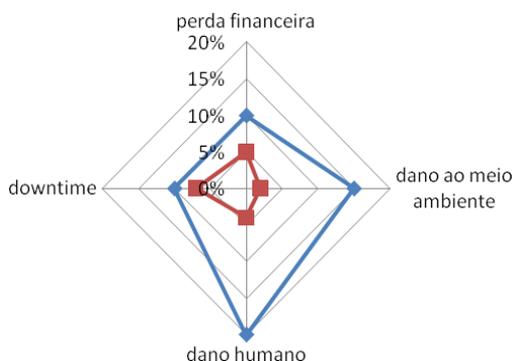


Figura 5 – Representação do potencial de redução de percentual de risco em cada dimensão.

Uma proposta para a priorização das atividades que foram definidas a partir da aplicação da MCC tem influência direta de tudo que foi visto na literatura. Observa-se que uma das maiores preocupações da MCC diz respeito a preocupação ambiental e dos danos humanos que podem surgir na ocorrência de um modo de falha. Estas preocupações, em verdade, destaca a MCC de outras técnicas que apenas enfatizam questões econômicas. Nesse sentido, pode-se considerar que ações que estejam vinculadas a modos de falhas que tenham dimensões de severidade preocupantes em termos de danos ambiental ou humano, estarão automaticamente priorizadas. Nesse caso, não há um processo de concorrência a que tais ações serão submetidas, ou seja, estas já estão priorizadas de ante-mão. Observa-se que as ações associadas a modos de falhas com tais características na TERMOPE compõem a minoria. Nesse sentido, a grande maioria, que são ações relacionadas com modos de falhas que não são gravemente avaliados nas dimensões de danos humanos e ambientais, deverá passar por um processo de competição por uma posição em um ranque que determina a prioridade com que uma ação deverá ser realizada a despeito da não realização de outras.

Com base em todo exposto, o processo de priorização, aqui proposto, consiste no seguinte conjunto de passos encadeados:

1. Inicialmente, resgata-se as ações que estão vinculadas aos modos de falhas com severidade 4, seja na dimensão humana, seja na dimensão ambiental.
2. Avaliam-se as questões associadas à efetividade.
3. Estima-se a perda esperada na ocorrência do modo de falha. Esta perda esperada depende da frequência das vezes que este modo de falha se repete; da perda financeira relativa à ocorrência da consequência; e, finalmente, da probabilidade da consequência ocorra, uma vez que o modo de falha tenha se manifestado;
4. Estima-se o potencial de redução destas perdas, pela efetivação de uma dada ação;

5. Estima-se o custo de cada ação;
6. Estima-se a vantagem que é a diferença entre o valor da perda média anterior a realização da ação e da perda média posterior a aplicação da mesma. No caso em que os valores são iguais (a diferença é zero) não há vantagem em efetuar tal ação.
7. Estima-se a rentabilidade que é o valor relativo a vantagem subtraído do custo para realizar tal ação. Nesse caso, se para haver vantagem o investimento é muito alto, supera a própria vantagem obtida, a ação não é rentável.
8. A rentabilidade é considerada uma dimensão de decisão, bem como a perda esperada.
9. Utiliza-se um procedimento de agregação destes dois critérios, isto porque o decisor quer tratá-los, atribuindo-lhes diferente importância.
10. Definição da prioridade final

Um exemplo, que caracteriza-se como sendo um caso especial do modelo apresentado, é o uso de distância analítica em função de uma reta com inclinação que reflete a preferência do decisor em relação aos dois critérios apresentados.

As principais vantagens desse modelo são: a facilidade da possibilidade de representação gráfica que permite uma fácil compreensão do processo de priorização. Também, a possibilidade de introdução de aspectos econômicos pela modificação dos critérios clássicos do FMECA. E, finalmente, a redução significativa dos aspectos arbitrários utilizados normalmente em um processo de FMECA.

Observa-se que a TERMOPE foi bastante receptiva a este tipo de representação gráfica. Isto devido a fácil compreensão e o entendimento imediato do que ocorre no modelo.

Destaca-se que o procedimento de priorização proposto foi discutido junto a equipe TERMOPE, que demonstrou bastante interesse em uma discussão mais aprofundada, contudo, não requisitou nenhuma modificação deste modelo.

V. CONCLUSÕES

Para uma usina térmica de geração de energia um eficiente planejamento de manutenção não é apenas necessário, é imprescindível, isto porque as consequências das falhas estão muito vinculadas a questões de segurança. Além disso, graves sanções econômicas, impostas por órgão regulatório, limitam a possibilidade de indisponibilidade do sistema. Por tudo isto, não há espaços para ineficiências nas ações sob o domínio do departamento de manutenção.

O projeto aqui descrito vai ao encontro da necessidade de incremento de eficiência às ações de manutenção. Isto porque, o principal problema desenvolvido está relacionado com a proposição de procedimentos que possam melhorar a eficiência das atividades de manutenção.

Observa-se que os modelos propostos potencializam os resultados positivos do uso da MCC, uma vez que, não só robustecem os procedimentos previstos nessa metodologia, mas, principalmente, permitem responder as questões que estão fora do alcance da MCC.

VI. AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem aos funcionários da IBERDROLA pela disponibilidade para interagir e discutir, a fim de assegurar que os modelos refletissem as necessidades reais da empresa.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. Freitas, J. “Key elements of successful PM programs for turbine by-pass systems,” *Combined Cycle Journal, Third Quarter, 2007*.
- [2] S. Martorell, J. F. Villanueva, S. Carlos, Y. Nebot, A. Sanchez, J. L. Pitarch, “RAMSCC informed decision-making with application to multiobjective optimization of technical specifications and maintenance using genetic algorithms,” *Reliability Engineering and System Safety, Vol 87, n. 1, pp. 65–75. 2005*.
- [3] M. Rausand, “Reliability centred maintenance,” *Reliability Engineering and System Safety, vol. 60, n. 2, pp. 121–32. 1998*.
- [4] W. Pujadas, F. F. Chen, “Reliability centered maintenance strategy for a discrete part manufacturing facility,” *19th International Conference on Computers and Industrial Engineering, vol. 31, n. 1, pp. 241-244. 1996*.
- [5] D. C. Brauer, G. D. Brauer, “Reliability-Centered Maintenance,” *IEEE Transactions on Reliability, vol. R-36, n. 1. 1987*.
- [6] J. Carretero, J. M. Pérez, F. Garcia-Carballeira, A. Calderón, J. Fernández, J. D. García, A. Lozano, L. Cardona, N. Cotaina, P. Prete, “Applying RCM in large scale systems: a case study with railway networks,” *Reliability Engineering and System Safety, v. 82, pp. 257-273. 2003*.
- [7] F. Kimura, T. Hata, N. Kobayashi, “Reliability-Centered Maintenance Planning based on Computer-Aided FMEA,” *The 35th CIRP-International Seminar on Manufacturing Systems, 12-15 May, Seoul, Korea. 2002*.
- [8] D. J. Fonseca, G. M. Knapp, “An expert system for reliability centered maintenance in the chemical industry,” *Expert Systems with Applications, v. 19, pp. 45-57. 2000*.
- [9] V. S. Deshpande, J. P. Modak, “Application of RCM to a medium scale industry,” *Reliability Engineering and System Safety. v.77, pp. 31–43. 2002*.
- [10] M. V. Lucatelli, R. Ojeda, “Proposta de Aplicação da Manutenção Centrada em Confiabilidade em Estabelecimentos Assistenciais de Saúde,” *Memórias II congresso Latinoamericano de Ingeniería Biomédica, Havana, Cuba. 2001*.
- [11] V. S. Deshpande, J. P. Modak, “Application of RCM for safety considerations in a steel plant,” *Reliability Engineering and System Safety, v.78, pp. 325-334. 2002*.
- [12] R. Dekker, P. A. Scarf, “On the impact of optimization models in maintenance decision making: the state of the art,” *Reliability Engineering and System Safety, vol.60, p.111-119. 1998*.
- [13] S. S. Souza, C. R. C. LIMA, “Manutenção centrada em confiabilidade como ferramenta estratégica,” *XXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 21-24 out 2003 Ouro Preto/MG, Brasil. 2003*.
- [14] A. H. C. Tsang, “Condition-based maintenance: tools and decision making,” *Journal of Quality in Maintenance Engineering, v.1, pp. 3-17. 1995*.
- [15] J. Wyrebski, “Manutenção produtiva total – um modelo adaptado,” *Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997*
- [16] A. C. Márquez, “*The Maintenance Management Framework: Models and Methods for Complex Systems Maintenance*,” Springer, USA, 2007.
- [17] M. Bertolini, M. Bevilacqua, “A combined goal programming—AHP approach to maintenance selection problem,” *Reliability Engineering and System Safety, v.91, pp. 839–848. 2006*.
- [18] W. Edwards, F. H. Barron, “SMARTS and SMARTER: Improved simple methods for multiattribute utility measurement,” *Organizational Behavior and Human Decision Processes, vol. 60, pp. 306-325. 1994*.