



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

ANÁLISE DO TIPO FMEA APLICADA NA DIAGNOSE DE FALHAS NOS SISTEMAS HIDRAULICOS DE REGULADORES DE VELOCIDADE DA TURBINA FRANCIS.

Erick M. Portugal Hidalgo, erickportugal_60@hotmail.com
Gilberto F. Martha de Souza, gfmsouza@usp.br

Escola Politécnica – Universidade de São Paulo, Av. Prof. Mello Moraes, 2231– Cidade Universitária, São Paulo-SP

***Resumo:** O presente trabalho visa apresentar a aplicação da análise de modos e efeitos de falha (FMEA – Failure mode and effects analysis), na diagnose de falhas do sistema hidráulico de reguladores de velocidade de turbinas hidráulicas do tipo Francis. A partir da aplicação da análise do tipo FMEA, é possível obter informação útil para a seleção de soluções ou / e atividades de manutenção mais eficientes no controle ou eliminação de um efeito indesejável devido ao comprometimento da função principal do regulador de velocidade. Como resultado deste trabalho propõe-se propostas de manutenções para cada componente crítico, baseando-se nos conceitos de Manutenção Centrada em Confiabilidade.*

***Palavras-chave:** Regulador de velocidade, FMEA, políticas de manutenção.*

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é uma potência mundial em geração de energia elétrica com o emprego de usinas hidrelétricas, pois conta com a maior bacia hidrográfica do mundo. Segundo o balanço energético nacional realizado pelo Ministério de Minas e Energia no ano de 2008, cerca do 73,1% da produção nacional de energia elétrica do país é obtida através de centrais hidroelétricas.

O regulador de velocidade de um hidrogerador tem a função de controlar a potência hídrica que se converte em potência mecânica para compatibilizar a geração de energia elétrica com a sua demanda e evitar perda de sincronismo, além disso, é responsável indiretamente pela qualidade de energia elétrica gerada (De Negri, 2001) e (Yesid, 2006).

A disponibilidade, segundo a norma brasileira NBR 5462 (ABNT, 1994) é definida como a capacidade de um item estar em condições de executar uma determinada função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado. A disponibilidade deve ser mantida como o emprego das políticas de manutenção, as quais tenham por objetivo se antecipar à ocorrência da falha, empregando-se preferencialmente práticas preventivas e/ou preditivas. A manutenção deve ser compreendida como a atividade cuja função é manter ou retornar os equipamentos às suas condições operacionais especificadas em projeto.

O presente artigo tem como objetivo desenvolver um modelo para diagnosticar falhas em sistemas hidráulicos de reguladores de velocidade da turbina Francis, identificando os modos de falhas de cada componente, suas causas e seus efeitos no desempenho do sistema hidráulico por meio do emprego da técnica de Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA). A partir dos resultados desta análise identificam-se os componentes críticos do sistema, ou seja, aqueles cujas falhas geram perda do desempenho. Para estes será feita uma proposta de manutenção, baseando-se nos conceitos de Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC).

2. MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE

Este processo encontra suas raízes na indústria da aviação comercial internacional, impulsionada pela necessidade de aperfeiçoar a confiabilidade, esta indústria desenvolveu um amplo processo para decidir qual trabalho de manutenção é necessário para manter um avião voando. Este processo tem evoluído permanentemente desde seus primórdios em 1960, (Moubrey, 2000) e (Smith e Hinchcliffe, 2004).

Conforme Moubrey (2000), uma definição mais ampla do MCC poderia ser “um processo que se usa para determinar o que deve fazer-se para assegurar que um elemento físico continue desempenhando as funções desejadas em seu contexto operacional presente”.

O objetivo principal do MCC é reduzir custo de manutenção, focando-se nas funções mais importantes do sistema e evitando ações de manutenção que não são estritamente necessárias. Se um programa de manutenção já existe, o resultado de uma análise de MCC será frequentemente eliminar as tarefas de Manutenção Preventiva ineficazes.

A implantação de um programa de MCC envolve uma série de passos e de atividades de forma seqüencial, as quais são:

- a) Definição do sistema e coleta de dados e informações
- b) Descrição funcional – elaboração da Árvore Funcional
- c) Análise de Modos e Efeitos de Falhas (FMEA) – determinação da conseqüência das falhas funcionais do sistema associadas à falha de cada um dos componentes.
- d) Identificação dos componentes críticos.
- e) Seleção das políticas de manutenção para os componentes críticos.
- f) Avaliação dos resultados da implementação destas políticas.

3. MÉTODO

O método proposto está baseado na filosofia de Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM), e tem como objetivo determinar e identificar os componentes críticos do sistema hidráulico em regulador de velocidade de turbina Francis bem como propor políticas de manutenção baseadas nos conceitos de Manutenção Centrada na Confiabilidade.

Na Figura 1 é apresentada de forma esquemática a seqüência das atividades a cumprir. O primeiro passo envolve a realização de um estudo sobre o sistema hidráulico do regulador de velocidade; o segundo passo envolve a elaboração da descrição funcional (identificação das funções de cada um dos equipamentos dentro do sistema) e a elaboração da árvore funcional (representação gráfica das relações funcionais dos equipamentos). Essa árvore deve ser observada como um sistema, o qual será dividido em subsistemas.

Para cada um dos componentes da árvore funcional é realizada uma Análise de Modos e Efeitos de Falha com o objetivo de definir os componentes críticos para a operação do sistema. O FMEA é uma técnica muito conhecida para o estudo de confiabilidade de sistemas, permitindo identificar os principais mecanismos de falha dos equipamentos que compõem o sistema, as conseqüências da ocorrência das mesmas e permite também caracterizá-las através de um nível de severidade. Quanto maior o nível de severidade, maior o grau de degradação funcional do sistema em função da falha do equipamento.

Uma vez definidos os componentes críticos são selecionadas as políticas de manutenção mais adequadas, através da aplicação dos diagramas de decisão para Seleção de Práticas de Manutenção da filosofia MCC.

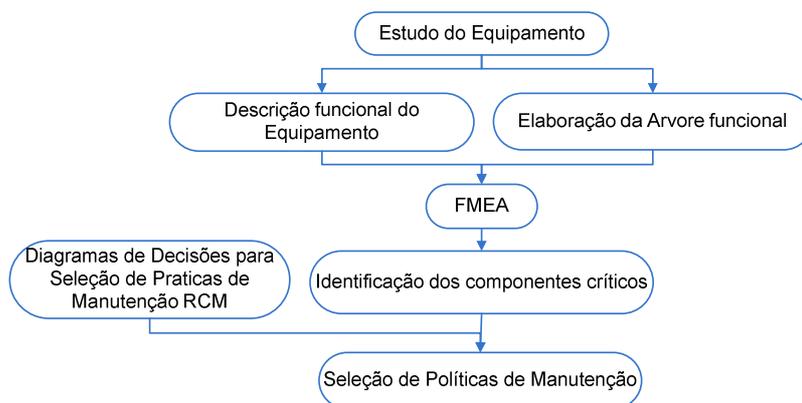


Figura 1 Etapas do modelo proposto

4. APLICAÇÃO DO MÉTODO

4.1. Regulador de velocidade

A utilização de reguladores de velocidade teve início no século XVII por meio de James Watt, que desenvolveu um controlador centrífugo de velocidade em uma máquina à vapor. O regulador Watt é um dos dispositivos mecânicos mais importantes dado o seu papel nos primórdios do desenvolvimento da teoria de controle.

O regulador de velocidade tem a função principal de atuar no sentido de aumentar ou diminuir a potência gerada pela turbina mantendo a freqüência (ou rotação de referência) do eixo da turbina. Em função da demanda do sistema, o sistema regulador da turbina atua sobre a posição das pás do distribuidor controlando a abertura e conseqüentemente a vazão que chega ao rotor, fazendo com que o hidrogenador gere apenas a energia necessária para o consumo (Andia, 2005).

O regulador de velocidade é uma combinação de dispositivos que detecta qualquer que seja a variação de velocidade do eixo da turbina e a corrige. No caso das turbinas Francis utiliza-se um servomotor que movimenta o anel do distribuidor. O distribuidor é um anel de pás ajustáveis que envolve o rotor da turbina. Para alterar a velocidade de rotação da turbina é necessário modificar a passagem de água pelo rotor. O movimento das pás do distribuidor é realizado por um anel de regulação, ligado às pás por um sistema biela-manivela (Yesid, 2006) e (Andia, 2005), de acordo com a Figura 2.

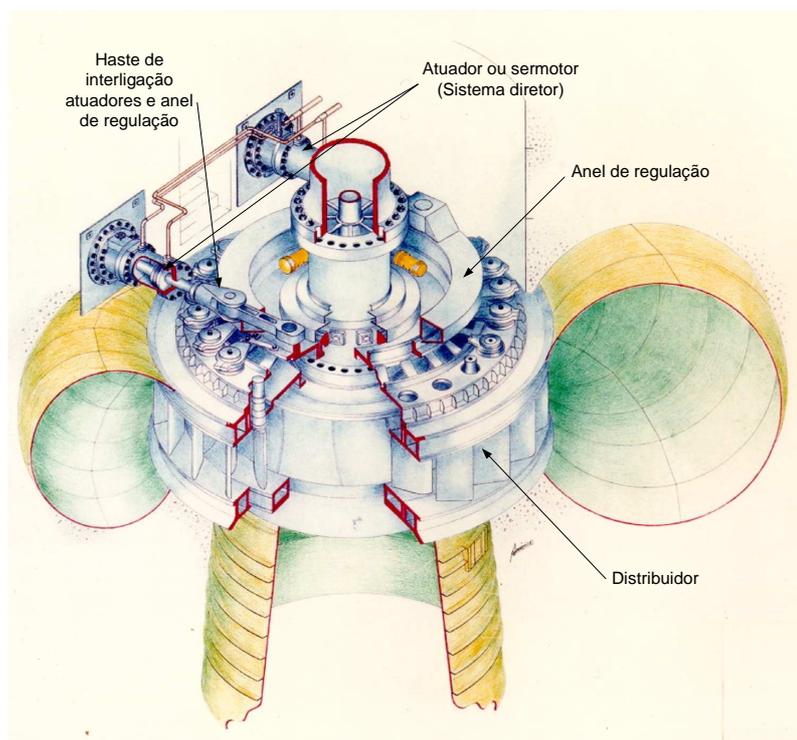


Figura 2 Sistema de regulação da Turbinas Francis (Yesid, 2006)

No caso deste artigo focou-se os sistemas hidráulicos do regulador de velocidade da turbinas Francis, cujo esquema hidráulico é indicado na Figura 3.

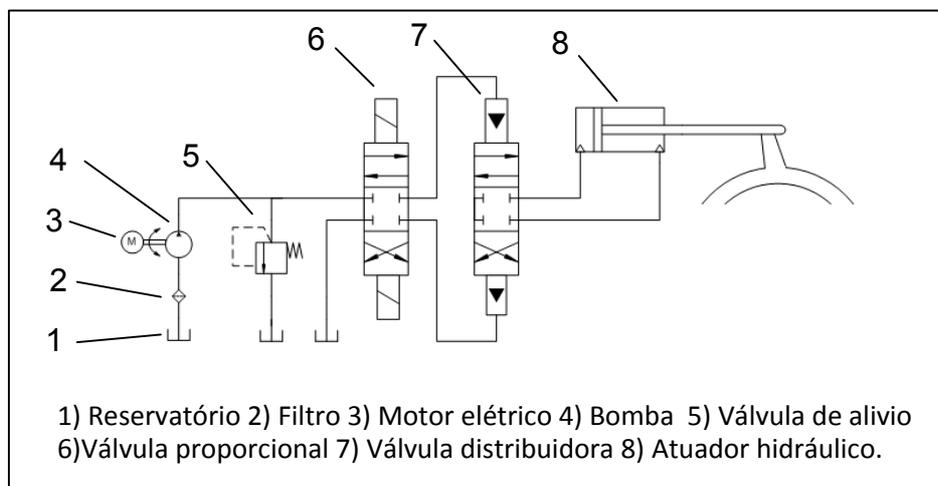


Figura 3 Diagrama simplificado do Sistema Hidráulico

4.2. Árvore funcional

Para elaborar uma árvore funcional é preciso conhecer a lógica de operação do sistema. Para este trabalho é necessário entender o esquema operacional do sistema hidráulico do regulador de velocidade, definindo a relação funcional entre os subsistemas e os equipamentos (Massarani, 2003).

Para realizar a elaboração da árvore funcional é necessário responder às seguintes perguntas: 1) Como é executada (cumprida) uma determinada função? ou 2) Porque uma determinada função deve ser executada?

Partindo do nível primário, que define a função do sistema hidráulico do regulador de velocidade, a resposta à primeira pergunta nos leva a um nível abaixo e as funções que asseguram o cumprimento da função do nível acima, e assim sucessivamente até o nível de equipamentos/componentes. A resposta à segunda pergunta percorre o caminho contrário, do nível de componentes até o nível primário e fornece uma forma de verificar a árvore. A árvore funcional para o sistema hidráulico do regulador de velocidade da turbina hidráulico do tipo Francis é apresentada na Fig. (4).

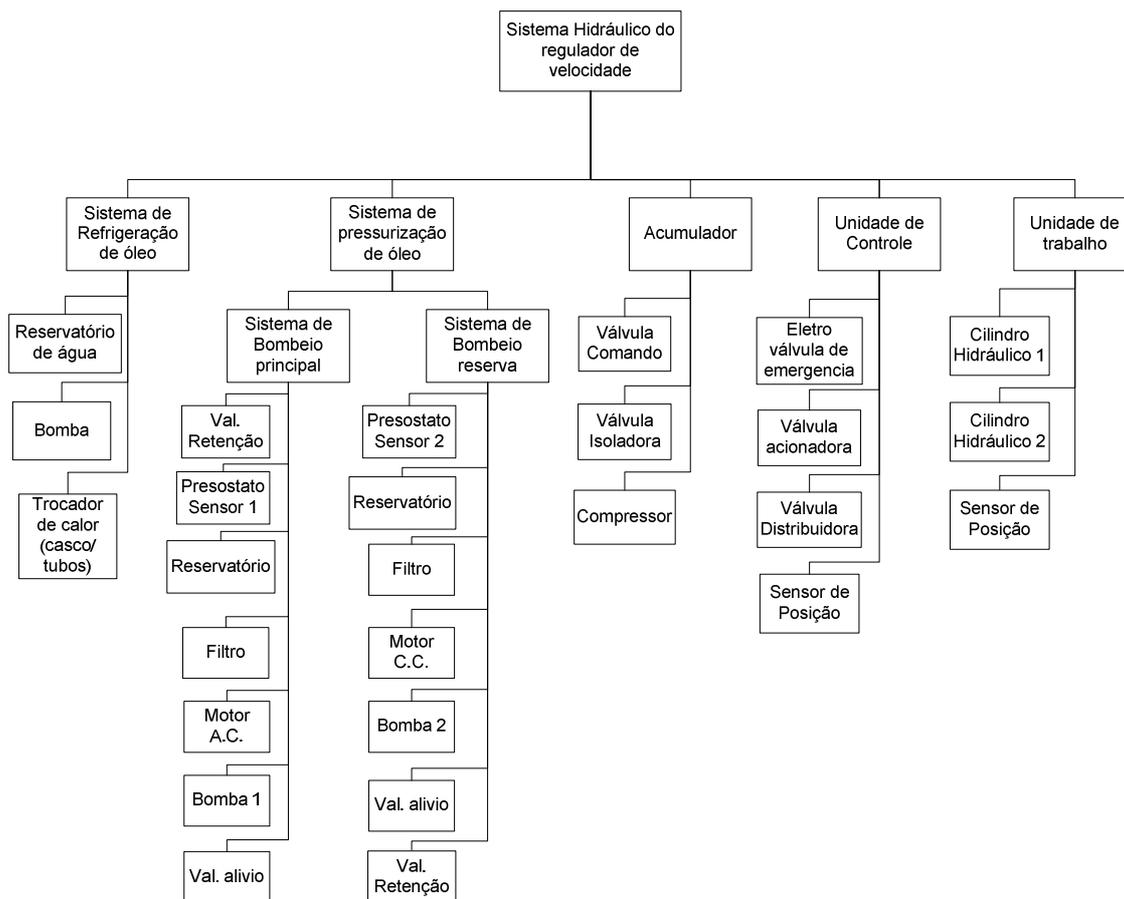


Figura 4 Árvore funcional do sistema hidráulico do regulador de velocidade

4.3. Análise de Modos e Efeitos de Falha – FMEA

O método de Análise de Modos e Efeitos de Falhas (FMEA) teve origem no meio militar, sendo frequentemente citada a norma MIL-STD 1629, pioneira na análise dos modos de falha. Segundo Jingyi et al (2001) e Cassanelli (2006) a análise do tipo FMEA é definida como um procedimento pelo qual cada modo de falha potencial em um componente do sistema é analisado para determinar os resultados ou efeitos de sua ocorrência no desempenho operacional do sistema, possibilitando classificar cada modo de falha potencial de acordo com sua severidade.

Realizada a elaboração da Árvore funcional, foram identificados todos os componentes que compõem o Sistema Hidráulico do Regulador de Velocidade. Para cada um dos componentes é feita uma análise de modos e efeitos de falha, tentando identificar seus modos de falha associadas com as condições operacionais específicas, e os mecanismos causadores de falha.

Para desenvolver a análise do tipo FMEA é utilizada uma tabela composta por seis colunas como indicado na Tabela 1: componente (identificação de cada componente que pertence ao sistema), função (descrição resumida e precisa da tarefa que deve executar o componente), modo de falha potencial (descrição da forma como a falha é observada pela equipe de operação), causa da falha (descrição simples e concisa de ocorrências – causas – que tem origem no tipo considerado de falha), possível efeito da falha (consequência da ocorrência de falha, estendida ou não para o usuário final, pode ser local ou global), severidade (este é um indicador que reflete a gravidade das consequências das falhas sob a condição operacional do sistema).

Tabela 1 Formulário empregado na Análise de Modo e Efeito de Falha

Análise de Modo e Efeito de Falhas - FMEA					
Componente	Função	Modo de falha potencial	Causa(s) da falha	Possível (is) Efeito(s) da falha	Sev

Neste estudo emprega-se uma classificação da severidade variando de 1 a 9. Os níveis 1 a 3 estão associados à falhas que afetam ligeiramente o desempenho do hidrogerador. Já os níveis de severidade 4 a 6 afetam o desempenho operacional, causando restrições na potência gerada. Já os níveis 7 a 9, cuja descrição é apresentada na Tabela 2, representam situações em que ocorre a parada do hidrogerador, podendo causar danos ao meio ambiente. Falhas (e os respectivos componentes a elas associados) classificadas com estes níveis de severidade são consideradas as mais críticas para a operação do hidrogerador (Guevara, 2006). Os componentes críticos devem ser objeto de estudo da MCC

Tabela 2 Classificação de Severidade empregada na Análise do tipo FMEA de um sistema Geração de Energia Elétrica (Guevara, 2006)

<i>Grau de Severidade</i>	Efeito sobre a Operacionalidade do Sistema de Geração de Energia Elétrica
1...5, 6.	- Efeitos que causam redução no desempenho operacional do sistema
7. (Efeito Extremo)	- Falha de componente, sem danos a outros componentes. Necessidade de substituição e/ou reparo do componente, com tempo de parada reduzido; - Falha que não afeta segurança do sistema de geração e dos operadores; - Falha causa parada de máquina, com não cumprimento de regulamentação governamental. - Efeito ambiental grave, possibilidade de multa.
8. (Efeito Sério)	- Falha de componente que causa danos moderados ao sistema de geração de energia, sem danos a outros componentes. Necessidade de substituição e/ou reparo do componente; - Falha que não afeta segurança do sistema de geração e dos operadores; - Falha causa parada de máquina, com não cumprimento de regulamentação governamental. - Efeito ambiental muito grave, possibilidade de multa.
9. (Efeito Perigoso)	- Falha de componente que causa danos severos ao sistema de geração, incluindo danos a outros componentes. Necessidade de substituição e/ou reparo de vários componentes; - Falha que afeta segurança do sistema de geração e dos operadores; - Falha causa parada de máquina, com não cumprimento de regulamentação governamental. - Efeito ambiental perigoso, vazamento de substâncias perigosas, aplicação de multa.

Uma parte da análise dos modos de falhas e seus efeitos em sistemas hidráulicos é indicada na Tabela 3, tomando-se como caso exemplo de aplicação o fluido hidráulico

Tabela 3 Extrato da Análise de Modos e Efeitos de Falha do Fluido Hidráulico

Análise de Modo e Efeito de Falhas - FMEA					
Componente	Função	Modo de falha potencial	Causa(s) da falha	Possível (is) Efeito(s) da falha	Sev.
Fluido Hidráulico	Lubrificar, dissipar o calor e transmitir a potência	Varição da viscosidade: Alta Viscosidade	Baixa temperatura do meio ambiente Fluido Inadequado Falha no Aquecedor (em ambientes muito frios) Falha na seleção do fluido	Aumento da resistência ao escoamento Aumento do coeficiente da expansão térmica Consumo de maior potência elétrica na compressão	7
		Varição da viscosidade: Baixa Viscosidade	Contaminação por água (Falha no trocador de calor) Falta de limpeza do reservatório Falha na seleção do fluido Duto de entrada e retorno do fluido muito próximos Temperatura elevada no sistema	Perda do poder lubrificante Desgaste dos selos, produzindo vazamentos internos e externos Aceleração do desgaste dos componentes mecânicos Queda de pressão com redução na velocidade dos atuadores	7
		Baixo módulo de Compressibilidade	Presença de bolhas de ar no fluido	Vibração no sistema	7

4.4. Seleção de componentes críticos

Depois de elaborar a análise do tipo FMEA no item 4.3, realiza-se a seleção de equipamentos críticos que tenham severidade maior que 6. Na tabela 4 tem-se a lista de componentes críticos com seus respectivos modos de falha e grau de severidade, ou seja, aqueles que comprometem a geração de energia elétrica em um hidrogerador.

Tabela 4 Lista de componentes críticos

Sistema	Subsistema	Componente	Modo de falha	Sev.	
Sistema eletro - hidráulico	Sistema de refrigeração de óleo	Trocador de calor	Incapacidade de resfriar o óleo	7	
	Sistema de pressurização de óleo	Fluido hidráulico	Varição da viscosidade: Alta Viscosidade	7	
			Varição da viscosidade: Baixa Viscosidade	7	
			Baixo módulo de Compressibilidade	7	
		Pressostato	Não aciona	8	
			Não trabalha adequadamente	8	
		Filtro	Filtro Entupido	7	
		Motor AC	Não há transformação de energia elétrica em energia mecânica.	8	
		Motor DC	Não há transformação de energia elétrica em energia mecânica.	7	
		Bomba	Incapacidade de bombear	8	
			Bombeamento insuficiente à especificada	7	
	Válvula de alívio	Não regula a pressão	7		
	Acumulador	Acumulador	Perda total do acumulador	8	
			Vazão inadequada	7	
	Unidade de controle	Válvula de emergência	Válvula não se move	9	
			Válvula não responde adequadamente ao comando	8	
			Vazamento	7	
		Válvula Proporcional	Válvula não se move	9	
			Válvula não responde adequadamente ao comando	8	
			Vazamento	7	
		Válvula Distribuidora	Válvula não se move	9	
			Válvula não responde adequadamente ao comando	8	
			Vazamento Externo	7	
			Vazamento Interno	8	
		Unidade de trabalho	Atuador	Atuador fica sem movimento	9
				Velocidade Incorreta	7
	Movimento em pulsos			7	
	Vazamento externo			8	
	Falta de força			8	

4.5. Seleção e Recomendações de Políticas de Manutenção

Para escolher uma política de manutenção apropriada para um equipamento, tem-se que definir um processo de decisão. Para indicar as práticas de manutenção mais recomendadas para o mesmo, em concordância com as características dos modos de falha e das práticas de manutenção próprias utilizadas em equipamentos hidráulicos.

Para os componentes críticos listados na Tabela 4, deve-se realizar uma seleção das tarefas de manutenção, elaborando políticas de manutenção baseadas nos diagramas de decisão empregados pela Manutenção Centrada em Confiabilidade (Moubray, 2000). Para aplicar o diagrama de decisão é preciso realizar a classificação das falhas dos componentes, em função das conseqüências destas sobre o desempenho operacional. Sob o ponto de vista da tomada de decisão em manutenção, as falhas podem ser funcionais ou potenciais. A falha funcional é definida como a incapacidade de um elemento ou componente de um equipamento para satisfazer um funcionamento padrão desejado. A falha potencial é representada pela presença de uma evidência física de que um processo de deterioração de um componente está acontecendo, o qual culminará como uma falha funcional.

Uma parte da aplicação das políticas de manutenção em sistemas hidráulicos está indicada na Tabela 5 tomando com exemplo de aplicação a bomba hidráulica.

Tabela 5 Proposta de políticas de manutenção para a bomba

RCM					Sistema			Sistema Hidráulico do Regulador de Velocidade							
Tabela de decisão					Sub-sistema			Bomba							
Modo de Falha	Avaliação de conseqüências				H1	H2	H3	Ação padrão				Atividade de Manutenção Proposta			
					S1	S2	S3								
	H	S	E	O	O1	O1	O3	N1	N2	N3	H4		H5	S4	
Incapacidade de bombear															Como atividade de Manutenção Preventiva
	N	S	N	S	X	X									1. Inspeção e limpeza da linha de sucção e do filtro 2. Supervisar o nível do óleo no tanque 3. Inspeção do motor elétrico sim esta dando partida, e verificar o acoplamento entre a bomba e o motor
Bombeamento insuficiente à especificada															Como atividades de Manutenção preditiva
	N	S	N	S	X	X									1. Análise de vibração para detectar falhas em rolamentos, desbalanceamento, desalinhamento e cavitação na bomba
															Como atividades de Manutenção Preventiva
															1. Inspeção e limpeza da linha de sucção, uniões e do filtro. 2. Inspeccionar a quantidade de óleo no tanque. 3. Realizar um lavagem de todos os orifícios e componentes da bomba. 4. Verificar sim existe vazamento externo na bomba
															Como atividade de Manutenção preditiva
															1. Análise de vibração para detectar falhas em rolamentos, desbalanceamento, desalinhamento 2. Análise de ultra-som para detenção de cavitação na bomba

Segundo Jingyi (2006) cerca de 50% dos problemas encontrados nos sistemas hidráulicos estão relacionados como o óleo hidráulico, Na análise do FMEA se observou que o óleo hidráulico é um dos maiores contribuidores na propagação de modos de falhas pelo sistema hidráulico do regulador de velocidade. Dessa forma, mantendo, controlando ou eliminando os modos de falhas do óleo hidráulico, se pode evitar um número maior de efeitos indesejáveis no sistema. Para tanto se recomenda realizar um análise de óleo, testes podem ser realizados para a determinação da viscosidade, contaminação por partícula e presença de água no fluido. A realização dos testes nos permitirá identificar a qualidade ou estado em que se encontra o fluido.

Outros elementos muito importantes no sistema hidráulico são os filtros. O estado da maioria dos filtros é mostrado pela diferença de pressão observada entre a entrada e a saída, a qual indica possível bloqueio dos mesmos. Os filtros devem ser trocados antes que eles sejam bloqueados ou ocorra à ruptura do elemento filtrante. A evolução temporal dessa pressão diferencial é um indicativo da ocorrência de depósitos no filtro e pode ser usada como um parâmetro para a aplicação da prática de manutenção preditiva.

5. CONCLUSÕES

Este artigo mostra que a análise do tipo FMEA pode ser utilizada para o levantamento de todos os modos de falhas a serem eliminados ou controlados por ações de manutenção. Os efeitos dos modos de falhas servem de base para verificar suas conseqüências na segurança dos operadores, meio ambiente e do desempenho da função principal do sistema hidráulico do regulador de velocidade.

O resultado da análise do tipo FMEA permitiu identificar os componentes críticos, ou seja, aqueles cuja falha causa uma parada do sistema ou prejudica seu desempenho operacional, sendo útil para o contexto de estabelecimento de políticas de manutenção.

A política de manutenção baseada na filosofia da Manutenção Centrada em Confiabilidade enfocou as conseqüências das falhas na segurança pessoal, meio ambiental e serviço aos clientes.

Ressalta-se a importância da aplicação do análise funcional detalhada do sistema em estudo, especialmente através da elaboração da árvore funcional, que permite relacionar as funções dos diferentes componentes do sistema e serve como base para a execução do FMEA.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNR – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5462 Confiabilidade e Manutenibilidade, Rio de Janeiro, 1994.
- Andia, C. G., Centrales ELÉCTRICAS. Editora Universidad Católica de Santa Maria, Perú, 2005.
- Cassanelli, G., et al, Failure Analysis – assisted FMEA. International Journal, Microelectronics Reliability, 2006.
- De Negri, V.J., Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos para Automação e controle, Apostila de disciplina de pós-Graduação, Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.
- Guevara, F. J. C., “Análise de Disponibilidade de Turbinas a Gás Empregadas em Usinas Termelétricas a Ciclo Combinado”, Dissertação de Mestrado, EPUSP, 2006.
- Jingyi, Z., et al, “The development and prospects of hydraulic reliability engineering”. International conference on Fluid Power Transmission and Control, 2001.
- Massarani, M., “Engenharia do Valor”, Apostila da disciplina de pós-graduação, EPUSP, 2003.
- Ministério de Minas e Energia, 2009, disponível: <http://www.mme.gov.br> . Acessado em janeiro de 2009.
- Moubray, J., “RCM II- Reliability Centered Maintenance”, 2ª edição, New York: Industrial Press Inc, 2000.
- Smith, A. M., Hinchcliffe, G. R., “RCM - Gateway to World Class Maintenance”, Butterworth-Heinemann, 2ª Edição, 2003.
- Yesid E. A. M., “Desenvolvimento de um sistema servopneumático para Regulação de Velocidade de turbinas em pequenas centrais hidroelétricas”, dissertação de mestrado, Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores declaram serem os únicos responsáveis pelo conteúdo do material incluído neste trabalho.

FMEA APPLIED IN THE FAULTS DIAGNOSIS IN HYDRAULIC SPEED-GOVERNOR SYSTEMS OF FRANCIS TURBINE

Abstract: This paper presents the application of failure mode and effects analysis in a hydraulic speed-governor systems of Francis turbine. With the application of the FMEA analysis, it is possible to obtain useful information for the selection of solutions or/ and maintenance activities. Those activities should be more efficient in order to control or eliminate an undesirable failure effect, which can affect the main function of speed-governor. As a result, this work proposes suggestions of maintenance task for some critical componetst, based on the concepts of Reliability Centered Maintenance.

Keywords: speed-governor, FMEA, maintenance policie.