ERICK MIGUEL PORTUGAL HIDALGO

**MODELO PARA DIAGNOSE DE FALHAS EM REGULADOR DE VELOCIDADE
DE TURBINAS HIDRÁULICAS**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo como requisito para obtenção
de Título de Mestre em Engenharia

São Paulo
2010

ERICK MIGUEL PORTUGAL HIDALGO

**MODELO DE DIAGNOSE DE FALHAS EM REGULADOR DE VELOCIDADE
DE TURBINAS HIDRÁULICAS**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo como requisito para obtenção
do Título de Mestre em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:
Professor Dr.
Gilberto Francisco Martha Souza

São Paulo
2010

FICHA CATALOGRÁFICA

Hidalgo, Erick Miguel Portugal

Modelo para diagnose de falhas em reguladores de velocidade de turbinas hidráulicas / E.M.P. Hidalgo. -- São Paulo, 2010. 171 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Turbinas hidráulicas 2.Velocidade (Regulagem) I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha
família, e a todas as pessoas que
me apoiaram durante todo este
tempo.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a algumas pessoas que contribuíram decisivamente na consecução deste trabalho, seja pelo apoio pessoal, seja pela presteza com que me atenderam, sempre que solicitadas.

Agradeço inicialmente a meus pais, Miguel e Matilde, por fazerem de mim quem sou e pela força, perseverança e paciência;

Agradeço às minhas irmãs, Patricia e Greidy, pela companhia de todos esses anos e a toda minha família;

Ao meu orientador prof. Dr. Gilberto Francisco Martha de Souza, por ter me orientado, confiança, amizade e atenção com que me ajudou a conduzir este trabalho.

À minha namorada, Ligia, pelo apoio incondicional;

Aos meus amigos, pela união, por todos os momentos de diversão;

À senhora Vera, pelo apoio e porque sempre confiou em mim.

Ao CNPq pelo apoio financeiro para realização deste trabalho de dissertação .

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica pela oportunidade de integrar-me ao grupo de mestrandos;

Aos meus colegas do Laboratório de Confiabilidade da Escola Politécnica, pelas dicas;

E a Deus e à Virgem do Rosário por tudo.

RESUMO

O regulador de velocidade tem a função principal de atuar no sentido de aumentar ou diminuir a potência gerada pela turbina quando a velocidade ou frequência se afasta do valor de referência. 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, gerando apenas a energia elétrica necessária para o consumo.

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um método para diagnosticar falhas em reguladores de velocidade de turbinas hidráulicas. Baseando-se nas ferramentas de confiabilidade selecionou-se os componentes críticos do sistema para elaborar políticas de manutenção que visam obter maior disponibilidade do sistema.

Este trabalho apresenta uma metodologia com as seqüências das atividades que permitem fazer uma análise detalhada e confiável, pois são utilizadas numa ordem lógica e organizada, de forma que o método seja desenvolvido corretamente.

A metodologia proposta utiliza as ferramentas de análise de confiabilidade como: Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA) e Análise de Árvore de Falhas (FTA). O FMEA parte da definição das funções dos sistemas e subsistemas analisados, verificando em seguida as falhas que afetam cada função e todos os modos de falha que levam a cada falha. O FTA é basicamente um método dedutivo que visa identificar as causas ou combinações de causas que possam levar ao evento topo definido.

Palavras-chave: Confiabilidade, FMEA, FTA, Reguladores de Velocidade

ABSTRACT

The speed governing system has the primary function of acting to increase or decrease the power generated by the turbine when the speed or frequency deviation from reference value. According to the system demand, the speed governing system turbine operates on the position of the blades of the distributor controlling the opening and therefore the flow that reaches the rotor, generating only the power required for consumption.

This work aims at to develop a method to diagnose faults in speed governing system of hydraulic turbines. The tools of reliability selected critical components of the system to develop policies aimed at keeping achieve greater system availability.

This work presents a methodology with a sequence of activities allowing one to make a detailed and reliable analysis, because they are used in a logical order and organized so that the model is developed properly.

The proposed methodology uses tools such as reliability analysis: Analysis of Failure Modes and Effects (FMEA) and Fault Tree Analysis (FTA). The FMEA part of the definition of the functions of systems and subsystems analyzed, then verifying that the flaws affect every function and all modes of failure that led to each failure. The FTA is basically a deductive method that aims at identifying the causes or combinations of causes that could lead to top event defined.

Keywords: Reliability, FMEA, FTA, Governing System

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Usina Hidroelétrica (ITAIPU, 2009)	6
Figura 2.2: Turbina Pelton (ALSTOM, 2010)	7
Figura 2.3: Turbina Francis (VOIHT, 2009)	8
Figura 2.4. Turbina Kaplan (ALSTOM, 2009)	9
Figura 2.5: Sistema mecânico hidráulico simplificado de um regulador de velocidade convencional (DE NEGRI, 2001).....	12
Figura 2.6: Sistema mecânico e eletro - hidráulico simplificado de um regulador de velocidade moderno (DE NEGRI, 2001).	13
Figura 2.7 Regulador de velocidade RVX 300 (REIVAX, 2010)	14
Figura 2.8 Interface homem - máquina (REIVAX, 2010)	15
Figura 2.9: Diagrama do Sistema Hidráulico do regulador de velocidade (adaptação de PORCIÚNCULA et al, 2001 e DE NEGRI, 2001).	17
Figura 2.10 (a) deslocamento do distribuidor por um distribuidor; (b) deslocamento do distribuidor com dois distribuidores (DÍEZ, 1996; ANDIA, 2005)	18
Figura 2.11: Sistema mecânico do distribuidor Fink (ANDIA, 2008).....	19
Figura 2.12: Regulador de Watt para controle de máquinas a vapor (ANDIA, 2005).	20
Figura 2.13: Sistema de Regulação da Turbina Pelton (DIEZ, 1996).....	23
Figura 2.14: Sistema de Regulação da Turbina Francis (MASSORANA, 2008)	24
Figura 2.15: Sistema de Regulação da Turbina Kaplan (DE NEGRI, 2001; ANDIA, 2010)	25
Figura 3.1: Função de Probabilidade Acumulada $F(t)$ (LEITCH, 1995)	28
Figura 3.2 Função de Confiabilidade $R(t)$ (LEITCH, 1995).....	29
Figura 3.3: Representação da Curva da Banheira (SELUTTO, 2005)	31
Figura 3.4: Representação de blocos em série e em paralelo (O'CONNOR, 1985) .	33
Figura 3.5: Gráfico Comparativo da Evolução da Confiabilidade para Componentes e no Modo paralelo ativo (SOUZA, 2008).	34
Figura 3.6: Sistema em Paralelo Passivo (SUNDARARAJAN, 1991)	35
Figura 3.7 Símbolos dos eventos do FTA (O'CONNOR, 1985; BROOKE e PAIGE, 2003).	40
Figura 3.8 Conectores lógicos do FTA (O'CONNOR, 1985; BROOKE e PAIGE, 2003).	40

Figura 3.9 Símbolos de transferência do FTA (O'CONNOR, 1985; BROOKE E PAIGE, 2003).	41
Figura 3.10: Exemplo de FTA (RAUSAND e ARNLJOT, 2004).	42
Figura 3.11: Efeito da Manutenção Preventiva sob a Confiabilidade (LEWIS, 1987)	45
Figura 3.12: Efeito da Manutenção Preventiva na Confiabilidade (Lewis, 1987).	46
Figura 3.13: Curva de tendência para o valor de um parâmetro de interesse (CARAZAS, 2006).	49
Figura 3.14 A Curva P-F (RAUSAND, 1998).	54
Figura 3.15: Diagrama de decisões da Manutenção Centrada em Confiabilidade para políticas de manutenção (MOUBRAY, 2000)	56
Figura 4.1: Etapas do método proposto	62
Figura 4.2: Arranjo geral da árvore funcional (SOUZA, 2008).	63
Figura 5.1 Diagrama Hidráulico do Regulador de Velocidade de Turbinas Hidráulicas.	71
Figura 5.2 Árvore funcional do regulador de velocidade em Usinas hidroelétricas.	75
Figura 5.3 Árvore Funcional do Regulador de Velocidade	76
Figura 5.4 Árvore de Falhas da parada do regulador de velocidade.	83
Figura 5.5 Árvore de falhas para o evento topo "Parada do regulador de velocidade"	85
Figura 5.6 Árvore de falhas com estrutura reformada por cortes mínimos.	88
Figura 5.7 Diagnóstico de falhas quando o atuador está parado	97
Figura 5.8 Diagnóstico de falhas quando o atuador apresenta movimento pulsante	98
Figura 5.9 Diagnóstico de falhas quando a pressão no sistema está em desacordo com a especificação de operação	99
Figura 5.10 Diagnóstico de falhas quando a pressão de operação é insuficiente no sistema.	100
Figura 5.11 Diagnóstico de falhas quando a temperatura do óleo é elevada.	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Tabela de contendo Informações para elaboração da FMEA (CARAZAS, 2006).....	37
Tabela 3.2 Classificação de severidade conforme a norma iso 9000 (SOUZA, 2008).....	38
Tabela 3.3: Tabulação de resultados na Análise de decisão pelo método RCM (MOUBRAY, 2000).....	58
Tabela 4.1 Formulário empregado na Análise FMEA	64
Tabela 4.2 Classificação de Severidade Empregada na Análise do tipo FMEA de um sistema de Geração de Energia Elétrica (CARAZAS, 2003).....	65
.Tabela 4.3 Símbolos utilizados para a elaboração do diagnostico de falhas	69
Tabela 5.1 Parte da Análise de Modos e Efeitos de falha da bomba hidráulica ..	80
Tabela 5.2 Lista dos Componentes Críticos	81
Tabela 5.3 Eventos básicos ou causas da falha	86
Tabela 5.4 Eventos básicos ou causas da falha com suas respectivas probabilidades de falha	89
Tabela 5.5 Resultados do análise quantitativa: cortes mínimos importantes.....	90
Tabela 5.6 Componentes críticos do Sistema Hidráulico do Regulador de Velocidade	92
Tabela 5.7 Políticas de manutenção para a Bomba Hidráulica.....	95
Tabela 5.8 Histórico de Falhas do regulador de velocidade – caso exemplo	103

LISTA DE SÍMBOLOS

$F(t)$	Função de probabilidade acumulada de falha no tempo t
$f(t)$	Função densidade de probabilidade de falha no tempo t
$R(t)$	Confiabilidade no tempo t
$R_s(t)$	Confiabilidade do sistema no tempo t
$R_i(t)$	Confiabilidade do componente i no tempo t
β	Constante de forma na distribuição de Weibull.
η :	Constante de escala na distribuição de Weibull.
λ	Taxa de falha constante no tempo
$\lambda(t)$	Taxa de falha no tempo t
$MTTR$	Tempo médio para reparo
$MTBF$	Tempo médio entre falhas
I_k	Importância de eventos básicos.
T	Tempo até ocorrer a falha

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Considerações Iniciais.....	1
1.2	Objetivo do Trabalho	3
1.3	Escopo do Trabalho.....	4
2	REGULADOR DE VELOCIDADE	5
2.1	Centrais Hidroelétricas.	5
2.2	Turbinas Hidráulicas.	6
2.3	Regulador de Velocidade	9
2.3.1	Sistema de controle do regulador de velocidade.	11
2.3.2	Sistemas Eletro-Hidráulicos para controle de posição	15
2.3.3	O distribuidor.....	18
2.4	Evolução dos reguladores de velocidade	20
2.4.1	Relação dos tipos de turbinas com os reguladores.....	22
3	CONFIABILIDADE E MANUTENÇÃO.....	26
3.1	Confiabilidade	26
3.1.1	Confiabilidade de Sistema.....	32
3.2	Manutenção.....	42
3.2.1	Manutenção corretiva.....	43
3.2.2	Manutenção preventiva.....	44
3.2.3	Manutenção Preditiva	47
3.3	Manutenção centrada na confiabilidade	49
3.3.1	Classificação de falhas	53
3.3.2	Conseqüência da falha	54
3.3.3	Diagrama de decisões da Manutenção Centrada em Confiabilidade..	55

3.4	Manutenção de sistemas hidráulicos.....	58
4	PROPOSTA DO MÉTODO DE DIAGNOSE DE FALHAS NOS REGULADORES DE VELOCIDADE.....	61
4.1	Considerações iniciais.....	61
4.2	Proposta do Método de Análise.....	63
4.2.1	Elaboração da Árvore Funcional.....	63
4.2.2	Análise de Modos e Efeitos de falha (FMEA).....	64
4.2.3	Análise de Árvore de Falhas (FTA).....	66
4.2.4	Elaboração do Procedimento de Seleção de Políticas de Manutenção para os componentes críticos.....	67
4.2.5	Diagnóstico de falhas.....	68
5	ESTUDO DE CASO: SISTEMA HIDRÁULICO DO REGULADOR DE VELOCIDADE DA TURBINA FRANCIS.....	70
5.1	Aplicação do Método.....	70
5.1.1	Descrição do Sistema Hidráulico.....	70
5.1.2	Elaboração de Árvore Funcional.....	74
5.1.3	Análise de Modos e Efeitos de Falha do Sistema Hidráulico.....	77
5.1.4	Análise de Árvore de Falhas em Sistemas Hidráulicos.....	82
5.1.5	Proposta de Políticas de Manutenção.....	91
5.1.6	Diagnóstico de falhas do sistema hidráulico do regulador de velocidade.....	96
5.2	Validação do método.....	102
6	CONCLUSÕES.....	105
6.1	Conclusões.....	105
6.2	Considerações para Trabalhos Futuros.....	107
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA.....	109
	APÊNDICE A. DESCRIÇÃO FUNCIONAL.....	116
	APÊNDICE B. ANÁLISE DE MODOS E EFEITOS DE FALHA.....	122

APÊNDICE C. ANÁLISE DA ÁRVORE DE FALHAS	139
APÊNDICE D. RECOMENDAÇÕES DE MANUTENÇÃO	149

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

O Brasil é uma potência mundial em geração de energia elétrica com o emprego de usinas hidroelétricas, 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 de 73,1% da produção nacional de energia elétrica do país é obtida através de centrais hidroelétricas.

Em uma central hidroelétrica, a energia potencial hidráulica é convertida em energia mecânica, que por sua vez, é convertida em energia elétrica. Costuma-se utilizar máquinas elétricas síncronas para transformar energia mecânica em energia elétrica. Em uma máquina síncrona, o campo magnético induzido no rotor gira em conjunto com o rotor, e o campo magnético induzido no estator gira em uma rotação proporcional à frequência elétrica (DIEZ, 1996; ANDIA, 2005).

Atualmente a energia elétrica consumida é de corrente alternada. O consumidor cada vez é mais exigente na qualidade da energia elétrica gerada, que precisa ser definida como tensão e corrente com um dado valor nominal e uma frequência específica. As variações de frequência entre a nominal e a real devem ser as mínimas possíveis. Para conseguir que a frequência seja constante é necessário que as máquinas envolvidas na produção de energia elétrica, mantenham rotação constante e sejam capazes de corrigir tais desvios. Estes desvios serão corrigidos através do regulador de velocidade no caso de geração hidroelétrica.

O regulador de velocidade (RV) 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, ele também é responsável indiretamente, pela qualidade de energia elétrica produzida. O

regulador de velocidade é, por sua vez, constituído de sistemas hidráulico, elétrico e eletrônico, além de todos os componentes mecânicos (YESID, 2006; ANDIA, 2005).

Atualmente, a geração de energia elétrica é regulamentada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). A produção, portanto, depende da demanda e deve ser adaptada a ela a cada instante por um sistema de regulação, o qual é comandado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

No âmbito da produção de energia elétrica, para onde se destinam os sistemas hidráulicos reguladores de velocidade, as consequências associadas com uma falha de um hidrogerador que influem em redução da capacidade da geração de energia elétrica, podem ser as penalidades ou multas impostas pela legislação vigente. Na resolução nº 161, 20 de abril de 2001, da ANEEL, o valor mínimo da multa é de cem mil reais mais o pagamento da energia elétrica que não foi produzida.

Na resolução nº 318, 6 de outubro de 1998, da ANEEL, tem-se que "a inexecução parcial ou total de obrigações legais e contratuais, caracterizadas entre outras, por violação dos padrões de qualidade dos serviços, atraso da entrada em operação das instalações está sujeita a suspensão temporária de participação de licitações para obtenção de novas concessões, permissões ou autorizações, bem como impedimento de contratos com ANEEL e de recebimento de autorização para serviços e instalação de energia elétrica".

Segundo a norma brasileira NBR 5462 (ABNT, 1994), a confiabilidade é definida como a "capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um intervalo de tempo". A determinação da confiabilidade deve indicar e melhorar a disponibilidade das unidades geradoras. A disponibilidade de um sistema está diretamente relacionada com a confiabilidade dos equipamentos que o compõem.

Segundo a norma brasileira NBR 5462 (ABNT, 1994), a disponibilidade é a capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função em um

dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando-se em conta os aspectos combinados de sua confiabilidade, manutenibilidade bem como suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados.

Para manter a confiabilidade e a disponibilidade em níveis elevados é necessário fazer manutenção. A manutenção deve ser compreendida como a atividade cuja função é manter ou retornar os equipamentos às suas condições operacionais especificadas em projeto. Ao longo dos últimos trinta anos, houve uma grande evolução no que diz respeito às técnicas e métodos de intervenção nos equipamentos. Todo este desenvolvimento está centrado no fato de que as práticas a serem executadas pela manutenção são basicamente três (NBR 5462, 1994):

1. Manutenção corretiva: é executada após a ocorrência da falha, sem nenhum tipo de programação, ou seja, depois da quebra do equipamento. Em geral, ela é executada com a parada total e/ou parcial do equipamento.
2. Manutenção preventiva: é efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item.
3. Manutenção preditiva: permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva.

1.2 Objetivo do Trabalho

Este trabalho tem por objetivo desenvolver um método para diagnosticar falhas em reguladores de velocidade de turbinas hidráulicas. O método é desenvolvido por meio da aplicação de técnicas de análise de confiabilidade.

Após identificar os componentes críticos do sistema, que geram perda do desempenho, em caso de apresentar falhas são feitas propostas de manutenção para estes componentes do regulador de velocidade, baseando-se nos conceitos de manutenção centrada em confiabilidade.

1.3 Escopo do Trabalho

Visando atingir os objetivos apresentados na Seção 1.2, esta dissertação está dividida em sete capítulos. Após uma breve introdução do tema apresentada no Capítulo 1, no Capítulo 2 é apresentada uma descrição do regulador de velocidade das turbinas hidráulicas.

No Capítulo 3 são apresentados os principais conceitos de confiabilidade, incluindo as principais ferramentas de análise de confiabilidade de sistemas. São definidos também conceitos de manutenção e a relação entre a aplicação de técnicas de manutenção e controle da degradação da confiabilidade de equipamentos.

No Capítulo 4 é proposto o método que será aplicado no método de diagnóstico de falhas para o regulador de velocidade, baseados na aplicação dos conceitos de confiabilidade e manutenção centrada em confiabilidade.

No Capítulo 5 é realizado o estudo de caso aplicando o método proposto no Capítulo 4.

Finalmente, o Capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho, e o Capítulo 7 contém a bibliografia utilizada.

2 REGULADOR DE VELOCIDADE

Este capítulo tem por objetivo principal reunir e apresentar os principais fundamentos e definições necessárias ao desenvolvimento do estudo proposto. Na primeira etapa, são apresentados os conceitos básicos relacionados com a geração de energia hidroelétrica, buscando identificar os principais componentes de uma instalação, e em particular o regulador de velocidade, apresentando sua configuração física e definindo suas funções dentro do sistema.

2.1 Centrais Hidroelétricas.

Uma central hidroelétrica é um agrupamento de componentes que tem como principal objetivo transformar a energia potencial hidráulica de um rio ou de uma represa em energia elétrica (ANDIA, 2005).

Os principais componentes de uma usina hidroelétrica, como podem ser vistos na Figura 2.1, são:

- Barragem: onde é represada a água do rio para promover principalmente a queda de água;
- Tomada de água: onde faz a distribuição da água para as diversas máquinas;
- Conduto forçado: que direciona a água até a turbina;
- Casa de Máquina ou Casa de Força onde ficam:
 - Turbina: que transforma a energia cinética de movimento da água em energia mecânica para acionar o Gerador;
 - Gerador: transforma a energia mecânica proveniente da turbina em energia elétrica;
 - Outros componentes como regulador de velocidade, regulador de tensão, serviços auxiliares e outros;
- Canal de Restituição de Água.

Figura 2.1: Usina Hidroelétrica (ITAIPU, 2009)

2.2 Turbinas Hidráulicas.

A turbina é um equipamento que converte energia hidráulica em energia mecânica transferida para o eixo da máquina. As turbinas são classificadas como turbinas de reação e de ação (DIEZ, 1996):

- Turbinas de reação: turbinas em que a energia mecânica é obtida pela transformação das energias cinéticas e de pressão do fluxo de água. As turbinas que se enquadram nesta definição são as turbinas Francis e Kaplan.
- Turbinas de ação: turbinas em que o trabalho mecânico é obtido pela transformação da energia cinética da água em escoamento através do rotor. As turbinas que se enquadram nesta definição são as turbinas Pelton.

As turbinas PELTON são chamadas assim devido ao nome de seu idealizador, Allan Lester Pelton, que em 1880 pôs em funcionamento o primeiro rotor com a forma atual. Este modelo de turbina especial para quedas altas, pode ser instalado em centrais com quedas d'água entre 100 metros a 1.200 metros. As turbinas Pelton são constituídas de uma roda munida de pás dispostas em círculo (rotor) e de um injetor (ou mais de um) que desempenha o papel do distribuidor, que pode ser horizontal ou vertical. Cada pá é formada de duas conchas dispostas simetricamente em relação ao plano mediano da roda (plano de simetria perpendicular ao eixo de rotação) como pode ser visto na Figura 2.2, (ALSTOM, 2010).

Figura 2.2: Turbina Pelton (ALSTOM, 2010)

As turbinas FRANCIS recebem seu nome em referência ao engenheiro inglês James Bicheno FRANCIS (1812-1892) que as idealizou em meados do século XIX, as quais foram utilizadas em instalações hidroelétricas nos Estados Unidos. Desde a sua primeira concepção muitos aperfeiçoamentos foram feitos, tanto em termos hidráulicos, mecânicos e de instalação. Atualmente essas turbinas atingem seus

melhores valores de rendimento para quedas que variam de 10 e até 200 metros. Nas turbinas Francis o fluxo de água que passa pela turbina provém do conduto forçado, entrando na caixa espiral, sendo então direcionado pelas pás do distribuidor até atingir as pás do rotor, levando a água até tubo de sucção que drena a mesma para o canal de saída da turbina (Figura 2.3) (ALSTOM, 2010).

Figura 2.3: Turbina Francis (VOIHT, 2009)

As turbinas KAPLAN foram concebidas pelo engenheiro austríaco Victor Kaplan (1876-1934) que, por meio de estudos teóricos e experimentais, criou um novo tipo de turbina a partir das turbinas hélice, com a possibilidade de variar o passo das pás. Surge então a turbina hélice de pás reguláveis. A turbina Kaplan é caracterizada pela utilização de um rotor que se assemelha as hélices de navios. Nestas máquinas de reação, o fluxo escoar em direção axial pelo rotor (ALSTOM, 2010). Estas máquinas operam com grande vazão de água e baixa queda de água. O rotor da turbina Kaplan possui mecanismo interno de movimentação das pás, que opera em função da magnitude da vazão de água e é regulado pelas palhetas diretoras. São máquinas de dupla regulação, conjugando a posição das pás do rotor

e a abertura das palhetas para obter elevada eficiência em toda faixa operacional. Na Figura 2.4 apresenta a configuração básica de uma turbina Kaplan.

Figura 2.4. Turbina Kaplan (ALSTOM, 2009)

As turbinas Pelton são recomendadas para grandes alturas de queda, de aproximadamente 100m até 1.200m, as turbinas Francis para valores médios, de 10 a 200m aproximadamente, enquanto que as turbinas Kaplan às quedas menores que 60m.

2.3 Regulador de Velocidade

Dentre os subsistemas que atuam conjuntamente com a turbina hidráulica, o regulador tem a função principal de atuar no sentido de aumentar ou diminuir a potência gerada pela turbina quando a velocidade angular ou frequência se afasta do valor de referência. 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 de água que chega ao rotor, fazendo com que o hidrogerador gere apenas a energia elétrica necessária para o consumo (ANDIA, 2005) (YESID, 2006). Além disso, são responsáveis de forma direta e indireta pela qualidade da energia elétrica gerada, em termos de frequência e potência (VINADE, 2003).

O regulador de velocidade está constituído por um conjunto de dispositivos e mecanismos que detecta qualquer que seja a variação de velocidade do eixo da turbina e a corrige através, por exemplo, da variação de posição dos servomotores (atuador hidráulico) que age sobre o anel distribuidor que está interligado às pás direcionais em turbinas do tipo Francis e Kaplan.

No projeto do regulador de velocidade, há um ponto que é conhecido como ponto de operação sem carga, que é o ponto específico de abertura das pás do distribuidor, previsto pelo projeto, que determina o ponto onde o sistema gera a força suficiente apenas para vencer os esforços de atritos associados com a rotação da turbina (MAZZORANA, 2008).

Os reguladores de velocidade não só controlam a potência gerada para um determinado local, mas também podem fazer parte de um grupo maior de unidades de geração, onde é exigida alta disponibilidade, devido às solicitações imediatas de geração de potência extra. Eles também permitem prevenir a sobrecarga do rotor da turbina devido ao excesso de velocidade (é o fenômeno que ocorre quando o rotor da turbina atinge uma velocidade de rotação muito acima da projetada, em torno de 10%) (MAZZORANA, 2008).

Segundo Yesid (2006), o regulador de velocidade deve realizar várias funções além de ajustar o servomotor a fim de regular a frequência da variação da tensão e corrente elétrica de forma aceitável. Podes-se destacar as seguintes funções:

- Permitir a sincronização do gerador ao sistema no menor tempo possível;

- Dar partida na máquina acelerando-a até a velocidade nominal sem causar danos na turbina (por ação de tensões elevadas nas pás) no menor tempo possível;
- Ajustar o ângulo das pás do rotor para operação com o máximo rendimento (turbinas Kaplan), em função da altura de queda e abertura do distribuidor;
- Em rejeição brusca de carga, promover o fechamento do distribuidor sem que a sobrepressão do duto e da caixa espiral, subpressão da sucção e sobrevelocidade da máquina superem os níveis garantidos pelo fabricante da turbina e do gerador;
- Em condições especiais, colocar limites máximos de geração (limitador eletrônico e/ou mecânico, de potência e/ou posição do servomotor);
- Na falha completa de todas as fontes de alimentação de potência elétrica, promover o fechamento total do distribuidor ou bloqueá-lo e mantê-lo numa posição fixa enquanto é feita a manutenção, sem desligar a máquina do sistema;
- Fornecer indicações confiáveis da velocidade da máquina desde zero (unidade parada, deslocamento mínimo do rotor) até 100% de sobrevelocidade, para atuação de proteções de sobrevelocidade confiáveis em caso de falha do regulador automático;

O regulador de velocidade é composto por três subsistemas: sistema de controle do regulador de velocidade, sistema hidráulico e o distribuidor.

2.3.1 Sistema de controle do regulador de velocidade.

Antigamente, o regulador de velocidade era composto por dispositivos mecânicos ou hidráulicos que constituíam o sistema de controle do regulador.

Conforme a Figura 2.5, pode-se observar que o transdutor eletromecânico, é comandado por um motor elétrico. Ao transdutor eletromecânico está acoplada uma haste de realimentação da posição do servomotor. A atuação do variador na articulação e conseqüentemente na válvula é comandada por um motor acoplado a um parafuso de rosca sem fim (DE NEGRI, 2001).

Figura 2.5: Sistema mecânico hidráulico simplificado de um regulador de velocidade convencional (DE NEGRI, 2001).

Na Figura 2.6 está representado um regulador de velocidade moderno onde se substituiu o regulador mecânico por um eletrônico, e um transdutor eletromecânico por um transdutor de posição do tipo LVDT (Transdutor Indutivo de Posição), e a articulação mecânica de medição e atuação foram substituídas por sinais elétricos do tipo corrente ou tensão.

Figura 2.6: Sistema mecânico e eletro - hidráulico simplificado de um regulador de velocidade moderno (DE NEGRI, 2001).

Os sistemas de controles utilizam sensores de frequência e de tensão elétrica. As medidas são introduzidas no controlador e são comparadas com os valores de frequência e tensão elétrica desejada. Para o caso que seja preciso aumentar ou diminuir a frequência ou tensão elétrica um sinal será emitido à válvula proporcional pilotada por solenóide o qual ativará a válvula distribuidora e comandará o atuador hidráulico para aumentar ou diminuir o ingresso de água na turbina e conseqüentemente restabelecer a velocidade da turbina.

Como, por exemplo, o regulador de velocidade RVX300 recebe sinais lógicos de comando e controle, informações de frequência, potência, posição do distribuidor, (e das pás, caso seja do tipo Kaplan) gerando um sinal analógico de controle que, amplificado, comanda as válvulas proporcionais, que acionam as válvulas distribuidoras e os servomotores da turbina.

De acordo com as necessidades, como indica na Figura 2.7 o regulador pode possuir duas CPUs uma principal e outra de retaguarda como é mostrada aumentando a confiabilidade. A comutação de principal para retaguarda é automática, caso ocorra falha na CPU principal, falha na fonte de alimentação ou

perda do sinal de frequência da máquina.

Figura 2.7 Regulador de velocidade RVX 300 (REIVAX, 2010)

Além disso, o regulador RVX300 (IHM) permite ao usuário acessar e alterar os parâmetros do regulador acompanhando, através de registros gráficos coloridos de alta resolução, o desempenho da máquina como é mostrado na Figura 2.8. A Interface Homem-Máquina (IHM) faz a supervisão e o controle local ou remoto de toda a unidade geradora, dispensando a interface convencional com chaves e indicadores.

Figura 2.8 Interface homem - máquina (REIVAX, 2010)

2.3.2 Sistemas Eletro-Hidráulicos para controle de posição

Os sistemas hidráulicos encontram aplicação em praticamente todos os ramos de engenharia: maquinarias agrícolas, hidráulica industrial, em aplicações navais, aeronáutica, geração de energia elétrica entre outras; isso ocorre devido a algumas vantagens, como a versatilidade de sua configuração, precisão no controle de dispositivos mecânicos pesados e os sistemas hidráulicos podem ser comandados por sinais com baixo consumo de energia (PORCIÚNCULA et al, 2006; LINSINGEN, 2008).

Quando se faz necessário movimentar grandes massas ou realizar grandes esforços, os sistemas eletro-hidráulicos combinam as vantagens próprias dos circuitos hidráulicos, quais sejam, capacidade, pequena inércia e rápida resposta com o pequeno erro e versatilidade na medição, transmissão e processamento dos sinais elétricos (DE NEGRI, 2001; LINSINGEN, 2008).

Os mecanismos de natureza eletro-hidráulicos são comandados por sinais de baixo consumo de energia e controlam com precisão os movimentos de cilindros e motores hidráulicos de mecânica pesada. Além disso, possuem enorme versatilidade devido a uma variedade de configurações, sobretudo no processamento de sinais, que pode ser projetado para a obtenção da atuação hidráulica desejada. Na Figura 2.9 pode ser visto um diagrama típico de um sistema de controle de posição eletro-hidráulico que se pode empregar em reguladores de velocidade.

O sistema hidráulico do regulador de velocidade é constituído pelos seguintes componentes conforme indicado na Figura 2.9: Reservatório de óleo, Filtro, Motor, Bomba, Válvula de alívio, Válvula proporcional, Válvula distribuidora e Atuadores, também chamados servomotores. Todos os equipamentos estão interligados por tubulações rígidas e mangueiras.

No sistema acima, a razão de se utilizar uma válvula proporcional em conjunto com a válvula distribuidora é pela limitação da força que o solenóide é capaz de suportar enquanto este tipo de válvula está aberta totalmente. Para movimentar os atuadores hidráulicos dos reguladores de velocidade nas hidroelétricas, é necessário grandes vazões e um solenóide não é capaz de vencer as forças de escoamento do carretel causadas pelo escoamento nas câmaras das válvulas, por esse motivo é usada uma válvula proporcional pilotada por solenóide acoplada a uma válvula distribuidora (DE NEGRI, 2001)

Figura 2.9: Diagrama do Sistema Hidráulico do regulador de velocidade (adaptação de PORCIÚNCULA et al, 2001 e DE NEGRI, 2001).

De acordo com Porciúncula et al (2006), a posição desejada para o cilindro é estabelecida pela tensão de referência (U^{Z1}) que, através do controlador, gera uma tensão de comando (U^{V1}) na válvula direcional proporcional, produzindo o deslocamento do carretel. Isso provocar um fluxo através da válvula que promove uma variação de pressão na câmara do cilindro, resultando no movimento da massa (M) que é medida através do sensor de posição ($S1$) produzindo uma tensão (U^{S1}). Esta tensão (U^{S1}), com um sinal oposto ao da tensão de referência (U^{Z1}), fornece uma realimentação sobre a posição. Ao alcançar a posição desejada, vai-se anular a tensão de comando da válvula (U^{V1}) indicando que a posição da haste (X^{A1})

corresponde exatamente à posição desejada.

Os atuadores hidráulicos ou servomotores são empregados para o deslocamento da agulha do injetor e do defletor das turbinas Pelton, também podem ser utilizados para o deslocamento do distribuidor em turbinas de reação. No caso da turbina Kaplan também são utilizados para o movimento das pás do rotor Kaplan.

Servomotores se adéquam a cada aplicação, dependendo do tipo de turbina e características especiais de cada máquina. O atuador vem com transdutor de posição integrado, assim o regulador faz seu controle de posição através de válvula proporcional. Para potências não muito grandes ($P \leq 10.000 \text{ kW}$) podem se empregar somente um servomotor de duplo efeito, como mostrado na Figura 2.10 (a), entretanto, para turbinas de médio e grande porte ($P > 10.000 \text{ kW}$), utilizam-se dois servomotores de duplo efeito como é mostrado na Figura 2.10 (b).

Figura 2.10 (a) deslocamento do distribuidor por um distribuidor; (b) deslocamento do distribuidor com dois distribuidores (DÍEZ, 1996; ANDIA, 2005)

2.3.3 O distribuidor

O distribuidor é utilizado nas turbinas de reação e tem como objetivo conduzir a água em direção às pás do rotor regulando a vazão e modificando, desta forma, a potência da turbina, ajustando-se as possíveis variações de carga na rede (DÍEZ, 1996; ANDIA, 2005). O distribuidor é constituído de um conjunto de pás diretrizes

(direcionais) móveis dispostas ao redor do rotor, as quais giram simultaneamente com mesmo ângulo, possibilitando a passagem da descarga requerida ou interrompendo-a quando necessário. Para cada valor de descarga, o ângulo das pás diretrizes mais conveniente de entrada de água no rotor é o que gera um escoamento com mínima perda hidráulica.

O anel que comanda as bielas das pás, chamado anel de regularização, é comandado por um eixo graças às bielas que lhe permitem efetuar um movimento de rotação de pequena amplitude. Esse mecanismo foi proposto por Fink (Figura 2.11). O anel recebe o comando para a regulagem do fluxo de água de alimentação transmitido pelos servomotores colocados no plano do anel de regulação, que provocarão o movimento do anel movendo as pás para a abertura ou ângulo desejado (YESID, 2006).

Figura 2.11: Sistema mecânico do distribuidor Fink (ANDIA, 2008)

A Figura 2.11 apresenta os componentes que formam parte do sistema mecânico do distribuidor: 1 – anel inferior onde são montadas as pás; 2 – pás direcionais encaixadas entre os anéis inferior e superior; 3 – anel superior; 4 – manivela soldada às pás; 5 – bielas ajustáveis ligadas em uma extremidade às manivelas e na outra ao anel distribuidor; 6 – anel de regulação, responsável pela rotação e movimento simultâneo de todas as pás direcionais do distribuidor na mesma proporção (MAZZORANA, 2008).

2.4 Evolução dos reguladores de velocidade

A utilização de reguladores de velocidade teve início no século XVIII por meio de James Watt, que desenvolveu um controlador centrífugo de velocidade em uma máquina a vapor, conforme a Figura 2.12. O regulador de Watt é um dos dispositivos mecânicos mais importantes devido ao seu papel nos primórdios do desenvolvimento da teoria de controle (ANDIA, 2005). O sucesso do regulador de Watt deve-se à combinação de simplicidade e eficiência do dispositivo, associada aos novos desenvolvimentos tecnológicos na área de máquinas a vapor, conferindo ao evento uma enorme aplicabilidade na época. De fato, o regulador de Watt foi utilizado na indústria em praticamente todas as formas de máquinas rotativas que necessitavam de constância na velocidade de operação.

Figura 2.12: Regulador de Watt para controle de máquinas a vapor (ANDIA, 2005).

No final do século retrasado, a utilização deste sistema para controle de velocidade de turbinas hidráulicas resultou no desenvolvimento dos primeiros reguladores de velocidade. A exigência de esforços de manobra de maior porte do que aqueles exigidos pelas máquinas a vapor resultou na implementação de sistemas hidráulicos capazes de controlar máquinas hidráulicas atuando diretamente sobre o servomotor de comandos das mesmas.

Os desenvolvimentos posteriores a estes reguladores de velocidade resumiram-se à implementação de mecanismos de estabilização e acessórios, tais como, acumuladores, dispositivos de segurança, etc.

Segundo Jiang (1995), Izena (2006) e De Negri (2001), no final dos anos 40 iniciou-se um novo ciclo, desenvolvimento que resultou nos reguladores hidráulicos. Nesta fase, o regulador foi dividido em partes distintas, tais como o elemento sensor de rotação, o elemento amplificador e a válvula de regulação. O surgimento de máquinas de maior porte, assim como a necessidade de comando e a sinalização à distância, exigiu dos fabricantes novas soluções tais como o motor elétrico para acionamento do pêndulo centrífugo e a utilização de motores para atuação sobre os componentes do regulador.

No início dos anos 50 surgiram os primeiros reguladores eletrônicos de velocidade, inicialmente utilizando válvulas, que posteriormente foram substituídas por circuitos impressos e amplificadores operacionais. Na área hidráulica desenvolveram-se os primeiros transdutores eletro-hidráulicos, possibilitando a transmissão do sinal de atuação através de comandos elétricos.

A partir da década de sessenta, devido ao desenvolvimento dos computadores digitais, tornou-se possível o desenvolvimento de sistemas de controle no domínio do tempo que proporcionaram aos sistemas complexos controles cada vez mais precisos e seguros.

No final dos anos 80, surgiu a atual família de reguladores digitais, baseada em controladores lógicos programáveis. A principal mudança em relação aos modelos anteriores está associada ao fato de que nestes reguladores a função de controle está armazenada na memória do PLC (Controlador Lógico Programável) (JIN JANG, 1995).

2.4.1 Relação dos tipos de turbinas com os reguladores

2.4.1.1 Regulação das turbinas Pelton

No caso da regulação das turbinas Pelton (Figura 2.13), a ação do regulador é feita sobre a válvula da agulha do injetor e também no defletor. Em tais circunstâncias, estas turbinas dispõem da denominada dupla regulação, que estabelece uma exata correspondência entre a posição da válvula da agulha e o defletor.

Caso a carga proporcional do grupo diminua bruscamente ou ocorra uma falha na turbina, o defletor intervém, desviando parte do jato em direção ao exterior do rotor; posteriormente, e de forma lenta, se realiza a aproximação da agulha em direção à boca do injetor, com o que se evita efeitos prejudiciais ocasionados pela possível presença do golpe de aríete, especialmente se as tubulações forçadas forem de grande diâmetro, caso mais provável, por tratar-se da alimentação da turbinas Pelton.

Ao aumentar a potência solicitada da usina, o defletor se afasta do jato de água e, ao mesmo tempo, a agulha se separa do orifício da agulheta, permitindo maior vazão de água em direção à turbina (ANDIA, 2005).

Figura 2.13: Sistema de Regulação da Turbina Pelton (DIEZ, 1996).

2.4.1.2 Regulação das turbinas Francis

No caso das turbinas Francis, o controle de vazão ocorre geralmente pela atuação dos servomotores que movimentam o anel do distribuidor. O distribuidor é um anel de pás ajustáveis que envolvem o rotor da turbina. Para alterar a velocidade angular da turbina é necessário modificar o ângulo das pás do distribuidor para 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, de acordo com a Figura 2.14.

Após a passagem da água pelo distribuidor, esta impacta diretamente com as pás do rotor, onde a potência hidráulica é transformada em potência mecânica (YESID, 2006).

Figura 2.14: Sistema de Regulação da Turbina Francis (MAZZORANA, 2008)

2.4.1.3 Regulação das turbinas Kaplan

Nas turbinas Kaplan dispõem de um sistema de regulação mais complexa, já que, temos dois sistemas de controle: um que controla o ângulo das pás do distribuidor à entrada da turbina (tem o mesmo princípio de funcionamento do sistema de regulação da turbinas Francis) e no outro sistema de controle existe um servomotor interno ao eixo da turbina responsável pela variação do ângulo das pás do rotor, conforme a Figura 2.15 (ANDIA, 2005; DE NEGRI, 2001).

Notação	Componente
S	Servomotor
1V1	Válvula proporcional
1V2	Válvula distribuidora
R	Rotor

Figura 2.15: Sistema de Regulação da Turbina Kaplan (DE NEGRI, 2001; ANDIA, 2010)

3 CONFIABILIDADE E MANUTENÇÃO

3.1 Confiabilidade

O estudo da Engenharia da Confiabilidade teve seu início nos meados da 2ª Guerra Mundial. Em função do desenvolvimento de armamentos de maior complexidade, a indústria bélica passou a necessitar de meios que permitissem estimar a vida ou mesmo a probabilidade de um equipamento operar com sucesso. (SOUZA, 2008).

Depois do final da 2ª Guerra, com o desenvolvimento da energia nuclear, foi possível sua utilização para a geração de energia elétrica. A confiabilidade começou a ser aplicada na redução da probabilidade de falha de sistemas cuja consequência seria a ocorrência de vazamentos de material radioativo, e no projeto do sistema de controle de uma usina nuclear. A indústria nuclear segue utilizando os conceitos de confiabilidade em todas as etapas de desenvolvimento do projeto.

Na década de 70, o estudo da confiabilidade seguiu em três frentes: segurança, no caso de sistemas que envolviam grandes riscos como usinas nucleares, confiabilidade de programas (*software*) e em contratos de garantia de produtos.

A seguir são apresentadas algumas entidades e suas definições para o termo confiabilidade, a saber, retiradas de Leitch (1995):

European Organization for Quality Control (1965): “É a medida da capacidade de um produto funcionar corretamente por um período de tempo e em ambiente definido e é avaliada como uma probabilidade”.

US Military Handbook (1970): “A probabilidade em que um item irá executar sua função sob determinadas condições e durante um determinado período de tempo”.

UK Ministry of Defense (1970): “A aptidão de um item em executar, ou ser capaz de executar, uma determinada função sob determinadas condições sem falhar por um período de tempo estabelecido ou de operação; é também expressa como uma probabilidade”.

Blanchard e Fabrick (1990) definem confiabilidade enfatizando quatro elementos como probabilidade, desempenho satisfatório, tempo e condições de operações especificadas: “probabilidade que um sistema ou produto desempenhará a função de uma maneira satisfatória por um dado período de tempo, quando usado sob condições operacionais especificadas”.

Na norma brasileira NBR 5462 (ABNT, 1994), a confiabilidade é definida como a “capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um intervalo de tempo”.

Os pontos em comum entre as definições acima são:

- O desempenho específico é esperado;
- As condições de utilização são determinadas;
- O período pré-definido de utilização;
- Grandeza estatística.

Para a análise de engenharia é necessário definir a confiabilidade como uma probabilidade. Assim, uma definição possível é de que a confiabilidade é a probabilidade de um produto, sistema, máquina ou equipamento operar sem falha por um período de tempo determinado (SOUZA, 2003).

Uma falha de um produto ou sistema ocorre quando este pára de realizar a função desejada. A norma NBR 5462 (ABNT, 1994) define a falha como o “término da capacidade de um item desempenhar a função requerida”. Após a falha, conforme a norma, o item entra em quebra que é definida como o “estado de um item caracterizado pela incapacidade de desempenhar uma função requerida, excluindo a incapacidade durante a manutenção preventiva ou outras ações

planejadas, ou pela falta de recursos externos”.

Outra forma de conceituar confiabilidade é: “a probabilidade de que um sistema ou equipamento sobreviva por um período de tempo específico” (O’CONOR, 1985).

Definindo-se o tempo T até ocorrer a falha como uma variável aleatória, pode-se definir sua correspondente função densidade de probabilidade $f(t)$ como sendo:

$$f(t) \cdot \Delta t = P\{t < T < t + \Delta t\} \quad (3.1)$$

Sendo $F(t)$ a função probabilidade acumulada, tem-se que:

$$F(t) = P(T < t) \quad (3.2)$$

ou seja, $F(t)$ expressa a probabilidade de a falha ocorrer até um tempo t , enquanto $f(t)$ representa a função densidade de probabilidade da falha.

$F(t)$ é crescente no tempo, atingindo o valor unitário quando t tende a infinito, como mostra a Figura 3.1 (LEITCH, 1995).

Figura 3.1: Função de Probabilidade Acumulada $F(t)$ (LEITCH, 1995)

Sob o ponto de vista da lógica de sua operação, um componente ou equipamento ou está operando adequadamente, conforme previsto no projeto, ou está no estado de falha, mostrando assim que são eventos mutuamente excludentes. A confiabilidade pode ser expressa pela relação (LEITCH, 1995):

$$R(t) = P(T > t) \quad (3.3)$$

e

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (3.4)$$

A função confiabilidade está mostrada na Figura 3.2.

Figura 3.2 Função de Confiabilidade $R(t)$ (LEITCH, 1995)

Como decorrência desta definição, tem-se que:

$$R(0) = 1 \quad (3.5)$$

$$R(\infty) = 0 \quad (3.6)$$

A partir do gráfico apresentado na Figura 3.2, pode-se observar que a confiabilidade de um sistema decai com o tempo, e quanto maior é o tempo de operação, maior será a probabilidade deste apresentar falha. Portanto, apenas no instante em que o equipamento é colocado em operação sua confiabilidade é de 100%. Adicionalmente, pode-se afirmar que a confiabilidade não é restaurada, ou seja, não dá saltos ao longo da vida operacional.

O comportamento de determinado produto com relação à falha é bem mais compreendido pelo exame do comportamento de sua taxa de falha $\lambda(t)$. Esta taxa de falha, $\lambda(t)$, pode ser definida como sendo a probabilidade de que, tendo o equipamento trabalhado sem falha até o ciclo $t-1$, apresente falha no ciclo t . Também pode ser definida como se segue.

Sendo $\lambda(t)\Delta t$ a probabilidade de que o sistema falhará em um tempo $T < t + \Delta t$, dado que ainda não falhou até o tempo $T = t$, tem-se que $\lambda(t)\Delta t$ é a probabilidade condicional:

$$\lambda(t)\Delta t = P(T < t + \Delta t | T > t) \quad (3.7)$$

Assim, com base na definição de probabilidade condicional, tem-se:

$$P(T < t + \Delta t | T > t) = \frac{P\{(T > t) \cap (T < t + \Delta t)\}}{P(T > t)} \quad (3.8)$$

Como o numerador da equação 3.8 é a própria $f(t)$, e o denominador é a $R(t)$, a taxa de falhas instantânea é expressa por:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (3.9)$$

O comportamento da taxa de falha $\lambda(t)$ ao longo do tempo t é indicador das causas da falha. A curva da banheira, mostrada na Figura 3.3, representa graficamente esta relação para um sistema sem redundância.

Figura 3.3: Representação da Curva da Banheira (SELUTTO, 2005)

Nessa curva, no primeiro intervalo a taxa de falha é alta e decresce a partir de $t=0$, esta região é conhecida como fase de mortalidade infantil, nesta etapa pode-se representar problemas de manufatura, montagem ou mesmo com material empregado na fabricação do componente. No segundo intervalo, encontra-se o período de falha aleatória, onde a taxa de falha é constante, e onde os componentes eletrônicos são um típico exemplo deste comportamento. No ultimo intervalo, conhecido como fase de mortalidade senil, a taxa de falha cresce por causa do envelhecimento, é onde os fenômenos como o desgaste e a fadiga, entre outros, começam a ser relevantes no desempenho do equipamento (LEWIS, 1987; SOUZA, 2008).

3.1.1 Confiabilidade de Sistema

Define-se sistemas como um conjunto de partes operando interligadas de uma forma lógica e seqüencial visando cumprir uma seqüência de tarefas pré-definidas (SUNDARARAJAN, 1991).

Entre os principais métodos de análise de confiabilidade de sistemas, encontram-se (SOUZA; MOLINARI, 2008):

- Diagramas de Blocos;
- Análise de Modos e Efeitos de Falhas (FMEA);
- Análise de Árvore de Falhas (FTA).

Cada um destes métodos tem vantagens e desvantagens na sua aplicação, e estas devem ser consideradas na seleção da aplicação do método de acordo com o sistema em análise.

3.1.1.1 Método dos Diagramas de Blocos

No diagrama de blocos cada componente é representado por um bloco. Algumas vezes existem blocos que representam diferentes modos de falha de um mesmo componente, ou ainda, um bloco que representa um sistema ou subsistema.

Basicamente existem duas configurações: em série e em paralelo. Ambas as configurações estão representadas na Figura 3.4.

Figura 3.4: Representação de blocos em série e em paralelo (O'CONNOR, 1985)

As configurações em série consistem de dois ou mais componentes conectados em seqüência. Quando se empregam componentes em série, deve-se atentar para dois problemas (SOUZA; MOLINARI, 2008):

- a) A falha de apenas um componente é suficiente para parar a operação do sistema;
- b) O número de componentes tem efeito negativo na confiabilidade do sistema ($R_i(t)$), ou seja o aumento do número de componentes causa um decréscimo na confiabilidade do sistema.

Considerando que as causas de falha dos componentes em série são independentes, é possível calcular a confiabilidade do sistema $R_s(t)$ como um produto das confiabilidades de cada componente (O'CONNOR, 1985).

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (3.9)$$

Onde $R_i(t)$ é o valor da confiabilidade do i-ésimo componente.

As configurações em paralelo consistem em dois ou mais componentes

dispostos paralelamente, ou seja, com capacidade para executar a mesma função. Utiliza-se um sistema em paralelo com o objetivo de aumentar a confiabilidade do sistema como está mostrado na Figura 3.5. A grandeza da contribuição dos sistemas em paralelo é justamente assegurar a operação do sistema pela presença de várias unidades capazes de realizar a mesma tarefa.

Figura 3.5: Gráfico Comparativo da Evolução da Confiabilidade para Componentes e no Modo paralelo ativo (SOUZA, 2008).

Dentro dos sistemas das configurações em paralelo existem dois tipos de redundâncias: ativa e passiva.

Na redundância ativa todos os componentes estão operando, prontos para processar a informação, embora a informação possa ser processada em qualquer um deles, não sabendo-se, à priori qual componente irá processá-la. A expressão geral da confiabilidade para sistemas em paralelo é, (O'CONNOR, 1985):

$$R_S(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (3.10)$$

Na redundância passiva (operação reserva ou *standby*), o elemento passivo só passa a ser operacional quando ocorre a falha do componente principal, como indicado na Figura 3.6. Para este tipo de configuração é necessário um sistema de comando e controle que identifica a falha e aciona o componente redundante.

Figura 3.6: Sistema em Paralelo Passivo (SUNDARARAJAN, 1991)

3.1.1.2 Método da Análise de Modos e Efeitos de Falhas – FMEA

O Método de Análise de Modos e Efeitos de Falhas (FMEA - *Failure Mode and Effects Analysis*) teve origem no meio militar, sendo freqüentemente referenciada na norma MIL-STD 1629A (1977), pioneira na divulgação dos conceitos da análise dos modos de falha. A análise do tipo FMEA é definido como um procedimento pelo qual cada modo de falha potencial em um sistema é analisado para determinar os resultados ou efeitos no sistema da sua ocorrência possibilitando classificar cada modo de falha potencial de acordo com sua severidade (SOUZA, 2008; O'CONNOR, 1985).

Segundo Cassanelli (2006), o FMEA é conhecido por ser um procedimento sistemático para a análise de um sistema para identificar os possíveis modos de falha, suas causas e efeitos sobre o desempenho do sistema.

Para utilizar a análise do tipo FMEA, sugere-se dividir o sistema complexo em vários níveis. Estes sistemas seriam compostos por subsistemas os quais poderiam ir sendo divididos até chegar à menor unidade substituível denominada componente (HAWKINS e WOLLONS, 1998). A análise do tipo FMEA se inicia com a análise dos modos de falha de cada um destes componentes.

Durante uma Análise de Modos e Efeitos de Falha, as seguintes perguntas mostradas abaixo são respondidas para cada um dos componentes do sistema (SUNDARARAJAN, 1991):

- Como pode falhar o componente (quais são seus modos de falha)?
- Quais são os efeitos destas falhas sobre o sistema?
- Quão críticos são estes efeitos?
- Como detectar a falha?
- Quais as medidas contra estas falhas (evitar, prevenir a ocorrência das mesmas ou minimizar seus efeitos)?

Ao responder a estas perguntas, identificam-se todos os modos de falha de todos os componentes, a possibilidade da detecção de seu desenvolvimento e possuir proteção contra sua ocorrência são registradas, e seus efeitos no sistema são determinados.

Os modos de falha, de acordo com Vinadé (2001), podem ser definidos como a maneira na qual o defeito se apresenta ou a maneira como o item falha ou deixa de apresentar o resultado desejado ou esperado.

Os efeitos são as conseqüências e podem ser facilmente confundidos com os modos de falha. Para evitar esta confusão, antes de dar início ao FMEA, recomenda-se saber o que realmente deseja-se evitar: defeito no sistema, no componente ou no item interno. A expressão “o que” representa o efeito, enquanto a pergunta “como surge o efeito?” é o modo de falha. No entanto, esta estratégia deve ter um ponto limite, onde as descrições de “como surge o efeito” possam ser controladas.

O FMEA é utilizado com os seguintes objetivos (SUNDARARAJAN, 1991):

- Assegurar que todos os modos de falha e seus efeitos sejam entendidos;
- Auxiliar na identificação dos pontos fracos do desenho;
- Fornecer uma base para a seleção de alternativas do desenho durante as primeiras etapas do desenho;
- Fornecer uma base para recomendar melhoras no desenho;

- Fornecer uma base para as prioridades de ações corretivas;
- Auxiliar na resolução de problemas operacionais com os sistemas existentes.

Para cada componente do sistema é elaborada uma tabela informando dados de controle e descrevendo sua funcionalidade. Para cada um dos componentes e modos de falha são relacionados dados de controle, descrições, em que fases ou modo de operação a falha ocorre, causas, efeitos, como detectar, como reparar, como prevenir, severidade, sua frequência de ocorrência e comentários (observações) relevantes, conforme mostrado na Tabela 3.1. Os pontos descritos nesta tabela são bastante precisos, e na penúltima coluna pode-se observar a severidade.

Tabela 3.1 Tabela de Contendo Informações para elaboração da FMEA (CARAZAS, 2006)

Nº de identificação	Nomenclatura	Função	Causas / Modos de falha	Fase / Modo da operação	Efeitos			Método de detecção da falha	Medidas preventivas / corretivas	Severidade	Observações
					Locais	Próximo Nível	Níveis finais				

A norma MIL-STD-1629A (1977), classifica a severidade nas seguintes categorias:

- Catastrófica: falhas que podem causar danos fatais ou mortais;
- Crítica: falha que danifica completamente o sistema;
- Marginal: falha leve que degrada o sistema;
- Menor ou desprezível: falha que não causa ferimentos ou degradação no desempenho do sistema.

A Norma ISO 9000, também é usada para a classificação de severidades, como indicado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 Classificação de severidade conforme a norma iso 9000 (SOUZA, 2008)

1	Sem efeito	Nenhum efeito no produto ou processos subsequentes
2	Efeito muito leve	O cliente mais provavelmente não observa a falha. Efeito muito ligeiro ou no desempenho do produto / processo. Falha não vital observada às vezes
3	Efeito leve	Cliente ligeiramente irritado. Efeito menor no desempenho do produto / processo. Falha não vital observada na maioria das vezes
4	Efeito menor	Cliente sente o menor incômodo. Efeito moderado no desempenho do produto / processo. A falha não vital observou-se sempre.
5	Efeito moderado	O cliente sente algum descontentamento. Efeito moderado no desempenho do produto / processo. A falha na parte não vital requer o reparo
6	Efeito significativo	O cliente sente o desconforto. O desempenho do produto / processo degradou, mas operável e seguro. Peça não vital inoperável.
7	Efeito maior	Cliente descontente. Efeito no processo; retrabalho / reparo na parte necessária. Desempenho do produto / processo afetado severamente, mas, funciona e é seguro. Subsistema inoperante
8	Efeito extremo	O cliente muito descontente. Efeito extremo no processo; o equipamento danificou. Produto inoperável, mas, seguro. Sistema inoperável
9	Efeito sério	Efeito potencial perigoso. Capaz de parar o produto sem acidente; segurança relacionada; falha dependente do tempo. Rompimento às operações do processo subsequente. O cumprimento com regulamento do governo está sob risco.
10	Efeito perigoso	Efeito perigoso. Segurança relacionada, falha repentina. Sem cumprimento com regulamento do governo.

3.1.1.3 Método da Análise de Árvores de Falhas - FTA

A análise de Árvore de Falhas (FTA - *Fault Tree Analysis*) foi introduzida em 1962 e tornou-se uma das principais técnicas para avaliação da confiabilidade de sistemas, sendo largamente aplicada em diversos setores industriais onde a confiabilidade dos sistemas envolvidos é de fundamental importância para operação segura e eficiente dos mesmos. Foi concebida inicialmente por *Bell Telephone*

Laboratories para a avaliação de confiabilidade do sistema de controle de lançamento do míssil Minuteman. (RAUSAND e ARNLJOT, 2004).

A análise do tipo FTA é basicamente um método dedutivo que visa identificar as causas ou combinação de causas que possam levar ao evento topo definido. A análise é basicamente qualitativa, porém, dependendo das condições, pode também ser quantitativa.

Determinar a origem do problema corresponde à parte qualitativa da análise. A FTA permite calcular a probabilidade de ocorrência do evento falha denominada evento terminal, a partir dos vários eventos iniciais, desde que seja conhecida a probabilidade de falha de cada um dos componentes candidatos a causar o evento terminal.

Os principais passos para a construção de uma análise do tipo FTA são:

- Definir o sistema, o evento topo (o acidente potencial), e as condições limites;
- Construção da árvore de falhas;
- Identificação dos conjuntos de cortes mínimos (*Cut sets*);
- Análise qualitativa da árvore de falhas;
- Análise quantitativa da árvore de falhas;
- Registro dos resultados.

Para a construção de um FTA são usados símbolos padronizados para descrever eventos, conexões lógicas e símbolos de transferência. Eles são mostrados na Figura 3.7, 3.8 e 3.9 (O'CONNOR, 1985; BROOKE e PAIGE, 2003).

Símbolo	Significado
O círculo representa um evento base na árvore. Eles se encontram nos níveis inferiores da árvore e não requerem mais desenvolvimento ou divisões. Não há portas ou eventos abaixo do evento base.
O diamante identifica um evento terminal sem desenvolver. Tão evento não é completamente desenvolvido devido a uma falta de informação.
O retângulo é o principal componente básico da árvore. Representa o evento negativo e se localiza no ponto superior da árvore e pode localizar-se por toda a árvore para indicar outros eventos que podem dividir-se mais. Este é o único símbolo que terá abaixo uma porta lógica e eventos de entrada.
Este símbolo representa uma situação especial que pode ocorrer somente se ocorrem certas circunstâncias. Isso se explica adentro do símbolo.

Figura 3.7 Símbolos dos eventos do FTA (O'CONNOR, 1985; BROOKE e PAIGE, 2003).

Símbolo	Nome	Significado
E	Evento de saída só ocorre se todos os eventos de entrada ocorrem simultaneamente.
OU	Evento de saída só ocorrerá se somente um ou qualquer combinação dos eventos de entrada ocorre
E de prioridade	Evento de entrada só conduz ao evento de saída se o condicional ocorrer
OU exclusiva	Evento de saída ocorre se os eventos de entrada ocorrer na ordem de esquerda para direita
Inibição condicional	Evento de saída ocorre se só um evento de entrada ocorrer

Figura 3.8 Conectores lógicos do FTA (O'CONNOR, 1985; BROOKE e PAIGE, 2003).

Símbolo	Significado
<div>Para fora</div> <div>Para dentro</div>	<p>Uma linha a partir do vértice do triângulo indica a transferência de entrada, e uma linha do lado denota uma transferência para fora</p>

Figura 3.9 Símbolos de transferência do FTA (O'CONNOR, 1985; BROOKE E PAIGE, 2003).

Uma árvore de falhas é uma representação gráfica organizada das condições que contribuem para ocorrência de falhas de um evento definido, chamado de evento topo. Uma típica árvore de falhas consiste de um evento topo, eventos básicos e portas lógicas. A Figura 3.7 ilustra a estrutura de uma árvore de falhas com componentes típicos. O evento topo representa uma condição indesejável do sistema, os eventos básicos representam os estados dos componentes do sistema, e as portas lógicas descrevem o comportamento entre os eventos básicos e o evento topo. Quando se tem uma porta lógica “E”, para que ocorra um evento topo, todos os eventos básicos têm que acontecer simultaneamente. A porta lógica “OU”, para que ocorra um evento topo, só é necessária quando ocorre um evento básico (RAUSAND e ARNLJOT, 2004).

Figura 3.10: Exemplo de FTA (RAUSAND e ARNLJOT, 2004).

A análise da Figura 3.10 possibilita verificar quão rápida e precisa pode ser a identificação da causa da falha no sistema com o emprego da Árvore de Falhas. Como pode-se observar na árvore de falhas, o evento topo é: sem água do sistema de bomba de incêndio. Os eventos básicos são: válvula bloqueada ou falha ao abrir, falha na bomba 1, falha na bomba 2, falha do motor 1 e, por ultimo, falha no motor 2. Observando a árvore de falha o componente mais crítico é a válvula, porque se a válvula está bloqueada ou falha ao abrir, o sistema ficaria sem água. No caso das bombas e motores deve acontecer uma falha simultânea dos dois sistemas de bombeamento para que o sistema fique sem água.

O FTA também possibilita elaborar procedimentos de diagnose de falhas como o “*troubleshooting*”, o qual é um procedimento para a rápida diagnose do sistema, determinação do componente onde a falha se originou, as causas da falha e correção do problema (SOUZA, 2008).

3.2 Manutenção

A manutenção pode ser definida como um conjunto de conhecimentos, técnicas e habilidades cuja aplicação tem por objetivo único garantir a funcionalidade dos sistemas ao longo da vida útil planejada.

Do ponto de vista da confiabilidade, existem três práticas básicas de manutenção: manutenção corretiva, manutenção preventiva e manutenção preditiva (SOUZA, 2008).

3.2.1 Manutenção corretiva

A lógica do gerenciamento em manutenção corretiva é simples e direta: quando uma máquina quebrar, conserte-a.

A manutenção corretiva, segundo a norma NBR 5462 (ABNT, 1994), é a manutenção efetuada após a ocorrência de uma pane sendo destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida.

Na grande maioria das vezes, as atividades de manutenção corretiva são as que mais sobrecarregam as atividades de manutenção, pois provocam perda de produção, aquisição de peças de reposição em caráter de urgência, horas extras, e muitas vezes um tempo maior de execução do que uma atividade de manutenção preventiva, pois a diagnose tende a ser mais demorada. Uma das contribuições da manutenção corretiva foi fornecer dados históricos para o acompanhamento dos sistemas e futuras tomadas de decisão.

No caso da manutenção corretiva, a máquina é desmontada e inspecionada para determinar os reparos necessários para retornar a máquina em serviço. Se as peças de reparo não estiverem no estoque, elas devem ser encomendadas. Mesmo quando as peças já estão no estoque da planta industrial, o pessoal de manutenção deve desmontar a máquina para localizar a fonte do problema ou problemas que ocasionaram a falha. Admitindo que eles identifiquem corretamente o problema, o tempo e o custo requerido para desmontar, reparar, e remontar a máquina seria, pelo menos, maior do que teria sido requerido por um reparo planejado (DUARTE, 2007).

Do ponto de vista da confiabilidade, existem componentes ou sistemas que simplesmente não aceitam manutenções preventivas ou preditivas, pois apresentam

falhas aleatórias e que não possuem o tempo de desenvolvimento da falhas (TDF); conseqüentemente, não apresentam sintomas como, por exemplo, os componentes eletrônicos, tais como os capacitores, que não avisam quando a falha vai acontecer, eles simplesmente queimam e deixam de funcionar (CARAZAS, 2006).

3.2.2 Manutenção preventiva

O surgimento e aplicação da manutenção preventiva (MP) aconteceram na década de 50. Após diversos refinamentos, o seu uso perdura até nossos dias. Como estratégia da manutenção, a MP é baseada em revisões, inspeções, trocas e ajustes, realizados a certas frequências, sob os diferentes equipamentos de um processo produtivo, com o fim de assegurar sua condição operativa adequada, minimizando o risco de ocorrências de corretivos de emergência (MONTILLA *et al*, 2007).

A manutenção preventiva, segundo a norma NBR 5462 (ABNT, 1994), é a manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item.

A prática de manutenção preventiva é de interesse para a ciência da confiabilidade porque permite manter a menor degradação possível da confiabilidade ao longo da vida operacional de um componente.

Considere a situação do gráfico da Figura 3.11, onde o sistema opera de forma constante até o instante T no intervalo $[0, T]$. Neste instante, é feita uma intervenção preventiva. Supondo que a manutenção retorne o sistema à condição de “novo” no intervalo $[T, 2T]$ (lembrar que a manutenção preventiva é executada a intervalos fixos) a confiabilidade neste novo intervalo será, segundo Lewis (1987):

$$R_m(t) = R(t) \cdot R(t - T) \Rightarrow T \leq t \leq 2T \quad (3.11)$$

Onde $R_m(t)$ é a confiabilidade do sistema após a manutenção preventiva.

Figura 3.11: Efeito da Manutenção Preventiva sob a Confiabilidade (LEWIS, 1987)

A Figura 3.11, mostra que a confiabilidade não se restaura. A curva da confiabilidade, após a ação da manutenção, apenas se torna idêntica àquela do instante inicial referente ao início da vida operacional do equipamento ou sistema.

A manutenção preventiva não pode ser aplicada a todos os tipos de maquinaria. Deve ser aplicada a equipamentos que têm taxa de falha crescente com o uso. Adota-se a distribuição Weibull que é útil em uma variedade de aplicações, particularmente, para o modelo da vida de dispositivos. A distribuição de Weibull assume uma variedade muito grande de formas e por isso é bastante flexível, podendo ser empregada para diversos tipos de dados. A distribuição de Weibull pode ser representada por dois parâmetros:

- β : parâmetro de forma
- η : parâmetro de escala

A função confiabilidade é dada por:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (3.12)$$

Pela variação do parâmetro β da distribuição de Weibull, pode-se representar a confiabilidade de componentes com taxa de falha crescente, constante, ou decrescente. Segundo Lewis (1987), β tem o seguinte significado:

- $\beta < 1$ A taxa de falha é decrescente
- $\beta > 1$ A taxa de falha é crescente
- $\beta = 1$ A taxa de falha constante

Figura 3.12: Efeito da Manutenção Preventiva na Confiabilidade (Lewis, 1987)

Na Figura 3.12 observa-se que quando $\beta < 1$ a manutenção preventiva prejudica o componente, fazendo com que o equipamento volte a operar na taxa de falha inicial (fase de mortalidade infantil) que é elevada e decrescente. Quando $\beta > 1$, a manutenção preventiva é adequada para reduzir a degradação da confiabilidade do componente ou equipamento. Quando $\beta = 1$, as ações preventivas de manutenção são inúteis por causa da taxa de falha.

3.2.3 Manutenção Preditiva

A manutenção preditiva, segundo a norma NBR 5462 (ABNT, 1994), é a manutenção que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise de sinais, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva.

A manutenção preditiva é erroneamente confundida ou tratada como o sinônimo de monitoramento. Define-se manutenção preditiva como sendo a execução de ações de manutenção em função do estado técnico real do equipamento, a partir de medições e seguimento de algum parâmetro e a execução da intervenção para manutenção segundo a fixação de níveis desejados, permissíveis ou de alarme para este parâmetro. A partir deste momento, a manutenção preditiva é a medição de variáveis que identifiquem um parâmetro, o que é conhecido como monitoramento de estado. Este monitoramento de estado se executa planejando inspeções, que são executadas segundo uma frequência, prevista em função das características das variáveis e o parâmetro sintoma identificado (DUARTE, 2007; SMITH e HINCHCLIFFE, 2004).

A partir do estudo e análise da variável, se estabelece uma ação de manutenção a executar, que pode ser planejada, sem se prever sua execução, em função das características do equipamento; ou execução da manutenção corretiva, caso precise executá-la com urgência.

Tem-se comprovado que a manutenção preditiva pode melhorar significativamente a segurança no sistema. No entanto, a manutenção preditiva é tradicionalmente custosa e, portanto, se utiliza somente para equipamentos importantes ou críticos (XIAOJUN, *et al*, 2007).

Várias pesquisas usualmente assumem que o monitoramento não é contínuo e que tratam de encontrar o intervalo ótimo de inspeção para poupar o custo de monitoramento.

O emprego da manutenção preditiva exige a interpretação dos dados coletados, que por si só já é um fator da complexidade para sua aplicação. A medição e o tratamento dos dados a tornam uma operação sofisticada e cara.

As técnicas mais utilizadas na indústria são:

- Análise de sinais de vibração;
- Análise termográfica;
- Análise de emissões acústicas;
- Análise de óleo lubrificantes para medida de desgaste;
- Análise de sinais de corrente elétrica;

A manutenção preditiva tem interesse para o estudo da confiabilidade por permitir a prorrogação na utilização dos componentes (aumenta a disponibilidade) cujas falhas possam ser aleatórias ou não. Por outro lado, a manutenção preditiva está relacionada com a confiabilidade na medida em que o modo de falha e o comportamento da falha fornecem indicações sobre a conveniência de sua aplicação, contribuindo para reduzir a degradação da confiabilidade do sistema.

Para executar a manutenção preditiva é de vital importância executar uma análise de tendência do parâmetro. O estado atual do parâmetro no momento da medição é de pouca utilidade na decisão de parar ou não o equipamento. É importante ter o histórico dos parâmetros e recorrer-se a algum método numérico, como regressões polinomiais e exponenciais, obtendo uma curva semelhante à mostrada na Figura 3.13, que permite definir o comportamento temporal do parâmetro (XENOS, 2004).

Figura 3.13: Curva de tendência para o valor de um parâmetro de interesse (XENOS, 2004).

A Figura 3.13 mostra que, enquanto não se conhece o valor de perigo (onde se dá a falha), se precisa reduzir o espaço entre as medições quando se nota uma aceleração na deterioração do equipamento. Depois de diagnosticada a falha, necessita-se programar a parada. Portanto, entre o instante da detecção e a imobilização do equipamento, este deve operar satisfatoriamente, caso contrário, a preditiva perderia todo o seu significado. Com o passar do tempo, a estimativa desta curva passa a ser bastante fidedigna (CARAZAS, 2006).

3.3 Manutenção centrada na confiabilidade

A manutenção centrada na confiabilidade (RCM) foi um processo desenvolvido durante os anos 60 e 70, com a finalidade de ajudar as pessoas a determinar as melhorias políticas para manter as funções dos ativos e para controlar as consequências de suas falhas.

A manutenção centrada na confiabilidade é usada para determinar o que deve ser feito, para assegurar que qualquer recurso físico ou sistema continue prestando serviço que seus usuários querem dele. Este processo encontra suas raízes na indústria da aviação comercial internacional. Impulsionada pela necessidade de aperfeiçoar a confiabilidade das aeronaves, esta indústria desenvolveu um amplo processo para decidir qual trabalho de manutenção é necessário para manter um avião voando, mantendo os padrões de segurança. Este processo tem evoluído permanentemente desde seus primórdios em 1960 (MOUBRAY, 2000; SMITH e HINCHCLIFFE, 2004).

O RCM foi originalmente apresentado pelos empregados da *United Airlines* Stanley Nowlan e Howard Heap em seu livro *Reliability Centered Maintenance* (Manutenção Centrada na Confiabilidade), tal livro deu nome ao processo (MOUBRAY, 2000).

Conforme Moubray (2000), uma definição mais ampla do RCM 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 RCM 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 RCM será freqüentemente eliminar as tarefas de Manutenção Preventiva ineficazes.

O RCM se centra na relação entre a organização e os elementos físicos que o compõem. Antes que se possa explorar esta relação detalhadamente, se necessita saber que tipos de elementos físicos existem na empresa, e decidir quais serão sujeitos ao processo de revisão do RCM. Na maioria dos casos, isto significa que se deve realizar um registro de equipamentos completos se não houver um.

O RCM realiza uma série de perguntas a cerca de cada um dos elementos selecionados (RAUSAND, 1998):

1. Quais são as funções e padrões de desempenho do item no seu contexto operacional atual?
2. De que forma ele falha em cumprir suas funções?
3. O que causa cada falha funcional?
4. O que acontece quando ocorre cada falha?
5. De que forma cada falha tem importância?
6. O que poder ser feito para prever ou prevenir cada uma das falhas?
7. O que deve ser feito, se não for encontrada uma tarefa de manutenção apropriada?

Segundo Rausand (1998), a experiência tem demonstrado que aproximadamente 30% dos esforços de uma análise de RCM estão envolvidos definindo as funções e padrões de desempenho, ou seja, respondendo a pergunta número 1.

Nowlan e Heap (1978) afirmam que para obter a resposta para as primeiras quatro perguntas deve-se aplicar a Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA); sendo que as duas últimas identificam as ações a serem tomadas para administrar as falhas potenciais. A quinta pergunta determina como deve-se reagir diante da falha. Se a falha tem pouca ou nenhuma consequência relativa para a produção, custo, segurança, riscos ambientais, então a falha pode ser aceita e reparada em um momento futuro mais propício. É necessário compreender se a falha é oculta ou evidente para desenvolver uma resposta adequada. As perguntas devem ser respondidas por um grupo que conhece melhor os equipamentos (operador, supervisor de manutenção, supervisor de operações).

A manutenção centrada em Confiabilidade dá prioridade à manutenção de componentes cujas falhas causam perda de desempenho, às quais estão

associadas a perdas financeiras. Daí a importância à priorização das práticas preventivas ou preditivas, as quais diminuem a possibilidade de ocorrências destas perdas. O maior custo da manutenção preventiva está associado com o período de indisponibilidade do sistema, e também associado a esse custo estão a mão de obra e as peças sobressalentes. No caso da manutenção preditiva estão associados os custos de aquisição, implantação e operação dos instrumentos de monitoramento dos parâmetros indicativos do desempenho do sistema, bem como os custos de análise dos dados coletados. Existem falhas que não causam prejuízo ao desempenho do sistema, para este tipo de falhas se utiliza manutenção corretiva, pois o custo associado com estas tarefas será inferior aos custos por manutenção preditiva e preventiva (CARAZAS, 2006).

A implantação de um programa de manutenção centrada em confiabilidade envolve uma série de passos e de atividades de forma seqüencial (RAUSAND, 1997):

1. Preparação do estudo;
2. Selecionar e definir o sistema;
3. Análise de falha funcional;
4. Seleção dos componentes críticos;
5. Recopilação de dados e análise;
6. Análise de modos, efeitos e crítico de falhas (FMECA);
7. Seleção de ações de manutenção;
8. Determinação de intervalos de manutenção;
9. Análise de comparação de manutenção preventiva;
10. Tratamento de componentes não críticos;
11. Implementação;
12. Recolhimento de dados em serviço e atualização.

O autor em referência apresenta de forma detalhada as atividades previstas em cada uma destas etapas, as quais não são reproduzidas no presente texto.

3.3.1 Classificação de falhas

De acordo com a norma brasileira NBR 5462, a falha caracteriza-se como o “término da capacidade de um item desempenhar a função requerida”. Outra definição para o termo é “a falha de um dispositivo fica caracterizada quando ele não é mais capaz de desempenhar uma ou mais das suas funções, ainda que não esteja completamente incapacitado” (SOUZA, 2008). O desempenho estará diretamente relacionado com a função do componente e também com o contexto operacional do sistema.

Para identificar se um desempenho é insatisfatório é necessário fixar um padrão de desempenho mínimo esperado do componente, o qual será tomado como referência.

Sob o ponto de vista da tomada de decisão em manutenção, as falhas podem ser funcionais ou potenciais (Figura 3.14). A falha funcional é definida como a incapacidade de um elemento ou componente de um equipamento 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 com uma falha funcional (MOUBRAY, 2000).

Figura 3.14 A Curva P-F (RAUSAND, 1998)

As falhas funcionais e potenciais são detectadas quando o operador do sistema verifica alguma anomalia na condição operacional do mesmo, e está associada à verificação da perda de desempenho do sistema. Muitas das falhas funcionais podem ser detectadas pelo operador do sistema, podem ocorrer falhas de componentes que não são imediatamente observadas pelo operador. As falhas funcionais podem ser classificadas em falhas evidentes e ocultas (RAUSAND, 1998).

3.3.2 Consequência da falha

Cada falha afeta a organização de alguma forma, mas em cada caso, os efeitos são diferentes. Isto deve afetar as operações, além da qualidade do produto, serviço aos clientes e segurança ao meio ambiente. Todos esses fatores tomarão tempo e dinheiro para repará-los.

Se uma falha tem consequências significativas em termos de qualquer destas categorias já mencionadas, é importante tratar de preveni-las. Por outro lado, se as consequências não são significativas, então não é necessário fazer qualquer tipo de manutenção que não sejam as rotinas básicas de lubrificação e limpeza (MOUBRAY; 2000).

A manutenção centrada em confiabilidade classifica as conseqüências dentro de quatro grupos:

- Conseqüências de falhas ocultas: falha oculta não tem um impacto direto, mas expõem a organização a outras falhas com conseqüências severas, muitas vezes catastróficas (a maioria dessas falhas está relacionada com os dispositivos de proteção que não são livres de falhas).
- Conseqüências sobre segurança e meio ambiente: uma falha tem conseqüências sobre a segurança se a mesma afeta fisicamente a alguém. Ocorrem conseqüências sobre o meio ambiente quando se infringem as normas governamentais relacionadas ao meio ambiente.
- Conseqüências Operacionais: uma falha tem conseqüências operacionais quando afeta a produção (capacidade, qualidade do produto, serviço ao cliente, custos operacionais além dos custos diretos de reparo).
- Conseqüências não operacionais: são falhas que não afetam a produção nem a segurança, portanto envolvem apenas o custo direto do reparo.

3.3.3 Diagrama de decisões da Manutenção Centrada em Confiabilidade

Uma vez realizada a classificação das falhas funcionais dos componentes, em função das conseqüências destas sobre o desempenho operacional, deve-se realizar uma seleção das tarefas de manutenção recomendadas para cada componente do sistema, elaborando políticas de manutenção.

Os diagramas de decisão empregados na manutenção centrada em confiabilidade estão mostrados na Figura 3.15 (MOUBRAY, 2000).

Figura 3.15: Diagrama de decisões da Manutenção Centrada em Confiabilidade para políticas de manutenção (MOUBRAY, 2000)

Segundo Moubray (2000), devido à necessidade contínua de prever certos tipos de falhas e a incapacidade crescente das técnicas tradicionais para fazê-lo, foram criados novos tipos de prevenção de falhas. A maioria destas novas técnicas é baseada no fato de que a maioria das falhas apresenta algum aviso de que estão prestes a acontecer. Estas advertências são conhecidas como falhas potenciais, e definem-se como as condições físicas identificáveis que indicam que vai acontecer uma falha funcional ou que está em processo de ocorrência.

As novas técnicas são usadas para determinar quando acontecem as falhas potenciais de forma que se possa fazer algo antes que se convertam em falhas funcionais. Esta técnica é conhecida como tarefas sob condição, porque se realiza um acompanhamento dos parâmetros de operação de maneira a detectar alguma condição que marque o início de uma falha potencial.

As tarefas de restauração programada (*overhaul*) e substituição programada (manutenção preventiva) realizam uma revisão dos equipamentos ou dos seus componentes a serem reparados em determinadas frequências, independentemente de seu estado nesse instante.

O teste ou a inspeção periódica é uma tarefa de investigação ou de inspeção de falhas ocultas. É uma ação que significa predizer ou prevenir a falha de uma função não evidente que só valerá a pena fazê-la se for reduzido o risco de ocorrência de uma falha múltipla associada a essa função ainda em um nível baixo aceitável. Caso não sejam possíveis estas inspeções, ou a falha não afete a segurança operacional do sistema, sugere-se esperar que a falha aconteça para aplicar a manutenção corretiva.

Para ajudar a tabulação das questões no diagrama de decisões do RCM, pode-se utilizar uma tabela, tal como a Tabela 3.3, onde indica-se SIM ou NÃO para a variedade de respostas, possibilitando a seleção da melhor prática de manutenção para o componente, levando em consideração um modo de falha específico (MOUBRAY, 2000).

Tabela 3.3: Tabulação de resultados na Análise de decisão pelo método RCM (MOUBRAY, 2000)

RCM II TABELA de DECISÃO © 1990 ALADON LTD		SISTEMA										Sistema No.		Facilitador:		Data		Folha No.		
		SUB-SISTEMA										Sub-Sistema No.		Auditor:		Data		de		
Modo de falha		Avaliação de consequência				H1 S1	H2 S2	H3 S3	Ação padrão			Atividade de Manutenção Proposta					Intervalo Inicial de Intervenções		Deve ser executada por	
		H	S	E	O	O1 N1	O1 N2	O3 N3	H4	H5	S4									

3.4 Manutenção de sistemas hidráulicos

A maioria do pessoal de produção tem a impressão de que o departamento de manutenção só existe principalmente para reparar as falhas que já aconteceram. A importância do departamento de manutenção está relacionada com a execução da manutenção planejada, também conhecida como manutenção preventiva (PARR, 1999).

A manutenção preventiva em sistemas hidráulicos trata-se, principalmente, de:

- Manutenção periódica do equipamento;
- Verificação do funcionamento correto do sistema;
- Identificação de falhas potenciais e sua imediata retificação ou correção.

Uma vida longa do equipamento hidráulico é conseguida, inicialmente, através de condições de limpeza e lubrificação adequadas e posteriormente com inspeções e ajustes periódicos, eliminando-se desalinhamentos e folgas (DRAPINSKI, 1975).

Cerca de 50% dos problemas encontrados nos sistemas hidráulicos estão relacionados com o óleo hidráulico. Por esta razão, se realiza amostragem e testes

periódicos do fluido hidráulico. Esse tipo de teste é conhecido como análise de óleo. Atualmente se podem realizar testes básicos de análise de óleo na própria indústria. Os testes que podem ser realizados incluem aqueles como a determinação de viscosidade, verificação de contaminação por partículas e presença de água. A realização do teste nos permite identificar a qualidade ou estado em que se encontra o fluido. Mantendo o controle ou eliminando-se os modos de falha do fluido, evita-se um maior número de efeitos indesejáveis no sistema (RAVI e ANDRIES, 2005; JINGYI, 2006).

É fundamental que o pessoal de manutenção seja treinado para desempenhar as atividades de manutenção com eficiência. Um técnico deve ser capaz de reconhecer os primeiros sintomas de potenciais problemas hidráulicos.

Os sintomas de aviso do desenvolvimento de falhas estão relacionados com a temperatura excessiva, vazamento, vibração e ruído. Caso seja possível perceber estes efeitos em um componente, há grandes chances de ter encontrado a origem do mau funcionamento. Se o mau funcionamento não ocorreu, os efeitos de aviso podem ajudar a preveni-los através de ajustes, reparos ou substituição do componente. Por exemplo, um ruído na bomba pode ser devido à cavitação causada por uma obstrução da entrada do filtro ou uma lenta saída do atuador pode ser devido à alta viscosidade do fluido (VINADE, 2001).

Os filtros são importantes nos sistemas hidráulicos. 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 (DRAPINSKI, 1975). 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.

Para que as técnicas de manutenção preventiva sejam realmente eficazes, é necessário ter uma boa comunicação e sistema de registro. Esses relatórios devem incluir as seguintes informações (PARR, 1999);

- Os tipos de sintomas encontrados e como eles foram detectados juntamente com a respectiva data;
- Uma descrição das tarefas de manutenção realizadas. Isto deve incluir a substituição de peças, o tempo requerido para o reparo e a data;
- Registros de datas em que o óleo foi testado, adicionado ou trocado;
- Registros de datas em que os filtros foram limpos ou substituídos.

4 PROPOSTA DO MÉTODO DE DIAGNOSE DE FALHAS NOS REGULADORES DE VELOCIDADE

4.1 Considerações iniciais

O método proposto tem como objetivo desenvolver um método para diagnose de falhas em Sistemas Hidráulicos em Regulador de Velocidade de Turbinas Hidráulicas. Para desenvolver este método, decidiu-se utilizar técnicas de estudo de confiabilidade como: Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA) e Análise de Árvore de Falhas (FTA). Por fim, propõem-se políticas de manutenção que baseadas em diagramas de decisões de Manutenção Centrada em Confiabilidade.

O método proposto está conformado pelas seguintes etapas:

- A primeira etapa do método é realizar um estudo do equipamento e descrição operacional do Sistema Hidráulico do Regulador de Velocidades de Turbinas Hidráulicas.
- Na segunda etapa do método faz-se a construção da Árvore Funcional do Regulador de Velocidade de Turbinas Hidráulicas (representação gráfica das relações funcionais dos equipamentos) (SOUZA, 2008); em seguida, realizar-se a descrição funcional (identificação das funções de cada um dos equipamentos dentro do sistema) de cada um dos componentes que servirá como auxílio para a elaboração da Análise de Modos e Efeitos de Falha.
- Na terceira etapa do método se realiza a identificação dos componentes críticos por meio da aplicação das técnicas de análise de confiabilidade: de Análise de Modos e Efeitos de Falha e Análise da Árvore de Falha.
- Na quarta etapa do método se realiza uma elaboração de políticas de manutenção para os componentes críticos identificados na terceira etapa do

método. As políticas de manutenção devem ser feitas por meio das filosofias da Manutenção Centrada em Confiabilidade.

- Como última etapa do método é realizada o diagnóstico de falhas e avaliação dos resultados.

Na Figura 4.1 é apresentada a metodologia, de forma esquemática, mostrando as seqüências das atividades que permitem fazer uma análise detalhada e confiável, pois são utilizadas numa ordem lógica e organizada de forma a cumprir o objetivo anteriormente já definido.

Figura 4.1: Etapas do método proposto

4.2 Proposta do Método de Análise

4.2.1 Elaboração da Árvore Funcional

Para elaborar uma árvore funcional é preciso conhecer a lógica de operação do sistema. Para esse fim, é necessário entender o esquema operacional do sistema eletro-hidráulico, definindo a relação funcional entre os subsistemas e os equipamentos (SOUZA, 2008).

Para a elaboração da árvore funcional deve-se responder as seguintes perguntas:

- Como é executada (cumprida) uma determinada função?
- Por que uma determinada função deve ser executada?

A resposta à primeira pergunta será de nível primário, que permite definir quais componentes devem ser utilizados para executar esta função. Assim deve-se continuar até chegar ao último nível, que é o nível do componente.

A segunda pergunta serve para verificar se a árvore baseada na primeira pergunta está correta. A Figura 4.2 ilustra a metodologia para a elaboração da árvore funcional.

Figura 4.2: Arranjo geral da árvore funcional (SOUZA, 2008)

4.2.2 Análise de Modos e Efeitos de falha (FMEA)

Realizada a elaboração da Árvore Funcional, são identificados todos os componentes que compõem o Sistema Hidráulico do Regulador de Velocidade. Para cada um dos componentes será feita uma Análise de Modos e Efeitos de Falha, tentando identificar seus modos de falha, associados com as condições operacionais específicas, e as causas do mecanismo de falha.

Para desenvolver uma Análise de Modos e Efeitos de Falhas será utilizada uma tabela composta por seis colunas como indicado na Tabela 4.1: 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 o fracasso é observado pela equipe de operação), causa e mecanismo potencial de falha (descrição simples e concisa de ocorrências - causas - que tem origem no tipo considerado de falha), possível efeito da falha (são discutidas as conseqüências de cada modo de falha sobre o funcionamento do sistema): pode ser local (ela não afeta os outros componentes) ou global (pode afetar outras funções ou componentes), e definição da sua severidade (este é um indicador que reflete a gravidade das conseqüências das falhas).

Tabela 4.1 Formulário empregado na Análise FMEA

Análise de Modo e Efeito de Falhas - FMEA					
<i>Componente:</i>				<i>Página: de</i>	
<i>Sistema:</i>				<i>Data</i>	
<i>Equipe</i>					
<i>Responsável</i>					

Componente	Função	Modo de falha potencial	Causa(s) da falha	Possível (is) Efeito(s) da falha	Sev.

A análise do tipo FMEA será executada considerando a severidade da falha, definida como o grau de comprometimento da capacidade de geração de energia elétrica, e a qualidade da energia elétrica gerada. Os níveis de severidade serão definidos como indicado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 Classificação de Severidade Empregada na Análise do tipo FMEA de um sistema de Geração de Energia Elétrica (CARAZAS, 2003)

<i>Grau de Severidade</i>	<i>Efeito sobre a Operacionalidade do Sistema de Geração de Energia Elétrica</i>
1 (Sem Efeito)	<ul style="list-style-type: none"> - Falha de componentes que exigem reparo ou substituição, mas não imediata; - Não afeta o desempenho da máquina ou sistema ou sem efeito sobre o meio ambiente.
2 (Efeito Leve)	<ul style="list-style-type: none"> - Falha de componentes que exigem reparo ou substituição, mas não imediata; - Desempenho da máquina ou sistema muito pouco degradado, sem efeito sobre o meio ambiente.
3 (Efeito Menor)	<ul style="list-style-type: none"> - Falha de componentes que exigem reparo ou substituição, mas não imediata; - Desempenho da máquina pouco degradado, sem efeito detrimental sobre o meio ambiente..
4 (Efeito Moderado)	<ul style="list-style-type: none"> - Falha de componentes, com necessidade de reparo ou substituição. - Desempenho do sistema de geração de energia pouco degradado, mas ainda permite operação, porém com potência gerada reduzida; - Perda de desempenho nos sistemas de controle das condições de operação, com pequenas dificuldades de manutenção das mesmas. - Possibilidade de efeito pouco detrimental sobre o meio ambiente.
5 (Efeito Significante)	<ul style="list-style-type: none"> - Falha de componentes, com necessidade de reparo ou substituição. - Desempenho do sistema de geração afetado, mas ainda permite operação, porém com potência gerada reduzida; - Perda de desempenho nos sistemas de controle das condições de operação, com dificuldade de manutenção das mesmas. - Possibilidade de algum efeito detrimental sobre o meio ambiente.
6 (Efeito Maior)	<ul style="list-style-type: none"> - Falha de componentes, com necessidade de reparo ou substituição. - Desempenho do sistema de geração afetado severamente, mas ainda permite operação, porém com potência gerada bastante reduzida; - Severa perda de desempenho nos sistemas de controle das condições de operação.. - Possibilidade de efeito detrimental sobre o meio ambiente, chance de exceder alguma regulamentação ambiental.
7 (Efeito Extremo)	<ul style="list-style-type: none"> - 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 Sêrio)	<ul style="list-style-type: none"> - Falha de componente que causa danos moderados ao sistema de geração de energia, sem dano 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)	<ul style="list-style-type: none"> - Falha de componente que causa danos severos ao sistema de geração, incluindo dano 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.

4.2.3 Análise de Árvore de Falhas (FTA)

Será aplicada a FTA pois a FMEA tem deficiências na avaliação dos efeitos quando vários modos de falha ocorrem simultaneamente, o que geralmente acontece em sistemas hidráulicos.

Realizada a Análise de Modos e Efeitos de Falha para cada componente que compõem o Sistema Hidráulico do Regulador de Velocidade, serão encontrados os efeitos das falhas sobre o sistema, e que permitirá identificar os eventos topos que serão analisados pelo método de Análise de Árvore de Falha.

A elaboração da Análise de Árvore de Falha será baseada em livros, manuais de manutenção, catálogos e artigos científicos. Além de elaborar as Árvores de Falha, se realizará a análise quantitativa e qualitativa:

A) Análise qualitativa da árvore de falhas.

Uma vez elaborada a árvore de falhas para os eventos topo, procede-se à avaliação qualitativa das combinações dos eventos básicos que causam a ocorrência desse evento topo. Ou seja, procede-se à identificação dos cortes mínimos (*“cut sets”*) da árvore que ocasionariam o evento topo. Para identificar os cortes mínimos é necessário aplicar as principais leis de álgebra booleana.

O corte mínimo de uma árvore de falhas é o conjunto de eventos básicos que causam a ocorrência do evento topo, ou seja, a falha do sistema. Desta forma se pode definir que um corte é a combinação de eventos básicos que ao ocorrerem levam necessariamente à falha do sistema. Um corte é definido como corte mínimo quando é constituído pelo menor número possível de eventos básicos, cuja ocorrência é necessária e suficiente para causar a ocorrência do evento topo, não podendo ser reduzido sem perder a sua condição de corte (O’CONNOR, 1985).

B) Análise quantitativa da árvore de falhas

Como resultado da análise quantitativa se obterá a probabilidade de falha do evento topo e o índice de importância dos eventos básicos. Para calcular a probabilidade de falha do evento topo, é necessário ingressar os valores de probabilidade de falha dos eventos básicos na equação obtida da análise qualitativa da árvore de falhas. A probabilidade de falha dos eventos básicos será baseada em dados de literatura.

A análise de importância dos cortes mínimos (I_K) é uma parte substancial da análise quantitativa. Este análise indica a contribuição dos eventos básicos para a falha do evento topo. A análise de importância dos eventos básicos será calculada por meio da eq. 4.1. (Park; Lee, 2009)

$$I_K(X_i) = \frac{P_{Xi}}{P_{top}} \quad (4.1)$$

O resultado da análise de importância dos cortes mínimos será listado numa tabela de forma decrescente.

4.2.4 Elaboração do Procedimento de Seleção de Políticas de Manutenção para os componentes críticos

Como resultado da aplicação da análise do tipo FMEA e análise qualitativa do FTA, serão avaliadas as conseqüências das falhas sobre a operação do sistema, permitindo identificar os componentes considerados críticos que comprometam a função principal do sistema hidráulico do regulador de velocidade de turbinas hidráulicas em caso de falhas. Identificados os componentes críticos estes serão apresentados uma tabela.

Para selecionar a política de manutenção mais apropriada para um equipamento do sistema hidráulico, tem-se que definir um processo de decisão que permita determinar as práticas de manutenção mais apropriadas para o componente. A escolha deve ser executada em concordância com as características

dos modos de falha, as causas da falha, e sintomas. As políticas de manutenção têm que ser tecnicamente viáveis, e devem resolver o problema em nível aceitável, além de apresentar custos razoáveis. As políticas de manutenção serão baseadas em conceitos apresentados em manuais de fabricantes e livros.

Deve-se realizar uma seleção das tarefas de manutenção recomendadas para cada um dos componentes críticos do sistema, elaborando políticas de manutenção, baseadas nos diagramas de decisão empregados pela Manutenção Centrada em Confiabilidade explicada no Capítulo 3.

4.2.5 Diagnóstico de falhas

O processo de diagnóstico de falhas consiste em descobrir, detectar, diagnosticar e aproveitar as informações para tomar ações que permitam corrigir falhas e prever futuras perturbações nos sistemas hidráulicos.

Diagnóstico define-se como “o procedimento de localizar e explicar a ocorrência de uma falha em componentes ou sistemas”. A definição de falha, já dita, é o “término da capacidade de um item desempenhar a função para o qual foi projetado”. Identificada a falha deve-se conhecer a função do equipamento

Para realizar diagnóstico de falhas em sistemas hidráulicos se sugere uma seqüência lógica de procedimentos quando se observam operações impróprias do atuador hidráulico ou sintomas de aviso. Os sintomas de aviso estão relacionados a temperaturas excessivas, vazamentos de óleo, vibração e ruído. Quando se percebe estes efeitos junto a um componente é porque existem grandes chances de encontrar a origem da falha ou do mau funcionamento (VINADE, 2003).

Para elaborar o diagnóstico de falhas em sistemas hidráulicos, decidiu-se por utilizar técnicas de estudo de confiabilidade, tais como, FMEA e FTA. As técnicas são utilizadas de forma lógica e organizada para que uma seja complemento de outra. Por meio da aplicação da análise do FMEA se conseguirá identificar os modos de falhas, causas e efeitos das falhas sobre o sistema. Da aplicação do FMEA se conseguirá identificar os eventos topo que serão desenvolvidos na análise do FTA. Com a identificação dos eventos topos se começará a derivação dos eventos que

podem ter ocasionado os eventos topos, até chegar a um nível de detalhe que permitia identificar as falhas básicas ou primárias. Com a recopilção dos resultados obtidos das duas análises se começará a desenvolver o diagnóstico de falhas em sistemas hidráulicos de reguladores de velocidade em usinas hidroelétricas.

A apresentação do diagnóstico de falhas é realizada por meio de fluxogramas, construída através de símbolos. Na Tabela 4.3 são apresentados os símbolos com seus receptivos significados. Para começar o diagnóstico de falhas se deve definir o problema a ser analisado. Em seqüência se realizará uma série de perguntas com uma seqüência lógica, tendo como respostas um Sim ou Não, até identificar a causa da falha e propor tarefas de manutenção ou recomendações.

.Tabela 4.3 Símbolos utilizados para a elaboração do diagnostico de falhas

Símbolo	Significado
O retângulo representa uma afirmação de um evento
No hexágono é colocado a pergunta, como saída se terá duas alternativas de decisão sim ou não.
Este símbolo representa tarefas de manutenção ou recomendações
Este símbolo representa que pode estar acontecendo qualquer dos seguintes eventos.
Quando a flecha está entrado ao triângulo indica transferência de entrada. Quando a flecha está saindo do triângulo indica transferência para fora.

5 ESTUDO DE CASO: SISTEMA HIDRÁULICO DO REGULADOR DE VELOCIDADE DA TURBINA FRANCIS

Neste capítulo apresenta-se um estudo de caso como exemplo de um método de diagnose de falhas em reguladores de velocidade empregados em turbinas hidráulicas, com a aplicação do método apresentado no Capítulo 4.

5.1 Aplicação do Método

5.1.1 Descrição do Sistema Hidráulico

Os sistemas hidráulicos têm se mostrado como soluções adequadas para atuação em máquinas e processos como: manipulação de peças e ferramentas, posicionamento de dispositivos mecânicos, controle de forças, velocidade, entre outros. Isso se deve à capacidade de atuação rápida e precisa, e à possibilidade de receber sinais elétricos de comando através de válvulas eletro-hidráulicas (LINSINGEN, 2008; DE NEGRI, 2001). Conforme estas características, os sistemas hidráulicos têm sido uma boa opção para o controle de velocidade de turbinas hidráulicas, onde é exigida uma interface entre os sensores para medição de deslocamento de abertura e fechamento de passagens de água, e controladores que mantém, através de um circuito hidráulico de atuação, a posição desejada destas passagens.

Conforme a Figura 5.1, mostra-se o diagrama de um sistema hidráulico empregado para este fim. O sistema hidráulico é composto por três sistemas principais, que são:

- Sistema de pressurização de óleo;
- Sistema de controle hidráulico;
- Unidade de trabalho;

Legenda 1) Bomba 2) Motor AC. 3) Motor DC. 4) Válvula de alívio 5) Pressostato 6) Válvula unidirecional 7) Válvula proporcional 8) Válvula de emergência 9) Válvula distribuidora 10) Atuadores 11) Válvula isoladora a óleo 12) Válvula cartucho 13) Acumulador

Figura 5.1 Diagrama Hidráulico do Regulador de Velocidade de Turbinas Hidráulicas.

5.1.1.1 Sistema de Pressurização de Óleo

O sistema de pressurização de óleo é composto por dois sistemas em paralelo, o sistema de pressurização de óleo principal e o reserva. Este tipo de configuração permite ter uma maior confiabilidade. Para que o sistema falhe, tem que acontecer falhas simultâneas nos dois sistemas de bombeio (principal e de reserva).

O sistema de pressurização de óleo principal é composto por uma bomba hidráulica, motor a.c., tubulações para transporte do fluido, filtro para limpeza do óleo, válvula de alívio, reservatório, válvula unidirecional e pressostatos. De forma semelhante, o sistema de pressurização de óleo de reserva é composto por uma bomba hidráulica, motor d.c., tubulações, filtro, válvula de alívio, reservatório, válvula unidirecional e pressostatos.

Em regime normal de funcionamento, a bomba principal é a que abastece o sistema, porém, quando há uma queda brusca de pressão, o pressostato faz com que a bomba de emergência seja ligada, para repor a pressão de operação no sistema, e quando a pressão do sistema se normaliza, o pressostato da bomba de emergência a desliga do sistema, mantendo somente a bomba principal.

As bombas hidráulicas possuem duas portas hidráulicas, uma delas está interligada diretamente ao reservatório para a sua alimentação de óleo, e a outra porta hidráulica a uma tubulação para o transporte do fluido sob pressão até o sistema de controle hidráulico. Nesta mesma tubulação existe uma ramificação para a válvula de alívio.

A válvula de alívio é calibrada para trabalhar a uma pressão de 25 bar, pressão na qual trabalha o circuito hidráulico. Esta válvula tem a função de não permitir sobrepressão na linha do sistema, e se abre quando a pressão de operação é maior do que 25 bar, enviando o fluido em direção ao reservatório hidráulico.

A válvula unidirecional, também conhecida como anti-retorno, fica localizada na linha da bomba e é utilizada para proteção das bombas contra o golpe de ariete.

No caso que falhem simultaneamente os dois sistemas de pressurização de óleo, um sinal elétrico será enviada para a válvula isoladora ar/óleo e comandará a válvula cartucho, a qual permitira enviar o fluido hidráulico a pressão armazenado no acumulador para o circuito hidráulico e conseqüentemente fechar o distribuidor.

5.1.1.2 Sistema de Controle Hidráulico

O sistema de controle hidráulico é constituído pelas válvulas distribuidoras, proporcional e de emergência. Entre a válvula proporcional e a válvula distribuidora se encontra localizada a válvula de emergência conforme se vê na Figura 5.1. Para que o sistema opere, é preciso que a válvula de emergência esteja ligada. Em situações que se exige um fechamento rápido do mecanismo, a válvula de emergência é desligada. A válvula de emergência é a mais importante, já que uma falha nela pode levar a consequências catastróficas dentro da hidroelétrica.

Conforme a Figura 5.1, utilizam-se duas válvulas em cascata, a válvula proporcional e a distribuidora. A válvula distribuidora tem duas câmaras laterais:

- Uma câmara lateral direita S1 de seção $X1$ alimentada a pressão constante.
- Uma câmara lateral esquerda S2 de seção $X2 = 2X1$, alimentada em óleo por meio da válvula proporcional, sob uma pressão modulada, igual ao equilíbrio da metade da pressão de alimentação.

No procedimento de fechamento do distribuidor, a câmara lateral esquerda S1 da válvula distribuidora está sempre acionada a uma pressão constante de 25 bar. Quando a válvula proporcional recebe um sinal elétrico (tensão ou corrente) do regulador de velocidade eletrônico (explicado no item 2.3.1.) no solenóide (A2) da válvula proporcional transformará a sinal elétrico em deslocamento do seu carretel, o fluido, então, passa através da válvula de emergência enviando o fluido para a câmara lateral direita (S2) da válvula distribuidora, o qual permite o fechamento do distribuidor.

No procedimento de abertura do distribuidor, a câmara lateral esquerda S1 da válvula distribuidora está sempre acionado, a pressão constante de 25 bar. Quando a válvula proporcional recebe um sinal elétrico (tensão ou corrente) do regulador de velocidade eletrônico (explicado no item 2.3.1.) no solenóide (A1) da válvula

proporcional, a câmara lateral direita (S2) da válvula distribuidora estará encaminhando o fluido em direção ao reservatório.

5.1.1.3 Unidade de trabalho

A unidade de trabalho é constituída pelos atuadores. A válvula distribuidora atua sobre dois cilindros hidráulicos que estão interligados ao anel de regulação do distribuidor, os atuadores são instalados um em cada lado do anel e as suas câmaras de acionamento estão interligadas de forma invertida, ou seja, enquanto um atuador avança, o outro atuador retorna.

5.1.2 Elaboração de Árvore Funcional

Para a elaboração da árvore funcional, o regulador de velocidade deve ser analisada como um sistema, separado em vários níveis compostos por subsistemas, os quais poderiam ser divididos até chegar ao nível dos componentes. (VINADE, 2003). Neste trabalho a árvore funcional é elaborada segundo a metodologia apresentada por Souza (2008), descrita no Capítulo 4 deste texto.

Partindo do nível primário, que define a função do regulador de velocidade, a resposta à primeira pergunta (como é executada uma determinada função?) 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 (porque uma determinada função deve ser executada?) percorre o caminho contrário, do nível de componentes até o nível primário e fornece uma forma de verificar a árvore funcional do regulador de velocidade.

Para a construção da árvore funcional é necessário conhecer cada uma das funções dos componentes, subsistemas e sistemas que pertencem ao regulador de velocidade, aplica-se a descrição funcional como uma ferramenta auxiliar para esta tarefa. No Apêndice A apresenta-se a descrição funcional do sistema sob estudo, tal descrição apresenta a relação de todos os componentes e as suas respectivas

funções.

A elaboração da árvore funcional foi realizada através do estudo das referências bibliográficas sob reguladores de velocidade em usinas hidroelétricas e baseadas em estudos de sistemas hidráulicos. Entre as bibliografias revisadas vale ressaltar Andia (2005), De Negri (2001), Mazzorana (2008), Paes (2002), Reivax (2010) e Yesid (2006), que serviram de auxílio para identificar cada componente que constitui o regulador de velocidade e suas respectivas funções dentro do sistema. A Figura 5.2 mostra a árvore funcional do regulador de velocidade, que foi dividida em três sistemas: regulador de velocidade eletrônico, sistema hidráulico e o distribuidor.

Figura 5.2 Árvore funcional do regulador de velocidade em Usinas hidroelétricas.

Na Figura 5.3 mostra-se a árvore funcional completa do regulador de velocidade o qual é composto por sistemas, sendo estes divididos em subsistemas e componentes.

Figura 5.3 Árvore Funcional do Regulador de Velocidade

5.1.3 Análise de Modos e Efeitos de Falha do Sistema Hidráulico

A análise do FMEA em sistemas hidráulicos tem como objetivo criar um banco de dados dos principais modos de falha destes equipamentos, suas causas, e conseqüências. A partir deste levantamento é possível obter informações úteis para a elaboração de políticas de manutenção. Esta análise poderá indicar sintomas que podem ser monitorados para identificar o início da falha e evitar a sua propagação, pelo sistema ou controlar seus efeitos.

O levantamento dos modos de falha e causas da falha é realizado por meio da coleta de informação das referências bibliográficas, das quais se podem ressaltar as seguintes:

- Catálogo: Parker (1999)
- Manual de Manutenção: Ferreiros CAT (2004)
- Artigos: Bagnoli (2009), Bonaldi (2008); Frith e Scott (1992), Hugueros (2002), Park (2002), Vinade *et al* (2001), Zanini (2007).
- Livros: Drapinski (1975), Linsingen (2008), Mobley (2000), Parr (1999), Ravi e Andries (2005).

Da bibliografia citada vale ressaltar Ferreiros (2004) e Drapinski (1975), que indicam as causas de como os componentes hidráulicos falham, e os sintomas que eles apresentam. Parr (1999), Ravi e Andries (2005) possuem capítulos dedicados a *troubleshooting* em sistemas hidráulicos e sugestões sobre possíveis intervenções nos componentes hidráulicos. Vinade (2003) indica as causas e efeitos de modos de falha em sistemas hidráulicos. Frith e Scott (1992) discutem como a contaminação dos fluidos hidráulicos como afetam o desempenho em sistemas hidráulicos.

Da implementação da análise do tipo FMEA se observou que os modos de falha de alguns componentes não só reduzem seu desempenho, mas também provocam o surgimento de outros modos de falhas em outros componentes e

diferentes efeitos no sistema. Como exemplo tem-se que na análise da FMEA foi observado que o óleo hidráulico é um dos maiores contribuidores na propagação de modos de falhas pelo sistema hidráulico do regulador de velocidade. Então se for controlado este tipo de componente, é possível permitimos reduzir ou eliminar a ocorrência de um grupo maior de efeitos que comprometam a função principal do sistema. Como se observou na análise do FMEA as causas mais comuns são falhas de fabricação, erro no projeto, manutenção imprópria, falha na operação, e desgaste.

As causas internas são oriundas de falhas em componentes devido a defeitos de fabricação e ao desgaste. As causas externas podem ser devido à manutenção imprópria, falha de projeto do sistema, falha de operação e falha induzida por modos de falha de outros componentes.

Além de realizar o levantamento dos modos de falha para cada componente, precisam-se determinar os efeitos ou conseqüências sobre o sistema. Um dos efeitos mais críticos encontrados na análise da FMEA é a parada do regulador de velocidade, que compromete a geração de energia elétrica e conseqüentemente, o fornecimento de energia elétrica, provocando perdas econômicas pela perda de produção e devido a multas impostas pela legislação vigente.

A tabela do FMEA foi montada com seis colunas de componentes, funções, modos de falha potencial, causas da falha, possíveis efeitos de falha e severidade como foi mostrada na Tabela 4.1 (formulário empregado na análise FMEA).

A análise do tipo FMEA foi executada considerando a severidade da falha, como foi mostrada na Tabela 4.2. Neste estudo emprega-se uma classificação da severidade variando de 1 a 9. Os níveis de 1 a 3 estão associados às falhas que afetam ligeiramente o desempenho do hidrogerador. Já os níveis de severidade de 4 a 6 afetam o desempenho operacional, causando restrições na potência gerada. Os níveis de 7 a 9, cuja descrição é apresentada na Tabela 4.2, representam situações em que ocorre a parada do hidrogerador, podendo causar danos ao meio ambiente. As 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).

Uma parte da análise dos modos de falha e seus efeitos em sistemas hidráulicos é indicado na Tabela 5.1, onde é abordado a bomba hidráulica. A análise completa é apresentada no Apêndice B.

Como resultado da elaboração da Análise de Modos e Efeitos de Falhas, realiza-se a seleção de equipamentos críticos que tenham severidade maior a seis.

Na Tabela 5.2 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 uma usina hidroelétrica. Os componentes críticos devem ser objeto de estudo da Manutenção Centrada em Confiabilidade, a lista serve para aplicar os diagramas de decisão para seleção de práticas de manutenção.

Tabela 5.1 Parte da Análise de Modos e Efeitos de falha da bomba hidráulica

Análise de Modo e Efeito de Falhas - FMEA					
<i>Componente:</i>	Bomba			<i>Página:</i>	6 de 18
<i>Sistema:</i>					
<i>Equipe</i>					
<i>Responsável</i>					
Componente	Função	Modo de falha potencial	Causa(s) da falha	Possível(is) Efeito(s) da falha	Sev.
Bomba	Converter energia mecânica em hidráulica fazendo os fluidos escoarem	Incapacidade de bombear	Ruptura do acoplamento		8
			Falha no sistema de alimentação de energia elétrica		
			Travamento do eixo da bomba	Parada do regulador de velocidade	
			Motor parado		
			Bloqueio total da linha de sucção		
			Entupimento do filtro de sucção		
			Falta ou falha de lubrificação		
		Bombeamento insuficiente à especificada	Falta ou falha de lubrificação ,		7
			Vazamentos causados por montagem imprópria e falhas dos retentores ou conexões	Velocidade incorreta do atuador	
			Vazamentos internos ou externos na bomba	Possível parada do regulador de velocidade	
			Folgas excessivas ou com variações devidos a aos erros de montagem	Pressão insuficiente no acumulador	
			Cavitação ou aeração	Alteração na pressão do sistema	
			Pressão de sucção insuficiente		

Tabela 5.2 Lista dos Componentes Críticos

Sistema	Subsistema	Componente	Modo de falha	Sev.
Sistema eletro - hidráulico	Sistema de resfriamento de óleo	Trocador de calor	Incapacidade de resfriar o óleo	7
	Sistema de pressurização de óleo	Reservatório	Vazamento de óleo	7
		Fluido	Variação da viscosidade: Alta Viscosidade	7
			Variação da viscosidade: Baixa Viscosidade	7
		Pressostato	Não aciona	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	7
	Unidade de controle	Válvula de emergência	Válvula não se move	9
		Válvula Proporcional	Válvula não se move	9
			Válvula não responde adequadamente ao comando	8
		Válvula Distribuidora	Válvula não se move	9
			Válvula não responde adequadamente ao comando	8
	Unidade de trabalho	Atuador	Atuador fica sem movimento	9
			Velocidade Incorreta	7
			Movimento em pulos	7
			Vazamento externo	8
			Falta de força	8

5.1.4 Análise de Árvore de Falhas em Sistemas Hidráulicos

Conforme as definições e determinações feitas no capítulo 3, a elaboração do FTA é fundamentada na mesma bibliografia utilizada para a análise do tipo FMEA.

O FTA percorre o caminho inverso da análise da FMEA. Através de um fluxograma constituído por vários eventos combinados por portas lógicas que partem de um efeito no sistema e chegam aos componentes cujas falhas podem ter causado o problema no sistema. Geralmente análise do tipo FMEA e o FTA são utilizadas de forma complementar.

O sistema analisado consiste no mesmo da análise da FMEA, isto é, o sistema hidráulico do regulador de velocidade empregado em turbinas hidráulicas, cujos componentes e fronteiras já são bem conhecidos. Os principais eventos topos para a análise da FTA são: parada do regulador de velocidade, perda na precisão do posicionamento do atuador, velocidade incorreta no atuador e perda de força no atuador. A partir do conhecimento acerca do funcionamento dos sistemas considerados e de suas interações, foi construída a árvore de falhas para cada evento topo anteriormente definidos.

Para exemplificar, a Figura 5.3 ilustra a árvore de falhas elaborada para o evento topo “Parada do regulador de velocidade”. As outras árvores de falhas que completam a análise são apresentadas no Apêndice C.

Figura 5.4 Árvore de Falhas da parada do regulador de velocidade

Conforme a Figura 5.3, o evento topo “Parada do regulador de velocidade”, é causado por 3 eventos básicos como: nível insuficiente de óleo no tanque, válvula de emergência desligada e falha no regulador eletrônico; assim como por três eventos intermediários: inoperância no sistema de bombeio, falha na unidade de controle e falha na unidade de trabalho. Para combinações destes os eventos, é utilizada a porta lógica “OU”, que significa que qualquer destes eventos mencionados leva ao evento topo.

O evento básico “nível de óleo insuficiente” significa que o sistema pode estar apresentando pressão insuficiente de operação ou não tem pressão no sistema, ou ainda que os atuadores hidráulicos não conseguem movimentar o anel de regulação do distribuidor.

Para que o evento básico “válvula de emergência desligada” ocorra, é necessário que a válvula de emergência esteja desenergizada, como foi explicada na descrição operacional do sistema.

O evento básico “falha no regulador de velocidade eletrônico” significa que o regulador não conseguiria enviar sinal elétrico para a válvula de emergência e para a válvula proporcional e, por conseguinte, as válvulas não cumpririam suas funções e o sistema ficaria parado.

A árvore apresenta outros três eventos intermediários. O primeiro evento intermediário “não existe sistema de bombeio” é causado pelas falhas no sistema de bombeamento principal e de reserva, tais eventos são combinados por uma porta lógica “E”. Para que aconteça uma falha no sistema de bombeamento principal tem que ocorrer qualquer dos eventos básicos como: filtro entupido 1, bomba 1 parada, falha no motor A.C. e falta de abastecimento de energia A.C. Tais eventos são combinados por uma porta lógica “OU”. Para que aconteça uma falha no sistema de bombeamento de reserva tem que acontecer qualquer dos eventos básicos filtro entupido 2, bomba 2 parada, falha no pressostato, falha no motor D.C. e falta de abastecimento de energia D.C. Tais eventos são combinados por uma porta lógica “OU”.

O segundo evento intermediário “falha na unidade de controle” é causado pela falha da válvula proporcional e falha na válvula distribuidora, que não se move. Tais eventos são combinados por uma porta lógica “OU”. Conforme explicado na descrição operacional do sistema, as válvulas estão localizadas em série, o que significa que a falha de uma delas ocasionaria a parada do sistema.

Por fim, o terceiro evento intermediário “falha na unidade de trabalho” é causado pela falha no atuador 1 e falha no atuador 2. Tais eventos são combinados por uma porta lógica “OU”. Se acontece uma falha em um dos dois atuadores, o outro atuador não seria capaz de realizar o movimento do anel de regularização do distribuidor.

5.1.4.1 Análise Qualitativa da Árvore de Falhas

Através das árvores de falhas elaboradas para cada um dos eventos topo, procedeu-se a avaliação qualitativa das combinações dos eventos básicos que causam a ocorrência desse evento topo. O fato importante desta análise é identificar os cortes mínimos (*cut sets*) da árvore que ocasionaria o evento topo.

A árvore de falhas para o evento topo “parada do regulador de velocidade” a ser analisado é mostrado na Figura 5.5. Os eventos intermediários e básicos da árvore são listados na Tabela 5.3.

Figura 5.5 Árvore de falhas para o evento topo "Parada do regulador de velocidade"

Tabela 5.3 Eventos básicos ou causas da falha

Identificação da causa	Descrição da causa
X1	Nível de óleo insuficiente no tanque
X2	Válvula de emergência desligada
A	Não existe sistema de bombeio
B	Falha no sistema de bombeamento principal
X3	Filtro entupido 1
X4	Bomba parada 1
X5	Falha no motor AC
C	Falha no sistema de bombeamento reserva
X6	Filtro entupido 2
X7	Bomba parada 2
X8	Falha no pressostato 1
X9	Falha no motor DC
X10	Falha no regulador eletrônico
D	Falha na unidade de controle
X11	Válvula proporcional não se move
X12	Válvula distribuidora não se move
E	Falha na unidade de trabalho
X13	Atuador 1 parado
X14	Atuador 2 parado

O evento topo “parada do regulador de velocidade”, conforme a Figura 5.4 é expresso pela eq. 5.1:

$$Topo = X1 + X2 + A + X10 + D + E \quad (5.1)$$

O evento intermediário A é expresso pela eq. 5.2:

$$A = B \times C \quad (5.2)$$

O evento intermediário B é expresso pela eq. 5.3:

$$B = X3 + X4 + X5 \quad (5.3)$$

O evento intermediário C é expresso pela eq. 5.4:

$$C = X6 + X7 + X8 + X9 \quad (5.4)$$

Substituindo a eq. 5.3 e 5.4 na eq. 5.2 o evento intermediário A resulta na expressão da eq.5.5:

$$A = (X3 + X4 + X5) \times (X6 + X7 + X8 + X9) \quad (5.5)$$

O evento intermediário D é expresso pela eq. 5.6:

$$D = X11 + X12 \quad (5.6)$$

O evento intermediário E é expresso pela eq. 5.7:

$$E = X13 + X14 \quad (5.7)$$

Eventualmente, o evento topo pode ser expresso em termos de eventos básicos conforme a eq. 5.8.

$$Topo = X1 + X2 + (X3 + X4 + X5) \times (X6 + X7 + X8 + X9) + X10 + X11 + X12 + X13 + X14 \quad (5.8)$$

Finalmente aplicando os conceitos da álgebra Booleana na eq. 5.8 se obtém a expressão da eq. 5.9 que representa o resultado da análise qualitativa que se obtém com as combinações dos eventos básicos que levaram à ocorrência do evento topo.

$$Topo = X1 + X2 + (X3)(X6) + (X3)(X7) + (X3)(X8) + (X3)(X9) + (X4)(X6) + (X4)(X7) + (X4)(X8) + (X4)(X9) + (X5)(X6) + (X5)(X7) + (X5)(X8) + (X5)(X9) + X10 + X11 + X12 + X13 + X14. \quad (5.9)$$

Através da identificação dos cortes mínimos, a árvore de falhas pode ser convertida a partir da árvore de falhas da Figura 5.5, para a árvore de falhas na forma mais simples, estruturada da Figura 5.6.

Os cortes mínimos são ilustrados na Figura 5.6 onde observa-se sete cortes mínimos com um evento básico e doze cortes mínimos com dois eventos básicos. Os cortes mínimos de um evento básico estão combinados pela porta lógica “OU”. Os mínimos cortes de dois eventos básicos estão combinados pela porta lógica “E”.

Figura 5.6 Árvore de falhas com estrutura reformada por cortes mínimos

Conforme a Figura 5.6 observa-se a análise qualitativa da árvore de falhas para o evento topo com cortes mínimos de um evento básico e cortes mínimos de dois eventos básicos. Os cortes mínimos de um evento básico, também conhecidos cortes mínimos de primeira ordem (X1, X2, X10, X11, X12, X13, X14), fazem com que apenas a ocorrência de um evento básico cause a ocorrência do evento topo. A existência de cortes de primeira ordem pode ser um indicador de baixa confiabilidade do sistema, pois significa que apenas uma única falha é capaz de causar a falha total do sistema. Isto nem sempre é verdadeiro, pois mesmo os cortes de primeira ordem podem ter baixas probabilidades de falha, o que não necessariamente compromete a confiabilidade do sistema.

Os mínimos cortes de dois eventos básicos são chamados também cortes mínimos de segunda ordem ((X3)(X6), (X3)(X7), (X3)(X8), (X3)(X9), (X4)(X6), (X4)(X7), (X4)(X8), (X4)(X9), (X5)(X6), (X5)(X7), (X5)(X8), (X5)(X9)). Para que estes tipo de eventos de segunda ordem levem a ocorrência do evento topo, eles tem que falhar simultaneamente os dois eventos básicos.

5.1.4.2 Análise quantitativa da árvore de falhas

A análise quantitativa foi desenvolvida para estimar a probabilidade de falha do evento topo e os cortes mínimos importantes. Os cortes mínimos calculados da análise qualitativa serão avaliados qualitativamente. Determinada a probabilidade de falha dos eventos básicos, o efeito dos eventos básicos sob a probabilidade do evento topo poder ser avaliado quantitativamente.

Na Tabela 5.4 são listados os eventos básicos ou causas da falha com suas respectivas probabilidade de falha. Os dados foram obtidos dos livros Bloch e Geitner (1999), Smith (1997), Chandler *et al* (1995) e Casazza (1995). A probabilidade de falha foi calculada para um tempo de operação de 2000 horas, tempo em que o óleo hidráulico deve ser trocado segundo Drapinski (1975). Os tipo de distribuições utilizadas para calcular a probabilidade de falha são de Weibull e Exponencial.

Tabela 5.4 Eventos básicos ou causas da falha com suas respectivas probabilidades de falha

Identificação da causa	Descrição da causa	Probabilidade de falha (2000 horas)	Distribuição			Referências
			Weibull	Exponencial		
			β	η (hora)	λ (falhas/hora)	
	X1	Nível de óleo insuficiente no tanque			5.64E-08	Casazza
	X2	Válvula de emergência desligada			9.44E-06	Chandler
A		Não existe sistema de bombeio				
B		Falha no sistema de bombeamento principal				
	X3	Filtro entupido 1	1.1	25000		Chandler
	X4	Bomba parada 1	1.1	50000		Bloch e Geitner
	X5	Falha no motor AC	1.2	100000		Chandler
C		Falha no sistema de bombeamento reserva				
	X6	Filtro entupido 2	1.1	25000		Chandler
	X7	Bomba parada 2	1.1	50000		Bloch e Geitner
	X8	Falha no pressostato 1			4.71E-06	Smith
	X9	Falha no motor DC	1.2	50000		Chandler
	X10	Falha no regulador eletrônico			5.71E-08	Chandler
D		Falha na unidade de controle				
	X11	Válvula proporcional não se move			9.44E-06	Chandler
	X12	Válvula distribuidora não se move	1	100000		Bloch e Geitner
E		Falha na unidade de trabalho				
	X13	Atuador 1 parado	2	900000		Casazza
	X14	Atuador 2 parado	2	900000		Casazza

Na Tabela 5.4 verifica-se que as válvulas proporcional e distribuidora tem confiabilidade representada por distribuição Exponencial e Weibull, respectivamente. Entretanto, ao observa-se o valor de β tem-se que este é igual a 1,0. Nesta situação a distribuição de Weibull representa a distribuição Exponencial cuja taxa de falha é

igual a $1/\eta$. Portanto a confiabilidade das válvulas acima citadas é representada por distribuição exponencial.

As probabilidades de falha dos eventos básicos são substituídas na equação 5.8 dando como resultado uma probabilidade de falha do evento topo de 8.1%, e uma confiabilidade de 91.9%. É importante para o bom desempenho do sistema hidráulico manter as características do fluido, e em função do regime do trabalho é necessário trocá-lo cada 2000 horas de operação, o que garante uma confiabilidade aproximadamente de 90% para o sistema, sendo acompanhada por tarefa de manutenção preventiva.

Os resultados da análise de importância dos eventos básicos estão listados na Tabela 5.5. A informação da análise da classificação de cortes mínimos importantes é útil já que permite identificar os componentes críticos e comparar o resultado obtido com a classificação da severidade da análise do tipo FMEA.

Tabela 5.5 Resultados do análise quantitativa: cortes mínimos importantes

	Conjunto de cortes mínimos	Cortes mínimos importantes (I_k)
1	X12	0.2444
2	X2	0.2309
3	X11	0.2309
4	X13	0.0543
5	X14	0.0543
6	(X3)(X6)	0.0449
7	(X3)(X7)	0.0213
8	(X4)(X6)	0.0213
9	(X3)(X9)	0.0155
10	(X4)(X7)	0.0101
11	X10	0.0074
12	(X4)(X9)	0.0073
13	(X5)(X6)	0.0068
14	X1	0.0062
15	(X3)(X8)	0.0052
16	(X5)(X7)	0.0032
17	(X4)(X8)	0.0025
18	(X5)(X9)	0.0023
19	(X5)(X8)	0.0008

Conforme a Tabela 5.5 os cortes de primeira ordem X12, X2 e X11, são os mais críticos porque suas probabilidades de falhas são as mais altas, em seguida estão X13 e X14, que também são críticos, só que em menor grau que os eventos X12, X2 e X11.

Como se mencionou na análise quantitativa os cortes de primeira ordem nem sempre são os mais críticos, o que acontece com X1 e X10 pois, segundo a classificação dos cortes mínimos importantes, estão nas posições 14 e 11 respectivamente, pois suas probabilidades de falha são muito baixas.

O corte de segunda ordem (X6)(X7) segundo a classificação feita é o mais sobressalente dos cortes de segunda ordem. Segundo a classificação o corte mínimo com menor probabilidade de acontecer é (X5)(X8).

5.1.5 Proposta de Políticas de Manutenção

A seleção dos componentes críticos foi feita a partir dos resultados das análises do FMEA e FTA. A seleção dos componentes críticos segundo a análise de FMEA foi apresentada na Tabela 5.2, e o resultado da análise de importância dos eventos básico no FTA, que foi apresentado na Tabela 5.5, também permite esta seleção. Realizando a comparação das análises se observa que na Tabela 5.2 os componentes pressostato e reservatório foram identificados como componentes críticos, e na análise de importância de eventos básicos no FTA, segundo a Tabela 5.6, eles tem uma probabilidade de falha muito pequena o que nos permite deduzir que não deveriam ser consideradas como componentes críticos do sistema. No caso do reservatório seria preciso realizar tarefas simples como inspeções e limpeza, e no pressostato seria necessário realizar inspeções e supervisionar se este está calibrado. No caso de falha, seria necessário simplesmente trocá-lo.

Na Tabela 5.7 tem-se a lista de componentes críticos com seus respectivos modos de falha e grau de severidade, ou seja, aqueles que comprometem a capacidade da geração de energia elétrica em um hidrogerador.

Tabela 5.6 Componentes críticos do Sistema Hidráulico do Regulador de Velocidade

Sistema	Subsistema	Componente	Modo de falha	Sev.
Sistema eletro - hidráulico	Sistema de resfriamento de óleo	Trocador de calor	Incapacidade de resfriar o óleo	7
	Sistema de presurizacao de óleo	Fluido	Variação da viscosidade: Alta Viscosidade	7
			Variação da viscosidade: Baixa Viscosidade	7
		Filtro	Ruptura do elemento filtrante	7
			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	7
	Unidade de controle	Válvula de emergência	Válvula não se move	9
		Válvula Proporcional	Válvula não se move	9
			Válvula não responde adequadamente ao comando	8
		Válvula Distribuidora	Válvula não se move	9
			Vazamento externo	7
			Válvula não responde adequadamente ao comando	8
	Unidade de trabalho	Atuador	Atuador fica sem movimento	9
			Velocidade Incorreta	7
			Movimento em pulso	7
			Vazamento externo	8
			Falta de força	8
	Meio de transporte	Tubos, mangueiras	Ruptura	8

Tomando-se por base a identificação dos componentes críticos do sistema hidráulico do regulador de velocidade de turbinas hidráulicas, começar-se-á elaborar as respectivas políticas de recomendação para cada um dos componentes críticos.

O objetivo das políticas de manutenção é apresentar de forma fácil a visualização das tarefas de manutenção a serem executadas no equipamento. A manutenção envolve atividades diretamente ligadas à prevenção e a predição da falha (manutenção preventiva e preditiva) e a correção das falhas (manutenção corretiva).

Para a elaboração das políticas de manutenção foram tomadas como base as referências de manuais de operação e manutenção, assim como livros de sistemas hidráulicos. Os manuais de operação e manutenção incluem todos os dados, informações e desenhos dos componentes. Os manuais incluem a descrição de procedimentos recomendados de operação, manutenção, lista de materiais e equipamentos, acompanhados de catálogos, diagramas e desenhos ou cortes descrevendo os equipamentos.

Para cada um dos modos de falha dos componentes críticos se empregou o método de seleção de práticas de manutenção baseadas na filosofia do RCM, como foi apresentado no Capítulo 3. Os resultados foram elaborados em termos de tabela, onde se classifica a falha como oculta (H), de segurança (S), e não operacional (O). Para o preenchimento das tabelas foi necessário responder às perguntas do diagrama de decisão do RCM, como foi apresentado na Figura 3.15.

Como observado na descrição operacional do sistema hidráulico do regulador de velocidade, tem-se dois sistemas em paralelo passivo (*standby*) de pressurização de óleo. Os componentes em condição de *standby* podem apresentar falhas ocultas cujo controle deve ser feito por inspeções periódicas para certificar a disponibilidade delas, quando forem requeridas.

É importante destacar que, caso exista um vazamento de óleo, seja evitado o contato com qualquer interface elétrica (por exemplo, solenóides e pressostatos). Os circuitos de controle devem ser isolados para eliminar o risco de uma descarga elétrica e reduzir a possibilidade de iniciar um incêndio. A ruptura de uma linha de

pressão devido a uma alta pressão pode causar danos à integridade física dos operadores.

Uma parte das políticas de manutenção é indicada na Tabela 5.7, onde tem-se como exemplo, o caso da bomba hidráulica. A parte complementar das políticas de manutenção, é exposta no Apêndice C.

5.1.6 Diagnóstico de falhas do sistema hidráulico do regulador de velocidade

O diagnóstico de falhas permite um rápido diagnóstico do sistema, visando a determinação do componente onde a falha originou e as causas da falha, além da correção de problemas.

O regulador de velocidade tem varias funções dentro de uma Usina Hidroelétrica. Como apresentado no Capítulo 2, a função mais relevante é: “acionar os mecanismos de controle de vazão por meio de atuadores hidráulicos, permitindo variar a vazão de água através do rotor da turbina conforme a demanda de energia elétrica e mantendo, deste modo a rotação do eixo da turbina dentro de níveis admissíveis” (RODRIGUES *et al*, 2001).

Segundo a função definida, pode-se observar que o atuador hidráulico é um dos principais pontos de resposta de um regulador de velocidade. As ocorrências de falhas nos atuadores podem estar relacionadas com ele mesmo ou com outros componentes que formam parte do sistema hidráulico e que podem estar sujeitos a falhas.

Para dar início ao diagnóstico de falhas é importante definir as operações impróprias do atuador e os sintomas de aviso que se apresentam no sistema, como foi explicado no Capítulo 4. As operações impróprias do atuador e os sintomas de aviso foram retirados dos resultados da análise do FMEA e do FTA.

Como operações impróprias no atuador têm-se: atuador parado, atuador apresenta movimentos pulsantes. Como sintoma de aviso tem-se realizou temperatura elevada no óleo.

O diagnóstico de falhas é apresentado na Figuras 5.7 a 5.11.

Através da elaboração do diagnóstico de falha por meio de fluxogramas é possível obter de uma forma simples, dinâmica e rápida a identificação da falha. Como pode se observar o diagnóstico de falhas se caracteriza por ser um procedimento de manutenção corretiva (SOUZA, 2008).

Figura 5.7 Diagnóstico de falhas quando o atuador está parado

Figura 5.8 Diagnóstico de falhas quando o atuador apresenta movimento pulsante

Figura 5.9 Diagnóstico de falhas quando a pressão no sistema está em desacordo com a especificação de operação

Figura 5.10 Diagnóstico de falhas quando a pressão de operação é insuficiente no sistema

Figura 5.11 Diagnóstico de falhas quando a temperatura do óleo é elevada

5.2 Validação do método

É importante ressaltar que os equipes de manutenção e de operação de usina que foi utilizada como caso exemplo não mantinham um bom registro de todas as ocorrências das falhas no sistema hidráulico do regulador de velocidade. Os dados apresentados na Tabela 5.8 são apenas uma parte das observadas na máquina, mas apenas estas foram registradas pelas equipes de manutenção.

Atualmente o Operador Nacional de Sistemas Elétrico (ONS) exige o registro das mudanças dos estados operativos e condições operativas das Unidades Geradoras. Todo evento de mudança de estado operativo que caracteriza uma indisponibilidade total ou parcial de uma unidade geradora deverá obrigatoriamente ter seu campo de comentário preenchido com a descrição elucidativa do motivo da indisponibilidade, o qual permitira levar um melhor controle sobre as falhas que ocorrem dentro da unidade geradora. Dessa forma, as empresas geradoras de energia elétrica passam a manter um registro detalhado das falhas das máquinas.

Na Tabela 5.8, apresenta-se o resultado da filtragem dos dados históricos de falhas da usina, apresentando somente as falhas no sistema hidráulico do regulador de velocidade. Os dados de falha referem-se ao período operacional compreendido entre os anos 2006 a 2008.

Cabe ressaltar que todas as informações apresentadas na Tabela 5.8 foram coletadas com as equipes de manutenção e operação da usina e compreendem apenas as falhas registradas pelas equipes, não se consideraram as falhas relatadas verbalmente.

Tabela 5.8 Histórico de Falhas do regulador de velocidade – caso exemplo

Data da falha / hora	Comentário
27/02/2006 01:09	Manutenção corretiva (substituída a válvula proporcional)
01/03/2007 19:51	Verificar e sanar, causa de vazamento de óleo pelo pistão do servomotor
29/12/2007 09:08	Sanar vazamento de óleo na haste do servomotor
20/06/2008 14:30	Falha no trocar de calor

Como se pode observar na tabela foram registrados três eventos indesejáveis. No primeiro evento tem-se falha na válvula proporcional, o qual causa a parada do regulador de velocidade, já que se a válvula está em estado de falha, está não poderá ativar a válvula distribuidora e conseqüentemente comandar os servomotores. Quando se aplicou a análise de importância dos eventos básico na técnica da FTA para o evento topo “parada do regulador de velocidade” se observou que a falha na válvula proporcional é um dos eventos básicos mais importantes que levam a ocorrência do evento topo, indicando que o método proposto detectou um modo de falha importante para o regulador de velocidade

No segundo evento registrado na Tabela 5.8 tem-se o vazamento de óleo no servomotor. Como se observou na análise do tipo FMEA este modo de falha foi identificado como “vazamento externo” e como possível efeitos sobre o sistema foram identificados possível parada do regulador ou insuficiência de pressão no atuador. Na análise de importância dos eventos básicos na análise do tipo FTA, o atuador está localizado em quarto lugar. Na análise qualitativa do FTA, apresentada no Apêndice C, se pode observar que quando se tem vazamento de óleo no atuador, o nível de óleo pode chegar a ser insuficiente e também poderá permitir ingresso de ar, o qual provocará contaminação do fluido hidráulico.

Como último evento tem-se falha no trocador de calor. Como se observou nas análises dos tipos FMEA e FTA, quando ocorre uma falha no trocador de calor a temperatura de óleo aumenta e conseqüentemente diminui a viscosidade do fluido o qual provocará desgaste excessivo dos componentes mecânicos.

Realizando a comparação do histórico de falhas com a análise aplicada no sistema hidráulico se pode concluir que o método proposto detectou equipamentos críticos (e seus modos de falha) para o desempenho do regulador de velocidade. Do histórico de falhas da usina analisada tem-se que as paradas do regulador de velocidade foram causadas por modos de falhas levantadas na análise executada nesta dissertação.

6 CONCLUSÕES

6.1 Conclusões

Em primeiro lugar pode-se concluir que o método desenvolvido para diagnose de falhas do regulador de velocidade de turbinas hidráulicas mostrou-se apropriada para detecção de equipamentos (e seus modos de falhas) considerados críticos para a operação deste sistema. Ressalta-se a grande importância de seguir o fluxograma proposto na Figura 4.1, mostrando as seqüências das atividades que permitem fazer a análise detalhada e confiável, pois são utilizadas numa ordem lógica e organizada, para o método seja aplicado corretamente.

Vale ressaltar a importância da Análise Funcional, a qual é composta pela elaboração da Árvore Funcional e da Descrição Funcional (apresentadas na Figura 5.3 do Capítulo 5 e no Apêndice A, respectivamente). Por meio da utilização da árvore funcional obtém-se o conhecimento da função de cada componente do Regulador de Velocidade e a importância de cada um deles para o desempenho do sistema. A descrição funcional auxilia na execução da Análise de Modos e Efeitos de Falha, apresentada no Apêndice B.

Constatou-se a utilidade da aplicação da Análise de Modos e Efeitos de Falha para criar um banco de dados dos principais modos de falha dos componentes do regulador, suas causas e conseqüências. Os efeitos dos modos de falhas servem de base para verificar suas conseqüências na segurança dos operadores, no meio ambiente e no desempenho da função principal do sistema. Os resultados permitem a identificação dos componentes críticos do sistema hidráulico do regulador de velocidade como foi apresentado na Tabela 5.2, ou seja, aqueles cuja falha causaria a parada da máquina ou prejudicaria o desempenho do sistema hidráulico do regulador de velocidade. Para a execução desta análise foi utilizada a Tabela 4.2 que apresenta avaliação de severidade dos modos de falha.

Observou-se na análise do tipo FMEA, que a contaminação do fluido hidráulico por água, ar e partículas, acelera o processo de desgaste em vários componentes, pois o fluido tem a sua capacidade de lubrificação reduzida. O fluido hidráulico é um dos maiores contribuidores na propagação de modos de falha pelo sistema. Portanto, mantendo-se o controle ou eliminando os modos de falha do fluido, evita-se um número maior de efeitos indesejáveis no sistema, associado com o desgaste do seus componentes.

Conclui-se que a análise do tipo FMEA fornece subsídios para elaboração de procedimentos de planejamento de ações de manutenção preventiva e preditiva e até mesmo o desenvolvimento para um sistema de monitoramento e diagnose de falha no regulador de velocidade.

Na seqüência foi realizada a aplicação da Análise Qualitativa e Quantitativa das Árvores de Falhas. Na Análise Qualitativa foram identificados os cortes mínimos que ocasionarão o evento topo (parada do regulador de velocidade), como pode ser observado na Figura 5.6. Com a identificação dos cortes mínimos se realizou a Análise Quantitativa, tendo como resultado a probabilidade de falha de 8,1% para um tempo de operação de 2000 horas. Considerando que a troca do fluido hidráulico seja realizado a cada 2000 horas, esta troca significa a eliminação da contaminação, e não necessariamente a substituição do fluido.

O resultado da análise de importância dos eventos básicos mostrados na Tabela 5.5, serviu como ajuda para reavaliar os componentes críticos obtidos na análise do tipo FMEA, já que a análise de importância dos eventos básicos nos indica a contribuição dos eventos básicos para a ocorrência do evento topo. O pressostato e o reservatório foram identificados como componentes críticos segundo a análise de tipo FMEA, como se pode observar na Tabela 5.2, e na análise de importância de eventos básicos no FTA. Segundo a Tabela 5.5 eles tem uma probabilidade de falha muito pequena, fato que nos permite deduzir estes que estes não deveriam ser consideradas como componentes críticos do sistema. Como resultado da comparação das duas análises de obteve-se a identificação dos componentes críticos, listada na Tabela 5.7.

Como observado na descrição operacional do sistema hidráulico do regulador de velocidade, tem-se dois sistemas em paralelo passivo (*standby*) de pressurização de óleo. Os componentes em condição de *standby* podem apresentar falhas ocultas cujo controle deve ser feito por inspeções periódicas para certificar a disponibilidade destes, quando forem requeridos.

A elaboração do diagnóstico de falha por meio de fluxogramas, possibilita obter de uma forma simples, dinâmica e rápida a identificação da falha, que deverá ser utilizado pelos técnicos ou operadores da máquina. Portanto, o diagnóstico de falhas caracteriza-se por ser um procedimento de manutenção corretiva.

Constatou-se a complexidade da análise dos dados de falha resgistradas em campo, os quais foram colhidos de maneira não precisa, já que em muitos casos as falhas não foram registradas pelas equipes de manutenção e de operação da máquina.

Por fim, conclui-se que o método foi validado com a comparação do histórico de falhas e, considerando-se que os quatros eventos identificados no histórico de falhas foram encontrados como resultados da análise, fato que valida o método.

6.2 Considerações para Trabalhos Futuros

O método proposto neste trabalho pode ser utilizado para modelar qualquer outro sistema presente na indústria.

Deveria ser realizado o levantamento dos dados de falhas de campo para calcular a probabilidade de falha do sistema o que permitira calcular o evento topo e a importância dos eventos básicos, já que os dados neste trabalho foram retirados de livros.

Com os fluxogramas elaborados para o diagnóstico de falhas, permite-se propor um monitoramento no monitoramento, e também utilizar os fluxogramas como lógica de programação.

Sugere-se realizar estudos visando uma análise técnica e econômica de sistemas hidráulicos de reguladores de velocidade com o uso de ferramentas de análise de risco para fundamentar melhor o planejamento da área de manutenção.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462: Confiabilidade e Manutenibilidade**. Rio de Janeiro, 1994.

ALVAREZ, A.J; SOUZA, R.Q. **FMEA e FTA analysis for application of the Reliability Centered Maintenance methodology: Case study on Hydraulic Turbines**. *19th International Congress of Mechanical Engineering*, Brasília, 2007.

ALSTOM. Disponível em: <<http://www.alstom.com.br>>. Acesso em: 16 de mar. 2010.

ANDIA, C. G. **Centrales Eléctricas**. 1º ed. Arequipa: Universidad Católica de Santa Maria, 2005. 420p.

AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução n. 161 de abril de 2001**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/>>. Acesso em: 3 de jun. 2009. 5p.

_____. **Resolução n. 328 de 6 de outubro de 1998**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/>>. Acesso em: 3 de jun 2009. 10p.

BAGNOLI F, *et al*. **Fatigue failure of a stainless steel wires used in a hydraulic pressure line**. *Engineering Failure Analysis*-16. p.1404-1411. 2009.

BLOCH, H. P.; GEITNER, F. K. **Machinery Failure Analysis and Troubleshooting**. 3º ed. Texas: Gulf Professional Publishing, 1999. 668p.

BONALDI, E. *et al*. **Diagnóstico de falhas em motores de corrente continua**. *VIII Conferencia internacional de aplicaciones industriales*, Poços Calda, 2008.

CARAZAS, F.J.G. **Análise de disponibilidade de Turbinas a Gás empregadas em Usinas Termelétricas a ciclo combinado**. 2006. 263p. Dissertação (Mestrado) - a Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

CASAZZA, L. O; *et al.* **Data collection and analysis in support of risk assessment for hydroelectric stations**, California, 1995.

CASSANELLI, G; *et al.* **Failure Analysis – assisted FMEA**. *Microelectronics Reliability* – 46. p. 1795-1799. 2006.

CHANDLER, G. *et al.* **Nonelectronic Parts Reliability Data**. Rome: Rome laboratory, 1995. 1004p.

DE NEGRI, V. J. **Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos para Automação e controle**. Florianópolis. 2001. Apostila para disciplina de pós-graduação do Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina. 2001.

DÍEZ, P. F. **Turbinas Hidráulicas**. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética de la Universidad de Catarina, Espanha, 1996. 141p. Disponível em: <<http://libros.redsauce.net>>. Acesso em: 16 de abr. 2009.

DRAPINSKI J. **Hidráulica e Pneumatica Industrial e móvel**. 1º ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil,. 1975. 287p.

DUARTE, Z. **¿Preventivo, predictivo o correctivo?. Decisión bajo el enfoque de planificación de las acciones de mantenimiento**. *Uptime Magazine*, 2007. Disponível em: <<http://confiabilidad.net>>. Acesso em: 28 de out. 2009.

FERREIROS CAT. **Manual técnico para Estudantes, Instrucción técnica DMSE0020-2004a**. Lima (2004). 173p.

FRITH R.H.; SCOTT W.; **Control of solids contamination in hydraulic systems- An Overview**. *Wear* – 165. p. 69-74. 1993.

HAWKINS, P.G.; WOLLONS, D.J. **Failure modes Effects Analysis of Complex Engineering Systems Using Funtional Models**. *Artificial Intelligence in Engineering*-12. p.375-397. 1998.

HUGUEROS P.S.; NETO W.W. **Avaliação de corrosão em trocadores de calor tipo duplo tubo, através da técnica da radiografia computadorizada.** *XXI Congresso Nacional de Ensaios Não Destrutivos*, Salvador, 2002.

ITAIPU. Disponível em: <<http://www.itaipu.gov.br>>. Acesso em: 16 de nov. 2009.

IZENA A, *et al.* **Practical Hydraulic Turbine Model.** *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, 2006.

JANG, J. **Design of an Optimal Robust Governor for Hydraulic Turbine Generating Units.** *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1995.

JINGYI, Z. *et al.* **The development and prospect of hydraulic reliability engineering.** 2001.

LEITCH, R. **Reliability Analysis for Engineers.** 1º ed. Grã-Bretanha: Oxford Press, 1995. 230p.a

LEWIS, E. E. **Introduction to Reliability Engineering.** 2º ed. New York: John Wiley & Sons, 1987. 435p.

LINSINGEN, I. V. **Fundamentos de sistemas hidráulicos.** 3º ed. Florianópolis: UFSC, 2008. 399p.

MAZZORANA, R.H.F. **Modelagem dinâmica via fluxo de potência de Reguladores de Velocidade em Usinas Hidroelétricas,** 2008. 140p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 10 de jan. 2010.

MOBLEY, R.K. Fluid Power Dynamics. Editora Butterworth-Heinemann, Estados Unidos, 2000.

MONTILLA, C.A.; ARROYAVE, J.F.; SILVA, C.E. **Caso de Aplicación Centrado en la Confiabilidad RCM, previa existencia de Mantenimiento Preventivo.** *Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal*, 2007.

MOUBRAY, J. **Reliability Centered Maintenance.** 2° ed. New York: Industrial Press, 2000. 445p.

NOWLAN, F.; HEAP, H. **Reliability – Centered Maintenance.** *Microelectronics and Reliability*-18. p. 407-446. 1978.

O’CONNOR, P.D.T. **Practical Reliability Engineering,** 2° ed. New York: Wiley&Sons, 1985. 500p.

Operador Nacional do Sistema Elétrico. Disponível em: <<http://www.ons.org.br>> Acesso em: 15 de abr. 2009.

PAES F.H.; DE NEGRI, V.J. **Capacitação industrial para construção de sistemas hidráulica de controladores de turbinas, Projeto PADCT/REIVAX,** Florianópolis, 2002. 75p.

PARK, A.; LEE, S. J. **Fault tree analysis on handwashing for hygiene management.** *Food control*-20, 2009. p. 223-229

PARK. M. **Fatigue failure of a Hydraulic filter head.** *Engineering Failure Analysis*-9. p. 435-450, 2002.

PARKER. **Tecnologia Hidráulica Industrial.** Jacareí (1999). 158p.

PARR, A.A. **Hydraulic and Pneumatic.** 1° ed. New York: Elsevier Science & Technology Books, 1999. 249p.

PORCIÚNCULA, G; DE NEGRI V; DIAS A. **Reliability of Electro-Hydraulic equipment systematization and analysis.** *ABCM Symposium Series in Mechatronics-2*. p.393-400, 2006.

RAUSAND, M. **Reliability Centered Maintenance.** *Reliability Engineering & System Safety* – 60. p. 121-132. 1998.

RAUSAND, M; ARNOLJOT, H. **System Reliability Theory, Models, Statistical, Methods and Applications.** 2ºed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2004. 668p.

RAVI, D.; ANDRIES, B. **Hydraulic Systems, Operation and troubleshooting for engineers & technicians,** 1ºed. New York: Elsevier Science & Technology Books, 2005. 232p.

REIVAX. **Regulador de Velocidade RVX 300.** Disponível em: <<http://www.reivax.com.br>>. Acesso em: 15 de fev. 2010.

RODRIGUES, L. A. **Análise Teórico-Experimental de um circuito hidráulico de controle de velocidade de turbina em central hidrelétrica.** *XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*, Uberlândia, 2001.

SELUTOO, M. A. **Strategic formulation of industrial maintenance supported by equipmant's reliability.** *Produção*, 2005.

SILVA D.R.B; CARAZAS F.J.G; SOUZA G.F.M. **Método para a seleção de instrumentação de Turbinas Hidráulicas em processo de modernização.** *V.Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, Salvador, 2008.

SMITH, D. J. **Reliability, Maintainability and Risk.** 5º ed. Oxford: Butterwoth Heinemann, 1997. 312p.

SMITH, A; HINCHCLIFFE, G. **RCM Gateway to world class maintenance.** 1º ed. Londres: Elsevier Butterwoth Heinemann, 2004. 335p.

SOUZA, G.F.M; MOLINARI, R. **PMR-5235 Fundamentos da Manutenção de**

Sistemas Mecânicos. São Paulo: Epusp, 2008. 60p. Apostila para disciplina de pós-graduação do Departamento de Engenharia Mecatrônica, PMR-5235. Fundamentos da Manutenção de Sistemas Mecânicos.

SOUZA, G.F.M.. **Análise de Confiabilidade Aplicada ao Projeto de Sistemas Mecânicos.** São Paulo: Epusp, 2008. Apostila para disciplina de pós-graduação, do Departamento de Engenharia Mecatrônica, PMR-5201. Análise de Confiabilidade Aplicada ao Projeto de Sistemas Mecânicos.

SUNDARARAJAN, C. **Guide to Reliability Engineering.** 1° ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991. 424p.

US MIL-STD-1629A. **Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis.** Washington, 1977. Disponível em: <http://www.goes-r.gov/procurement/antenna_docs/reference/MIL-STD-1629A.pdf>. Acesso em: 10 de jan. 2008.

VINADE, C.A.C. **Sistematização do processo de projeto para confiabilidade e manutenibilidade aplicado a Sistemas Hidráulicos e implementação de um sistema especialista.** 2003. 233p. Dissertação (Doutorado) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

VINADE, C.A.C.; *et al.* **FMEA aplicado no desenvolvimento de Sistemas Hidráulicos.** 3° Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto, Florianópolis, 2001.

VOITH HYDRO. Disponível em: <<http://www.voithhydro.com>>. Acesso em: 10 de fev. 2009.

XENOS, H. G. **Gerenciamento a Manutenção Preditiva.** 1° Ed. Rio de Janeiro: INDG, 2004. 302p.

XIAOJUN, Z; LIFENG, X; JAY, L. **Reliability-centered predictive maintenance scheduling for a continuously monitored system subject to degradation.**

Reliability engineering & system safety-92, 2007. p. 530-534.

YESID, E. A. M. **Desenvolvimento de um sistema servopneumático para Regulação Velocidade de turbinas em pequenas centrais Hidroelétricas**. 2006. 150p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

ZANINI, L.C. *et al.* **Minimização do desgaste erosivo corrosivo em trocadores de calor de usinas termoeletricas a carvão**. Laboratório de Síntese de Complexos Multifuncionais, Universidade do Extremo Sul Catarinense.

APÊNDICE A. DESCRIÇÃO FUNCIONAL

I. Regulador eletrônico:

Função primaria: Enviar a sinal elétrico para a válvula proporcional, para iniciar a regulação.

II. Sistema Eletro – Hidráulico:

Função primaria: Realizar a movimentação do anel distribuidor por meio dos atuadores

II.1 Sistema de Resfriamento de óleo:

Função Primária:

- Manter o óleo dentro das faixas de temperatura especificada.

II.1.1. Reservatório de água:

Função Primária:

- Conter a água do sistema de resfriamento do óleo.

II.1.2 .Trocado de calor (casos/tubos):

Função Primária:

- Resfriar o óleo do circuito hidráulico.

II.1.3. Bomba:

Função Primária:

- Transferir a energia mecânica para a água.

II.2. Sistema de pressurização de óleo:

Função Primária:

- Fornecer fluido pressurizado para a movimentação dos atuadores.

II.2.1.Sistema de Bombeio Principal:

Função Primária:

- Fornecer fluido pressurizado para a movimentação dos atuadores.

II.2.1.1. Presostato Sensor 1:

Função Primária:

- Acionar as bombas em caso de queda brusca de pressão.

II.2.1.2. Reservatório:

Função Primária:

- Armazenar o óleo. Ajudar a purgar o fluido dos contaminantes. Ajudar a dissipar o calor do fluido.

II.2.1.3. Filtro:

Função Primária:

- Manter o fluido livre de partículas estranhas.

II.2.1.4. Motor A.C.

Função Primária:

- Transformar energia elétrica em energia mecânica para o acionamento da bomba.

II.2.1.5. Bomba:

Função Primária:

- Converter energia mecânica em hidráulica fazendo os fluidos escoarem.

II.2.1.6. Válvula de. Alivio:

Função Primária:

- Limita a pressão do sistema.

II.2.2. Sistema de Bombeio de Reserva:

Função Primária:

- Fornecer fluido pressurizado para a movimentação dos atuadores.

II.2.2.1 Presostato Sensor 2:

Função Primária:

- Acionar as bombas em caso de queda brusca de pressão.

II.2.2.2 Reservatório:

Função Primária:

- Armazenar o óleo. Ajudar a purgar o fluido dos contaminantes. Ajudar a dissipar o calor do fluido.

II.2.2.3. Filtro:

Função Primária:

- Manter o fluido livre de partículas estranhas.

II.2.2.4. Motor C.C.

Função Primária:

- Transformar energia elétrica em energia mecânica para o acionamento da bomba.

II.2.2.5. Bomba:

Função Primária:

- Converter energia mecânica em hidráulica fazendo os fluidos escoarem.

II.2.2.6. Válvula de Alívio:

Função Primária:

- Limita a pressão do sistema

II.3. Acumulador:

Função Primária:

- Entregar vazão para fechar o distribuidor em caso de emergência.

II.3.1. Válvula Cartucho:

Função Primária:

- Permitir o passo do fluido do acumulador para fechar o regulador de velocidade em caso de emergência.

II.3.2. Válvula Isoladora:

Função Primária:

- Isolar o acumulador ar/óleo para sua proteção.

II.3.3. Compressor:

Função Primária:

- Abastecer de ar ao acumulador.

II.4. Unidade de Controle:

Função Primária:

- Receber a sinal do regulador eletrônico para movimentar os atuadores.

II.4.1. Válvula de emergência:

Função Primária:

- Precisa estar constantemente ligada para o funcionamento do regulador de velocidade.

- Será desligada em caso de emergência.

II.4.2. Válvula Proporcional:

Função Primária:

- Receber a sinal do Regulador de velocidade eletrônica e comandar a válvula distribuidora.
- Efetuar uma mudança do suporte elétrico ao suporte hidráulico.

II.4.3. Válvula Distribuidora:

Função Primária:

- Receber a sinal da válvula proporcional e controlar o movimento dos atuadores.
- Fornecer a potência hidráulica necessária para a manobra do atuador.

II.4.4. Sensor de Posição:

Função Primária:

- Indica a posição da válvula distribuidora.

II.5. Unidade de Trabalho:

Função Primária:

- Movimentar o anel do distribuidor.

II.5.1. Cilindros Hidráulicos:

Função Primária:

- Movimentar o anel do distribuidor.
- Converter a força fluida em mecânica proporcionando um movimento em linha reta.

II.5.2. Sensor de Posição:

Função Primária:

- Indica a posição da haste do atuador.

III. Distribuidor:

Função principal: Responsável pelo controle da vazão que passa pelo rotor, e assim, a potência gerada pela turbina.

III.1. Anel inferior:

Função principal:

- Suporta as pás

III.2. Pás diretoras

Função principal:

- Bloquear a entrada de água
- Regular a velocidade do rotor da turbina

III.3 Biela – Manivela

Função principal:

- Transmitir o movimento do anel distribuidor para as pás.

III.4. Anel de regulação ou anel distribuidor:

Função principal:

- Transformar o movimento linear do atuador em movimento de rotação.

APÊNDICE B. ANÁLISE DE MODOS E EFEITOS DE FALHA

Análise de Modo e Efeito de Falhas - FMEA					
Componente:	FluidoHidráulico			Página:	1 de 18
Sistema:					
Equipe					
Responsável					
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	Variação da viscosidade: Alta Viscosidade	Baixa temperatura do meio ambiente	Aumento da temperatura	7
			Fluido Inadequado	Consumo de mais potencia elétrica	
			Falha no Aquecedor (em ambientes muitos frios)	Aumento da resistência ao escoamento	
			Falha na seleção do fluido	Desgaste acelerados dos componentes do sistema	
		Variação da viscosidade: Baixa Viscosidade	Falha no trocador de calor	Perda do poder lubrificante	7
			Contaminação por água	Desgaste acelerados dos componentes do sistema	
			Falta de limpeza do reservatório		
			Falha no posicionamento do defletor	Aumento de vazamentos internos e externos	
			Falha na seleção do fluido	Queda de pressão	
			Duto de entrada e retorno muito pertos		

Análise de Modo e Efeito de Falhas - FMEA					
Componente:	Reservatório			Página: 2 de	18
Sistema:					
Equipe					
Responsável					
Componente	Função	Modo de falha potencial	Causa(s) da falha	Possível(is) Efeito(s) da falha	Sev.
Reservatório	Armazenar o óleo. Ajudar a purgar o fluido dos contaminantes. Ajudar a dissipar o calor do fluido	Vazamentos de óleo			7
			Falha de projeto	Ingresso de ar no sistema (Variação no	
			Falha no ajuste na linha de dreno	modulo de compressibilidade)	
			Tampa de limpeza mal fechada	Cavitação na bomba	
			Presença de trincas	Pressão insuficiente nos atuadores	
				Aeração na bomba	

Análise de Modo e Efeito de Falhas - FMEA					
Componente:	Filtro			Página: 3 de	18
Sistema:					
Equipe					
Responsável					
Componente	Função	Modo de falha potencial	Causa(s) da falha	Possível(is) Efeito(s) da falha	Sev.
Filtro	Manter o fluido livre de partículas estranhas	Ruptura do elemento filtrante	Falha na seleção do filtro	Desgaste acelerado dos componentes do sistema	6
			Aumento da pressão por acúmulo de sujeira	Vazamentos internos e externos	
			Vazão muito elevada para o filtro	Acúmulo de sujeira	
			Desgaste do papel do elemento filtrante	Possível emperramentos das válvulas	
				Obstrução dos pilotos das válvulas	
				Possível emperramentos do cilindro	
		Filtro entupido	Viscosidade alta do fluido	Possível parada dos cilindros	7
			Falta de limpeza do reservatório	Aumento da pressão no lado da entrada do filtro	
			Não se presta atenção aos intervalos de serviço do filtro	Cavitação na bomba	
			Falha na seleção do filtro	Temperatura elevada do sistema	

Análise de Modo e Efeito de Falhas - FMEA					
Componente:	Motor AC			Página: 4 de	18
Sistema:					
Equipe					
Responsável					
Componente	Função	Modo de falha potencial	Causa(s) da falha	Possível(is) Efeito(s) da falha	Sev.
Motor AC	Transformar energia elétrica em energia mecânica para o acionamento da bomba	Não há transformação de energia elétrica em energia mecânica	Disjuntor aberto	Parada do regulador de velocidade	8
			Perda do isolamento da bobina		
			Sobreaquecimento no motor		
			Travamento do eixo do motor		
			Ventilação inadequada		
			Baixo ou incorreto tensão no bordos do motor		

Análise de Modo e Efeito de Falhas - FMEA					
Componente:	Motor CC			Página: 5 de 18	
Sistema:					
Equipe					
Responsável					
Componente	Função	Modo de falha potencial	Causa(s) da falha	Possível(is) Efeito(s) da falha	Sev.
Motor CC	Transformar energia elétrica em energia mecânica para o acionamento da bomba	Não há transformação de energia elétrica em energia mecânica	Disjuntor aberto	Parada do regulador de velocidade	7
			Perda do isolamento da bobina		
			Sobreaquecimento no motor		
			Presença de faíscas devido a sujeira no comutador, problemas de excentricidade, pressão de contacto incorreta nas escovas		
			Folgas erradas entre as escovas e as porta escovas		
			Sobre corrente provocando incandescência nas escovas, desgaste e quebra		
			Falha no circuito de armadura		
			Desbalanceamento		

Análise de Modo e Efeito de Falhas - FMEA					
Componente:	Bomba			Página:	6 de 18
Sistema:					
Equipe					
Responsável					
Componente	Função	Modo de falha potencial	Causa(s) da falha	Possível(is) Efeito(s) da falha	Sev.
Bomba	Converter energia mecânica em hidráulica fazendo os fluidos escoarem	Incapacidade de bombear	Ruptura do acoplamento		8
			Falha no sistema de alimentação de energia elétrica		
			Travamento do eixo da bomba	Parada do regulador de velocidade	
			Motor parado		
			Bloqueio total da linha de sucção		
			Entupimento do filtro de sucção		
			Falta ou falha de lubrificação		
		Bombeamento insuficiente à especificada	Falta ou falha de lubrificação ,		7
			Vazamentos causados por montagem imprópria e falhas dos retentores ou conexões	Velocidade incorreta do atuador	
			Vazamentos internos ou externos na bomba	Possível parada do regulador de velocidade	
			Folgas excessivas ou com variações devidos a	Pressão insuficiente no acumulador	
			aos erros de montagem	Alteração na pressão do sistema	
			Cavitação ou aeração		
			Pressão de sucção insuficiente		

Análise de Modo e Efeito de Falhas - FMEA					
Componente:	Atuador			Página: 7 de	18
Sistema:					
Equipe					
Responsável					
Componente	Função	Modo de falha potencial	Causa(s) da falha	Possível(is) Efeito(s) da falha	Sev.
Atuador	Converter a força fluida em mecânica proporcionando um movimento em linha reta, suave e controlável	Atuador fica sem movimento	Viscosidade baixa do óleo		9
			Fluido com alta concentração de partículas	Parada do regulador de velocidade	
			Emperramento do embolo ou do haste do cilindro	Golpes de pressão	
			Falha no sistema de bombeio	Sobre pressão no sistema	
			Nível de óleo insuficiente	Danificar o retentor do atuador	
			Pressão insuficiente no sistema		
		Velocidade Incorreta	Desgaste excessivo da camisa, pistão ou anéis		6
			Folga excessiva dos anéis do pistão		
			Retentores com aperto insuficiente	Fonte de vibração	
			Falha na seleção do fluido	Velocidade instável do atuador	
			Desgaste do anéis do pistão	Ruído	
			Viscosidade alta do óleo		
			Nível de óleo insuficiente		
			Ingresso de ar no sistema		

Componente	Função	Modo de falha potencial	Causa(s) da falha	Possível(is) Efeito(s) da falha	Sev.
Atuador	Converter a força fluida em mecânica proporcionando um movimento em linha reta, suave e controlável	Movimento pulsante	Presença de ar no sistema.		7
			Amassaduras na camisa	Fonte de Vibração	
			Excesso de ajuste dos amortecedores do fim do curso	Perda de precisão de posicionamento do cilindros	
			Sulcos na camisa ou no pistão		
		Vazamento externo	Estiramento de tirantes ou parafusos	Possível parada do regulador de velocidade	8
			Desgaste do retentor	Insuficiência ou flutuações de pressão	
			Presença de trincas	(perda de força no atuador)	
			Montagem incorreta do retentor	Ingresso de ar no sistema	
			Cilindro desalinhado		
		Falta de força	Vazamento interno no cilindro		8
			Presença de ar no fluido	Possível parada do regulador de velocidade	
			Cilindro desalinhado	(perda de força no atuador)	
			Válvula de alívio está calibrada incorretamente		
			Pressão insuficiente no sistema		
			Nível insuficiente de óleo no reservatório		
			Fluido inadequado		

Análise de Modo e Efeito de Falhas - FMEA					
Componente:	Válvula de alívio			Página: 8 de	18
Sistema:					
Equipe					
Responsável					
Componente	Função	Modo de falha potencial	Causa(s) da falha	Possível(is) Efeito(s) da falha	Sev.
Válvula de alívio	Limita a pressão do sistema	Não regula a pressão	Quebra da mola	Aumento da temperatura do fluido	7
			Quebra do pistão	Aumento da pressão no lado da entrada da válvula	
			Desgaste do parafuso		
			Vazamento de óleo	Golpes de pressão	
		Pressão de abertura errada	Desgaste da mola		6
			Má calibração da válvula	Queda de pressão (insuficiente pressão nos atuadores)	
			Acumulo de sujeira na válvula		
			Desgaste da válvula		

Análise de Modo e Efeito de Falhas - FMEA					
Componente:	Válvula antiretorno			Página: 9 de	18
Sistema:					
Equipe					
Responsável					
Componente	Função	Modo de falha potencial	Causa(s) da falha	Possível(is) Efeito(s) da falha	Sev.
Válvula antiretorno	Permitir o passo do fluido somente em uma direção	Passa o fluido em ambas as direções	Desgaste da mola	Pressão de retorno elevada	5
			Desgaste do assentamento	Golpe de aríete na bomba	
			Elementos de vedação danificados	Vazamentos na válvula	
			Desgaste do corpo da válvula		

Análise de Modo e Efeito de Falhas - FMEA					
Componente:	Válvula distribuidora			Página: 10 de	18
Sistema:					
Equipe					
Responsável					
Componente	Função	Modo de falha potencial	Causa(s) da falha	Possível(is) Efeito(s) da falha	S e v .
Válvula Distribuidora	Receber a sinal da válvula proporcional e controlar o movimento dos atuadores. Fornecer a potencia hidráulica necessária para a manobra do atuador	Válvula não se move	Excessivo ajuste do anéis que imobiliza o eixo da válvula		9
			Partículas depositadas		
			Mola quebrada, ajuste incorreto	Aumento da pressão do sistema	
			Fluido altamente viscoso	Possível parada do regulador de velocidade	
			Retentor desgastado	Aumento da temperatura causando baixa	
			Piloto hidráulico obstruído	viscosidade e desgaste acelerados das	
			Travamento do carretel	vedações, dos componentes metálicos.	
			Corpo estranho encunhado entre o carretel e a carcaça		
		Válvula não responde adequadamente ao comando	Bolsa de ar no óleo		8
			Piloto hidráulico parcialmente obstruído	Perda da precisão no posicionamento do atuador	
			Vazamento na válvula permitindo a passagem de pressão para o lado oposto		
		Vazamento externo	Pressão elevada no sistema		7
			Parafusos esticados	Posivel parada do regulador de velocidade	
			Falta de retentor ou de junta	Insuficiência ou flutuações de pressão	
			Porosidade ou trincas na carcaça	Velocidade incorreta do atuador	
			Elementos de vedação desgastados		

Componente	Função	Modo de falha potencial	Causa(s) da falha	Possível(is) Efeito(s) da falha	Sev.
Válvula Distribuidora	Receber a sinal da válvula proporcional e controlar o movimento dos atuadores. Fornecer a potência hidráulica necessária para a manobra do atuador	Vazamento interno	Retentores desgastados	Perda da precisão no posicionamento do	6
			Desgaste do carretel ou da carcaça	atuador	
			Falta de canaletas no carretel	Queda de pressão	
			Falta de assentamento por partículas (partícula estranha aderida)	Aquecimento na válvula	
			Deformação da carcaça por erro de montagem	Aquecimento do óleo	

Análise de Modo e Efeito de Falhas - FMEA					
Componente:	Válvula Proporcional			Página: 11 de 18	
Sistema:					
Equipe					
Responsável					
Componente	Função	Modo de falha potencial	Causa(s) da falha	Possível(is) Efeito(s) da falha	Sev.
Válvula Proporcional	Receber a sinal do Regulador de velocidade eletrônica e comandar a válvula distribuidora. Efetuar uma mudança do suporte elétrico ao suporte hidráulico.	Válvula não se move	Queima do solenóide		
			Cabos elétricos desgastados		
			Partículas Aderidas entre o carretel e o agulheiro		
			causando que o carretel se trave (solenóide)	Queima do solenóide	
			Excessivo ajuste do anéis que imobiliza o eixo da válvula	Possível parada do regulador de velocidade	
			Mola quebrada, ajuste incorreto	Sobre pressão	9
			Fluido altamente viscoso	Aumento da temperatura causando baixa viscosidade e desgaste acelerados das	
			Retentor desgastado	vedações, dos componentes metálicos.	
			Falha no regulador de velocidade eletrônica		
			Dutos obstruídos ou quebrados		
			Corpo estranho encunhado entre o carretel e a carcaça		
		Válvula não responde adequadamente ao comando	Bolsa de ar no óleo		
			Frequência e voltagem incorretos no solenóide	Perda da precisão no posicionamento do atuador	8
			Voltagem da bobina é muito baixa, o campo eletromagnético não é o suficientemente forte		
		Vazamento Externo	Parafusos esticados	Aquecimento do óleo	
			Falta de retentor ou de junta	Queda de pressão (insuficiente pressão nos atuadores)	6
			Porosidade ou trincas na carcaça		
			Deformação da carcaça por erro de montagem		
			Elementos de vedação desgastados		

Análise de Modo e Efeito de Falhas - FMEA					
Componente:	Válvula cartucho			Página: 12 de 18	
Sistema:					
Equipe					
Responsável					
Componente	Função	Modo de falha potencial	Causa(s) da falha	Possível(is) Efeito(s) da falha	Sev.
Válvula cartucho	Permitir o passo do fluido do acumulador para fechar o regulador de velocidade em caso de emergência	Válvula não se move	Mola danificada ou quebrada		5
			Ruptura do obturador		
			Presença de trinca no corpo da válvula	Aumento da temperatura do fluido	
			Partículas aderidas entre o assento e o obturador	Queda de pressão	

Análise de Modo e Efeito de Falhas - FMEA					
Componente:	Válvula Isoladora ar/óleo (4X2)			Página: 13 de 18	
Sistema:					
Equipe					
Responsável					
Componente	Função	Modo de falha potencial	Causa(s) da falha	Possível(is) Efeito(s) da falha	Sev.
Válvula Isoladora ar/óleo (4X2)	Isolar o acumulador ar/óleo para sua proteção.	Válvula não se move	Queima do solenóide		6
			Cabos elétricos desgastados		
			Voltagem da bobina é muito baixa, o campo eletromagnético não é o suficientemente forte para atrair a armadura (falha no solenóide).		
			Partículas Aderidas entre o carretel e o agulheiro causando que o carretel se trave (solenóide)		
			Excessivo ajuste do anéis que imobiliza o eixo da válvula	Aumento da temperatura do fluido	
			Mola quebrada, ajuste incorreto	Queda de pressão	
			Fluido altamente viscoso		
			Retentor desgastado		
			Falha do controle eletrônico		
			Corpo estranho encunhado entre o carretel e a carcaça		

Análise de Modo e Efeito de Falhas - FMEA					
Componente:	Válvula Emergência (4X2)			Página:	14 de 18
Sistema:					
Equipe					
Responsável					
Componente	Função	Modo de falha potencial	Causa(s) da falha	Possível(is) Efeito(s) da falha	Sev.
Válvula Emergência (4X2)	Precisa estar constantemente ligada para o funcionamento do regulador de velocidade. Será desligada em caso de emergência.	Válvula não se move	Queima do solenóide		9
			Cabos elétricos desgastados		
			Partículas Aderidas entre o carretel e o agulheiro		
			causando que o carretel se trave (solenóide)		
			Excessivo ajuste do anéis que imobiliza	Parada do regulador de velocidade	
			o eixo da válvula	Queima do solenóide	
			Mola quebrada	Golpe de pressão	
			Fluido altamente viscoso		
			Corpo estranho encunhado entre o carretel e a carcaça		
		Válvula não responde adequadamente ao comando	Bolsa de ar no óleo		6
			Frequência e voltagem incorretos (solenóide)	Possível parada do regulador de velocidade	
			Voltagem da bobina é muito baixa, o campo eletromagnético não é o suficientemente forte		
		Vazamento			6
			Parafusos esticados		
			Falta de retentor ou de junta	Queda de pressão (insuficiente pressão nos atuadores)	
			Porosidade ou trincas na carcaça		
			Deformação da carcaça por erro de montagem		
			Elementos de vedação desgastados		

Análise de Modo e Efeito de Falhas - FMEA					
Componente:	Tubos, mangueiras conexões.			Página: 15 de 18	
Sistema:					
Equipe					
Responsável					
Componente	Função	Modo de falha potencial	Causa(s) da falha	Possível(is) Efeito(s) da falha	Sev.
Tubos, mangueiras conexões.	Encaminhar o fluido hidráulico entre os componentes do circuito hidráulico	Ruptura	Pressão muito elevada		8
			Temperatura elevada		
			Desgaste erosivo causado por fluido quente com impacto de partículas		
			Fatiga / envelhecimento	Possível parada do regulador de velocidade	
			Corrosão das paredes da tubulação	Ingresso de ar no sistema	
			Falha no projeto		
			Desgaste do selo nas conexões		
			Montagem ou instalação incorreta		

Análise de Modo e Efeito de Falhas - FMEA					
Componente:	Pressostato			Página: 16 de 18	
Sistema:					
Equipe					
Responsável					
Componente	Função	Modo de falha potencial	Causa(s) da falha	Possível(is) Efeito(s) da falha	Sev.
Pressostato	Acionar as bombas em caso de queda brusca de pressão	Não aciona	Tensão de alimentação excede a tensão nominal		8
			Corto circuito		
			Falta de abastecimento de energia	Possível parada do regulador de velocidade	
			Quebra da mola	Insuficiência ou flutuações de pressão (perda de força no atuador)	
			Falha no micro-interruptor		
			Golpes de pressão hidráulica		
			Cabos desgastados ou desligados		

Análise de Modo e Efeito de Falhas - FMEA					
Componente:	Acumulador			Página: 17 de	18
Sistema:					
Equipe					
Responsável					
Componente	Função	Modo de falha potencial	Causa(s) da falha	Possível(is) Efeito(s) da falha	Sev.
Acumulador	Entregar vazão para fechar o distribuidor em caso de emergência	Perda total do acumulador	Falha na válvula de acesso de óleo		7
			Ruptura da bexiga		
			Presença de trincas na armadura	Insuficiência ou flutuações de pressão	
			Falha no sistema de ar comprimido		
			Falha na válvula de carga do acumulador		
		Vazão inadequada	Pressão de carga insuficiente		5
			Obstrução da Válvula de acesso de óleo		
			Vazamentos internos ou externos		
			Bomba fornece vazão insuficiente		
			Desgaste da vedação	Golpes de pressão	
			Presença de sujeira	Velocidade inadequada do atuador	
			Pressão de carga excessiva provocará atraso do óleo e diminuição do volume admitido		

Análise de Modo e Efeito de Falhas - FMEA					
Componente:	Trocador de calor (casco/tubos)			Página: 18 de	18
Sistema:					
Equipe					
Responsável					
Componente	Função	Modo de falha potencial	Causa(s) da falha	Possível(is) Efeito(s) da falha	Sev.
Trocador de calor (casco/tubos)	Resfriar o óleo	Resfriamento insuficiente do óleo	Vazão de água insuficiente		
			Área de transferência de calor insuficiente	Fluido aquecido, deixa de lubrificar, desgaste rápido de todos os componentes do circuito,	7
			Presença de sais minerais de água	desgaste acelerado das vedações	
			Presença de sujeira		
			Falta de lavado do trocador		
		Vazamento	Corrosão dos tubos		6
			Desgaste erosivo	Contaminação do fluido com água	
			Presença de trincas	Perda de óleo	
			Tubos rachados		

APÊNDICE C. ANÁLISE DA ÁRVORE DE FALHAS

Figura C. 1 Parada do Regulador de Velocidade

Figura C. 2 Válvula proporcional não se move

Figura C. 3 Válvula distribuidora não se move

Figura C. 4 Solenóide não aciona a válvula

Figura C. 5 Travamento do carretel da válvula

Figura C. 6 Atuador Parado

Figura C. 7 Viscosidade Baixa do Fluido

Figura C. 8 Falha no sistema de resfriamento

Figura C. 9 Velocidade incorreta do atuador

Figura C. 10 Bomba entrega vazão inadequada ou instável

Figura C. 11 Vazamento interno no atuador

Figura C. 12 Perda no posicionamento dos atuadores

Figura C. 13 Insuficiência pressão nos atuadores

RCM					Sistema			Sistema Hidráulico do Regulador de Velocidade													
Tabela de decisão					Componente			Fluido													
Modo de Falha	Avaliação de consequências				H1	H2	H3	Ação padrão				Atividade de Manutenção Proposta									
					S1	S2	S3														
					O1	O1	O3														
	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4											
Variação da viscosidade: Alta Viscosidade												Como atividade de Manutenção Preditiva									
	N	N	N	S	X							1. Análise de óleo									
Variação da viscosidade: Baixa Viscosidade												Como atividades de Manutenção Preventiva									
	N	N	N	S	X	X						1. Inspeccionar o estado do trocador de calor									
												2. Inspeccionar a pressão de operação do sistema é elevada									
												Como atividade de Manutenção Preditiva									
												1. Análise de óleo									
												2. Análise termográfico									

RCM					Sistema			Sistema Hidráulico do Regulador de Velocidade																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Tabela de decisão					Componente			Válvula Distribuidora																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											</

RCM					Sistema			Sistema Hidráulico do Regulador de Velocidade						
Tabela de decisão					Componente			Atuador Hidráulico						
Modo de Falha	Avaliação de consequências				H1	H2	H3	Ação padrão				Atividade de Manutenção Proposta		
					S1	S2	S3							
					O1	O1	O3							
	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4				
Atuador fica sem movimento												Como atividade de Manutenção Preventiva		
												1. Inspeção da viscosidade do fluido		
	S	S	S	S	X	X						2. Inspecionar o nível de óleo no tanque		
												3. Inspeção o sistema de pressurização de óleo		
												Como atividades de Manutenção preditiva		
												1. Analise de óleo		
Velocidade Incorreta												Como atividades de Manutenção Preventiva		
												1. Inspeção visual para detecção de vazamentos externos no atuador		
	N	N	N	S	X	X						2. Inspecionar visualmente se a camisa, pistão ou anéis, estão desgastados		
												3. Inspeção dos retentores		
												Como atividade de Manutenção preditiva		
												1. Análise de óleo		
Movimento em pulos												Como atividade de Manutenção Preventiva		
												1. Inspecionar a presença de ar no cilindro, deve ser sangrada.		
	S	N	S	N		X						2. Supervisar o nível do óleo no tanque		
												3. Inspeção o ajuste dos amortecedores		
												4. Inspecionar a presença de sulcos no haste.		
Vazamento externo												Como atividade de Manutenção Preventiva		
												1. Inspeção dos retentores		
	S	N	S	S	X	X						1. Inspeção de trincas		
												3. Inspeção de selos		
												4. Inspeção da área de ligação das tampas com a camisa		
												Como atividades de Manutenção Preditiva		
												1. Análise de ultra-som para detecção de trincas		
Falta de força												Como atividades de Manutenção Preventiva		
												1. Inspeção se existe desgaste na camisa		
												2. Inspeção se existe desgaste no pistão		
	S	S	S	S	X	X						3. Inspecionar o estado do anel, se estiver quebrado, substituir.		
												4. Inspecionar a pressão do sistema		
												5. Inspecionar o estado dos selos.		
												6. Inspecionar a calibração da válvula de alívio.		
											Como atividade de Manutenção preditiva			
												1. Análise de óleo		

RCM					Sistema			Sistema Hidráulico do Regulador de Velocidade									
Tabela de decisão					Componente			Acumulador									
Modo de Falha	Avaliação de conseqüências				H1	H2	H3	Ação padrão				Atividade de Manutenção Proposta					
					S1	S2	S3										
					O1	O1	O3										
	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4							
Perda total do acumulador												Como atividade de Manutenção Preventiva					
												1. Inspecionar vazamentos					
												2. Inspeção da bexiga no caso de estar furada, substituir a bexiga.					
	N	S	N	S	X	X						3. Inspeção da pressão de carga do acumulador					
												4. Limpeza do acumulador					
												Como atividades de Manutenção preditiva					
												1. Análise de óleo					

RCM					Sistema			Sistema Hidráulico do Regulador de Velocidade									
Tabela de decisão					Componente			Motor elétrico D.C.									
Modo de Falha	Avaliação de conseqüências				H1	H2	H3	Ação padrão				Atividade de Manutenção Proposta					
					S1	S2	S3										
					O1	O1	O3										
	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4							
Não há transformação de energia elétrica em energia mecânica.												Como atividade de Manutenção Preventiva					
												1. Inspeção das fiações de entrada					
												2. Inspeção das conexões					
	N	S	S	N	X	X						Como atividades de Manutenção preditiva					
												1. Análise de vibração					
												2. Análise termográfico para monitorar o desgaste do isolamento dentro do motor elétrico					

RCM					Sistema			Sistema Hidráulico do Regulador de Velocidade									
Tabela de decisão					Componente			Tubulações									
Modo de Falha	Avaliação de conseqüências				H1	H2	H3	Ação padrão			Atividade de Manutenção Proposta						
					S1	S2	S3										
					O1	O1	O3										
	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4							
Ruptura												Como atividade de Manutenção Preventiva					
												1. Inspeção das tubulações na procura de corrosão ou deformações					
												2. Fazer limpeza das tubulações					
												Como atividade de Manutenção Preditiva					
	N	S	S	S	X	X						1. Análise de ultra-som para detecção de trincas					
												2. Fazer uma espectroscopia (detecta desgaste de materiais)					
												3. Monitorar a pressão do sistema					