

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

INSTRUMENTAÇÃO DE TURBINA HIDRÁULICA BASEADA NOS
CONCEITOS DE MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE

Daniel Rodrigo Barreto Silva

São Paulo

2007

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**INSTRUMENTAÇÃO DE TURBINA HIDRÁULICA BASEADA NOS
CONCEITOS DE MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE**

Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em Engenharia

Daniel Rodrigo Barreto Silva

Orientador:

Prof. Dr. Gilberto Francisco Martha de Souza

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

São Paulo
2007

FICHA CATALOGRÁFICA

Silva, Daniel Rodrigo Barreto

Instrumentação de turbina hidráulica baseada nos conceitos de manutenção centrada em confiabilidade / D.R.B. Silva. – São Paulo, 2007.

216 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Turbina hidráulica (Manutenção; Confiabilidade; Instrumentação) I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

Aos meus pais Jorge e
Lucy, ao meu irmão Junior e
À memória de minha avó.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Gilberto Francisco Martha de Souza pela orientação e incentivo constante deste trabalho, por mostrar a Engenharia de Confiabilidade e pela amizade cultivada.

À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e seus Professores pela minha formação como Engenheiro.

À Voith Siemens Hydro Power Generation pelo apoio à realização deste trabalho.

Aos amigos inesquecíveis da faculdade nestes cinco anos.

À Luciana Naufel por seu infinito amor e compreensão.

RESUMO

Um sistema de geração de eletricidade espera-se ser confiável, seguro, possuir alta disponibilidade e baixa manutenibilidade. Assegurar esses índices é tarefa equipe de manutenção baseada em uma política elaborada previamente. Neste contexto a técnica da Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) provê uma metodologia estrutura capaz de identificar modos e efeitos de falha críticos que podem acarretar a parada da máquina, interrupção da produção de energia elétrica e redução da disponibilidade.

O trabalho foca uma Turbina Hidráulica Kaplan e inicialmente revisa as técnicas de manutenção e conceitos estatísticos de Confiabilidade. Foram elaboradas a Árvore Funcional e a Descrição Funcional dos sistemas e componentes mecânicos da turbina. Por fim o FMEA (do inglês, *Failure Modes and Effects Analysis*) detalha os modos, mecanismos e efeitos potenciais de falhas. Classificando a severidade dos modos de falha em função do efeito sobre desempenho do sistema, obtêm-se os modos de falha críticos.

Resultado deste estudo é a avaliação da instrumentação adequada que capture estes modos de falha críticos com a finalidade de aumentar a disponibilidade do sistema de geração, para implementação em uma turbina que passa(rá) por uma modernização.

ABSTRACT

A power generation system must be reliable and safe. Besides it must have high availability and low maintainability. The maintenance team is responsible to meet these requirements after the turbine is put into work. RCM (*Reliability Centered Maintenance*) is a powerful tool to analyze the machine and to seek critically failure modes that could stop the system, and, indeed, the power generation.

This work applies the RCM technique to a Kaplan Hydraulic Turbine to show up critically failure modes. It starts reviewing maintenance techniques and reliability concepts. Then it presents the Functional Tree and Functional Description. Finally the FMEA (*Failure Modes and Effects Analysis*) details modes, roots causes and effects of failures. Ranking the effects of a particular failure mode over the performance of the system, we are able to extract critical failure modes.

As a result, this study recommends sensors to monitor these critical failure modes to increase availability in a turbine that will be refurbished.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	Considerações Iniciais.....	1
1.2.	Objetivo do Trabalho	4
1.3.	Desenvolvimento do Trabalho	5
2.	CONCEITOS DE MANUTENÇÃO.....	7
2.1.	Aspecto histórico.....	7
2.2.	Técnicas de Manutenção	8
2.2.1.	Manutenção Corretiva.....	9
2.2.2.	Manutenção Preventiva.....	9
2.2.3.	Manutenção Preditiva.....	12
2.3.	Custos.....	12
2.4.	Monitoramento na Atividade de Manutenção.....	15
3.	CONCEITOS DE CONFIABILIDADE.....	17
3.1.	Definições	17
3.2.	Modelo Matemático	17
3.3.	Curva da Banheira.....	19
3.4.	Distribuições Comuns	21
3.4.1.	Exponencial.....	21
3.4.2.	Normal.....	22
3.4.3.	Weibull 2 e 3 parâmetros	23
3.4.4.	Lognormal	25
3.5.	Confiabilidade de Sistema.....	25
3.5.1.	Componentes em Série.....	25
3.5.2.	Componentes em Paralelo.....	27
3.5.3.	Componentes em Comutação.....	28
3.6.	Índices na Confiabilidade.....	30
3.6.1.	Tempo Médio de Falha	31
3.6.2.	Tempo Médio de Reparo.....	31
3.6.3.	Disponibilidade	32
3.7.	Manutenção e Confiabilidade	33
4.	MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE .	35
4.1.	Aspectos Históricos e Conceitos.....	35
4.2.	As 7 Questões.....	37
4.3.	Funções e Níveis de Desempenho	38
4.3.1.	Árvore Funcional	39
4.3.2.	Descrição Funcional.....	39
4.4.	Falhas Funcionais.....	40

4.5.	Modos da Falha	41
4.6.	Efeitos de Falha	42
4.6.1.	FMEA	43
4.6.2.	Avaliação pelo risco	45
4.7.	Conseqüências da Falha	48
4.8.	Decisões na manutenção	49
5.	TURBINAS HIDRÁULICAS.....	51
5.1.	Tipos de turbinas hidráulicas	51
5.1.1.	Turbina Pelton	52
5.1.2.	Turbina Francis	53
5.1.3.	Turbina Kaplan.....	54
5.1.4.	Turbina Bulbo	56
5.2.	Descrição da Turbina Kaplan.....	56
5.2.1.	Conjunto Completo	57
5.2.2.	Caixa Espiral	58
5.2.3.	Rotor Kaplan	58
5.2.4.	Distribuidor	59
5.2.5.	Vedação do Eixo e Acoplamento.....	61
5.2.6.	Mancal Guia	63
5.2.7.	Mancal Escora.....	64
5.3.	Circuitos Auxiliares da Turbina	65
5.3.1.	Circuito da Vedação do Eixo	65
5.3.2.	Circuito do Regulador	66
5.3.3.	Circuito do Mancal Guia	67
5.3.4.	Circuito do Mancal de Escora	68
5.4.	Modernização no Brasil	69
6.	RESULTADOS.....	70
6.1.	Considerações Iniciais.....	70
6.2.	Metodologia MCC aplicada à instrumentação	70
6.3.	Modos de Falha Críticos do Mancal Guia.....	73
6.4.	Modos de Falha Críticos do Regulador de Velocidades	77
6.5.	Modos de Falha Críticos do Vedação do Eixo.....	81
6.6.	Modos de Falha Críticos do Mancal Escora	84
6.7.	Demais Componentes.....	88
7.	CONCLUSÕES	89
7.1.	Discussão	89
7.2.	Sugestão para Trabalhos Futuros	91
ANEXO A – ÁRVORE FUNCIONAL.....		92
ANEXO B – DESCRIÇÃO FUNCIONAL		94
ANEXO C – FMEA DA TURBINA		110
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		215

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Capacidade instalada por tipo de geração (ONS, 2007)	1
Figura 2 - Participação por tipo de geração (ONS, 2007).....	2
Figura 3 - Rede interconectada de alta tensão do SIN (ONS, 2007).....	3
Figura 4 - Estruturação das técnicas de manutenção (Adaptado: LYONNET, 1991) .	8
Figura 5 - Custos e Frequência de Manutenção	14
Figura 6 - Análise de Pareto	14
Figura 7 - Etapas do reparo (Adaptado: MOUBRAY, 1999)	15
Figura 8 - Curva da Banheira (SMITH, 2001)	20
Figura 9 - Taxa de falhas para diferentes sistemas (LEWIS, 1987).....	20
Figura 10 - Curvas características (LEWIS, 1987)	22
Figura 11 - Curvas características (LEWIS, 1987)	22
Figura 12 - Curvas características (LEWIS, 1987)	24
Figura 13 - Curvas características (LEWIS, 1987)	25
Figura 14 - Associação em série	26
Figura 15 - Associação em paralelo	28
Figura 16 - Associação em comutação.....	30
Figura 17 - Impacto da manutenção preventiva na confiabilidade (LEWIS, 1987) ..	34
Figura 18 - Curvas propostas (SIQUEIRA, 2005).....	36
Figura 19 - Elaboração da árvore funcional (MASSARANI, 2003).....	39
Figura 20 - Típico formulário para FMEA	44
Figura 21 - Fluxograma de decisão (MOUBRAY, 1999).....	49
Figura 22 – Seleção de Turbina em função da rotação específica (VOITH, 2004) ...	52
Figura 23 - Turbina Pelton com seis ejetores (VOITH, 2004).....	53
Figura 24 - Turbina Francis e Gerador (VOITH, 2004).....	54
Figura 25 - Turbina Kaplan e Gerador (VOITH, 2004).....	55
Figura 26 - Turbina Bulbo e Gerador (VOITH, 2004).....	56
Figura 27 - Corte pela unidade.....	57
Figura 28 - Caixa Espiral e Pré-Distribuidor	58
Figura 29 - Rotor Kaplan de cinco pás.....	59
Figura 30 - Mecanismo do Distribuidor.....	60
Figura 31 - Servomotor do Distribuidor	61
Figura 32- Vedação do Eixo e Acoplamento	62
Figura 33 - Mancel Guia	63
Figura 34 - Mancel Escora	64
Figura 35 - Circuito da vedação do eixo	65
Figura 36 - Circuito do regulador.....	66
Figura 37 - Circuito do mancel guia	67
Figura 38 - Circuito do mancel de escora	68
Figura 39 – Roteiro seguido	71
Figura 40 - Diagrama do Mancel Guia	73
Figura 41 - Diagrama do Regulador de Velocidades	77
Figura 42 - Diagrama da Vedação do Eixo.....	81
Figura 43 - Diagrama do Mancel Escora	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tempos Médios de Falha para algumas distribuições	31
Tabela 2 - Escalas de Detectabilidade (SIQUEIRA, 2005)	45
Tabela 3 - Escalas de Frequência (SIQUEIRA, 2005).....	46
Tabela 4 - Escalas de Severidade	47
Tabela 5 - Relações de causas e evidências potenciais do Mancal Guia	74
Tabela 6 - Instrumentação do Mancal Guia	75
Tabela 7 - Relações causas e evidências potenciais do Regulador de Velocidades...	78
Tabela 8 - Instrumentação do Regulador de Velocidades.....	79
Tabela 9 - Relações causas e evidências potenciais da Vedação do Eixo	82
Tabela 10 - Instrumentação da Vedação do Eixo.....	83
Tabela 11 - Relações causas e evidências potenciais do Mancal de Escora	85
Tabela 12 - Instrumentação do Mancal Escora	86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
SIN	Sistema Interligado Nacional
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
MCC	Manutenção Centrada em Confiabilidade
RCM	<i>Reliability Centered Maintenance</i>
FMEA	Análise de Modos e Efeitos de Falha
RPN	<i>Risk Priority Number</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

T	Variável aleatória contínua de tempo
$f(t)$	Função densidade de probabilidade de falha
$F(t)$	Função de probabilidade acumulada de falha
$R(t)$	Confiabilidade no instante t
$Q(t)$	Não-confiabilidade no instante t
$\lambda(t)$	Taxa de falha no instante t
N_s	Número de componentes bons
N_f	Número de componentes falhos
μ	Tempo de vida médio
σ	Desvio padrão do tempo de vida
$\Phi(t)$	Função de distribuição acumulada padrão
m	Parâmetro de forma da distribuição Weibull
θ	Parâmetro de escala da distribuição Weibull
$MTTF$	Tempo médio para falha (não reparável)
$MTBF$	Tempo médio entre falhas (reparável)
$MTTR$	Tempo médio de reparo
$\Gamma(t)$	Função gama
$m(t)$	Função densidade de probabilidade de manutenibilidade
$M(t)$	Mantenabilidade no instante t
$A(t)$	Disponibilidade no instante t
A^*	Disponibilidade média

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais

A geração de eletricidade no Brasil é fortemente caracterizada pelo uso de recursos hídricos. Em 31 de dezembro de 2006, a potência instalada da geração hidrelétrica alcançou 73 081 MW, ou 82,8% do total, segundo dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS)

Apenas 3,4% da capacidade de geração de eletricidade não está interligada ao Sistema Interligado Nacional (SIN) e, portanto, não contribuem para o índice.

A relevância de usinas hidrelétricas no Brasil pode ser analisada pela capacidade instalada. As Figura 1 e Figura 2 mostram a evolução da capacidade instalada por tipo de geração.

Ano	Hidro S/SE/CO + N/NE	Itaipu ¹	Termo					Termo Total	Emerg.	Total Ano ²	Var. Ano Ant. %
			OD	OC	GN	C	N				
2001 ³	54.693,7	6.300,0	224,2	1.338,0	2.055,7	1.409,6	1.966,0	6.993,2	-	67.986,9	3,4
2002 ³	57.533,7	6.300,0	224,2	1.337,8	4.030,0	1.409,6	2.007,0	9.008,8	1.827,3	74.699,9	9,9
2003 ³⁺⁴	59.765,0	6.300,0	34,2	1.337,8	5.373,8	1.410,0	2.007,0	10.162,8	1.773,8	78.001,6	4,4
2004 ³	61.044,0	6.300,0	34,2	1.737,3	7.873,0	1.410,0	2.007,0	13.061,5	1.703,0	82.108,5	5,3
2005 ³	63.013,3	7.000,0	34,2	1.737,3	8.189,5	1.410,0	2.007,0	13.378,0	785,4	84.176,7	2,5

¹Não inclui a disponibilidade de potência de Itaipu contratada do Paraguai.

²Não inclui sistemas isolados e autoprodutores.

³Na capacidade instalada estão incluídas as unidades geradoras em comissionamento.

⁴Foram acrescidos 211,7 MW de disponibilidade hidráulica e reduzidos 432,2 MW de disponibilidade térmica por divergências na potência efetiva de unidades geradoras.

Hidro: Geração Hidráulica

OD: Geração a Óleo Diesel

Emerg. Geração Emergencial

OC: Geração a Óleo Combustível

GN: Geração a Gás Natural

C: Geração a Carvão

N: Geração Nuclear

Figura 1 – Capacidade instalada por tipo de geração (ONS, 2007)

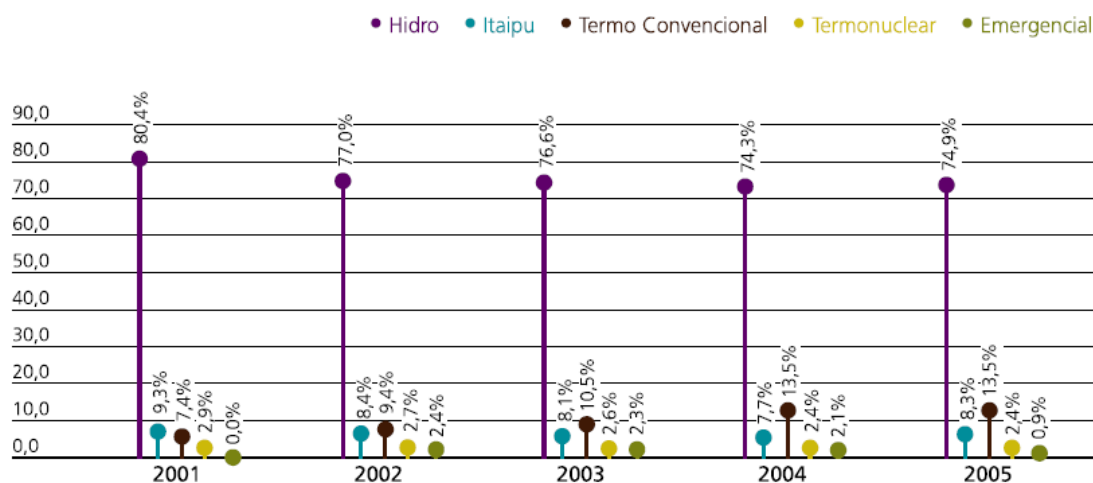


Figura 2 - Participação por tipo de geração (ONS, 2007)

Apesar dos valores indicados nas figuras mostrarem um leve decréscimo do percentual da capacidade instalada de geração hidroelétrica frente às outras fontes de energia, é claro a relevância das usinas hidrelétricas no Brasil na oferta de eletricidade.

O Sistema Interligado Nacional é responsável por atender o mercado brasileiro de energia elétrica e constitui-se de uma rede interligada de geração, transmissão e distribuição. Sob coordenação do ONS, o SIN busca equalizar a demanda e oferta de energia no âmbito nacional, acionando agentes geradores mesmo distantes da região de demanda, ANEEL (2005).

Foca-se assim a unificação do sistema de geração hidrotérmico brasileiro. Cita-se, como exemplo, em usinas hidrelétricas, a possibilidade de maior geração numa bacia hidrográfica no período de cheias atender a centros consumidores que localizados em bacias hidrográficas no período de secas ou recorrer às usinas termoeletricas.

A Figura 3 ilustra a rede de transmissão de alta tensão, cuja interconexão de complexos garante funcionalidade do SIN.

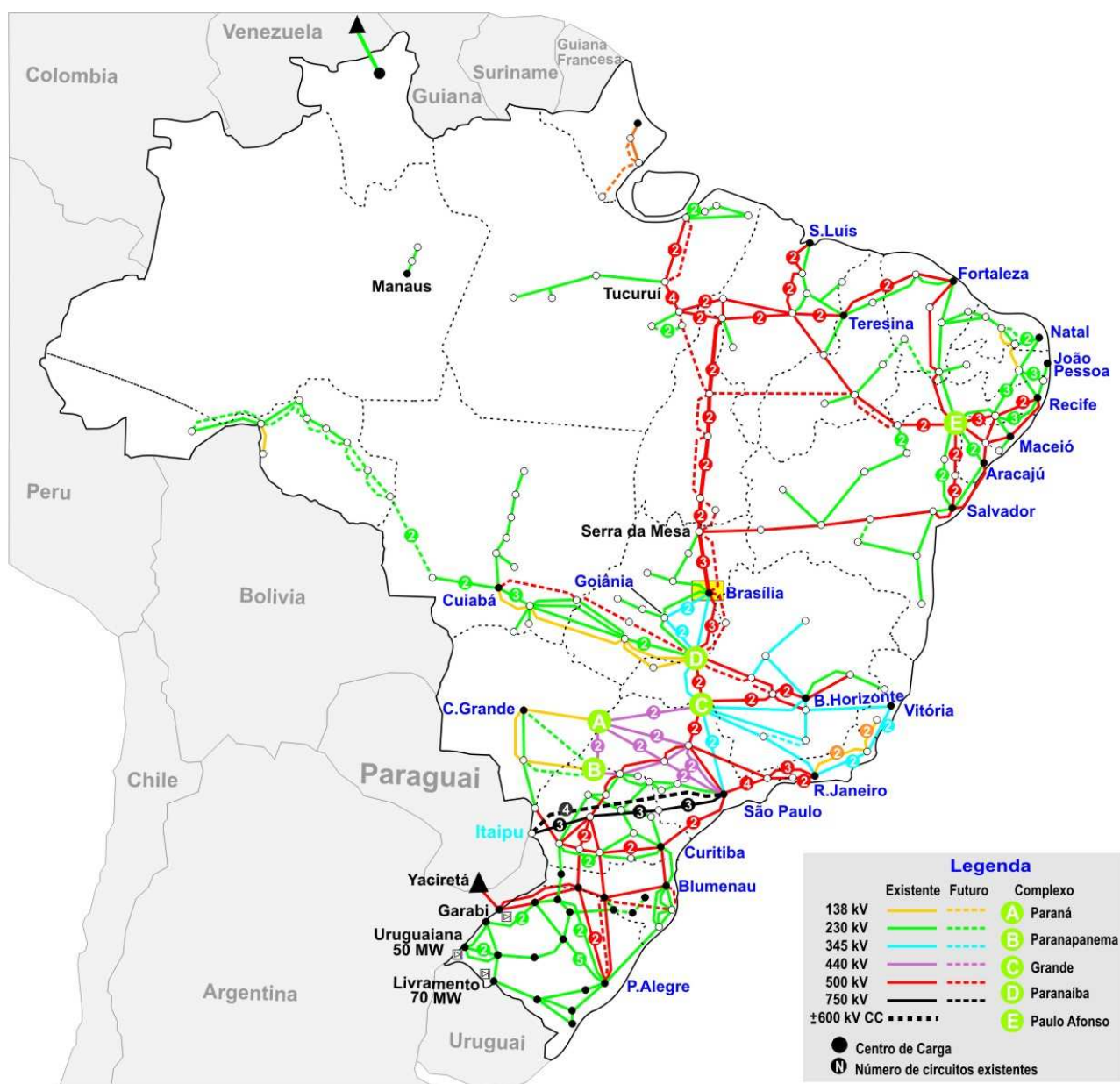


Figura 3 - Rede interconectada de alta tensão do SIN (ONS, 2007)

Cita-se que a fiscalização, a política de regulamentação, de desenvolvimento e de tarifas é função da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), ANEEL (2007). Cabe ao ONS a coordenação e controle dos agentes de geração, transmissão e distribuição.

1.2. Objetivo do Trabalho

No contexto apresentado anteriormente, usinas térmicas, nucleares ou hidráulicas devem assegurar um fornecimento ininterrupto, seguro e *on demand*, sob coordenação e controle do ONS em função da energia assegurada da usina.

Neste raciocínio, o conceito de confiabilidade de usinas de geração de energia elétrica surge naturalmente juntamente com a questão de como estimar e manter a degradação da confiabilidade em níveis aceitáveis. Confiabilidade e Disponibilidade estão intimamente relacionadas, sendo esta última uma medida do tempo médio operacional. De modo geral, o aumento do índice de Disponibilidade possibilita a oportunidade de maior geração de energia e receita para a usina.

Segundo JARDINE; BUZACOTT (1986), a confiabilidade de um sistema é em grande parte definida na fase de projeto, pelos componentes selecionados e suas configurações funcionais. Em operação, a confiabilidade do sistema é influenciada pelas ações de manutenção.

Do exposto acima, este trabalho tem como objetivo a proposta de um método de seleção da instrumentação mais adequada para implementação em turbina hidráulicas do tipo Kaplan em etapa de modernização que capture modos de falha críticos de seus componentes. Os modos de falha críticos são aqueles que causam a parada da turbina e interrupção da produção de energia elétrica. O estudo é fundamentado nos conceitos da Manutenção Centrada em Confiabilidade – MCC (em inglês, *Reliability Centered Maintenance - RCM*) e da Engenharia de Confiabilidade. O conjunto do gerador e sistemas elétricos da usina estão fora do escopo deste trabalho.

É apresentado um tratamento científico da manutenção e confiabilidade, recorrendo a definições e conceitos estatísticos, análise funcional e modos e efeitos de falhas (relação causa-efeito). Destes princípios, os componentes críticos do sistema se destacam.

O trabalho não se baseou em uma turbina instalada em uma usina específica. Foram considerados os componentes presentes na maioria das turbinas hidráulicas do tipo Kaplan. Assim o método empregado é genérico e pode ser aperfeiçoado para aplicação em uma turbina específica, a partir das peculiaridades de cada uma delas.

1.3. Desenvolvimento do Trabalho

A estrutura segue textos clássicos de MCC, (RAUSAND (1998), MOUBRAY (1999) e SMITH (2003)), adaptando aos objetivos e fronteiras de análise definidas anteriormente.

No Capítulo 2 são discutidas as técnicas essenciais de manutenção e suas relações com sistema ao qual são aplicadas. Cita-se:

- manutenção corretiva
- manutenção preventiva
- manutenção preditiva

Conceitos fundamentais da Engenharia de Confiabilidade são revistos no Capítulo 3. Definições de confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade são expostas, juntamente com os modelos estatísticos das suas possíveis distribuições.

O tema manutenção é retomado no Capítulo 4, sob o aspecto da MCC. Destaca-se neste capítulo a estruturação do método, a importância da análise funcional e a caracterização (científica) de confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade, e como estes conceitos insere-se na Manutenção Centrada em Confiabilidade. Ainda neste capítulo, é exposto o conceito de falha e modos e efeitos de falha, cerne por trás da MCC. Este estudo dita quais são os componentes críticos e a relevância de sua falha na operação do sistema.

O Capítulo 5 é uma descrição sucinta da turbina hidráulica, sistemas e subsistemas que compõem a fronteira sobre a qual o trabalho foi realizado. O aspecto

de modernização de uma turbina hidráulica sob o enfoque de confiabilidade é apresentado neste capítulo.

No Capítulo 7 são apresentados os resultados da metodologia para uma turbina hidráulica do tipo Kaplan: árvore funcional, FMEA (Análise de Modos e Efeitos de Falhas) e sensoriamento proposto para modernização.

Por fim, no Capítulo 8 os resultados são criticamente analisados e as principais conclusões são apresentadas, juntamente com sugestões de melhorias e dificuldades de aplicação do método. Neste capítulo também são sugeridas recomendações para trabalhos futuros na área.

2. CONCEITOS DE MANUTENÇÃO

2.1. Aspecto histórico

Discursar sobre o aspecto histórico da manutenção é essencial para compreender o surgimento das diversas técnicas de manutenção dentro do contexto social, econômico e ambiental, antes, porém, definiremos manutenção.

Conforme CARDOSO (2000), a manutenção tem por função manter ou retornar os equipamentos às suas condições específicas de operação. Esta definição é crucial em sistemas produtivos, nos quais máquinas paradas podem representar o não cumprimento do prazo de entrega das mercadorias, atraso na linha de produção ou produção defeituosa.

Pode-se dividir a evolução da manutenção em três gerações, SIQUEIRA (2005), as quais ditam o surgimento das diversas técnicas de manutenção:

Primeira Geração - Mecanização

Segunda Geração - Industrialização

Terceira Geração – Automação

A Primeira Geração compreende A equipamentos pouco sofisticados, de baixa produtividade e subutilizados, ou tecnicamente superdimensionadas para as funções impostas. A atividade de manutenção predominante é a corretiva, sendo a manutenção preventiva presente no contexto de limpeza, lubrificação e substituição de componentes simples. Estende-se desde o século XIX até o final da Segunda Guerra Mundial, SIQUEIRA (2005).

Na Segunda Geração, pós Segunda Guerra Mundial, aproximadamente em 1950, é introduzido nas indústrias o processo de automação, herança da indústria

bélica, tornando o sistema produtivo mais complexo e a sociedade mais dependente da produção em larga escala. A parada de um equipamento de funcionamento contínuo pode acarretar danos a todo um sistema de produção. Um esforço científico de anteceder a falha resultou no desenvolvimento de técnicas de manutenção preventiva e, na década de 60, nas técnicas de manutenção preditiva, CARDOSO (2000) e SIQUEIRA (2008).

Historicamente a atividade de manutenção foi vista como geradora de custo, entre os argumentos: manutenção de uma equipe especializada parte do tempo ociosa, enquanto a produção está operando corretamente, estoques de peças sobressalentes, intervenções demoradas, pouco valor agregado ao produto, equipamentos de monitoramento caros, entre outras.

Reverter este quadro e alinhar a manutenção com a estratégia empresarial de qualidade, custos, riscos, globalização e retorno sobre o capital investido motivaram o surgimento da metodologia MCC na década de 70, chamada de Terceira Geração.

A técnica da MCC, discutida em detalhes nos capítulos seguintes e foco deste trabalho, tem sua origem na indústria aeronáutica e outros ramos que envolvem questões de risco e elevada complexidade como a indústria bélica e usinas nucleares, RAUSAND (1998).

2.2. Técnicas de Manutenção

As diversas técnicas de manutenção estão estruturadas de acordo com a Figura 4.

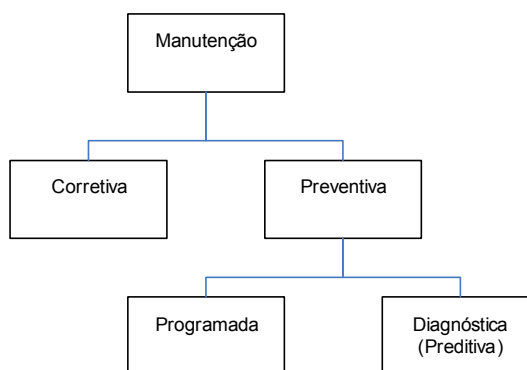


Figura 4 - Estruturação das técnicas de manutenção (Adaptado: LYONNET, 1991)

2.2.1. Manutenção Corretiva

Dá-se o nome de manutenção corretiva às atividades de intervenção apenas após a ocorrência da falha. É a mais elementar dentre as técnicas.

Mesmo um sistema bem mantido e monitorado está susceptível a esta técnica, em outras palavras, a falhas não previstas. Nenhuma política de manutenção é capaz de englobar todas as variáveis que o atuam sobre o sistema. Cita-se o exemplo de componentes projetados para vida infinita (abaixo do limite de fadiga), mas por um erro de instalação estão sobrecarregados e nenhuma atividade de manutenção periódica foi programada.

A manutenção corretiva muita vezes é a única opção para certos tipos de componentes, exemplo comum, lâmpadas incandescentes, que simplesmente queimam sem evidência significativa *a priori*.

Certas falhas podem ser toleradas até um dado momento ou extensão antes da intervenção, criando o conceito de corretiva programada, CARDOSO (2000). Neste caso, a falha afeta pouco a segurança e a operação do sistema, porém pode sobrecarregar outros componentes ou subsistemas, devendo o reparo ser programado pela equipe de manutenção quando da parada para manutenção preventiva ou *hot-swap*.

Uma atitude complementar, além da minimização dos efeitos da falha e o rápido retorno às condições operacionais, é manter um histórico destas falhas e de suas causas, e procurar manter o sistema livre destas, em um processo de melhoria contínua, que tenderá a um sistema livre de falhas.

2.2.2. Manutenção Preventiva

Em SMITH (2003) encontra-se uma definição clara: Manutenção Preventiva é a execução de tarefas de inspeção e/ou serviços que foram pré-planejadas para

realização em datas específicas a fim de manter a capacidade funcional do equipamento ou sistema.

Como sugerem BLISCHKE; MURTHY (2003), a seleção dos componentes que serão submetidos à manutenção preventiva, depende de dois fatores:

- A taxa de falha dos componentes é crescente ou irá crescer antes da próxima intervenção preventiva;
- O custo da manutenção corretiva é maior que o custo de uma manutenção preventiva (subentendem-se riscos devido à falha, inclusive);

No primeiro caso, se o sistema possui uma taxa de falha decrescente, a manutenção preventiva irá aumentar a taxa de falha para níveis anteriores a intervenção, portanto a um estado pior que o atual. Enquanto no segundo, prepondera para componentes nos quais a falha envolve questões de segurança ou perdas elevadas de produção. Assim o risco é muito grande para operação até o final de suas vidas úteis para estes componentes.

Ao intervir no equipamento, há o risco de danificar outros componentes e conseqüentemente prolongar o tempo de parada. Erros humanos são inevitáveis, mesmo para uma equipe bem treinada. Deve-se assim dosar a frequência de intervenção, para que esta não se torne intrusiva demais.

Existem três modelos dominantes de troca de componentes, BLISCHKE; MURTHY (2003): Troca Apenas na Falha, Troca por Envelhecimento e Troca em Bloco.

- Troca Apenas na Falha
 - Neste caso, apenas quando da falha o componente é trocado. Não há nenhuma manutenção preventiva, sendo um típico caso da manutenção corretiva.

- Troca por Envelhecimento
 - Um tempo de troca t_{wi} é estabelecido para cada componente. Se o item falhar antes deste tempo, a substituição é realizada.
 - Se o item sobreviver até o tempo t_{wi} , é realizada a substituição em t_{wi} .
 - O ponto chave é determinar t_{wi} ideal.
- Troca em Bloco
 - Um conjunto de componentes é substituído em intervalos regulares de tempo.
 - Caso um componente falhe entre duas Trocas em Módulo, ele é substituído. Na próxima Troca em Módulo, ele é novamente substituído.
 - O ponto chave é determinar t_w .

A vantagem da Troca em Bloco sobre a Troca por Envelhecimento é a simplificação da administração das idades de todos os componentes e abatimentos na compra de um número maior de componentes por lote.

Estimar o período ideal para realizar a troca exige o estudo do histórico de falhas e aproximações estatísticas, vide capítulo sobre Confiabilidade. Na troca precoce do componente, estamos descartando eventualmente horas de vida útil (aumentando o custo), enquanto na troca tardia, corre-se o risco da ocorrência da falha.

O tempo de equipamento parado para manutenção preventiva deve ser aproveitado para outras atividades, além da substituição de componente: calibração de sensores, regulação de elementos de máquinas (aperto de correias, por exemplo), checagem de níveis de óleo, substituição daqueles componentes em manutenção corretiva programada, etc.

2.2.3. Manutenção Preditiva

O conceito da manutenção preditiva é postergar a substituição do componente até que ele esteja mostrando sinais de desgaste ou envelhecimento que comprometem seu desempenho, baseando-se na medição de parâmetros, LYONNET (1991), tais como:

- Ruído e vibração
- Temperatura
- Análise de partículas em fluidos
- Emissão Acústica

O valor destes parâmetros é acompanhado ao longo do tempo a partir do sinal capturado. Valores como média, desvio-padrão, amplitudes e frequências do sinal são estimativas estatísticas para comparações.

Manutenção preditiva é aplicável para componentes que possuem elevados custos de substituição e cujo estado pode ser diagnosticado por testes não destrutivos, LYONNET (1991).

Há questionamentos se os parâmetros medidos são suficientes para indicar uma possível falha, mesmo se esta exibir sintomas mensuráveis. O tratamento adequado e a interpretação do sinal capturado devem ser executados por uma equipe treinada para não dar margem a decisões erradas, que não estendam a vida útil do equipamento, função da existência de uma equipe de manutenção preditiva e dos custos associados a ela.

2.3. Custos

Claro que manter uma equipe de manutenção representa um custo fixo e a frequência de intervenção (corretiva, preventiva ou preditiva) um custo variável, devido não apenas ao tempo de reparo do equipamento, mas devido também a perdas de produção, atrasos na entrega de produtos e substituição de componentes.

A administração da organização, responsável pela alocação de recursos e estratégias da empresa, não deve subestimar o valor da atividade de manutenção, por achar esta uma atividade apenas geradora de custos e não agregar valor ao produto final.

Equipamentos com manutenção deficiente estão propensos a quebras repentinas, paradas da produção e variabilidade nos produtos, pondo em risco a satisfação do cliente e futuro do negócio. Nota-se que ela está intimamente ligada com a capacidade produtiva fabril, qualidade do produto, segurança e aversão ao risco do negócio, e deve, portanto, fazer parte da estratégia empresarial.

Para um equipamento, o custo de aquisição, operação e manutenção são chamadas de Custo de Ciclo de Vida (do inglês, *Life Cycle Costs*) e subdividem-se, segundo SMITH (2001):

- Custos de Aquisição – Capital, instalação, transporte, etc
- Custos de Propriedade - Custo de manutenção e modificações
- Custos de Operação - Custo de Materiais e energia
- Custo de Administração - Custos de administração do equipamento

A redução dos Custos de Propriedade fundamenta-se na otimização, de forma segura, da atividade de manutenção. Neste ponto surge a necessidade de uma metodologia estruturada e confiável, a MCC, ao receitar a dose certa de manutenção para cada componente, minimizando a degradação da confiabilidade do sistema e analisando o efeito das falhas.

A frequência de manutenção impacta diretamente os custos fabris. O excesso de paradas para manutenção compromete a produção, mas reduzem a probabilidade de falhas. Por outro lado, a diminuição da manutenção do equipamento pode levar a falhas que exijam um tempo de parada maior, e mais componentes deverão ser substituídos. Estas situações são representadas qualitativamente na Figura 5. Assim deve-se operar a manutenção na região entorno do ponto ótimo.

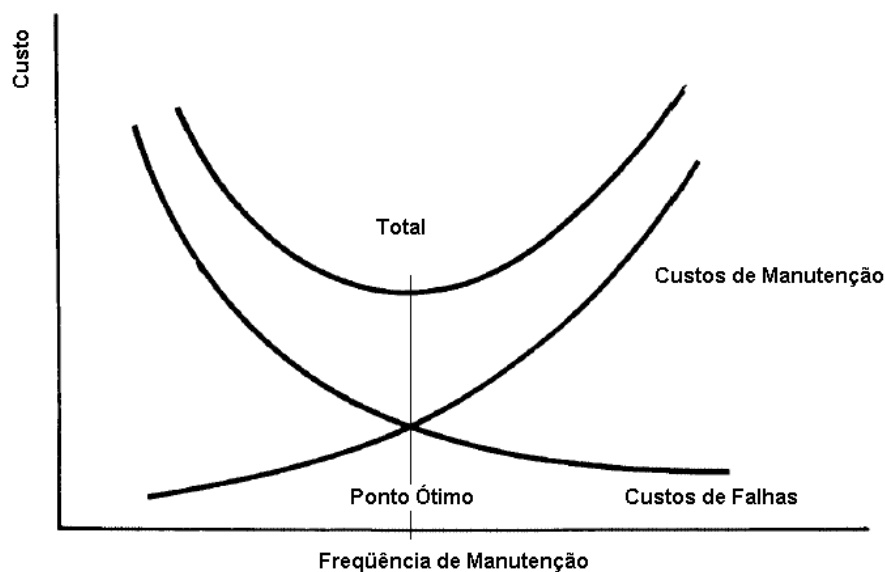


Figura 5 - Custos e Frequência de Manutenção

Alguns autores, LYONNET (1991) e SMITH (2003), propõem o uso da regra de Pareto, mais conhecida como regra 80/20, isto é, apenas 20% dos componentes de um equipamento são responsáveis por 80% do custo total de manutenção. Assim a deve-se focar esses componentes na manutenção. A Figura 6 ilustra o exposto.

Voltando à questão do empenho da administração da organização na questão dos custos de manutenção, SMITH (2003) comenta que mesmo conhecendo esta regra, muitos gestores a ignoram e perdem a oportunidade de aumentar o desempenho de suas organizações.

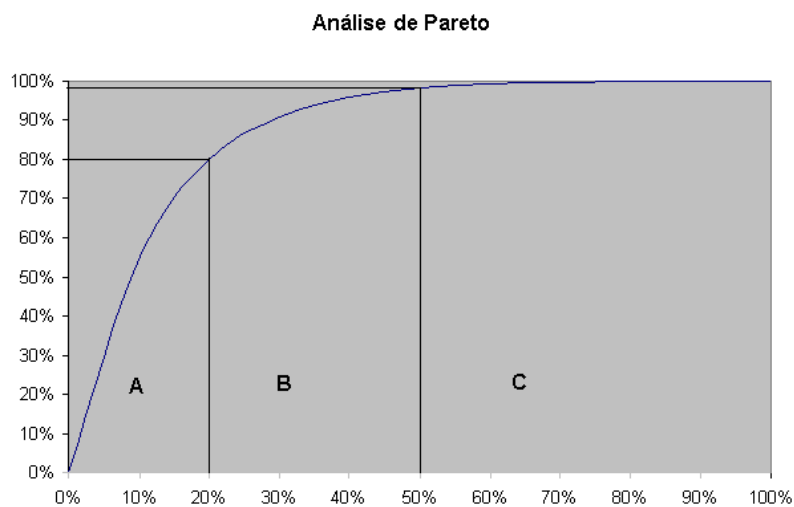


Figura 6 - Análise de Pareto

2.4. Monitoramento na Atividade de Manutenção

O conjunto de sensores num equipamento é usado para indicar o seu desempenho, controle e estado. O acompanhamento de sinais, suas tendências e médias indicam possíveis anomalias naquele conjunto. Para a equipe de manutenção, os sensores têm uma função estratégica vital: indicar possíveis falhas e o local onde investigar.

Assim a instrumentação pode seguramente aumentar a disponibilidade ao agir diretamente na redução dos tempos de diagnose do problema e de validação/teste. Pode-se prevenir uma possível falha e realizar todo um planejamento *a priori* que reduza os demais tempos da Figura 7.

A disponibilidade é um indicador importante para a equipe de manutenção, sendo definido e discutido em maiores detalhes no capítulo seguinte. Para o cálculo da disponibilidade, utiliza-se o tempo parado do equipamento.

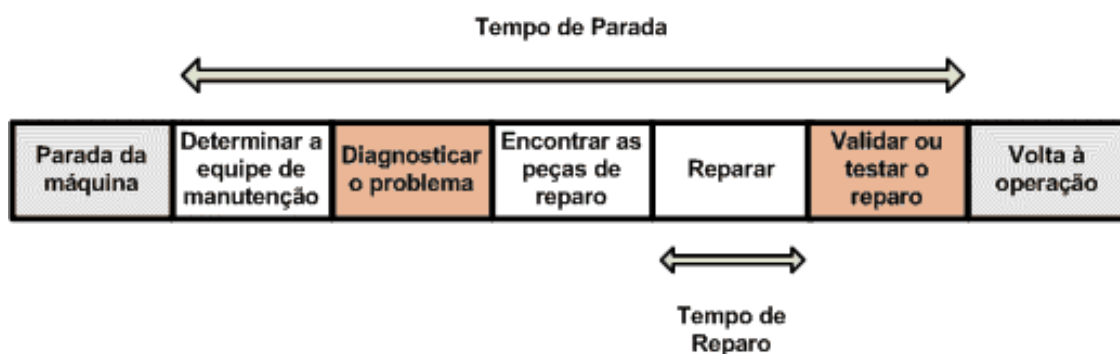


Figura 7 - Etapas do reparo (Adaptado: MOUBRAY, 1999)

É fundamental distinguir tempo de parada e tempo de reparo. Tempo de parada é o tempo total de indisponibilidade do equipamento, da decisão de parada para manutenção até a validação do reparo e retomada do equipamento à condição operacional, vide Figura 7.

Tempo de reparo é o tempo efetivamente gasto consertando o equipamento, sendo parte do tempo de parada total. Ressalta-se que o tempo do equipamento disponível para produção, mas improdutivo, é de caráter econômico.

3. CONCEITOS DE CONFIABILIDADE

3.1. Definições

Popularmente o termo confiabilidade representa um termo vago e muitas vezes se confunde com outras disciplinas. Segue alguns exemplos freqüentemente associados incorretamente à palavra confiabilidade aplicada a sistemas: operação ininterrupta, seguro, livre de falhas ou robusto.

Uma definição aprimorada em termos matemáticos é encontrada em LEWIS (1987):

“Confiabilidade é a probabilidade de um sistema operar por um intervalo de tempo determinado sobre condições específicas”.

Duas palavras merecem destaque. A primeira é “probabilidade”, isto é, confiabilidade pode ser expressa como uma probabilidade, um conceito matemático bem definido no qual se aplica as definições e teorias estatísticas. Outra palavra de destaque é “específicas”. A medida de probabilidade da confiabilidade só é válida se as condições de operação desejada do sistema estiverem bem especificadas.

3.2. Modelo Matemático

Confiabilidade tem uma definição bastante exata. Traduzindo a definição acima numa linguagem matemática, LEWIS (1987) e BAZOVSKY (2004):

$$f(t) \cdot \Delta t = P(t < T < t + \Delta t) = \text{Probabilidade de uma falha ocorrer} \quad (1)$$

no intervalo de tempo entre t e Δt

$$F(t) = P(T \leq t) = \text{Probabilidade de uma falha ocorrer no intervalo} \quad (2)$$

de tempo menor ou igual a t

$$R(t) = P(T > t) = \text{Probabilidade de uma falha ocorrer no intervalo} \quad (3)$$

maior que t

Em engenharia de confiabilidade, a letra “f” indica a função densidade de probabilidade de falha, “F” a função probabilidade acumulada de falha e “R” a confiabilidade. Baseando-se em históricos de falhas e ensaios de componentes, é possível medir, testar, levantar e projetar um sistema com uma determinada confiabilidade.

Estendendo o desenvolvimento, a taxa de falha de um sistema λ (do inglês, *hazard ratio*) é a probabilidade instantânea de falha, razão entre o número infinitesimal de componentes que falham no período pelo número de componentes bons e pelo tempo infinitesimal de referência:

$$\lambda(t) = \frac{1}{N_s} \frac{dN_f}{dt} \quad (4)$$

Onde,

N_s = número de componentes bons

dN_f = quantidade infinitesimal de falhas

dt = intervalo infinitesimal de referência

A relação entre estas funções matemáticas é

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (5)$$

É possível provar que a relação entre a taxa de falha e a confiabilidade segue uma relação exponencial, BAZOVSKY (2001):

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) \cdot dt} \quad (6)$$

Para sistemas físicos, a taxa de falha é uma função estritamente positiva (>0), portanto a confiabilidade é uma função decrescente com o tempo, e o levantamento deste parâmetro é o cerne do problema.

Em modelos simples, a função densidade de probabilidade, $f(t)$, é tomada entre as diversas existentes da estatística: Exponencial, Normal, Log-Normal, Weibull, etc. É obtida então a confiabilidade:

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t) \cdot dt = \int_t^\infty f(t) \cdot dt \quad (7)$$

E pela eq. (5), a taxa de falha.

3.3. Curva da Banheira

O gráfico da taxa de falha da maioria de sistemas se assemelha a uma curva em forma de banheira (do inglês, *bathtub curve*). Seu perfil é composto da soma de três tipos taxas de falhas: prematura (decrescente), útil (constante) e desgaste (crescente) com peso e duração diferentes em cada trecho, como observado na Figura 8.

Nos instantes iniciais, a taxa de falha é decrescente com o tempo. As falhas que ocorrem neste período são prematuras, devido a erros de fabricação, montagem ou mesmo projeto.

A vida útil é determinada da parte da curva com taxa de falha constante, na qual as falhas ocorrem ao acaso. É desejável que o componente permanece a maior

parte de sua vida neste período, em componentes mecânicos aumenta-se o fator de segurança no projeto. Neste período as falhas ocorrem ao acaso por fatores incontroláveis e aleatórios, como flutuações de solicitação, pressão, ou o meio agindo sobre o componente.

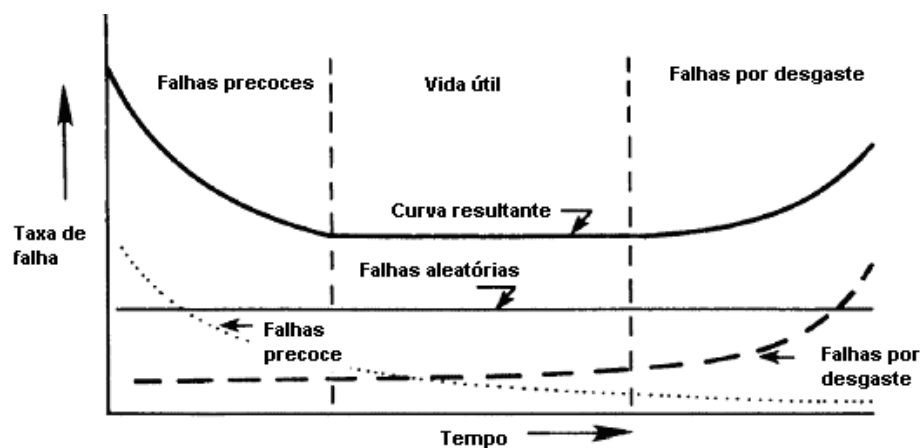


Figura 8 - Curva da Banheira (SMITH, 2001)

O último trecho tem taxa de falha crescente e corresponde ao período de desgaste e extinção da vida operacional. Observa-se o efeito cumulativo de fenômenos como desgaste, corrosão, acumulação de incrustação ou fadiga.

Relacionando a manutenção com a curva da banheira, a manutenção preventiva procura substituir os componentes antes que eles atinjam o período de desgaste a fim de não comprometer a confiabilidade. Já a preditiva tenta estender a utilização além deste limite, acompanhando a evolução dos sintomas da falha até o limite seguro de operação.

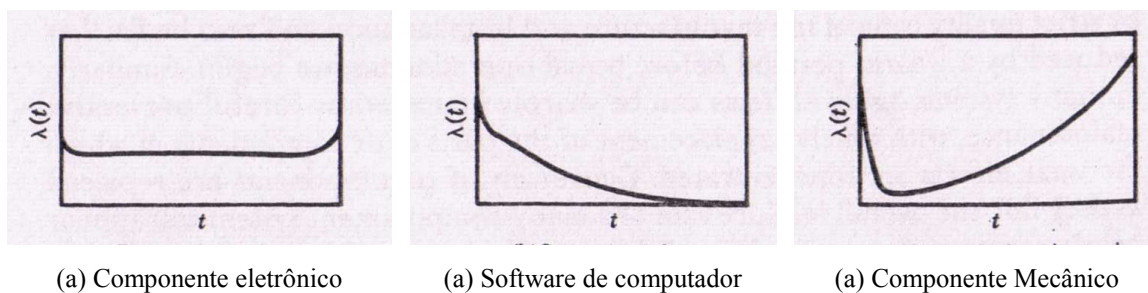


Figura 9 - Taxa de falhas para diferentes sistemas (LEWIS, 1987)

Nos diversos sistemas, o instante inicial e a duração de cada período variam. Em especial para sistemas mecânicos, o período de vida útil não é constante e apresenta um crescimento da taxa de falhas devido à presença constante de efeitos cumulativos: corrosão, fadiga e desgaste, sendo o tempo de transição para o período de desgaste não tão claro, Figura 9c.

Softwares de computador, apesar de não sofrerem desgaste, apresentam uma taxa de falha decrescente pois correções aos chamados *bugs* são implantadas e o número de falhas diminui, com a hipótese de que as correções não adicionam novas vulnerabilidades, Figura 9b.

3.4. Distribuições Comuns

3.4.1. Exponencial

Dada a função de confiabilidade, $R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$, o modelo mais elementar é o taxa de falha constante, portanto:

$$R(t) = e^{-\lambda \cdot t} \quad (8)$$

A distribuição é inteiramente determinada pelo parâmetro λ e a probabilidade do componente falhar independe da idade, popularmente “sem memória”.

A Figura 10 representa as curvas características para uma distribuição com taxa de falha constante. A parte central da “Curva da Banheira”, item 3.3, é bem representada por este modelo.

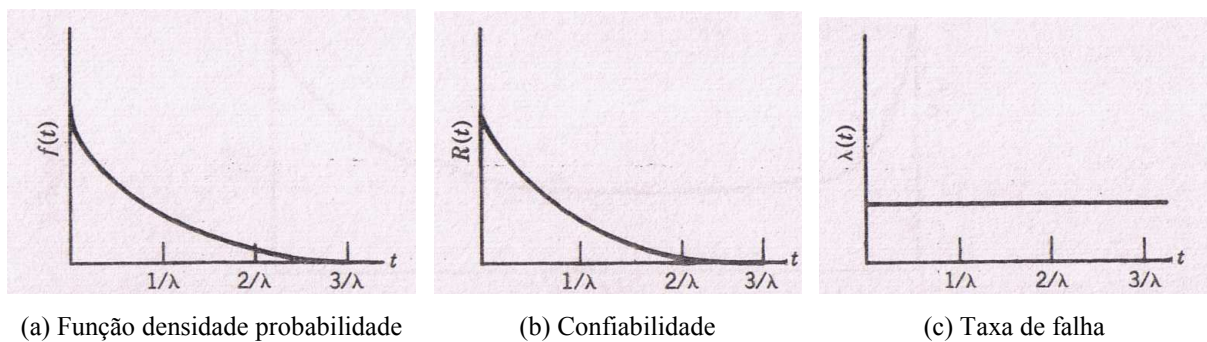


Figura 10 - Curvas características (LEWIS, 1987)

3.4.2. Normal

Assumindo que a função densidade de probabilidade de falha, $f(t)$, segue uma distribuição normal de parâmetros μ e σ , a taxa de falha irá depender do tempo, Figura 11c:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (9)$$

$$R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{t - \mu}{\sigma}\right) \quad (10)$$

Onde,

μ = tempo de vida médio

σ = desvio padrão de μ

Φ = função de distribuição acumulada normal padrão

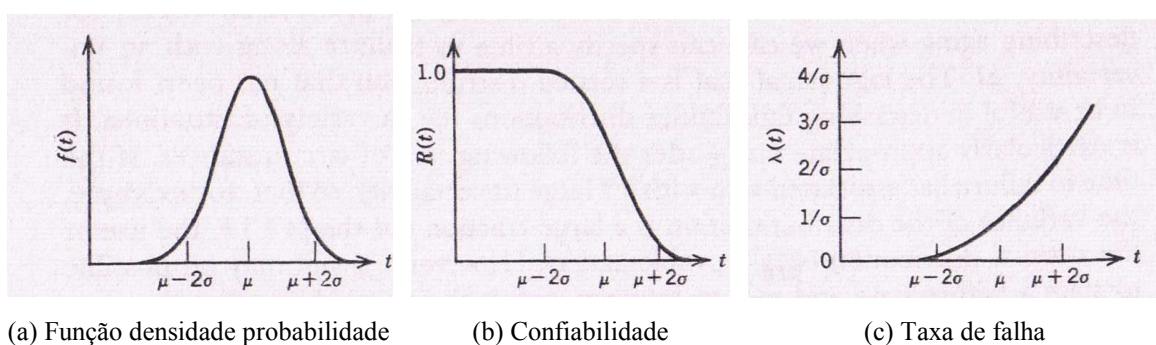


Figura 11 - Curvas características (LEWIS, 1987)

Nota-se que as curvas características deste modelo têm um comportamento regido em torno do tempo de vida médio, μ . Componentes que apresentam um desgaste acentuado após certo tempo de vida, como ferramentas de usinagem e pneus podem ser modelados por esta distribuição.

Em comparação com a distribuição anterior com taxa de falha constante, a probabilidade de um componente falhar depende do tempo na distribuição normal, devido ao aumento da taxa de falha. O trecho final da “Curva da Banheira” pode ser representado por este modelo.

3.4.3. Weibull 2 e 3 parâmetros

A distribuição Weibull é uma das mais usadas devida a sua flexibilidade em modelar diversas taxas de falha por uma escolha apropriada de seus parâmetros.

Usando dois parâmetros, a taxa de falha segue uma lei de potência dada por:

$$\lambda(t) = \frac{m}{\theta} \left(\frac{t}{\theta} \right)^{m-1} \quad (11)$$

A função densidade de probabilidade de falha por:

$$f(t) = \frac{m}{\theta} \left(\frac{t}{\theta} \right)^{m-1} \cdot \exp \left[- \left(\frac{t}{\theta} \right)^m \right] \quad (12)$$

E a função confiabilidade por:

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\theta} \right)^m \right] \quad (13)$$

Onde,

m = parâmetro de forma

θ = parâmetro de escala

A Figura 12 mostra diversas curvas obtidas variando o valor do parâmetro de forma. Para $m = 1$, obtém-se o modelo exponencial. Para $m < 1$ e $m > 1$, modela-se, respectivamente, o fenômeno de falha precoce (*burn-in*) e desgaste cumulativo (*wearout*).

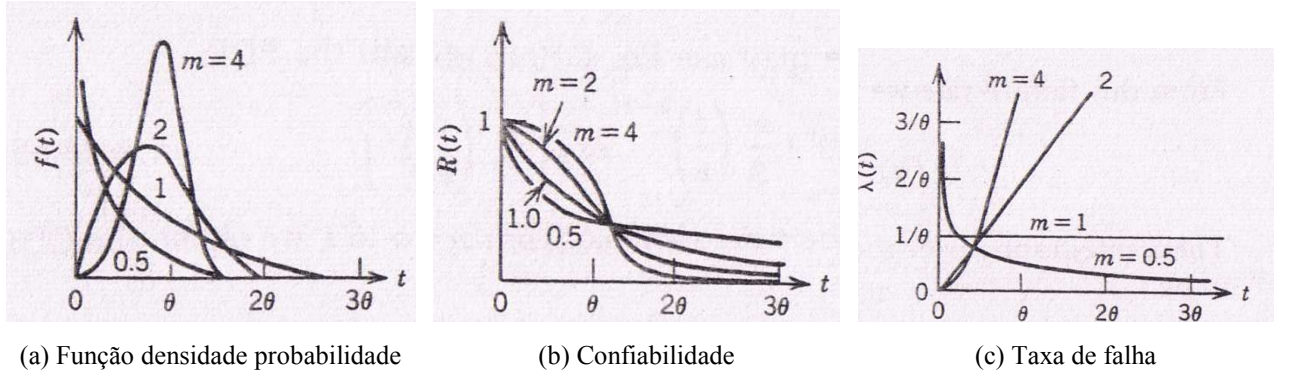


Figura 12 - Curvas características (LEWIS, 1987)

A distribuição Weibull com 3 parâmetros é obtida trasladando a taxa de falha e a função densidade de falha de um tempo t_0 :

$$\lambda(t) = \begin{cases} 0, & t < t_0 \\ \frac{m}{\theta} \left(\frac{t-t_0}{\theta} \right)^{m-1}, & t \geq t_0 \end{cases} \quad (14)$$

$$f(t) = \begin{cases} 0, & t < t_0 \\ \frac{m}{\theta} \left(\frac{t-t_0}{\theta} \right)^{m-1} \cdot \exp \left[- \left(\frac{t-t_0}{\theta} \right)^m \right], & t \geq t_0 \end{cases} \quad (15)$$

3.4.4. Lognormal

Segundo o mesmo raciocínio, a distribuição lognormal é derivada da distribuição normal por uma transformação de variáveis. É flexível para descrever diversas situações, dependendo dos parâmetros utilizados, Figura 13:

$$f(t) = \frac{1}{s \cdot t \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2s^2} \cdot \left[\ln\left(\frac{t}{t_0}\right)\right]^2\right\} \quad (16)$$

$$R(t) = 1 - \Phi\left[\frac{1}{s} \cdot \ln\left(\frac{t}{t_0}\right)\right] \quad (17)$$

É sugerida a consultada de LEWIS [13] para definição e determinação dos parâmetros da distribuição.

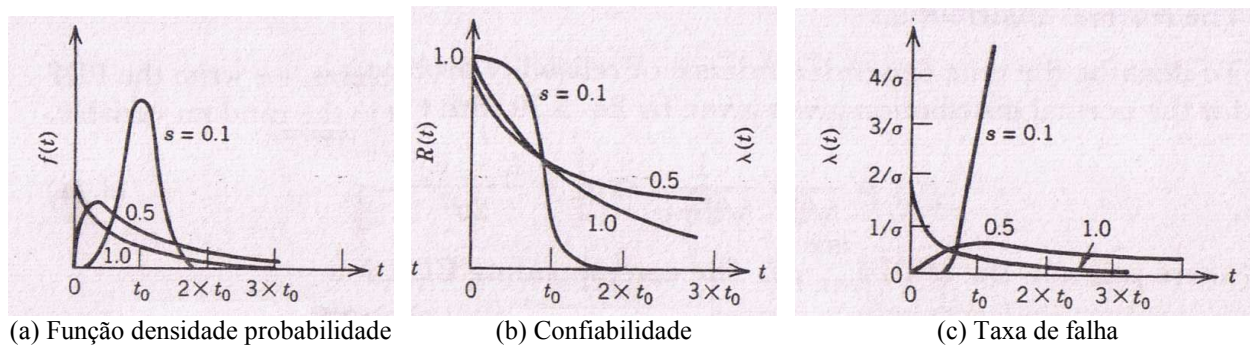


Figura 13 - Curvas características (LEWIS, 1987)

3.5. Confiabilidade de Sistema

Um sistema pode ser visualizado como composto de componentes em série, em paralelos ou em comutação. Faz-se assim necessário estabelecer relações para cálculo de confiabilidade do sistema a partir da confiabilidade de seus componentes.

3.5.1. Componentes em Série

Defini-se a associação de componentes em série como uma dependência tal que a falha de um implica na parada de funcionamento dos demais. Um exemplo comum é a de resistores conectados em sequência (série): a queima de qualquer um causa a abertura do circuito e interrupção da corrente elétrica.

Dada a função $R_i(t)$ de cada componente, a confiabilidade da associação é a multiplicação das confiabilidades individuais:

$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (18)$$

A Figura 14 exemplifica a equação acima para a associação de 2 e 10 componentes que possuem um taxa de falha constante unitária.

$$R(t) = e^{-t}, \text{ para } n = 1$$

$$R(t) = e^{-2t}, \text{ para } n = 2$$

$$R(t) = e^{-10t}, \text{ para } n = 10$$

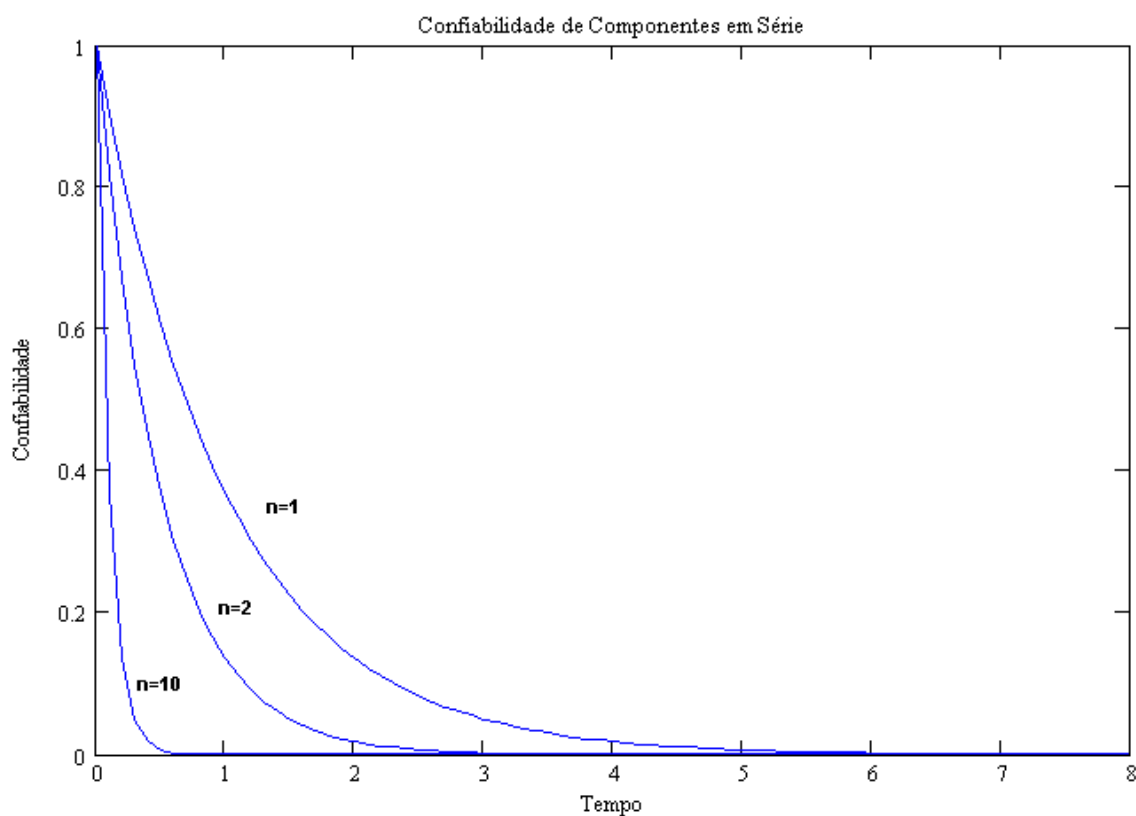


Figura 14 - Associação em série

Como era de se esperar, a confiabilidade decresce com o número de componente. Nota-se o rápido decréscimo, mesmo com uma quantidade pequena em série.

3.5.2. Componentes em Paralelo

Associam-se componentes em paralelo quando se quer garantir o funcionamento do conjunto mesmo quando alguns de seus componentes venham a falhar. Exemplificando novamente com resistores, a queima de um resistor em paralelo não irá causar a interrupção da corrente.

Este é um mecanismo de aumento de confiabilidade no projeto de sistema, normalmente conhecido como redundância ativa, pois todos os elementos funcionam ao mesmo tempo.

Demonstra-se que a confiabilidade do sistema é dada por:

$$R(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)], \quad (19)$$

Ou por:

$$Q(t) = \prod_{i=1}^n Q_i(t), \text{ onde}$$

$Q_i(t) = 1 - R_i(t)$ é a não-confiabilidade (evento complementar da confiabilidade).

A Figura 15 exemplifica a equação acima para a associação de 2 e 10 componentes que possuem um taxa de falha constante unitária.

$$R(t) = e^{-t}, \text{ para } n = 1$$

$$R(t) = 1 - [1 - e^{-t}]^2, \text{ para } n = 2$$

$$R(t) = 1 - [1 - e^{-t}]^{10}, \text{ para } n = 10$$

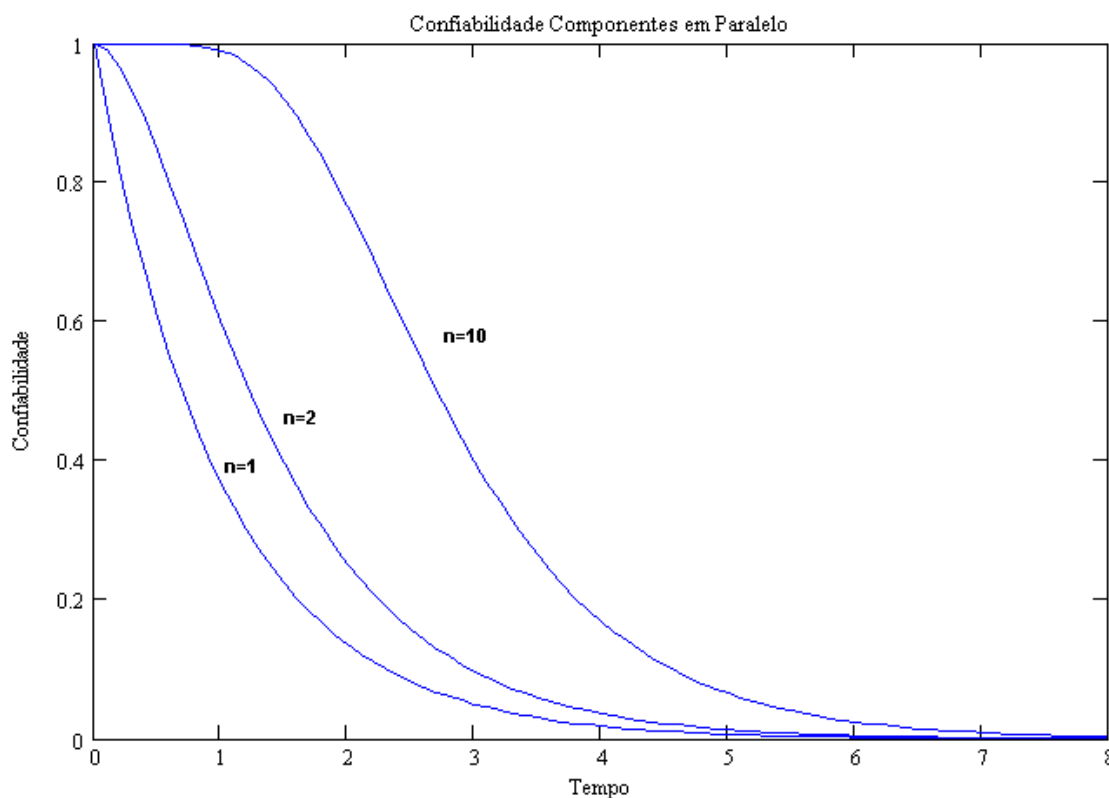


Figura 15 - Associação em paralelo

Nesta arranjo, tem-se um aumento da confiabilidade devido à possibilidade do conjunto continuar funcionar mesmo quando alguns de seus elementos venham a falhar.

3.5.3. Componentes em Comutação

Um arranjo de componentes bastante comum é o em comutação. Opera-se apenas um por vez, diferentemente do arranjo em paralelo. Na falha do componente em trabalho, é acionado outro por meio de um chaveador. Como exemplo típico desta configuração, cita-se bombas de reservas. Neste caso a operação em paralelo alteraria o adimensional característico da instalação e as bombas operariam em carga parcial. Ao instalar o conjunto em comutação, garante-se a operação nas condições de projeto e aumento da confiabilidade.

Demonstra-se que a confiabilidade do sistema é dada por, BAZOVSKY (2004):

$$R(t) = e^{-\lambda t} \left(\sum_{i=0}^{n-1} \frac{(\lambda \cdot t)^i}{i!} \right), \quad (20)$$

Onde:

n = número de componentes do arranjo

λ = taxa de falha

Com as hipóteses:

- Comutador ideal (confiabilidade unitária e constante)
- Componentes modelados pela distribuição exponencial com taxa de falhas iguais
- Componentes não degradam quando em espera

A Figura 16 exemplifica a equação acima para a associação de 2 e 10 componentes que possuem um taxa de falha constante unitária.

$$R(t) = e^{-t}, \text{ para } n = 1$$

$$R(t) = e^{-t}(1+t), \text{ para } n = 2$$

$$R(t) = e^{-t} \left(\sum_{i=0}^9 \frac{t^i}{i!} \right), \text{ para } n = 10$$

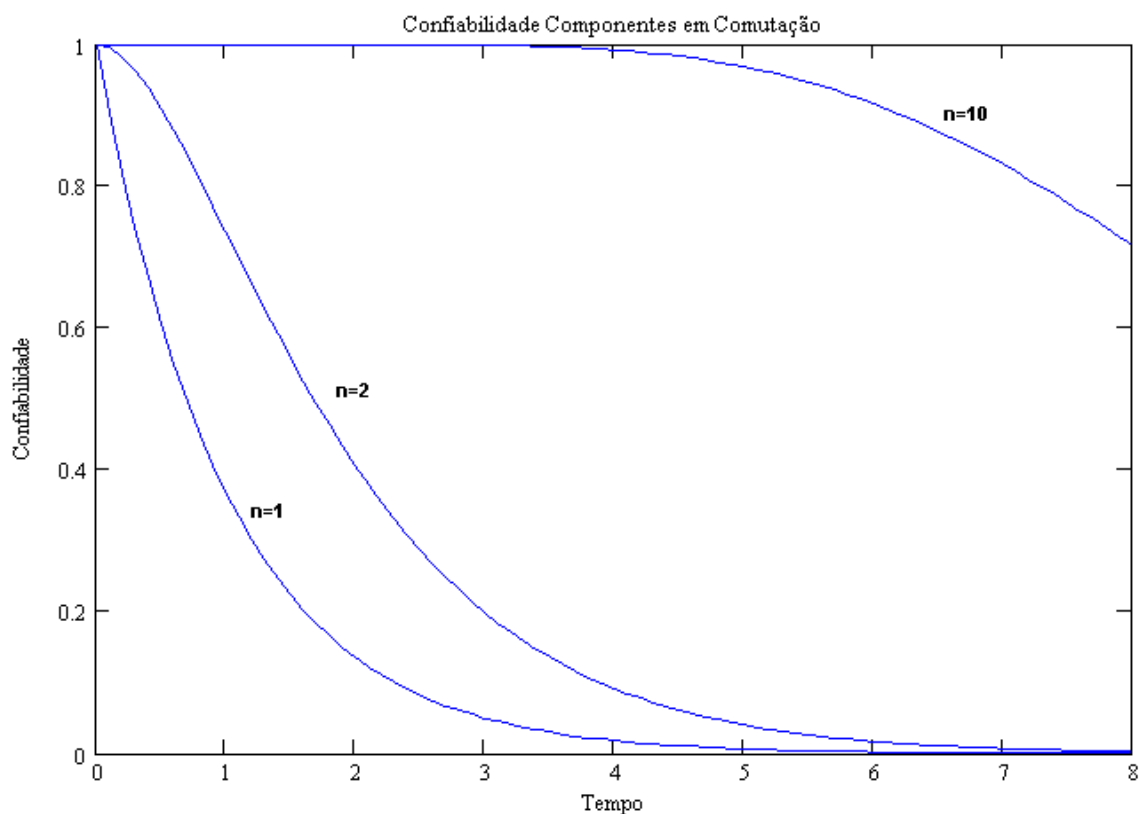


Figura 16 - Associação em comutação

À primeira vista pode parecer que este arranjo possui uma confiabilidade maior que o arranjo em paralelo. Isto é verdade para o comutador ideal. Assumindo que a comutação também possui uma distribuição de probabilidade e/ou que os componentes degradam quando em espera, este resultado pode mudar significativamente.

3.6. Índices na Confiabilidade

Muitos são os índices usados em Confiabilidade para caracterizar o comportamento do sistema em análise, três dos quais serão apresentados nos tópicos seguintes: Tempo Médio de Falha ou MTTF (do inglês, *Mean Time to Failure*), Tempo Médio de Reparo ou MTTR (do inglês, *Mean Time to Repair*) e Disponibilidade.

3.6.1. Tempo Médio de Falha

Para sistemas não reparáveis, o MTTF é o valor esperado da função densidade de probabilidade de falha, matematicamente:

$$MTTF = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) \cdot dt = \int_0^{\infty} R(t) \cdot dt \quad (21)$$

Representa o tempo de vida médio do sistema. É um dos índices mais usados em Confiabilidade. Para as distribuições discutidas acima, temos:

Tabela 1 - Tempos Médios de Falha para algumas distribuições

Distribuição	MTTF
Exponencial	$1/\lambda$
Normal	μ
Weibull 2 parâmetros (*)	$\theta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right)$
Lognormal	$\ln(t_0)$

(*) - $\Gamma(t)$ é a função gama, veja (BUSSAB; MORETTIN, 2006)

Para sistemas reparáveis usa-se o termo Tempo Médio Entre Falhas ou MTBF (do inglês, *Mean Time Between Failure*) que caracteriza o intervalo de tempo médio entre falhas, após ocorrência e reparo. É comum o uso do termo MTBF para sistemas reparáveis e não reparáveis, sendo que ambos representam o mesmo conceito estatístico, BAZOVSKY (2004).

3.6.2. Tempo Médio de Reparo

Seja t uma variável aleatória contínua que representa o tempo de concertar uma falha depois de ocorrida. A probabilidade do tempo de reparo ser igual a $t = \tau$ segue uma distribuição de probabilidade.

A capacidade de detecção do problema, a habilidade técnica da equipe de manutenção, o acesso ao local e efeitos da falha influenciam a forma da distribuição. Em sistemas mecânicos, muitas falhas são evidentes ou tornam-se evidente devido à instrumentação presente, reduzindo o tempo de diagnóstico.

Definindo uma função densidade de probabilidade de reparo segundo LEWIS (1987), temos:

$$m(t) \cdot \Delta t = P(t < T < t + \Delta t) = \text{Probabilidade do reparo de uma falha} \quad (22)$$

ocorrer no intervalo de tempo entre
 t e Δt (*)

Defini-se então manutenibilidade e MTTR, respectivamente por:

$$M(t) = \int_0^t m(t') \cdot dt' \quad (23)$$

$$MTTR = \int_0^{\infty} t \cdot m(t) \cdot dt \quad (24)$$

É um indicador importante da eficiência da manutenção na organização, pois considera indiretamente fatores como estoques, administração, capacidade técnica, entre outros.

3.6.3. Disponibilidade

Um índice que mede o tempo operacional de um sistema reparável é a Disponibilidade. Definindo uma função probabilidade segundo LEWIS (1987), temos:

$$A(t) = \text{Probabilidade que o sistema esteja operando no instante de tempo } t$$

(*) Aqui o termo tempo de parada foi substituído por tempo de reparo para adequação com a nomenclatura corrente em confiabilidade.

Refere-se a esta função como disponibilidade pontual, em contraste com a disponibilidade em um intervalo, ao longo da vida útil do sistema ou para uma operação específica:

$$A^*(t_0) = \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} A(t) \cdot dt \quad (25)$$

A disponibilidade em um intervalo no regime estacionário é calculada fazendo t_0 tender a infinito:

$$A^*(\infty) = \lim_{t_0 \rightarrow \infty} \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} A(t) \cdot dt \quad (26)$$

Para sistemas com falhas evidentes, o MTTR é muito inferior ao MTBF, e modelando tanto a função densidade de probabilidade de reparo, $m(t)$, quanto a função densidade de probabilidade de falha, $f(t)$, como exponenciais, chega-se à importante expressão, maiores detalhes em LEWIS (1987):

$$A^*(\infty) = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (27)$$

SMITH (2001) aponta que a definição do tempo parado pode incluir parcialmente ou eventualmente excluir o tempo de checagem e validação.

3.7. Manutenção e Confiabilidade

O impacto da manutenção preventiva sobre a confiabilidade, modelo de Weibull, em três situações com taxas de falhas diferentes é observado na Figura 17:

$\beta < 1$, taxa de falha decrescente

$\beta = 1$, taxa de falha constante

$\beta > 1$, taxa de falha crescente

No primeiro caso, $\beta < 1$, a manutenção pode prejudicar o sistema ao introduzir componentes novos com taxas de falhas precoces altas. Para $\beta = 1$, a manutenção é indiferente e para $\beta > 1$, a manutenção reduz a degradação confiabilidade ao substituir componentes com desgaste e taxas de falhas elevadas.

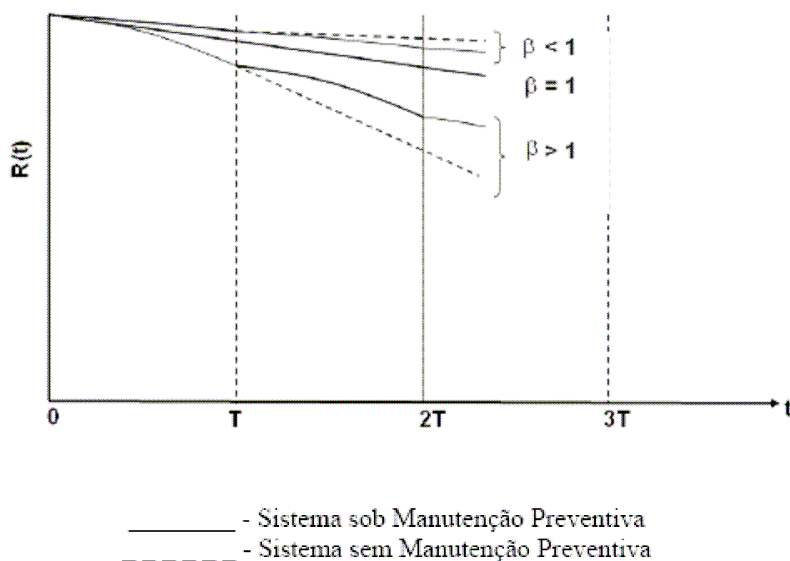


Figura 17 - Impacto da manutenção preventiva na confiabilidade (LEWIS, 1987)

Observa-se que para $\beta > 1$ não houve aumento de confiabilidade, ao contrário da intuição. Houve uma mudança na inclinação da curva, indicando uma menor degradação e maior tempo de vida do sistema. A afirmação que manutenção aumenta a confiabilidade é errada.

A Figura 9c mostra que sistemas mecânicos permanecem um curto período com taxa de falha decrescente e a maior parcela de sua vida operacional com taxa de falha crescente. Justifica-se assim a necessidade de manutenção preventiva nestes sistemas.

4. MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE

4.1. Aspectos Históricos e Conceitos

A Manutenção Centrada em Confiabilidade surgiu no campo da aviação comercial na década de 60 para certificação da nova geração de aeronaves com alto grau de automação e complexidade, face à inviabilidade das técnicas de manutenção da época, segunda geração, em atender as exigências das autoridades aeronáuticas. Foi criado o grupo de trabalho conhecido pela sigla MSG-1 em 1968 para rever a aplicabilidade dos métodos existentes, SIQUEIRA (2005).

Dos trabalhos do grupo, surge o relatório o qual introduz os conceitos da Manutenção Centrada em Confiabilidade e torna a metodologia obrigatória para uso em novas aeronaves.

O trabalho pioneiro de NOWLAN; HEAP (1978) foi baseado no campo da aviação, mas o conceito foi expandido e generalizado para aplicação em outros sistemas e processos complexos, dado o alto grau de automação, confiabilidade e requisitos de qualidade atualmente. A metodologia logo se estendeu para área militar, energia, mineração e processo.

Atualmente a norma SAE JA1011, “Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes” estabelece os critérios mínimos de um processo MCC. Há livros que se tornaram referências clássicas no assunto: NOWLAN; HEAP (1978), MOUBRAY (1999) e SMITH (2003).

Nesta terceira geração, a curva da banheira representará uma pequena parcela das falhas em sistemas complexos e sem modo de falha dominante. NOWLAN; HEAP (1978) sugere seis padrões de curvas, Figura 18, extraída de SIQUEIRA (2005), nos quais apenas 11% dos itens seguem os padrões A, B e C, cujas falhas estão ligadas a efeitos de envelhecimento. Os 89% restantes permanecem a maior parte de sua vida útil em um estado de taxa de falha constante.

A razão para este fenômeno, é que a variedade de modos de falhas do sistema governa o comportamento e a taxa de falha se mantém praticamente constante após entrada em operação e eliminação das falhas prematuras.

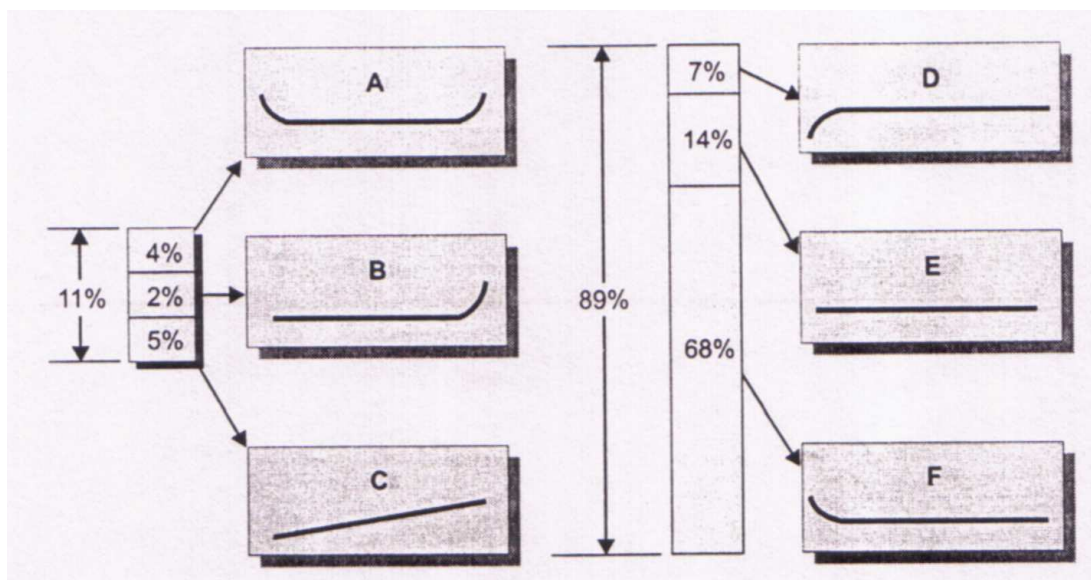


Figura 18 - Curvas propostas (SIQUEIRA, 2005)

Esta descoberta iniciou uma mudança na forma de efetuar manutenção, pois, como mostrado no capítulo anterior, a manutenção preventiva em sistemas com taxas de falhas constante não reduz a degradação confiabilidade, ao contrário, expõe o sistema a novas falhas ao introduzir componentes com falhas prematuras e erros humanos no reparo.

A decisão da manutenção recai então nas consequências da falha. Para falhas cujas consequências são mínimas, pode-se chegar ao extremo de não se tomar qualquer cuidado e aplicar apenas manutenção corretiva. Mas quando as consequências são significativas, alguma ação deve ser tomada para prevenir ou prever a falha, ou reduzir suas consequências, MOUBRAY (1999).

A avaliação das consequências de falhas alinha-se também com a crescente preocupação da sociedade com aspectos ambientais, de segurança e de qualidade. A

imagem que a organização transmite à sociedade vai além de custos e tem um peso importante para sobrevivência do negócio.

Os métodos da segunda geração, em destaque a manutenção preventiva, mostraram-se ineficiente do ponto de vista de custos e retorno em confiabilidade. O aumento da frequência de parada para revisões e troca de componentes com base em tempo de vida, não trazia o respectivo ganho em confiabilidade. Assim um dos aspectos abordados na terceira geração foi qual o método mais eficiente, dentre as três técnicas clássicas de manutenção, que assegure a confiabilidade e reduza as consequências de falhas para cada componente. Reduz-se custos sem detrimento da confiabilidade, focando-se a manutenção nas funções importantes do sistema.

Em RAUSAND (1998) encontra-se a seguinte definição da MCC:

“MMC é uma consideração sistemática das funções do sistema, do modo como elas falham, e, baseadas em prioridades, considerações de segurança e econômicas que identifica a aplicação e a efetividade de ações preventivas”

O foco muda para as funções desempenhadas pelos sistemas e não às partes físicas.

4.2. As 7 Questões

A aplicação da metodologia MCC, provê respostas às sete questões seguintes:

- Quais são as funções e os níveis de desempenho do sistema no contexto operacional atual?
- De que modos ele falha de satisfazer suas funções?
- O que causa cada falha funcional?
- O que acontece quando cada falha ocorre?
- De que modo cada falha importa?
- O que pode ser feito para predizer ou prevenir cada falha?

- O que deveria ser feito se uma tarefa de manutenção pró-ativa não puder ser determinada?

Dado o grande número de componentes em sistemas complexos, a MCC segue uma organização com formulários, organogramas e diagramas de decisões típicos. Os sete tópicos seguintes apresentam estes itens e as questões em maiores detalhes.

4.3. Funções e Níveis de Desempenho

Ao transferir o foco da parte física para a funcional, a metodologia MCC integra o desejo final do usuário do sistema em cumprir determinada tarefa. A concepção do sistema em termos funcionais realça os quesitos que devem ser cumpridos para manutenção da operação.

As funções são classificadas em primária e secundária:

- Primária: resumem o porquê da aquisição do componente, isto é, a principal função para a qual ele foi adquirido.
- Secundária: expressam desejos adicionais do comprador do equipamento. Incluem itens como conforto, baixo nível de ruído, acesso fácil, etc.

Sistemas de geração são constituídos basicamente por funções primárias, entretanto, questões de bem-estar dos operadores, ambientais e sociais estão impondo novas e desafiantes funções secundárias.

Organizam-se as funções dos diversos componentes no sistema na forma de uma árvore funcional e da descrição funcional.

4.3.1. Árvore Funcional

A metodologia proposta por MASSARANI (2003) para elaboração de uma árvore funcional consiste em responder sistematicamente às perguntas: Como é executada (cumprida) uma determinada função?; Por que uma determinada função deve ser executada?

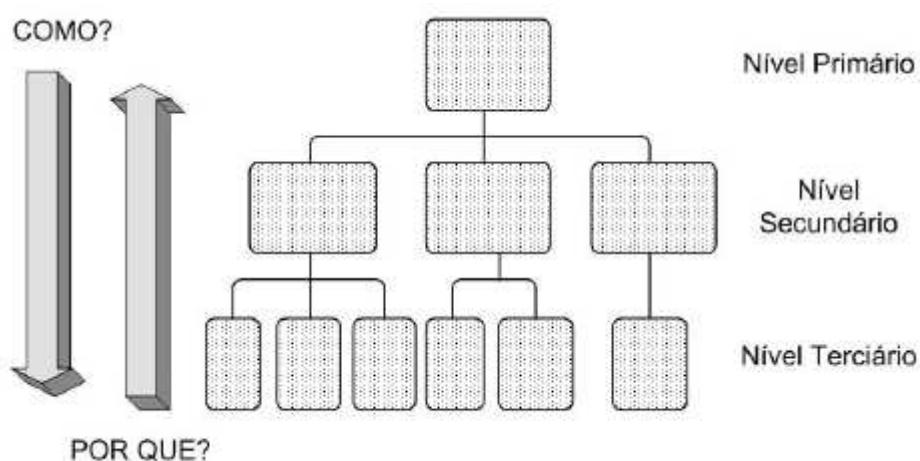


Figura 19 - Elaboração da árvore funcional (MASSARANI, 2003)

Partindo do nível primário, que define a função da existência do equipamento, a resposta à primeira pergunta leva um nível abaixo e as funções que asseguram o cumprimento da função do nível acima. Assim sucessivamente até o nível de componentes. A resposta à segunda pergunta percorre o caminho contrário, do nível de componentes até o nível primário e fornece uma forma de checagem da árvore.

Para cada componente da árvore será elaborada uma análise de modos e efeitos de falhas, descrita a frente neste capítulo, e servirá de meio para avaliar o caminho da falha desde os níveis inferiores até o nível primário.

4.3.2. Descrição Funcional

A Engenharia de Valor, MASSARANI (2003), sugere que a descrição funcional seja do tipo:

Verbo + Substantivo

Já a metodologia MCC, MOUBRAY (1999), adiciona um termo extra que define o nível de desempenho aceitável para o componente. Quando o estado operacional não cumpre este nível de desempenho, o componente, funcionalmente, falhou:

Verbo + Substantivo + padrão de desempenho desejado

Este termo adicional deve ser o mais quantitativo possível, sendo portanto intimamente ligado com a turbina em questão. Uma bomba que deve bombear X litros/min de óleo numa turbina deverá bombear Y litros/min em outra usina de potência diferente, por exemplo.

Este trabalho não retrata nenhuma instalação específica, portanto este termo adicional não foi avaliado e não afeta de modo algum os objetivos deste trabalho.

4.4. Falhas Funcionais

Estando o componente em um estado incapaz de realizar o que o usuário deseja, diz-se que o componente falhou. Normalmente a falha é enxergada apenas pelo lado do componente, mas o usuário pode querer um desempenho acima das especificações técnicas. Neste caso, não houve uma falha física, mas o componente falhou por não atender mais as exigências do usuário.

Quando o componente não atende ou atende parcialmente os requisitos dados em sua descrição funcional, há uma falha funcional. Nota-se que componentes com mais de uma função, é possível a falha de uma função específica enquanto as demais continuam operacionais.

4.5. Modos da Falha

A possível causa da falha funcional é atribuída aos modos de falha, ou seja, os eventos que podem provavelmente levar à falha funcional. Para cada falha funcional, pode-se listar um ou mais modos de falhas.

Os modos de falhas representam as atividades de manutenção em si. As atividades de manutenção são gerenciadas a partir de modos de falha, MOUBRAY (1999).

Alguns exemplos representativos desta afirmação:

- Trocar o anel de vedação de uma bomba devido ao vazamento excessivo. Vazamento excessivo é um modo de falha da bomba quando aquele excede o valor aceitável da descrição funcional;
- Reparar entupimento parcial de tubulação. Novamente um modo de falha, o bloqueio parcial da tubulação cuja vazão está abaixo do aceitável;
- O planejamento das atividades de manutenção é feito a partir de modos de falhas específicos, MOUBRAY (1999);

Manutenção pró-ativa antecede à ocorrência de modos de falhas ou, ao menos, como tratá-los uma vez ocorridos. Para aqueles modos de falha não listados, o princípio vale para a próxima ocorrência. Manutenção reativa lida com os modos de falha após ocorrência.

Para cada modo de falha é possível prever o que acontece quando ele ocorre (efeitos de falhas), suas consequências (segurança, ambientais e operacionais) e o que pode ser feito para anteceder, prevenir, detectar ou corrigir.

Cada modo de falha do equipamento segue um padrão de falha característico, representado por uma curva de taxa de falha, reforçando o conceito de administração

da manutenção pelos modos de falhas e não no nível do equipamento ou nível de componentes.

As causas físicas (em inglês, *root causes*) do modo de falha fornecem indícios para a equipe de manutenção do que pode estar errado com o equipamento, por exemplo, fadiga, corrosão, desgaste, erro do operador, etc. São também conhecidos como causas potenciais.

Em princípio, a descrição de um modo de falha, e suas causas, poderia se estender ao nível de humor do operador do equipamento ou além. O nível de detalhe desta análise deve estar de acordo com os objetivos da MCC de determinar uma atividade de manutenção e do escopo de implantação da MCC.

4.6. Efeitos de Falha

Os efeitos de falha descrevem o que acontece no sistema quando da falha. Não confundir nesta etapa efeitos e consequências. Consequências respondem a questão da importância da falha.

Evidências da ocorrência, como ruídos, vazamentos, alarmes, etc., são incluídos na descrição, pois são relevantes para a equipe de manutenção por tornarem a falha evidente. O impacto da falha na capacidade operacional do equipamento deve ser incluído na descrição dos efeitos, em termos de queda de rendimento, parada ou sem efeito.

Falhas que afetam a segurança ou o ambiente devem listar como colocam em risco a planta, os operários e o ambiente: explosões, vazamentos, enchentes, etc. Por último, deve-se incluir o tempo estimado de reparo da falha com base em experiências anteriores.

Neste ponto, o caminho que a falha do componente executada ao afetar os diversos níveis do sistema (dos mais baixos até o primário) é enxergado pela árvore

funcional. Por exemplo, no caso da ruptura da tubulação de óleo do mancal guia, este perde a capacidade de guiar o eixo com baixo atrito e leva à parada da turbina.

4.6.1. FMEA

Ao chegar neste ponto, o estudo recebe o nome de FMEA, pois contém as informações funcionais, de modos e efeitos de falhas. A forma como a MCC organiza todas essas informações para uso e auditoria é através de formulário padrão, o qual resume este estudo para cada componente, popularmente conhecido como formulário FMEA. O modelo adotado neste trabalho é apresentado na Figura 20.

O FMEA é um documento vivo. É desejável que seja constantemente revisado, ao descobrir novos modos ou causas de falhas, correção de dados de efeitos, acompanhamento das técnicas implementadas, reconsiderações de severidade, frequências ou detectabilidade, aquisição de novos equipamentos, etc.

Sistema: Mancal Guia									
Subsistema: Sistema de Refrigeração e Lubrificação									
Componente: Tubulação de Óleo									
Número de Identificação: 2.2.2									
Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN		
Encaminhar o fluxo de óleo	Ruptura/Vazamento Excessivo	-Corrosão -Pressão elevada -Apoles subdimensionados -Soldas com defeitos -Danos às vedações/válvulas	1) Sistema de Refrigeração e Lubrificação incapaz de manter a circulação adequada de óleo; Vazamento de óleo para o ambiente; vazão de óleo baixa ou nula; 2) Sistema Mancal Guia inoperante; queda no nível de óleo; aumento de temperatura dos segmentos do mancal e do óleo; queda da temperatura da água de resfriamento na saída; 3) Parada da turbina	7			7		
	Obstrução total	-Acumulação de detritos	1) Sistema de Refrigeração e Lubrificação incapaz de manter a circulação adequada de óleo; vazão de óleo nula; 2) Sistema Mancal Guia inoperante; aumento de temperatura do óleo e dos segmentos; queda da temperatura da água de resfriamento na saída; 3) Parada da turbina	7			7		
	Obstrução Parcial	-Acumulação de detritos	1) Sistema de Refrigeração e Lubrificação incapaz de manter a circulação adequada de óleo; vazão de óleo baixa; 2) Sistema Mancal Guia operando com deficiência; aumento de temperatura do óleo e dos segmentos; queda da temperatura da água de resfriamento na saída; 3) Turbina operando com potência reduzida	6			6		

Figura 20 - Típico formulário para FMEA

4.6.2. Avaliação pelo risco

Outro meio comum de avaliar o efeito da falha é pelo risco:

$$\text{RPN} = \text{Severidade} \times \text{Frequência} \times \text{Detectabilidade}$$

A organização define tabelas com vários níveis para cada constituinte do risco e classifica cada modo de falha numa faixa de severidade, frequência e detectabilidade. A multiplicação dos constituintes resulta no índice RPN (do inglês, *Risk Priority Number*) que mede o risco daquele modo de falha.

Modos de falha com RPN altos são preocupantes porque expõe a organização a falhas severas, com altas frequências e baixa detectabilidade, são em essência, falhas intoleráveis. A aceitabilidade de risco é estipulada pelo gestor da organização.

SIQUEIRA (2005) propõe o uso de escalas para a detectabilidade e frequências conforme a Tabela 2 e a .:

Tabela 2 - Escalas de Detectabilidade (SIQUEIRA, 2005)

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

Tabela 3 - Escalas de Freqüência (SIQUEIRA, 2005)

<i>Nível</i>	<i>Freqüência</i>	<i>Descrição</i>	<i>Exemplo</i>
1	Freqüente	Esperado ocorrer freqüentemente Falha ocorrerá continuamente	$\geq 10^{-1} / ano$
2	Provável	Ocorrerá várias vezes Falha ocorrerá com freqüência	$< 10^{-1} / ano$ $\geq 10^{-2} / ano$
3	Ocasional	Possível ocorrer várias vezes Falha esperada ocorrer ocasionalmente	$< 10^{-2} / ano$ $\geq 10^{-3} / ano$
4	Remoto	Esperado ocorrer algumas vezes Falha razoavelmente esperada	$< 10^{-3} / ano$ $\geq 10^{-4} / ano$
5	Improvável	Possível ocorrer, mas improvável Falha ocorrerá excepcionalmente	$< 10^{-4} / ano$ $\geq 10^{-5} / ano$
6	Inacreditável	Essencialmente inesperada ocorrer Falha praticamente não ocorrerá	$< 10^{-5} / ano$ $\geq 10^{-6} / ano$

Para este trabalho foi adotada a tabela de severidade proposta por CARAZAS (2006) para sistemas de geração de eletricidade. É composta de nove escalas, Tabela 4.

Tabela 4 - Escalas de Severidade

<i>Grau de Severidade</i>	<i>Efeito sobre a Operacionalidade do Sistema de Geração de Energia</i>
1. (Sem Efeito)	- 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 Ligeiro)	- 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)	- 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)	- 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)	- 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)	- 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)	- Falha de componente, sem danos a outros componentes. Necessidade de substituição e/ou reparo do componente, com tempo de parada reduzido; - Falha que não afeta segurança do sistema de geração e dos operadores; - Falha causa parada de máquina, com não cumprimento de regulamentação governamental. - Efeito ambiental grave, possibilidade de multa.
8. (Efeito Sério)	- Falha de componente que causa danos moderados ao sistema de geração de energia, sem danos a outros componentes. Necessidade de substituição e/ou reparo do componente; - Falha que não afeta segurança do sistema de geração e dos operadores; - Falha causa parada de máquina, com não cumprimento de regulamentação governamental. - Efeito ambiental muito grave, possibilidade de multa.
9. (Efeito Perigoso)	- Falha de componente que causa danos severos ao sistema de geração, incluindo danos a outros componentes. Necessidade de substituição e/ou reparo de vários componentes; - Falha que afeta segurança do sistema de geração e dos operadores; - Falha causa parada de máquina, com não cumprimento de regulamentação governamental. - Efeito ambiental perigoso, vazamento de substâncias perigosas, aplicação de multa.

4.7. Consequências da Falha

As falhas e seus efeitos afetam o sistema de diversas maneiras e graus: qualidade, segurança, risco, ambiente, etc. Assim ações são tomadas de acordo com as consequências das falhas. Severas consequências indicam que devemos prestar mais atenção a estas falhas, acompanhando sua evolução e reparando o item quando atingir valores críticos.

O grande esforço da MCC é reconhecer que as consequências são de longe mais importantes que suas características técnicas, MOUBRAY (1999). A razão da manutenção pró-ativa não é evitar falhas, mas reduzir ou eliminar as consequências destas falhas.

A MCC classifica as consequências em quatro categorias, MOUBRAY (1999):

- Consequências escondidas: falhas escondidas não têm impacto direto, mas expõem a organização à falhas múltiplas com sérios, às vezes catastróficas, consequências. (A maioria destas falhas está associada à dispositivos de proteção com falhas não evidentes);
- Consequências ambientais e de segurança: uma falha tem consequências de segurança se pode ferir ou matar alguém. Ela tem consequências ambientais se pode infringir algum requisito ambiental corporativo, regional, nacional ou internacional;
- Consequências operacionais: Uma falha tem consequências operacionais se afeta a produção (linha de produção, qualidade do produto, serviços ao consumidor ou outros custos operacionais além do custo de reparo);

- Sem consequências operacionais: Falhas evidentes que se encaixam nesta categoria não afetam a segurança ou produção, envolve apenas o custo de reparo;

As decisões de manutenção são baseadas nestas consequências, e priorizam a segurança, o ambiente e a operação. A estrutura de decisão elimina o conceito de que todas as falhas são ruins e concentra esforços naquelas que realmente trazem benefícios.

4.8. Decisões na manutenção

Em síntese, a estrutura de decisão na MCC questiona se uma técnica pró-ativa de manutenção é realizável e que reduza os riscos a patamares aceitáveis. Se uma técnica pró-ativa não puder ser determinada, então uma técnica reativa poderá ser empregada.

O fluxograma da Figura 21 resume o processo decisório.

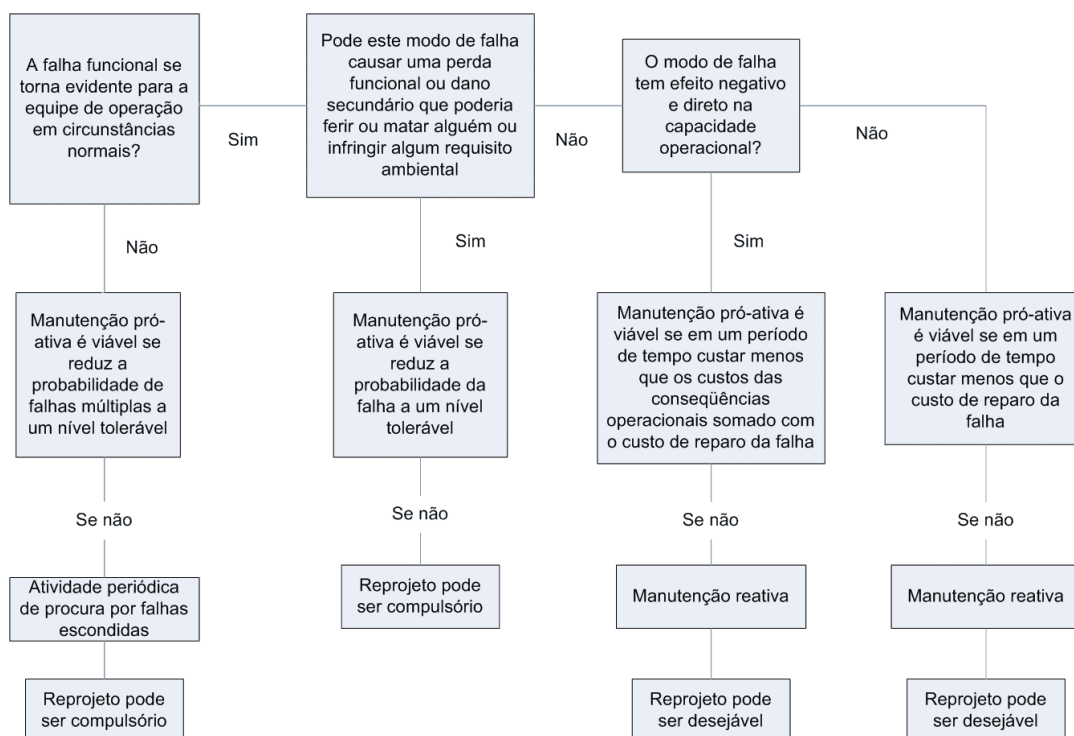


Figura 21 - Fluxograma de decisão (MOUBRAY, 1999)

Observando o fluxograma acima, as tarefas preditivas ou preventivas são escolhidas apenas para falhas com consequências significativas, reduzindo a carga de trabalho e os custos de manutenção, e, inclusive para consequências operacionais, deve-se justificar os custos destas técnicas

5. TURBINAS HIDRÁULICAS

Turbinas hidráulicas são máquinas de transformação de energia. Recebem a energia hidráulica na forma de pressão e velocidade e a transforma em energia de eixo. São ainda classificadas como máquinas de fluxo, pois o trabalho é obtido pela variação da direção do escoamento ao passar pelo rotor, SOUZA (1991).

Na usina hidrelétrica, esta potência de eixo (torque e rotação) é entregue ao gerador que a converte em potência elétrica (tensão e corrente). A energia elétrica então segue para transformadores, que elevam a tensão para as linhas de transmissão e daí para os centros consumidores.

5.1. Tipos de turbinas hidráulicas

A seleção do tipo de turbina mais adequada, dadas as características de um aproveitamento, vazão e queda, é função da rotação específica:

$$n_q = \frac{n \cdot \sqrt{Q}}{H^{0,75}}$$

Onde:

n = velocidade de rotação da turbina em [rpm]

Q = vazão em [m³/s]

H = queda em [m]

A Figura 22 relaciona a rotação específica com o tipo de turbina. Nota-se a presença de quatro configurações básicas de turbinas hidráulicas: Pelton, Francis, Kaplan e Bulbo. De modo geral, pode-se dizer que o custo de fabricação de uma turbina cresce com o aumento da rotação específica.

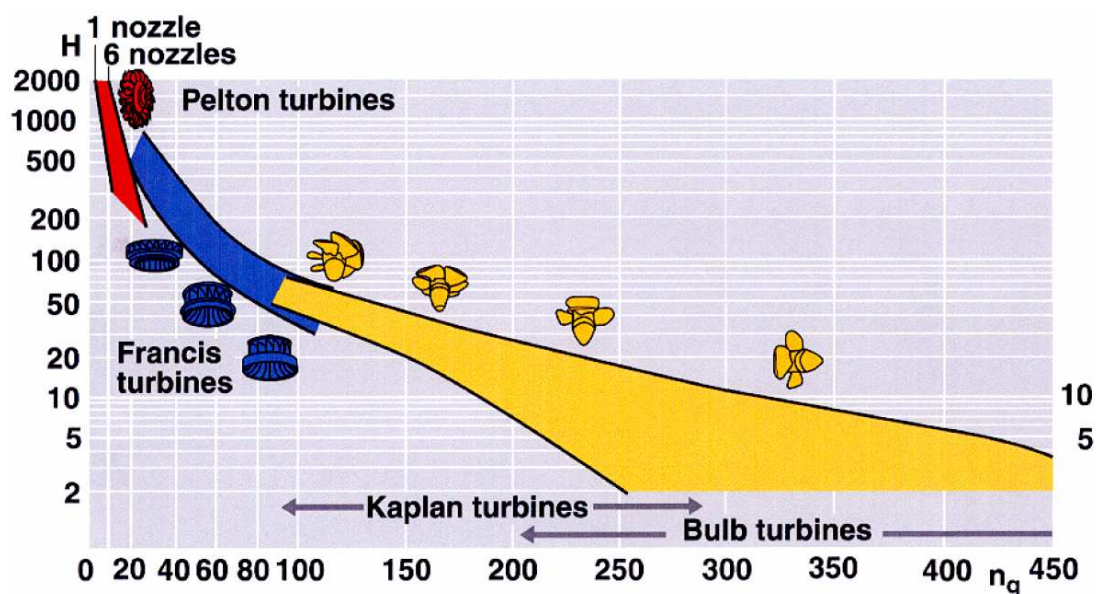


Figura 22 – Seleção de Turbina em função da rotação específica (VOITH, 2004)

5.1.1. Turbina Pelton

A Turbina Pelton é utilizada em aproveitamentos com alta queda e pequena vazão de água, isto é, baixa rotação específica. São turbinas de ação, pois não há variação de pressão no escoamento ao passar pelo rotor, há apenas mudança de direção, e possuem pás em forma de concha. O escoamento é acelerado nos ejetores (em inglês, *nozzles*) e lançado tangencialmente nas pás do rotor. Assemelha-se muito ao princípio de uma roda d'água.

Não são comuns no Brasil, pois as características hidrológicas e geológicas do país não satisfazem o perfil acima citado. Exemplo deste tipo de máquina é a usina de Henry Borden em São Paulo, no sopé da Serra do Mar, com uma queda de 720m.

A Figura 23 representa esquematicamente o funcionamento de uma turbina Pelton. O rotor e suas conchas estão representados em vermelho no centro e os seis ejetores ao redor. Além de acelerar o fluido, os ejetores controlam a vazão turbinada pela agulha em seu interior.

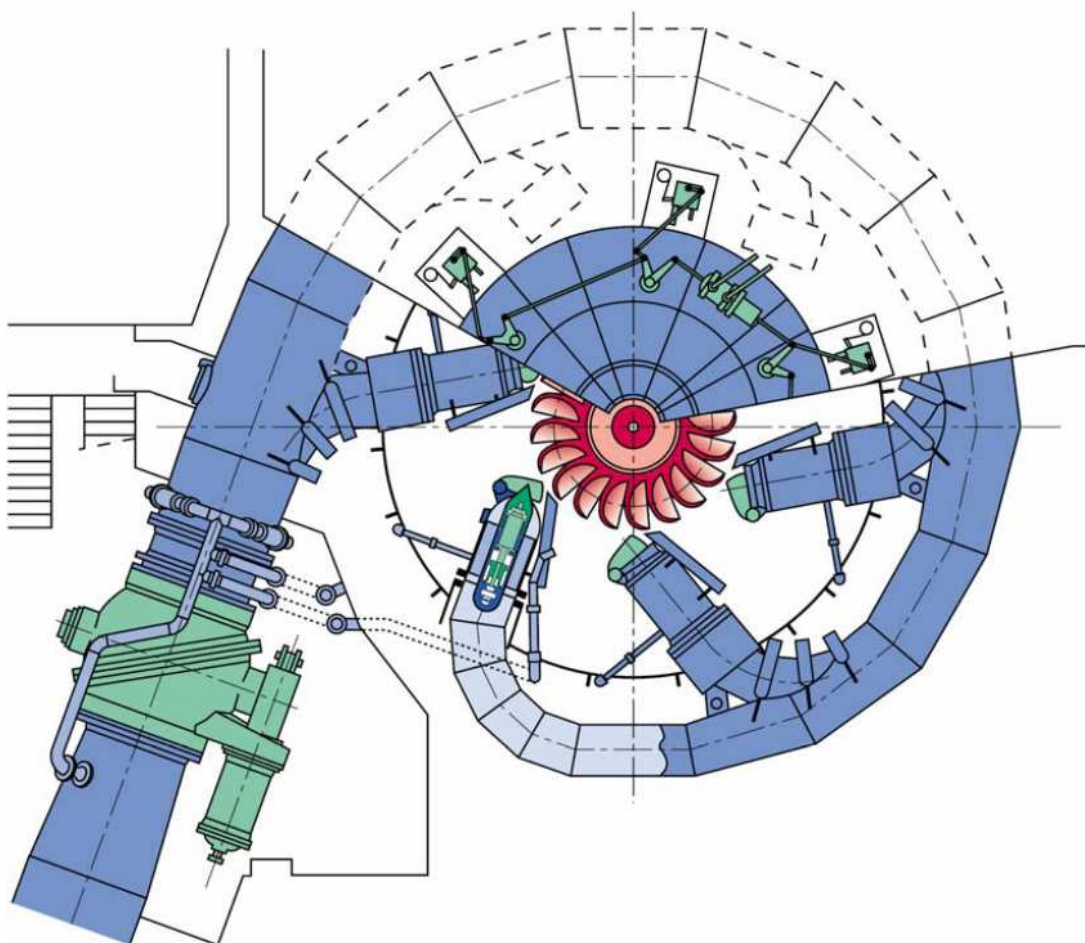


Figura 23 - Turbina Pelton com seis ejetores (VOITH, 2004)

5.1.2. Turbina Francis

Devido à ampla faixa de queda admitida, é a mais comum no mundo. São muitos os exemplos de turbinas Francis famosas por suas capacidades de geração e dimensão do empreendimento: Itaipu, Ilha Solteira, Furnas (Brasil), Três Gargantas (China) e Guri (Venezuela).

A Turbina Francis é de reação, pois a pressão do fluido muda ao escoar pelo rotor. Ao contrário da Turbina Pelton, o fluido entra radialmente no rotor e sai axialmente. Há um conjunto de palhetas diretoras antes do rotor que direciona e controla o fluxo turbinado.

Certas máquinas são construídas para operar como bombas hidráulicas. O sentido de rotação é invertido, e a máquina passa a funcionar como bomba, enchendo o reservatório em horários de baixa tarifa e turbinando em horários de alta demanda e tarifa. São conhecidas como turbinas reversíveis ou turbinas-bombas, comuns em regiões montanhosas.

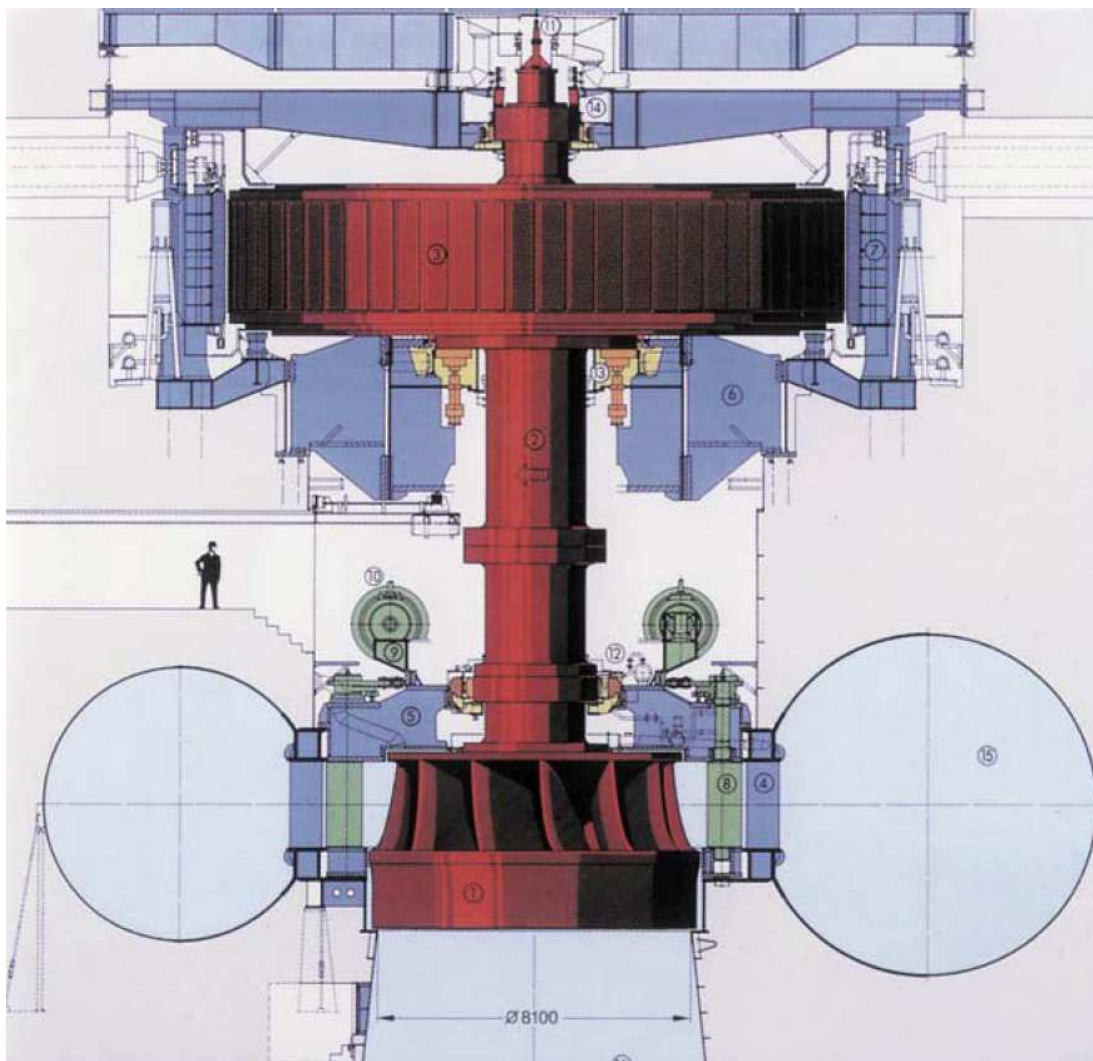


Figura 24 - Turbina Francis e Gerador (VOITH, 2004)

5.1.3. Turbina Kaplan

As Turbinas Kaplan são caracterizadas por rotores que se assemelham a hélice de navios, Figura 25. São máquinas de reação e o fluxo escoa axialmente pelo rotor. Operam com grande vazão de água e baixa queda.

O rotor possui um mecanismo interno o qual permite movimentar as pás. Estão presentes também palhetas diretoras. São máquinas de dupla regulação, portanto. Faz-se a conjugação entre a posição das pás e a abertura das palhetas para operação com maior rendimento numa ampla faixa.

Existem variações desta construção, Turbina Tipo-S, Propeller (pás do rotor fixas) e a Bulbo, detalhada a seguir.

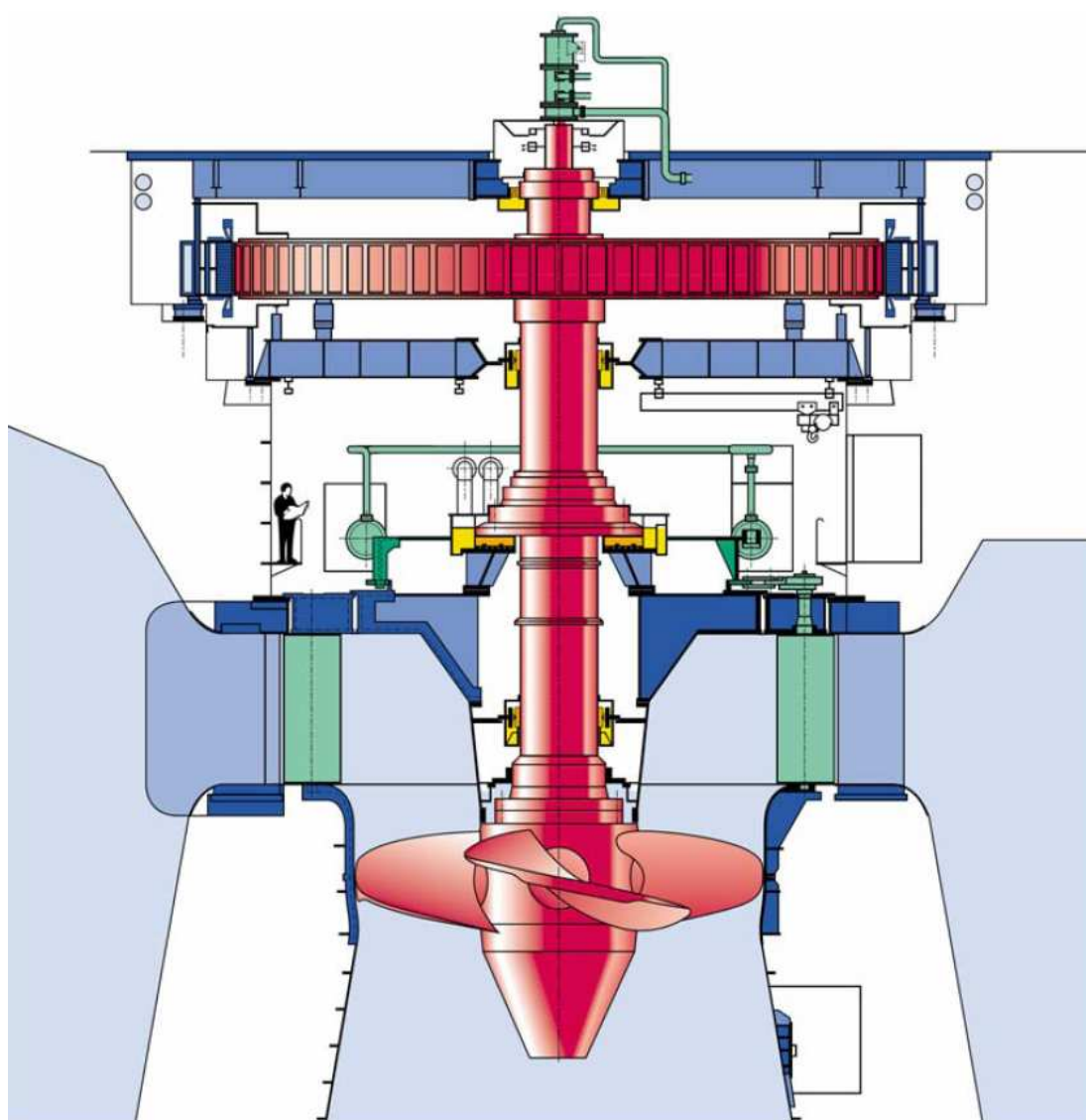


Figura 25 - Turbina Kaplan e Gerador (VOITH, 2004)

5.1.4. Turbina Bulbo

São máquinas horizontais, com dupla (rotor e palhetas) ou simples regulação (palhetas) e fluxo sempre axial. As palhetas estão dispostas inclinadas em relação ao eixo da turbina. Todo o conjunto girante fica imerso na água, lembrando submarinos, Figura 26, daí a dificuldade construtiva desta concepção .

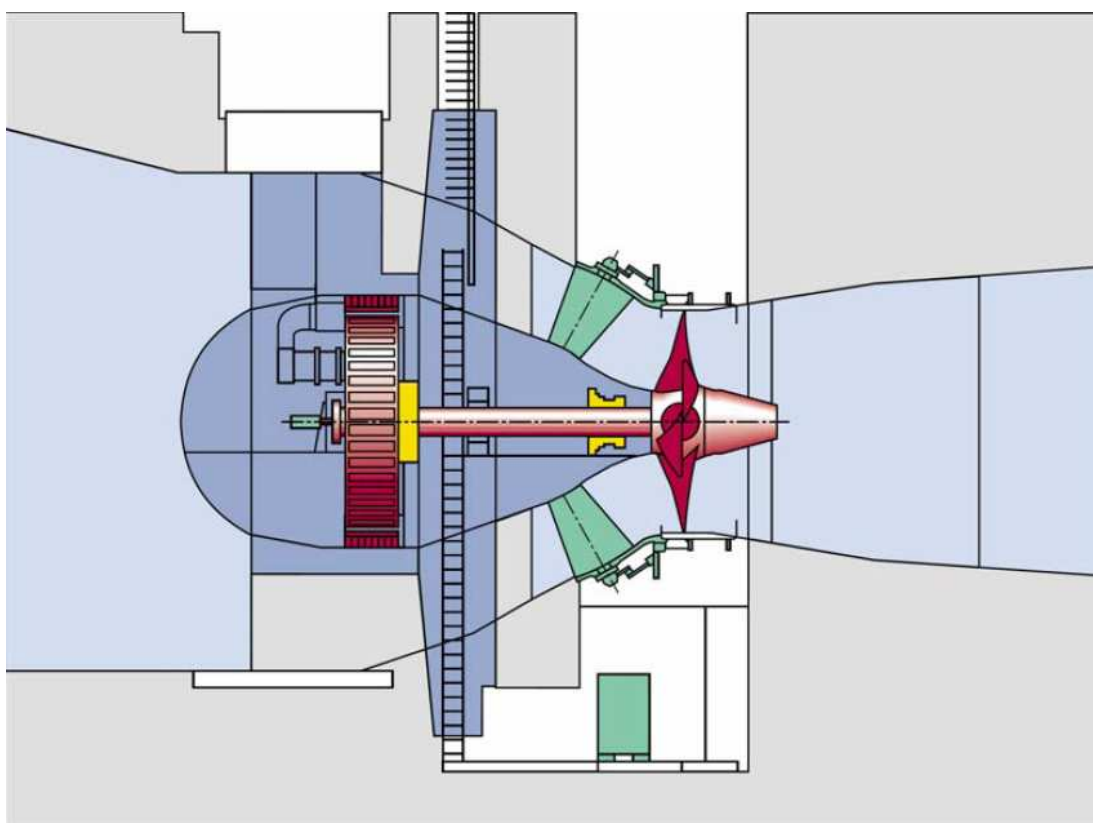


Figura 26 - Turbina Bulbo e Gerador (VOITH, 2004)

5.2. Descrição da Turbina Kaplan

Os principais constituintes de uma turbina serão discutidos nos próximos itens. Não é objetivo detalhar em profundidade um conjunto e tentou-se analisar configurações comuns entre diversas máquinas. Na Figura 27 é mostrado o corte de uma Turbina Kaplan para entendimento do conjunto e referência.

5.2.1. Conjunto Completo

LEGENDA

- | | |
|--------------------------------|---------------------------------|
| 1- CABECOTE KAPLAN | 13- SERVO MOTOR DO DISTRIBUIDOR |
| 2- MANCAL SUPERIOR DO GERADOR | 14- TAMPA EXTERNA |
| 3- CRUZETA SUPERIOR | 15- TAMPA INTERMEDIÁRIA |
| 4- EIXO SUPERIOR DO GERADOR | 16- PALHETA |
| 5- TAMPA DO GERADOR | 17- PRÉ-DISTRIBUIDOR |
| 6- ROTOR DO GERADOR | 18- ARO DE SAÍDA |
| 7- ESTATOR | 19- ARO CAMARA DO ROTOR |
| 8- FREIOS | 20- ROTOR KAPLAN |
| 9- CRUZETA INFERIOR | 21- TUBO DE SUÇÃO |
| 10- MANCAL INFERIOR DO GERADOR | 22- EIXO DA TURBINA |
| 11- EIXO INFERIOR DO GERADOR | 23- MANCAL GUIA DA TURBINA |
| 12- MANCAL ESCORA | 24- VEDAÇÃO DO EIXO E PARADA |
| | 25- TALHA GIRATÓRIA |
| | 26- TROCADOR DE CALOR |

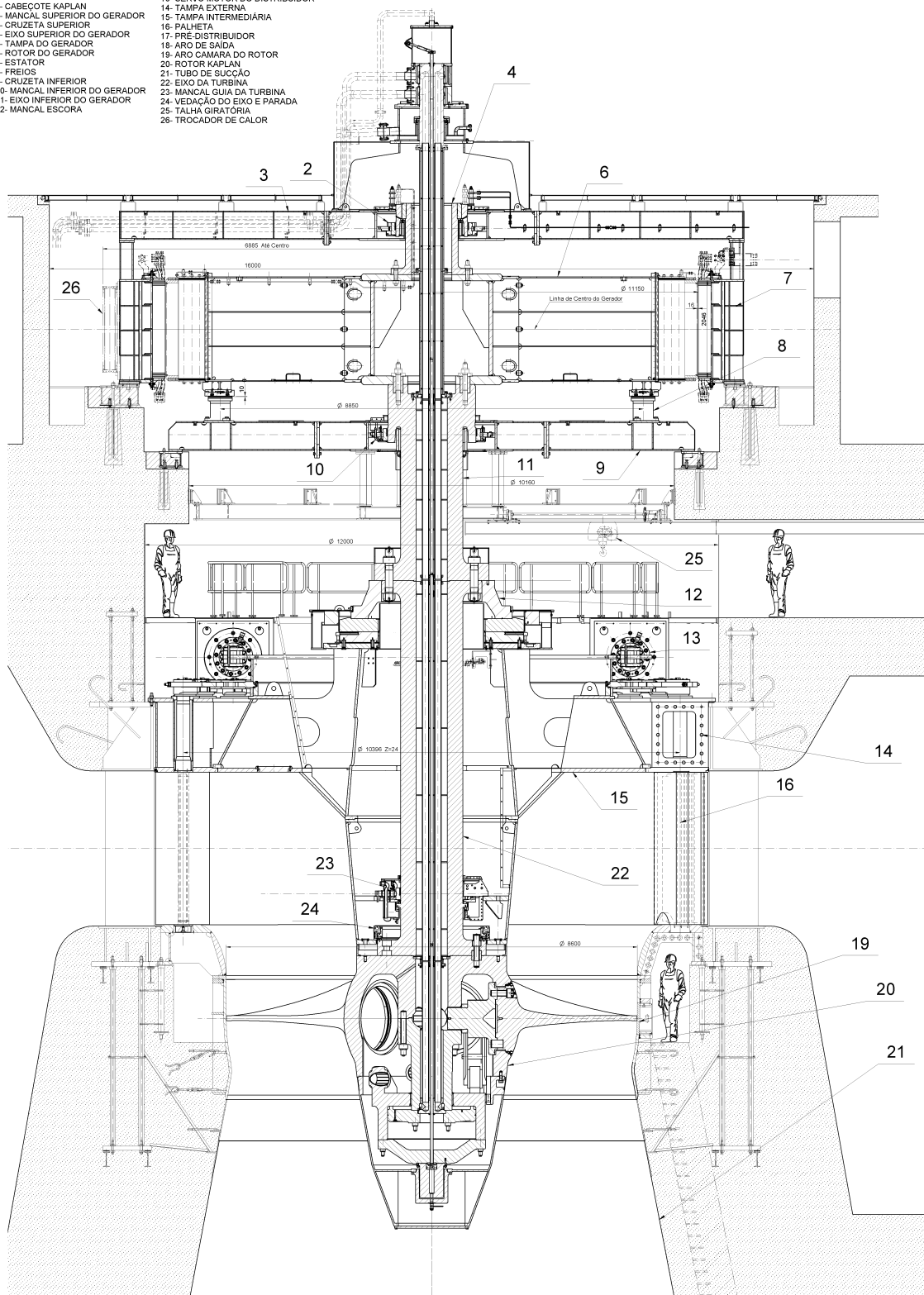


Figura 27 - Corte pela unidade

5.2.2. Caixa Espiral

O rotor deve receber o fluxo de água uniformemente distribuído a fim de equalizar os esforços hidráulicos. Assim a caixa espiral recebe o fluxo do conduto de adução e o distribui numa vazão uniforme ao redor do rotor, conforme sua seção transversal diminui. Estão sujeitas as grandes tensões e são projetadas para suportar transientes hidráulicos.

Turbinas de grande vazão e baixa queda possuem caixa espiral moldada no próprio concreto com seção transversal não-circular e não há revestimento metálico, diferentemente da Figura 28.

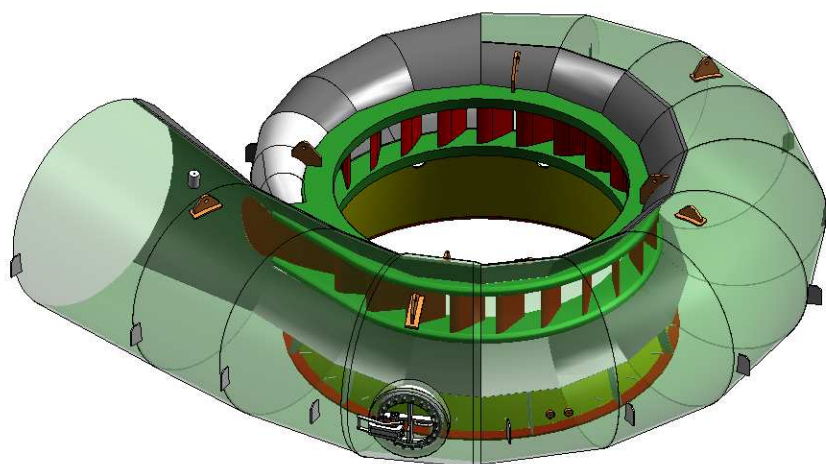


Figura 28 - Caixa Espiral e Pré-Distribuidor

No raio mais interno, está presente o pré-distribuidor com travessas fixas. É responsável por pré direcionar o fluxo e pela rigidez estrutural da caixa espiral.

5.2.3. Rotor Kaplan

O cerne da turbina hidráulica é o rotor que retira a energia fluídica (pressão , velocidade e queda) e a transforma em energia mecânica (torque e rotação). Em Turbinas Kaplan tem forma de hélice de navio com pás móveis, Figura 29.

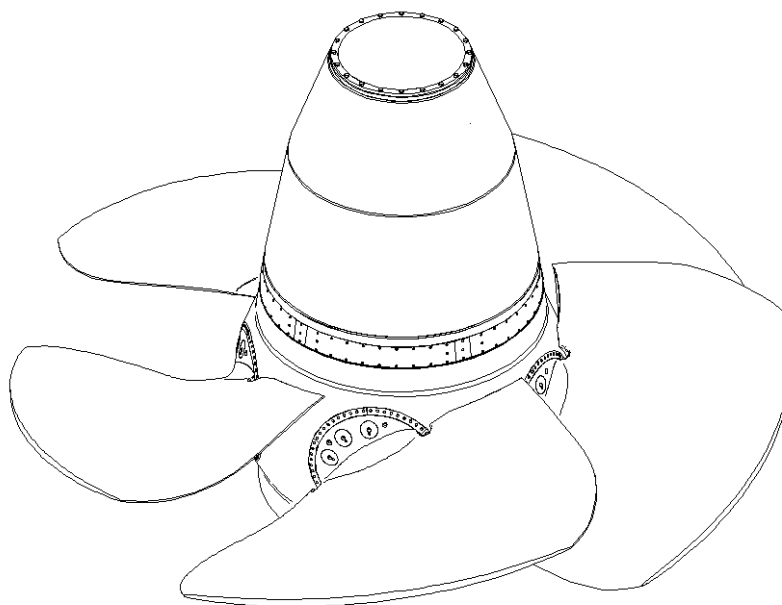


Figura 29 - Rotor Kaplan de cinco pás

Os componentes básicos do rotor Kaplan são: pás, buchas, cubo, ogiva, vedações e mecanismo. A ogiva são as partes cônicas do rotor visíveis na figura acima. O cubo suporta pás, ogiva, vedações e buchas. As buchas permitem o giro das pás com baixo atrito, enquanto as vedações impedem a entrada de água para dentro do rotor. O mecanismo de movimentação é do tipo biela-manivela com um único servomotor dentro do cubo.

Há um circuito hidráulico de controle e movimentação das pás, conjugado com o circuito hidráulico do distribuidor para operar com rendimento máximo (dupla regulação).

Estando em contato com a água, as pás do estão sujeitas à abrasão e cavitação, e demais problemas associados com esses fenômenos: desgaste, perda do perfil hidráulico, trinca e vibração.

5.2.4. Distribuidor

Controlar a vazão turbinada não é uma questão puramente hidráulica, este controle deve ser preciso o suficiente para manter a rotação da máquina constante,

em geradores síncronos, e a potência gerada pela turbina. Assim um mecanismo preciso é necessário, composto por: palhetas, mecanismo de regulação (geralmente biela-manivela e aro de regulação), buchas e servomotor hidráulico, Figura 30 e Figura 31.

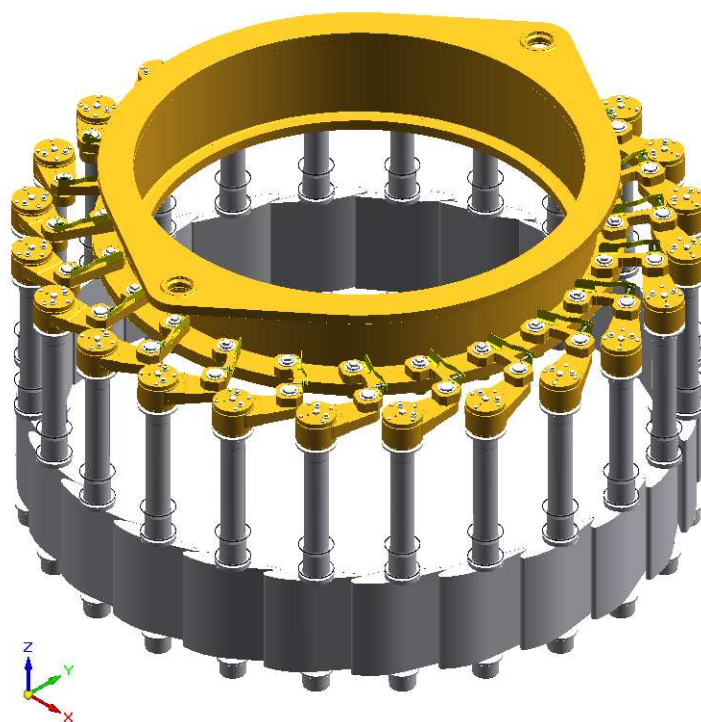


Figura 30 - Mecanismo do Distribuidor

As palhetas possuem perfil hidráulico e efetivamente controlam a área de passagem da água. O torque necessário para vencer o torque hidráulico mais o de atrito é transmitido do servomotor para as palhetas pelo mecanismo. Há diversas buchas no mecanismo para reduzir o atrito.

Para proteger o mecanismo no fechamento do distribuidor contra travamentos, em especial as palhetas, as bielas são dobráveis ou o pino de conexão na manivela é cisalhável. Ao atuar o dispositivo de proteção, o sistema de controle deve identificar a falha e parar a turbina.

O servomotor está acoplado no olhal do aro de regulação e ancorado no poço ou na tampa da turbina, sendo que o número de servomotores depende da

configuração do mecanismo. A abertura linear do servomotor é controlada por um circuito hidráulico com válvulas solenóides, vide item 5.3.

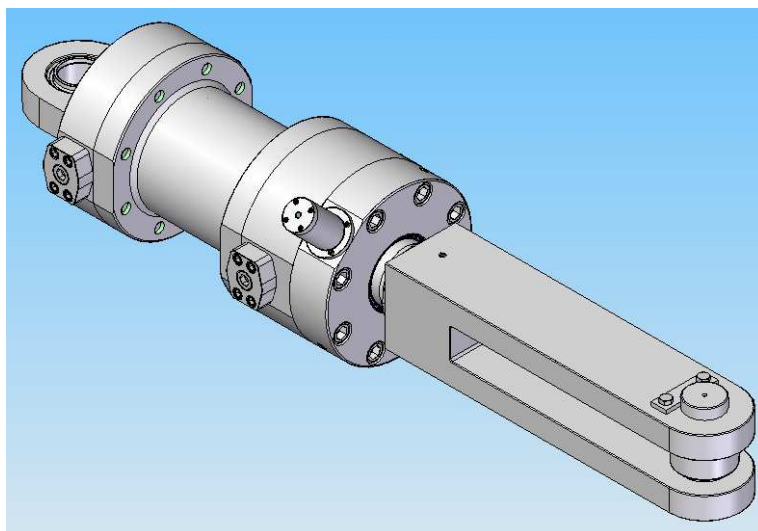


Figura 31 - Servomotor do Distribuidor

5.2.5. Vedação do Eixo e Acoplamento

A vedação do eixo tem a função de vedar a parte do conjunto girante em contato com a água e o ambiente da casa de força pelo espaço entre o flange do eixo e a tampa da turbina, evitando a entrada de água e perdas hidráulicas. Deve também permitir o giro com o menor atrito possível. Divide-se em vedação de parada e de operação.

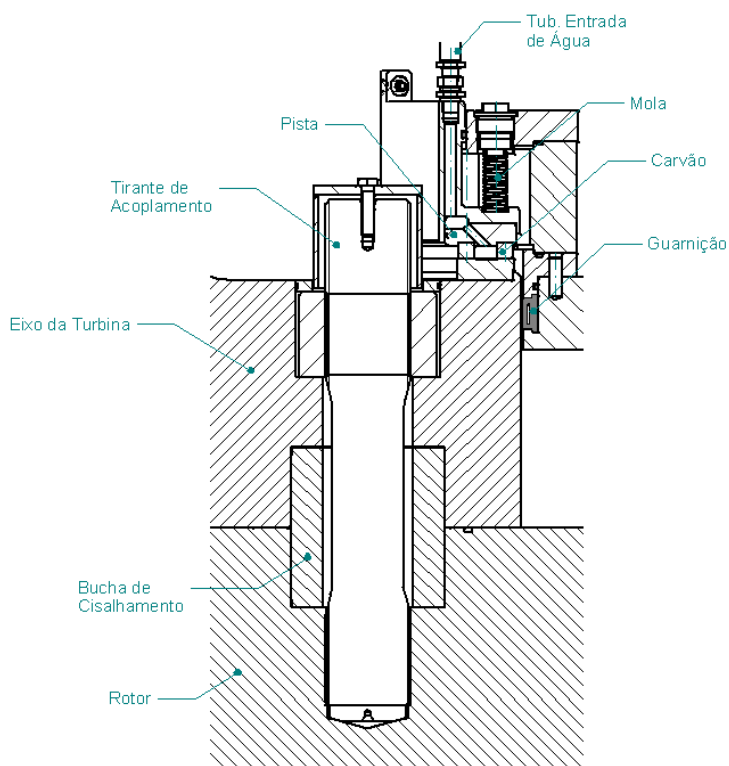


Figura 32- Vedação do Eixo e Acoplamento

É constituída por duas pistas, molas, carvões, tubulações, carcaça e guarnição, Figura 32.

Quando em operação, a mola tensionada aplica força na pista superior que distribui uniformemente entre os dois carvões, fazendo um sanduíche com a pista inferior solidária ao eixo. O carvão (grafite) pressionado impede a passagem da água e o giro com baixo atrito, porém desgasta e é frágil. Injeta-se água para refrigerar o calor gerado pelo atrito.

Quando em manutenção ou parada da Turbina, ar comprimido é injetado na guarnição. Esta infla, abraça o eixo e veda ao encostar o beijo na lateral do flange.

Na mesma Figura 32 é possível identificar o acoplamento do eixo com o rotor, composto de tirantes e buchas de cisalhamento. Na montagem, os tirantes são pré-tensionados térmica ou hidraulicamente e suportam a carga axial. O torque é transmitido pelas buchas de cisalhamento.

5.2.6. Mancal Guia

O mancal guia resiste a carregamentos radiais, mantém a concentricidade do eixo e a rotação com baixo coeficiente de atrito. São encontrados em número maior que dois. A referência da Figura 27 é um máquina com três mancais guias. É encontrado também combinado com o de Escora

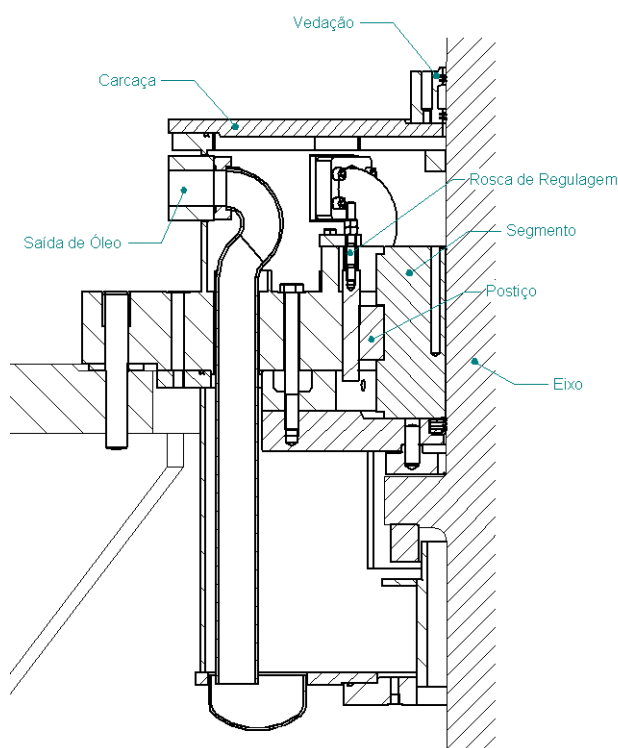


Figura 33 - Mancal Guia

O mancal da Figura 33 é do tipo segmentado. É um conjunto complexo com diversas configurações, mas é possível identificar componentes básicos: carcaça, segmentos, postiço e tubulação de óleo. Há mancais nos quais os segmentos são substituídos por casquilhos.

Os segmentos são revestidos por metal patente (comumente liga de estanho) e estão sujeitos à pressão hidrodinâmica do filme de óleo. A folga radial é ajustada pela rosca de regulagem e pelo postiço. A carga radial do segmento é transmitida para a estrutura pelo *chapão* da carcaça.

5.2.7. Mancal Escora

Todo o conjunto girante mais empuxo hidráulico, não de Arquimedes, é suportado pelo Mancal de Escora apoiado em cruzeta ou na tampa da turbina. Apesar de muitas vezes estar localizado no Conjunto Gerador, foi analisado neste trabalho por ser também um componente crítico para a Turbina.

O conjunto é composto basicamente por: bloco de escora, espelho, sapatas, carcaça e molas, Figura 34. O bloco de escora é acoplado com o eixo e distribui a carga axial uniformemente entre as sapatas através do espelho. Alguns mancais não possuem espelho, e o bloco de escora cumpre esta função. Há uma chaveta de conexão entre o eixo e o bloco de escora, necessário para vencer as perdas por atrito do filme de óleo.

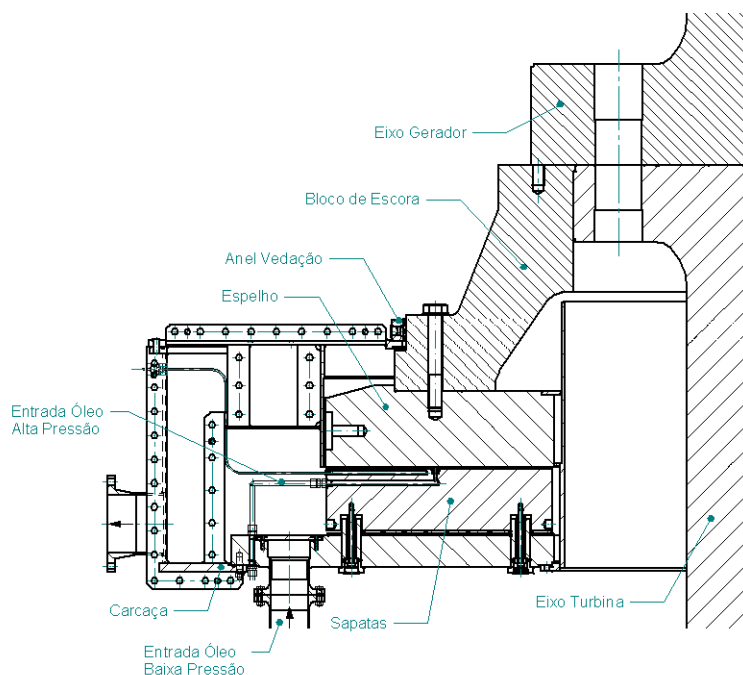


Figura 34 - Mancal Escora

Toda a deformação axial não uniforme é acomodada por um conjunto de molas localizadas embaixo de cada sapata. O carregamento axial é então transmitido à carcaça e dela para a estrutura.

5.3. Circuitos Auxiliares da Turbina

Os circuitos auxiliares são responsáveis pelo fornecimento de óleo limpo e frio no caso dos mancais, de água limpa e fria para resfriamento dos carvões na vedação de serviço, de ar comprimido para inflar a guarnição da vedação de parada e controle de abertura do Distribuidor e das Pás do Rotor no regulador de velocidades. São circuitos pressurizados e comandados por válvulas manuais ou solenóides. Recomenda-se a consulta de literatura específica da área de automação hidráulica e pneumática para entendimento da simbologia.

5.3.1. Circuito da Vedação do Eixo

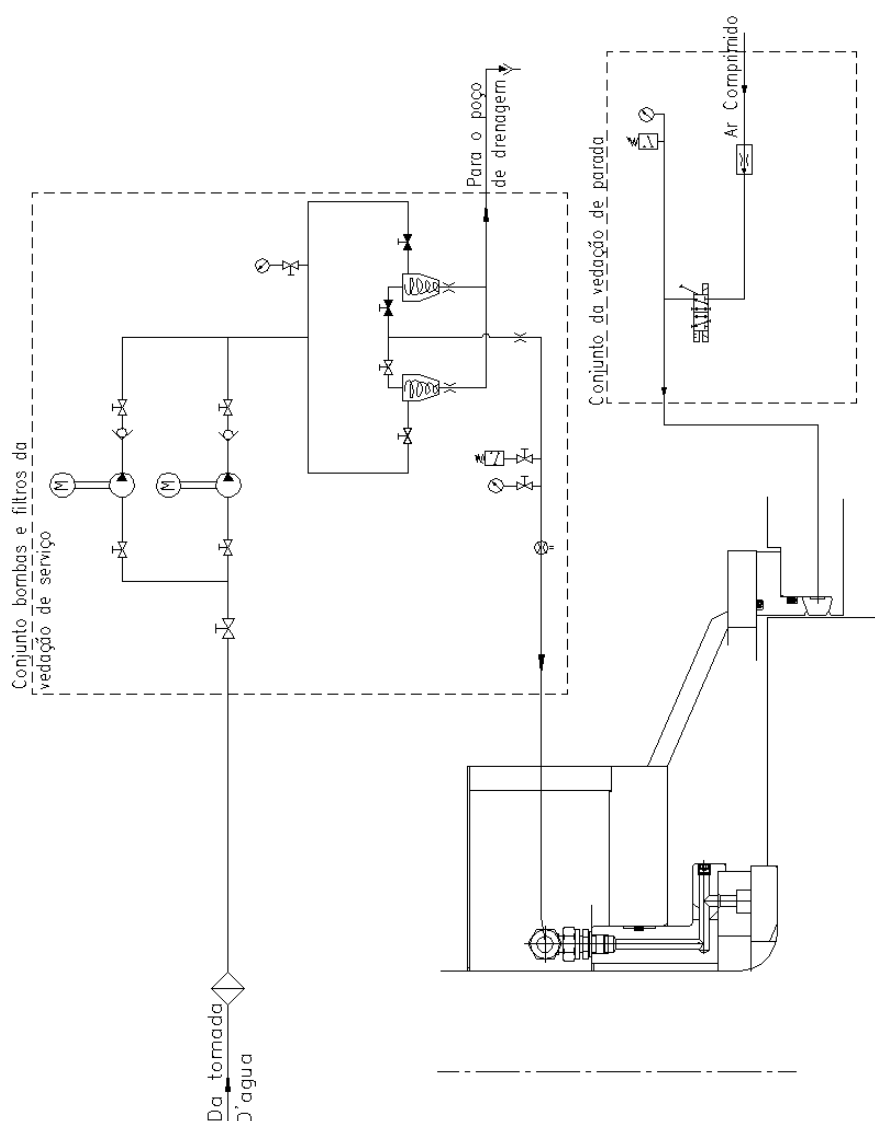


Figura 35 - Circuito da vedação do eixo

5.3.2. Circuito do Regulador

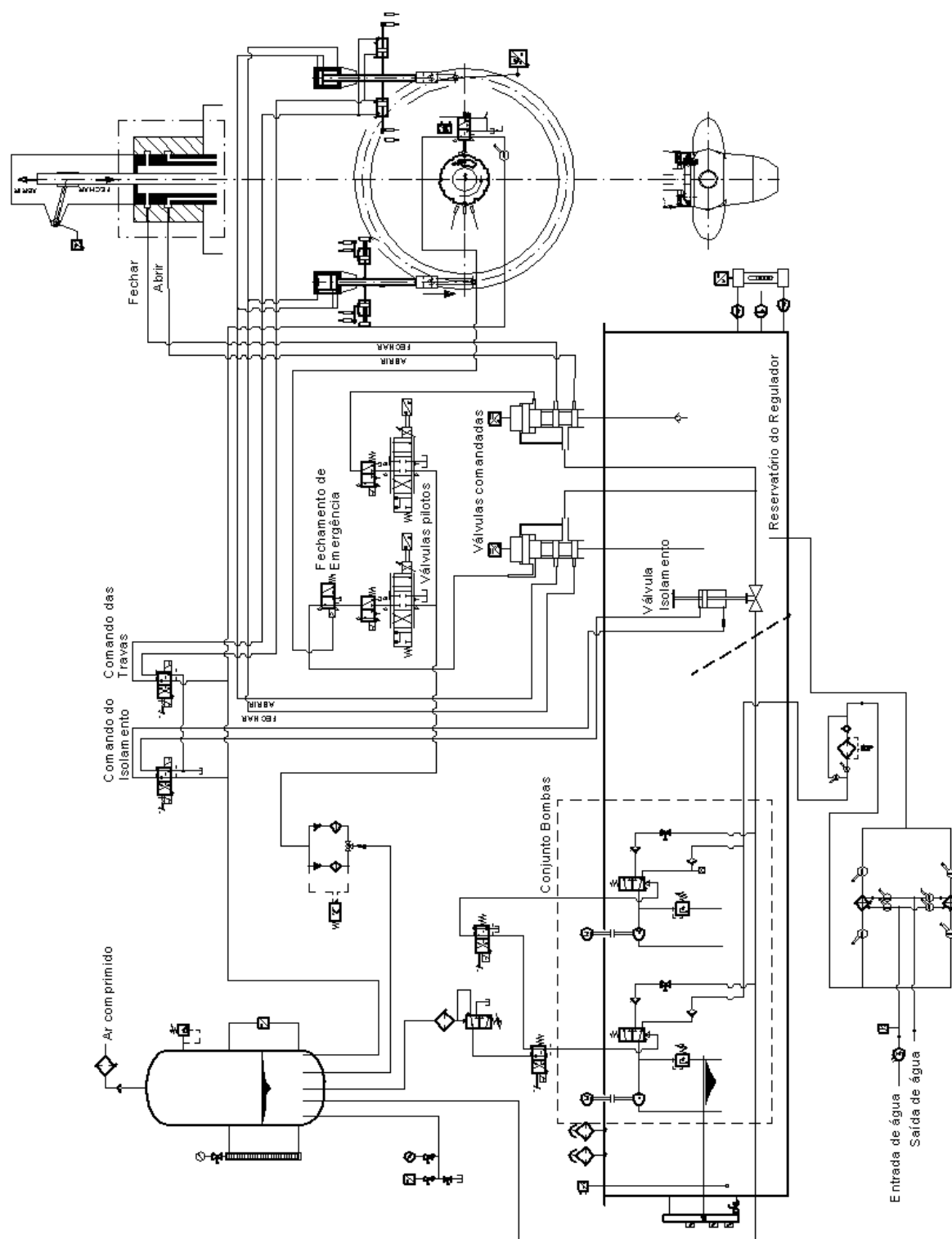


Figura 36 - Circuito do regulador

5.3.3. Circuito do Mancal Guia

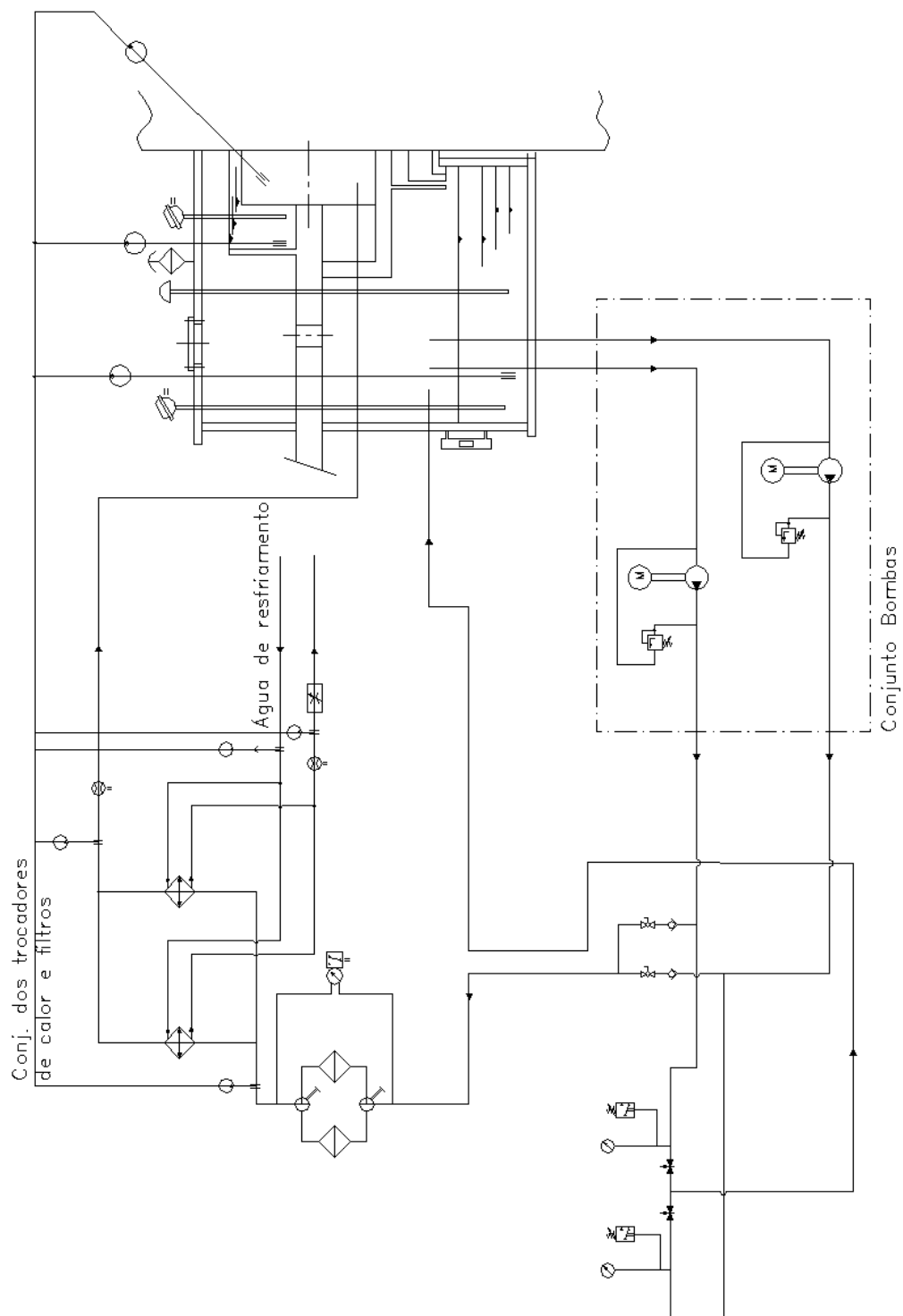


Figura 37 - Circuito do mancal guia

5.3.4. Circuito do Mancal de Escora

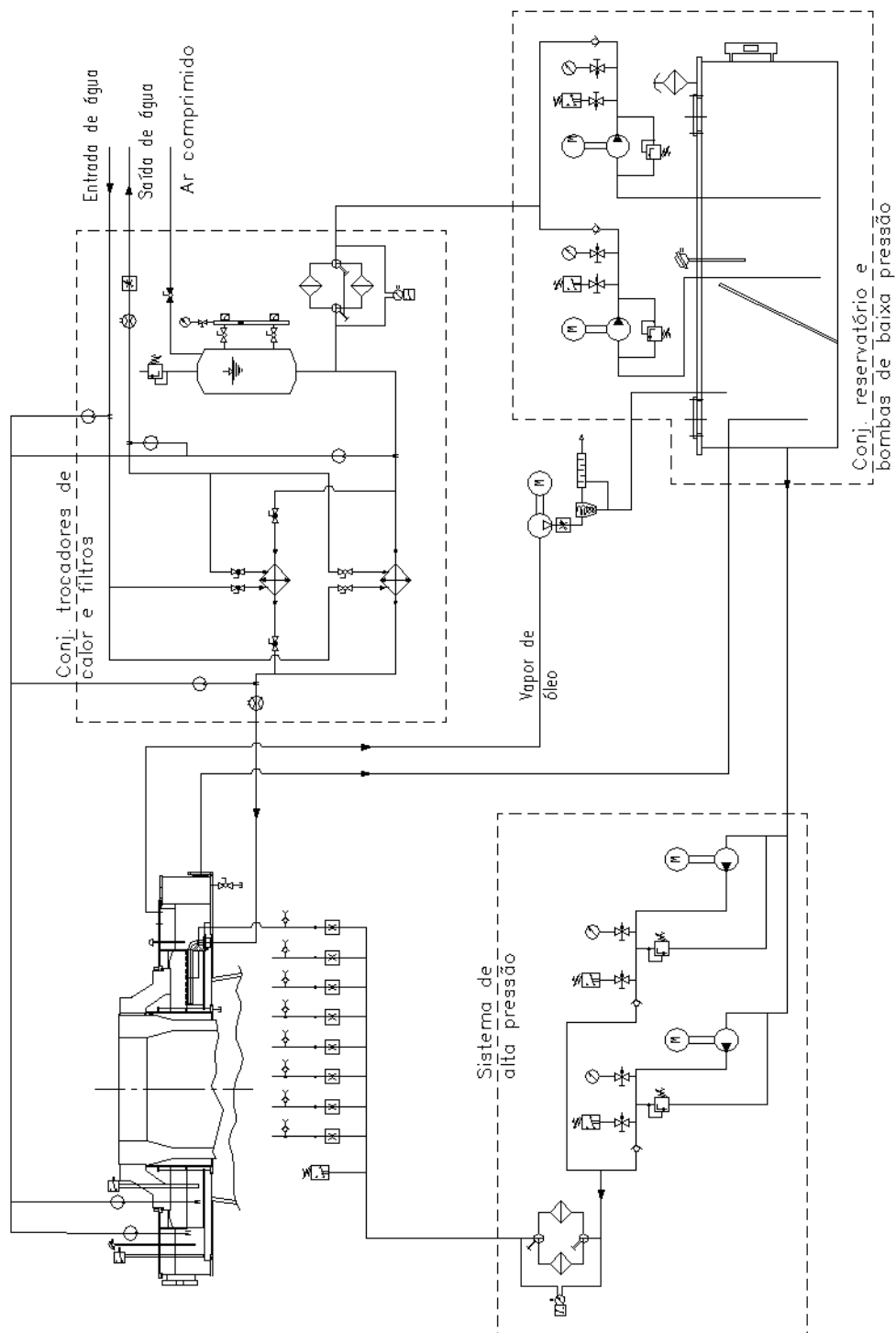


Figura 38 - Circuito do mancal de escora

5.4. Modernização no Brasil

Diversos empreendimentos hidrelétricos no Brasil foram construídos durante as décadas de 60 e 70 do século XX, e completaram assim, na passagem para o século XXI, no mínimo 30 anos de vida. Dada a crescente demanda por energia elétrica e expressiva contribuição da energia hidrelétrica na matriz energética do país, é clara a necessidade da modernização para não comprometer o futuro abastecimento.

Ao passar por uma modernização, conceito diferente de repotenciação, pretende-se estender a vida útil e introduzir novas funcionalidades no equipamento. A sobrevida é alcançada pela reforma ou substituição, com desempenho no mínimo igual ou superior, daqueles componentes que estão no final de suas vidas úteis. Cita-se o programa de modernização do Sistema Furnas iniciado em 2001 que prevê a extensão da vida útil por mais 30 a 40 anos, Revista Furnas (número 340).

Entre as novas funcionalidades, a principal é a automação. É desejada a operação computadorizada e remota de procedimentos de partida, parada, controle e monitoramento das condições operacionais.

No escopo da modernização, deve ser incluídos requisitos de auxílio da atividade de manutenção. A excelência de manutenção está intimamente ligada às configurações do equipamento e, muito provavelmente, a visão desta atividade pelo fabricante original era diferente da atual. Esta funcionalidade deve estar presente quando da reforma ou substituição de componentes. Além disso na modernização há a oportunidade de introduzir sensores para monitoramento do estado do equipamento que auxiliem na execução da manutenção e no aumento de disponibilidade, foco deste trabalho.

6. RESULTADOS

6.1. Considerações Iniciais

Os efeitos causados pelos modos de falha críticos têm impactos operacionais muito severos, reduzindo a potência gerada ou mesmo parando o equipamento, ocasionando queda de receita e de disponibilidade.

A instrumentação proposta tenta cercar estes modos de falha críticos em termos operacionais. Este conjunto de sensores fornecerá indícios da ocorrência de modos de falha com efeitos operacionais severos. De posse e análise desses dados, a equipe de manutenção poderá estender a operação com segurança ou reduzir o tempo de parada, através do diagnóstico precoce e rápida validação, vide item 2.4.

Como citado, objeto de estudo deste trabalho é uma turbina hidráulica do tipo Kaplan genérica. Entende-se por genérica que a turbina analisada não está instalada em uma usina específica, e tentou-se incluir componentes certamente encontrados na maioria das instalações.

Turbinas hidráulicas têm instrumentação específica para medição de desempenho e segurança, por exemplo, o medidor de vazão Winter Kennedy na Caixa Espiral e as chaves fim-de-curso nos acessos da Caixa Espiral e do Tubo de Sucção, respectivamente. Esta instrumentação é essencial, mas não aparece nos resultados por estarem fora do escopo do trabalho.

6.2. Metodologia MCC aplicada à instrumentação

O roteiro seguido neste trabalho é o da Figura 39. O estudo do sistema, das relações funcionais e FMEA assemelham-se à MCC tradicional, como descrito no Capítulo 4.

Na realização do FMEA, a severidade é avaliada conforme a Tabela 4. Os demais, detectabilidade e frequência, são específicos de cada usina hidrelétrica, ou seja, depende da instrumentação existente e do estado de conservação dos equipamentos. A instrumentação sugerida é para implementação em uma turbina que sofrerá modernização, sendo portanto independente destes dois fatores.

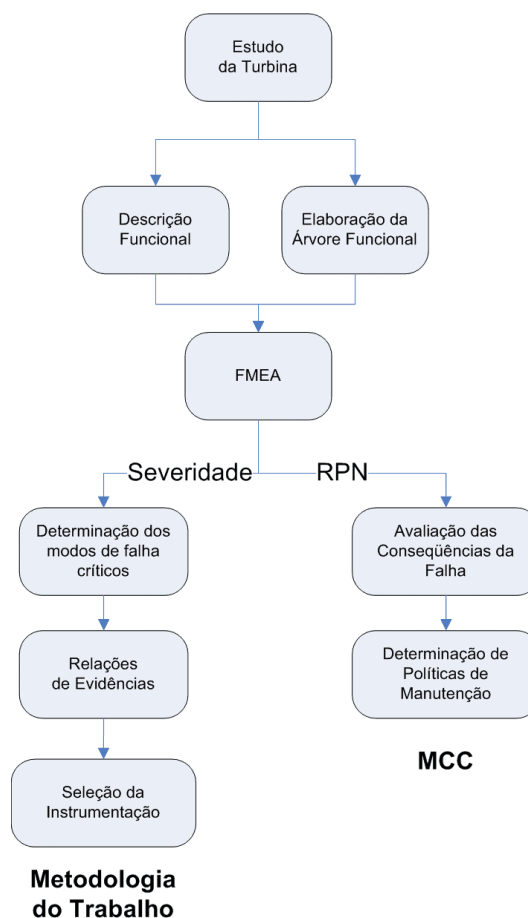


Figura 39 – Roteiro seguido

Para todos os componentes dos ramos inferiores da árvore funcional é realizada uma análise de modos e efeitos de falha, FMEA, utilizando o formulário padrão. Aqueles componentes que têm modos de falha e efeitos idênticos são agrupados para evitar multiplicação desnecessária de formulários.

O critério de seleção dos modos críticos baseia-se nos efeitos que levam à parada da turbina: índices maiores ou iguais a sete na escala de severidade. O índice

imediatamente abaixo, seis, indica modos de falha que afetam severamente o desempenho. Para alguns destes, são feitas sugestões de instrumentação.

O FMEA fornece duas informações extremamente importantes para determinação da instrumentação: severidade, como mencionado anteriormente, e efeitos da falha. Com estes últimos, a falha é então rastreada, ou seja, as evidências mensuráveis da ocorrência da falha, por exemplo, aumento de temperatura ou vibração.

Para cada sistema, um diagrama do tipo Espinha de Peixe, ou Ishikawa, foi elaborado. Trabalhando em conjunto com uma tabela cujos elementos relacionam os modos de falha críticos e as evidências de ocorrência, foi possível determinar um conjunto de sensores.

Os diagramas Espinha de Peixe podem ser expandidos em causas secundárias, neste trabalho causas potenciais (*root causes*), já que, para alguns componentes, existem causas que ocasionam o mesmo efeito, mas evidências distintas, por exemplo, no conjunto bomba: a queima do enrolamento do motor elétrico e o desgaste do rotor da bomba por cavitação. Ambos acarretam a incapacidade de transformar energia do conjunto bomba, mas com evidências distintas.

Cada etapa do roteiro da Figura 39 produz resultados. Dada a extensão dos documentos e o propósito do trabalho, os resultados são apresentados da forma:

Árvore Funcional	- Anexo A
Descrição Funcional	- Anexo B
FMEA	- Anexo C
Determinação dos modos de falha críticos	- Próximos itens deste Capítulo
Relações de Evidência	- Próximos itens deste Capítulo
Seleção da Instrumentação	- Próximos itens deste Capítulo

6.3. Modos de Falha Críticos do Mancal Guia

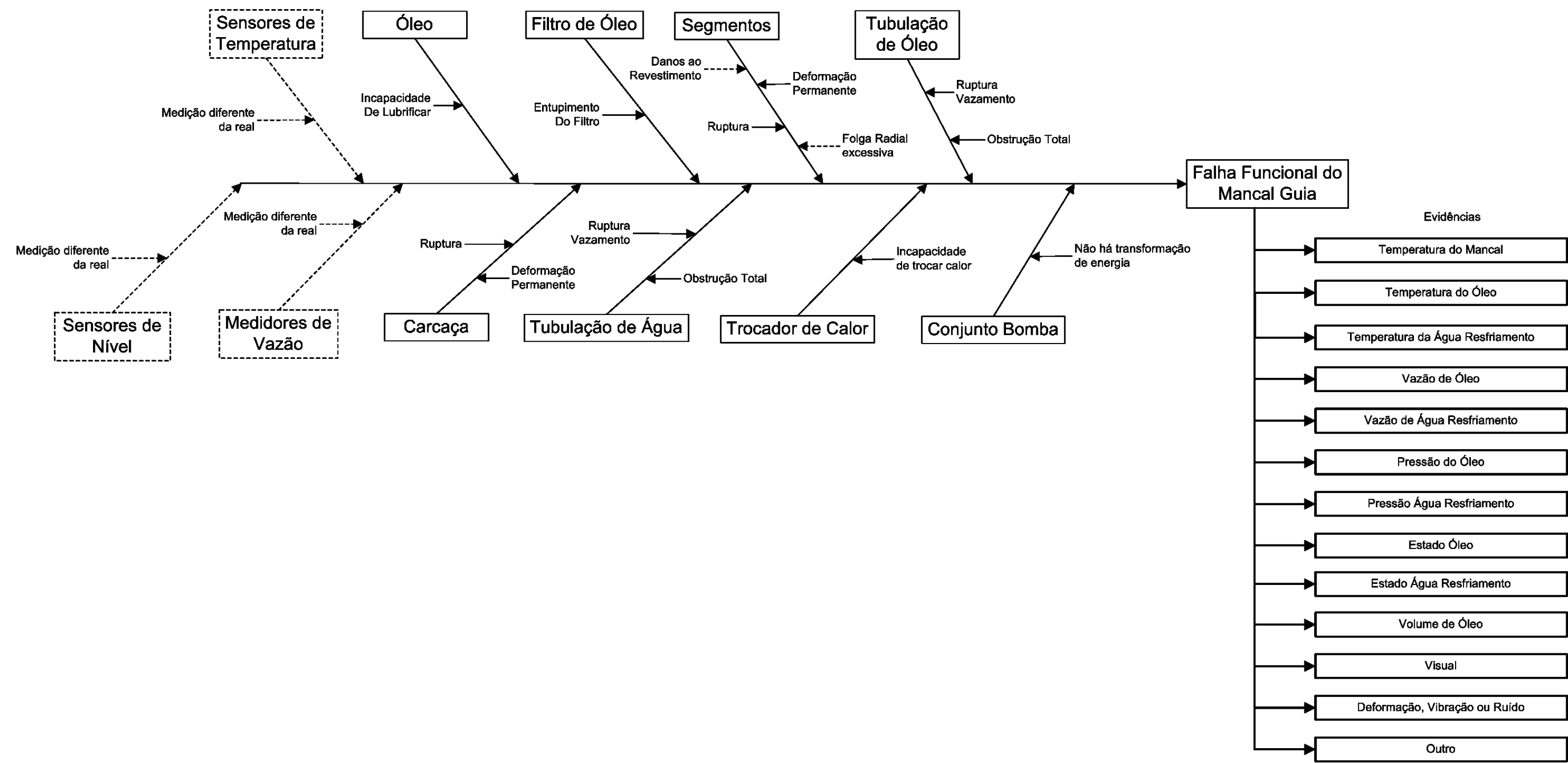


Figura 40 - Diagrama do Mancal Guia

Tabela 5 - Relações de causas e evidências potenciais do Mancal Guia

Componente	Modo de Falha	Temperatura do Mancal	Temperatura do Óleo	Temperatura Água Resfr.	Vazão de Óleo	Vazão Água Resfriamento	Pressão de Óleo	Pressão Água Resfriamento	Estado Óleo	Estado Água Resfriamento	Volume Óleo	Visual	Deformação/Vibração/Ruído	Outro
Segmentos	Ruptura do Segmento	X	X	X					X			X	X	X
	Deformação Permanente	X	X	X									X	X
	Danos ao revestimento (*)	X	X	X					X					X
	Folga radial excessiva (*)	X	X	X									X	X
Tubulação de óleo	Ruptura/Vazamento Excessivo	X	X	X	X		X		X		X	X		
	Entupimento total	X	X	X	X		X							
Conjunto Bomba	Não há transformação de energia	X	X	X	X		X					X	X	X
Trocador de Calor	Incapacidade de trocar calor	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X
Tubulação de Água	Ruptura/Vazamento Excessivo	X	X	X		X		X		X		X		
	Entupimento total	X	X	X		X		X						
Filtro de Óleo	Entupimento do Filtro	X	X	X	X		X							
Óleo	Incapacidade de lubrificar	X	X	X					X			X		X
Carcaça	Ruptura								X		X	X	X	X
	Deformação Permanente												X	X

(*) - Modo de falha não crítico

Tabela 6 - Instrumentação do Mancal Guia

Componente	Modos de Falha Críticos	Instrumentação	Observação
Segmento	Ruptura Deformação permanente Folga radial excessiva	Sensor de proximidade	Dois (2x) sensores alinhados a noventa graus entre si para captura da órbita do Eixo e níveis de vibração. Instalados na carcaça, mas com elevação próxima da linha de centro do Mancal.
		Medidor de temperatura	Instalados nos Segmentos por serem os componentes mais solicitados do conjunto e expostos às maiores temperaturas de filme de óleo.
		Medição de folga radial	Averiguar a folga quando a turbina estiver parada, por meio de chapas de ajuste.
		Visual/Ruído/Vibração	A evolução de níveis de ruído, vibração e vazamentos podem ser acompanhadas e comparadas com estados iniciais de comissionamento.
	Danos ao revestimento	Análise de óleo	Vide Óleo
Carcaça	Ruptura Deformação permanente	Extensômetros	Para medição dos níveis de deformação da Carcaça e estimativa da carga do Mancal.
		Medidor de temperatura	Temperatura média do óleo na Carcaça
		Chave de nível e vareta	O reservatório de óleo do Mancal é a própria Carcaça. O volume de óleo é medido por uma vareta e sinalizado pela chave de nível.
		Detector umidade no óleo	Capturar possíveis falhas de vedação ou mistura de fluidos no Trocador
Tubulação de Óleo	Ruptura Entupimento total	Medidor de vazão	Instalado após o Trocador de Calor.
		Medidores de pressão	Instalados na saída da bomba e antes da entrada no Mancal. Ambos, medidores de pressão e de vazão, permitem avaliar a perda de carga do circuito de óleo.
Conjunto Bomba	Não há transformação de energia	Pressostato	Regulado para sinalizar a queda de pressão e a incapacidade da bomba de manter o fluxo.
		Visual/Ruído/Vibração	As bombas são geralmente instaladas em locais de fácil acesso. A evolução de níveis de ruído, vibração, temperatura e vazamentos podem ser acompanhadas e comparadas com estados iniciais de comissionamento.
		(Válvula de alívio)	Impedir a sobrepressão na linha e danos à própria bomba e aos demais componentes do circuito.
		(Redundância)	Bomba de reserva.

Componente	Modos de Falha Críticos	Instrumentação	Observação
Trocador de Calor	Incapacidade de trocar calor	Medidores de temperatura do óleo (E/S)	A troca térmica é avaliada pela diferença de temperatura entre a entrada e saída do óleo.
		Medidores de temperatura de água (E/S)	A troca térmica é avaliada pela diferença de temperatura entre a entrada e saída da água.
		(Redundância)	Trocador de reserva.
Tubulação de Água	Ruptura Deformação permanente	Medidor de vazão	Instalado após o Trocador de Calor.
		Medidores de pressão	Instalados no circuito de água de resfriamento. Ambos, medidores de pressão e de vazão permitem avaliar a perda de carga do circuito.
		Análise da água	Acompanhamento da qualidade da água captada do reservatório.
Filtro de Óleo	Entupimento do filtro	Pressostato diferencial	Sinalizar o entupimento
		Medidor de pressão	Indicar a perda de carga pelo filtro
		(Redundância)	Filtro Duplex.
Óleo	Incapacidade de lubrificar	Análise do óleo	Deteção de umidade e particulado dissolvido no óleo. Pode-se realizar a análise de partículas para determinar locais de desgaste.
		Viscosímetro	Detectar o estado limite de utilização do óleo.

6.4. Modos de Falha Críticos do Regulador de Velocidades

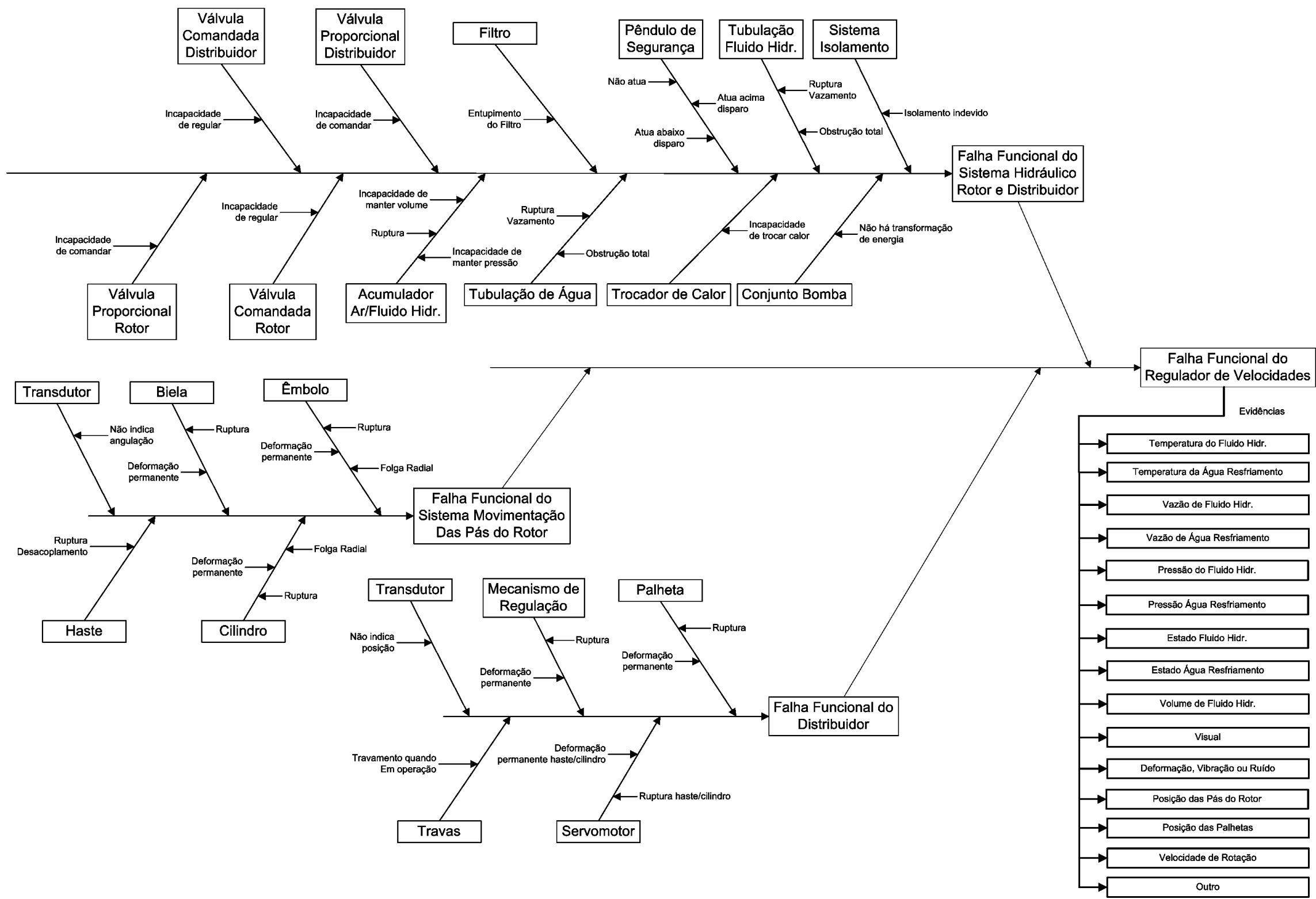


Figura 41 - Diagrama do Regulador de Velocidades

Tabela 7 - Relações causas e evidências potenciais do Regulador de Velocidades

[illegible]

Tabela 8 - Instrumentação do Regulador de Velocidades

Componente	Modos de Falha Críticos	Instrumentação	Observação
Sistema Isolamento	Isolamento indevido	(Trava manual)	Impedir o acionamento acidental com uma trava manual.
		Chave de posição	Sinalizar o estado.
Conjunto Bomba	Não há transformação de energia	Pressostato	Regulado para sinalizar a queda de pressão e a incapacidade da bomba de manter o fluxo.
		(Válvula de alívio)	Impedir a sobrepressão na linha e danos à própria bomba e aos demais componentes do circuito.
		(Redundância)	Bomba reserva.
		Visual/Ruído/Vibração	As bombas são geralmente instaladas em locais de fácil acesso. A evolução de níveis de ruído, vibração, temperatura e vazamentos podem ser acompanhadas e comparadas com estados iniciais de comissionamento.
Tubulação de Fluido Hidr.	Ruptura Entupimento total	Medidor de vazão	Instalado após o Trocador de Calor. Deve ser de qualidade e confiável para reduzir a probabilidade de falha múltipla.
		Medidores de pressão	Instalados na saída da bomba e após Trocador de Calor. Ambos, medidores de pressão e de vazão permitem avaliar a perda de carga do circuito
Trocador de Calor	Incapacidade de trocar calor	Medidores de Temperatura do óleo (E/S)	A troca térmica é avaliada pela diferença de temperatura entre a entrada e saída do óleo.
		Medidores de Temperatura de água (E/S)	A troca térmica é avaliada pela diferença de temperatura entre a entrada e saída da água.
		(Redundância)	Trocador reserva.
Pêndulo de Segurança	Não atua	(Redundância)	Instalação de pêndulo eletrônico e mecânico.
	Atua acima do disparo Atua abaixo do disparo	-	Capturar este modo de falha pela avaliação de técnicas de manutenção pró-ativa e reativa.
Tubulação de Água	Ruptura Deformação permanente	Medidor de vazão	Instalado após o Trocador de Calor. Deve ser de qualidade e confiável para reduzir a probabilidade de falha múltipla.
		Medidores de pressão	Instalados no circuito de água de resfriamento. Ambos, medidores de pressão e de vazão permitem avaliar a perda de carga do circuito.
Filtro de Óleo	Entupimento do filtro	Pressostato diferencial	Indicar a perda de carga pelo filtro e sinalizar o entupimento.
		(Redundância)	Filtro reserva (Duplex).

Componente	Modos de Falha Críticos	Instrumentação	Observação
Acumulador Ar/Fluido Hidr.	Incapacidade de manter pressão	Medidor de pressão	Monitorar a flutuação de pressão do acumulador.
	Incapacidade de manter volume Ruptura	Medidor de nível	Indicação do nível de fluido dentro do Acumulador.
		Medidor de nível	Indicação do nível de fluido no Reservatório.
		Chave de nível e vareta	O volume de fluido é medido por uma vareta e pela chave de nível no reservatório.
		Detector de umidade	Instalado no reservatório para sinalizar a presença de umidade no fluido.
		(Válvula de alívio)	Impedir o aumento excessivo de pressão do circuito hidráulico.
		(Filtro de ar)	Manter o fluido hidráulico livre de impurezas e acumulação de sedimentos no acumulador.
		Pressostato	Sinalizar a queda de pressão da linha de ar comprimido. Recomenda-se a instalação de uma válvula de retenção para evitar a queda de pressão.
Válvulas de Controle	Incapacidade de comandar - Incapacidade de regular	-	Capturar este modo de falha pela avaliação de técnicas de manutenção pró-ativa e reativa.
Transdutor Rotor	Não indica angulação	(Redundância)	Comparar a grandeza medida
Mecanismo de Regulação - Distribuidor	Ruptura Deformação permanente	Chave fim de curso	Indicar o fechamento e abertura do distribuidor.
		Extensômetros	Para medição dos níveis de deformação do mecanismo.
		Transdutor de posição	Indicar a abertura do distribuidor.
		Chaves de posição	Sinalizar a atuação do dispositivo de segurança. Instalada em cada mecanismo biela/alavanca.
Travas - Distribuidor	Travamento quando em operação	Chave de posição	Sinalizar o estado.
Transdutor - Distribuidor	Não indica posição	(Redundância)	Comparar a grandeza medida
Demais componentes		-	Avaliação da aplicação de manutenção pró-ativa e reativa
		-	Avaliação de novo conceito (mudança de projeto)

6.5. Modos de Falha Críticos do Vedação do Eixo

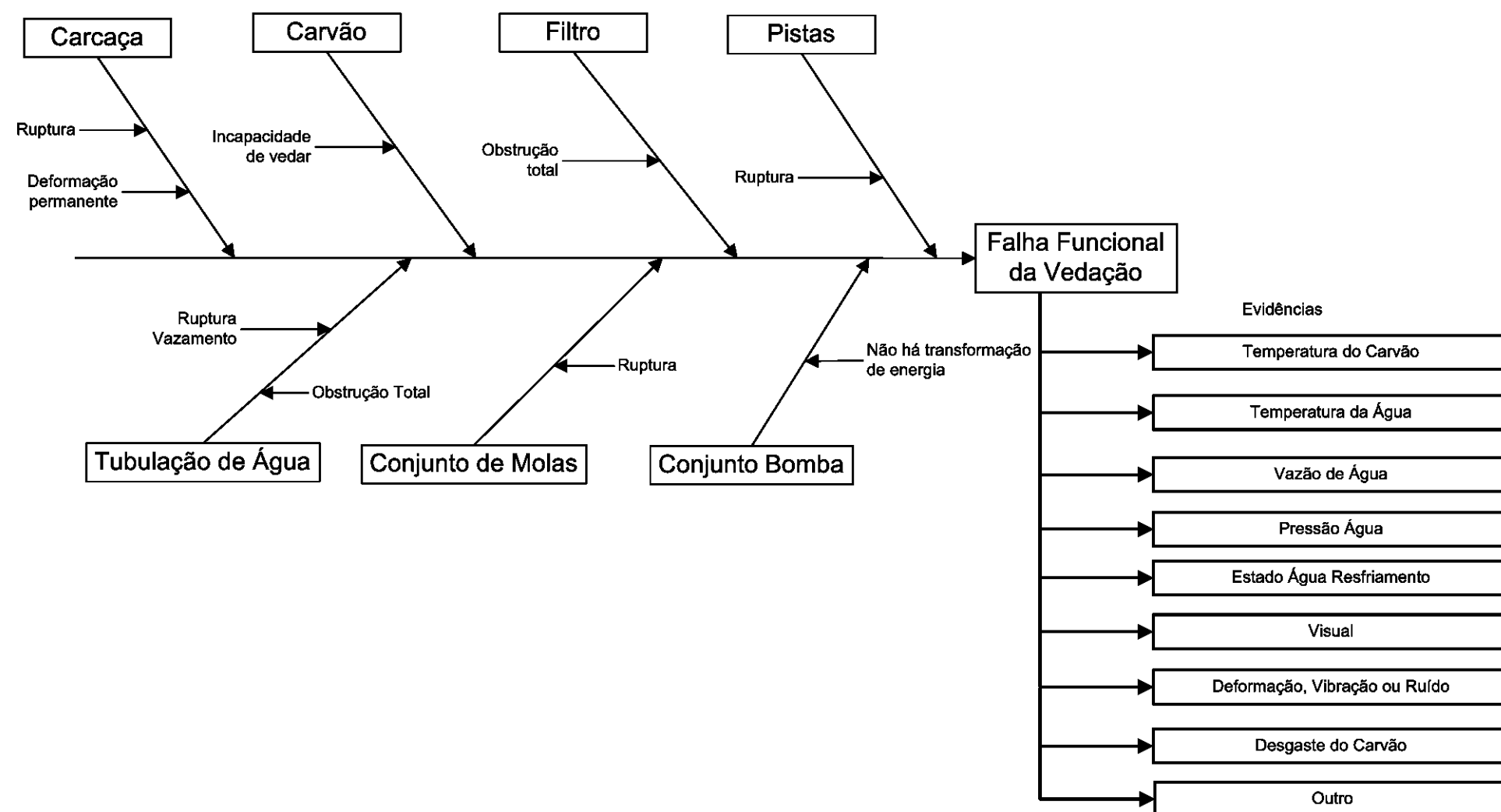


Figura 42 - Diagrama da Vedação do Eixo

Tabela 10 - Instrumentação da Vedação do Eixo

Componente	Modos de Falha Críticos	Instrumentação	Observação
Pistas	Ruptura	-	Vide Carcaça
Conjunto Bomba	Não há transformação de energia	Pressostato	Regulado para sinalizar a queda de pressão e a incapacidade da bomba de manter o fluxo.
		(Válvula de alívio)	Impedir a sobrepressão na linha e danos à própria bomba e aos demais componentes do circuito.
		(Redundância)	Bomba reserva.
		Visual/Ruído/Vibração	As bombas são geralmente instaladas em locais de fácil acesso. A evolução de níveis de ruído, vibração, temperatura e vazamentos podem ser acompanhadas e comparadas com estados iniciais de comissionamento.
Filtro de Água	Entupimento do filtro	Pressostato diferencial	Indicar a perda de carga pelo filtro e sinalizar o entupimento.
		(Redundância)	Filtro reserva (Duplex).
Conjunto Molas	Ruptura	-	Vide Carcaça
Carvão	Incapacidade de vedar	Medidor de desgaste	Com escala para acompanhar desgaste da vedação.
		Medidor de temperatura	Indicar a capacidade de refrigeração do circuito de água.
Tubulação de Água	Ruptura Deformação permanente	Medidor de vazão	Deve ser de qualidade e confiável para reduzir a probabilidade de falha múltipla.
		Medidores de pressão	Instalados no circuito de água de resfriamento. Ambos, medidores de pressão e de vazão permitem avaliar a perda de carga do circuito.
		Medidores de Temperatura de água (E/S)	A troca térmica é avaliada pela diferença de temperatura entre a entrada e saída da água.
Carcaça	Ruptura Deformação permanente	Visual/Ruído/Vibração	A evolução de níveis de ruído, vibração e vazamentos podem ser acompanhadas e comparadas com estados iniciais de comissionamento.
		Extensômetros	Para medição dos níveis de deformação da Carcaça e estimativa da carga do Mancal.

6.6. Modos de Falha Críticos do Mancal Escora

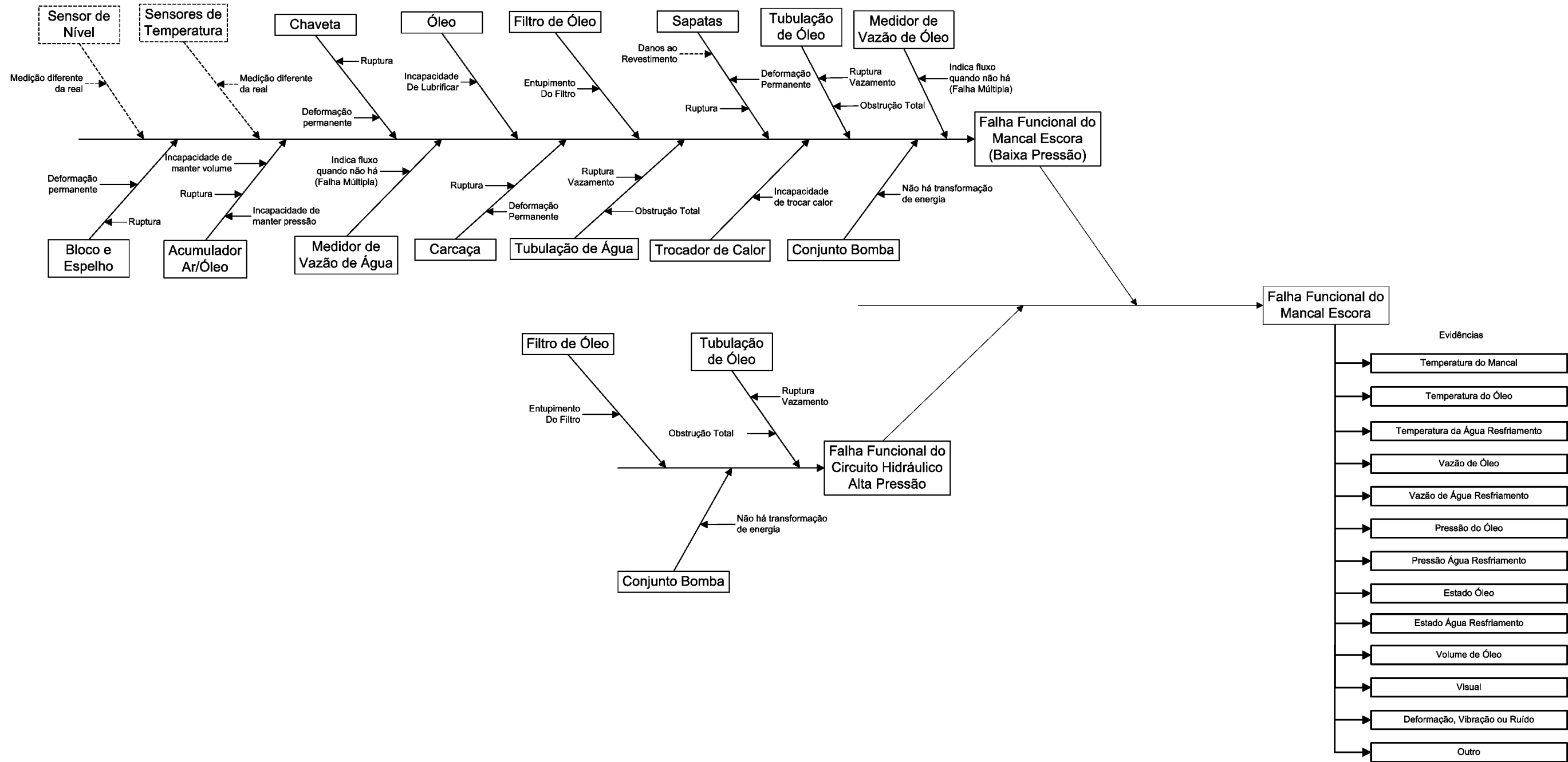


Figura 43 - Diagrama do Mancal Escora

Tabela 11 - Relações causas e evidências potenciais do Mancal de Escora

Componente	Modo de Falha	Temperatura do Mancal	Temperatura do Óleo	Temperatura Água Resfr.	Vazão de Óleo	Vazão Água Resfriamento	Pressão de Óleo	Pressão Água Resfriamento	Estado Óleo	Estado Água Resfriamento	Volume Óleo	Visual	Deformação/Vibração/Ruído	Outro
Conjunto Bomba	Não há transformação de energia	X	X	X	X		X					X	X	X
Medidor de Vazão de Óleo	Indica fluxo quando não há (*)	X	X	X	X		X		X		X	X		
Trocador de Calor	Incapacidade de trocar calor	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X
Tubulação de Óleo	Ruptura/Vazamento	X	X	X	X		X		X		X	X		
	Obstrução total	X	X	X	X		X							
Sapatas	Ruptura	X	X	X								X	X	X
	Deformação permanente	X	X	X									X	X
	Danos ao revestimento (*)	X	X	X				X						
Tubulação de Água	Ruptura/Vazamento	X	X	X		X		X		X		X		
	Obstrução total	X	X	X		X		X						
Filtro de Óleo	Entupimento do filtro	X	X	X	X		X							
Óleo	Incapacidade de lubrificar	X	X	X					X			X		X
Carcaça	Ruptura				X				X		X	X	X	X
	Deformação permanente												X	X
Chaveta	Ruptura											X	X	X
	Deformação permanente												X	X
Medidor de Vazão de Água	Indica fluxo quando não há	X	X	X		X		X		X		X		
Acumulador Ar/Óleo	Incapacidade de manter pressão	X	X	X			X				X		X	
	Incapacidade de manter volume	X	X	X			X		X		X	X		
	Ruptura	X	X	X			X		X		X	X	X	
Bloco e Espelho	Ruptura	X	X	X								X	X	X
	Deformação permanente	X	X	X									X	X
Tubulação de Óleo (AP)	Ruptura/Vazamento	X	X	X	X		X		X		X	X		
	Obstrução total	X	X	X	X		X							
Conjunto Bomba (AP)	Não há transformação de energia	X	X	X	X		X					X	X	X
Filtro de Óleo (AP)	Entupimento do filtro	X	X	X	X		X							

AP - Alta Pressão

(*) - Modo de falha não crítico

Tabela 12 - Instrumentação do Mancal Escora

Componente	Modos de Falha Críticos	Instrumentação	Observação
Conjunto Bomba	Não há transformação de energia	Pressostato	Regulado para sinalizar a queda de pressão e a incapacidade da bomba de manter o fluxo.
		(Válvula de alívio)	Impedir a sobrepressão na linha e danos à própria bomba e aos demais componentes do circuito.
		(Redundância)	Bomba reserva.
		Visual/Ruído/Vibração	As bombas são geralmente instaladas em locais de fácil acesso. A evolução de níveis de ruído, vibração, temperatura e vazamentos podem ser acompanhadas e comparadas com estados iniciais de comissionamento.
Medidor de Vazão de Óleo	Indica vazão quando não há	Medidor de vazão	Vide Tubulação de Óleo.
Trocador de Calor	Incapacidade de trocar calor	Medidores de Temperatura do óleo (E/S)	A troca térmica é avaliada pela diferença de temperatura entre a entrada e saída do óleo.
		Medidores de Temperatura de água (E/S)	A troca térmica é avaliada pela diferença de temperatura entre a entrada e saída da água.
		(Redundância)	Trocador reserva.
Tubulação de Óleo	Ruptura Entupimento total	Medidor de vazão	Instalado após o Trocador de Calor. Deve ser de qualidade e confiável para reduzir a probabilidade de falha múltipla.
		Medidores de pressão	Instalados na saída da bomba e antes da entrada no Mancal. Ambos, medidores de pressão e de vazão permitem avaliar a perda de carga do circuito
Sapatas	Ruptura Deformação permanente	Medidor de temperatura	Instalados nas Sapatas por serem os componentes mais solicitados do conjunto e expostos às maiores temperaturas de filme de óleo.
		Visual/Ruído/Vibração	A evolução de níveis de ruído, vibração e vazamentos podem ser acompanhadas e comparadas com estados iniciais de comissionamento.
	Danos ao revestimento	Análise de óleo	Vide Óleo
Tubulação de Água	Ruptura Entupimento total	Medidor de vazão	Deve ser de qualidade e confiável para reduzir a probabilidade de falha múltipla.
		Medidores de pressão	Instalados no circuito de água de resfriamento. Ambos, medidores de pressão e de vazão permitem avaliar a perda de carga do circuito.
		Medidores de Temperatura de água (E/S)	A troca térmica é avaliada pela diferença de temperatura entre a entrada e saída da água.

Componente	Modos de Falha Críticos	Instrumentação	Observação
Filtro de Óleo	Entupimento do filtro	Pressostato diferencial	Indicar a perda de carga pelo filtro e sinalizar o entupimento.
		(Redundância)	Filtro reserva (Duplex).
Óleo	Incapacidade de lubrificar	Análise do óleo	Detecção de umidade e particulado dissolvido no óleo. Pode-se realizar a análise de partículas para determinar locais de desgaste.
		Viscosímetro	Detectar o estado limite de utilização do óleo.
Carcaça	Ruptura Deformação permanente	Extensômetros	Para medição dos níveis de deformação da Carcaça e estimativa da carga do Mancal.
		Sensor de proximidade	Monitorar o deslocamento axial do conjunto girante
		Medidor de temperatura	Temperatura do óleo na Carcaça
		Chave de nível e vareta	O Reservatório e a Carcaça somados constituem o reservatório de óleo. Instalado na Carcaça.
		Chave de nível e medidor de nível	O reservatório e a carcaça somados constituem o reservatório de óleo. Instalado no Reservatório.
		Detector umidade no óleo	Capturar possíveis falhas de vedação ou furos no Trocador
Medidor de Vazão de Água	Indica vazão quando não há	Medidor de vazão	Vide Tubulação de Água.
Acumulador Ar/Fluido Hidr.	Incapacidade de manter pressão Incapacidade de manter volume Ruptura	Medidor de pressão	Monitorar a flutuação de pressão do acumulador.
		Medidor de nível	Indicação do nível de óleo dentro do Acumulador.
		Chave de nível	O volume de óleo é sinalizado pela chave de nível no Acumulador.
		Válvula de alívio	Impedir o aumento excessivo de pressão da linha.
		Filtro de ar	Manter o óleo livre de impurezas e acumulação de sedimentos no acumulador.
		Pressostato	Sinalizar a queda de pressão da linha de ar comprimido. Recomenda-se a instalação de uma válvula de retenção para evitar a queda de pressão.
Tubulação de Óleo (Alta Pressão)	Ruptura /Vazamento Entupimento total	-	Vide Tubulação de Óleo
Conjunto Bomba (Alta Pressão)	Não há transformação de energia	-	Vide Conjunto Bomba
Filtro de Óleo (Alta Pressão)	Entupimento do filtro	-	Vide Filtro de Óleo
Demais componentes		-	Avaliação da aplicação de manutenção pró-ativa e reativa
		-	Avaliação de novo conceito (mudança de projeto)

6.7. Demais Componentes

Componente	Modos de Falha Críticos	Instrumentação	Observação
Estrutura	Ruptura Deformação permanente	Extensômetros	Para medição dos níveis de deformação e estimativa da carga.
		Acelerômetros	Análise da amplitude e frequências de vibração.
Eixo	Ruptura Deformação permanente	Extensômetros	Para medição dos níveis de deformação angular e flutuação de momento torsor
Acoplamento	Ruptura Deformação permanente	-	Avaliação da aplicação de manutenção pró-ativa e reativa
		-	Avaliação de novo conceito (mudança de projeto)

7. CONCLUSÕES

7.1. Discussão

O método proposto baseado em MCC é aplicável a outros tipos de turbina em modernização ou ainda para avaliar a instrumentação na fase de projeto de novas unidades. Destaca-se a necessidade do conhecimento profundo do sistema.

A análise foi conservadora, a fim de ressaltar os modos de falha críticos. Componentes sabidamente instalados em redundância são analisados como únicos, já que, quando da falha múltipla, a redundância tem efeito similar ao componente instalado isoladamente.

Neste trabalho foi analisada uma turbina hidráulica do tipo Kaplan genérica. Deve-se ter atenção especial ao fato de que cada usina tem características específicas e os sensores são selecionados e dimensionados em função dos níveis da grandeza medida, como vazão e temperatura médias, espaço físico, capacidade de capturar o fenômeno de interesse, preço e qualidade.

A equipe de manutenção deve ser treinada para operar e interpretar resultados da instrumentação sugerida, assim como ter conhecimento dos conceitos básicos de Manutenção Centrada em Confiabilidade. Ela deve estar ciente dos detalhes de funcionamento do equipamento, pois muitos modos de falhas têm algumas evidências comuns. A interpretação errada pode induzir a erros de decisão.

O FMEA é um documento dinâmico. Novos componentes e modos de falha podem ser acrescentados e analisados. A capacidade da instrumentação de capturar estes novos modos de falha deve ser reavaliada para níveis de severidades acima ou igual ao desejado.

A análise limitou-se a causas primárias nos diagramas Espinha de Peixe. Pode-se expandir a relação de causa e efeito em causas secundárias, informação também extraídas do FMEA, e aplicar a metodologia a estas.

Em função dos resultados, pode-se concluir:

- **Mancal Guia e Escora:** é sugerida a instalação de alguns dispositivos de segurança e redundância, marcados entre parênteses nos resultados. A falha escondida é crítica para operação do sistema, por exemplo, a falha no sistema de alta pressão do mancal de escora ou a bomba de reserva nos circuitos, reveladas apenas quando da parada da máquina ou falha da bomba principal, respectivamente. Neste caso, a política de manutenção do hidrogerador deve conter atividades de procura de falhas escondidas.

O valor numérico da carga atuante no mancal é um parâmetro de difícil captura. Os extensômetros são para análise qualitativa a partir da deformação da estrutura suporte do mancal, e juntamente com sensores de proximidades revelam o comportamento dinâmico do conjunto girante. Neste caso, não há evidência única e a vibração pode ter fontes diversas.

- **Vedação do Eixo:** é sugerida a instalação de alguns dispositivos de segurança, marcados entre parênteses nos resultados. A falha da vedação de parada pode ser uma falha escondida e repete-se aqui o mesmo comentário dos mancais quanto a esse tipo de falha.
- **Regulador de Velocidades:** pela própria construção encapsulada, tanto das válvulas pilotos quanto das válvulas comandadas, é sugerida a avaliação de técnicas pró-ativa e reativa, como teste de mudança de estado e proporcionalidade, ruídos na mudança de estado e medição da corrente elétrica de comando. O mecanismo de regulação dentro do Rotor Kaplan tem apresenta dificuldades de implementação da monitoração: girante, confinado, ambiente com líquido, acesso difícil, distância entre o local de medição e o barramento de sinais dos sensores da unidade.

7.2. Sugestão para Trabalhos Futuros

Como sugestão para trabalhos futuros, a análise pode ser estendida a outros sistemas da usina hidrelétrica, componentes eletrônicos e conjunto gerador, por exemplo. O comportamento destes sistemas, seus modos de falhas e funcionamento devem ser cuidadosamente pesquisados.

Concentrar o estudo em uma usina específica e avaliar suas peculiaridades, estruturar a implementação e selecionar os instrumentos, dadas condições de contorno.

Desenvolvimento. O volume de informações captadas e a rapidez na tomada de decisão demandam o desenvolvimento de um sistema inteligente de gestão (*software*) capaz de acompanhar e interpretar a evolução dos sinais, e exibir em tempo real o estado do equipamento.

Tanto o estudo de viabilidade econômica da instrumentação quanto o impacto dos sensores na operação e confiabilidade da turbina são temas longos que merecem um detalhamento maior.

O trabalho de campo de ajuste da curva de confiabilidade a partir de dados de falha, principalmente, fichas de manutenção e histórico de falhas, segue outro caminho da Confiabilidade, mas igualmente importante, cujo objetivo é de validar o aumento da disponibilidade com a nova instrumentação e acompanhamento da degradação da confiabilidade.

ANEXO A – Árvore Funcional

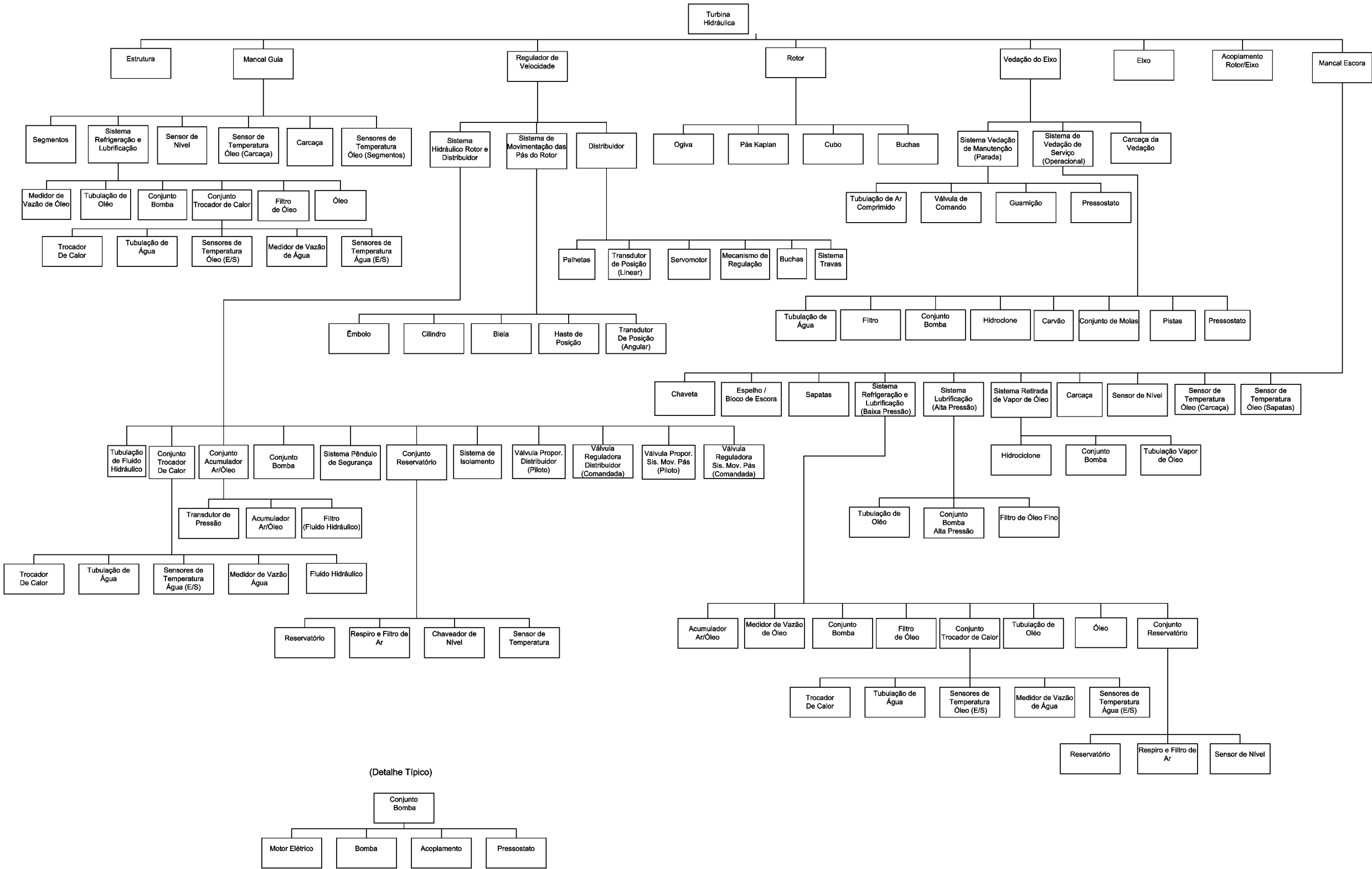
O ponto de partida da aplicação da estruturação MCC consiste em conhecer o sistema. Isto inclui não somente seus subsistemas, componentes e peças, mas a relação funcional entre eles.

A Árvore Funcional é um meio de se alcançar este objetivo, pois envolve a análise de cada componente e circuitos auxiliares dentro da fronteira de estudo. Partindo do estudo de desenhos técnicos, livro de referências, manuais de montagem e manutenção, os diversos componentes são dispostos hierarquicamente em blocos. O resultado é uma estrutura que se assemelha a uma árvore, com ramos superiores e inferiores.

É sugerida a leitura do capítulo 4 para um entendimento maior sobre elaboração da Árvore Funcional e outros aspectos da MCC.

A seguir é apresentada a árvore funcional da Turbina Hidráulica do Tipo Kaplan estudada.

Diagrama Funcional Turbina Hidráulica do Tipo Kaplan



ANEXO B – Descrição Funcional

Elaborada a Árvore Funcional, o passo seguinte é a Descrição Funcional que dita a função de cada componente dos ramos inferiores da Árvore Funcional. Cada componente tem uma função definida que justifica sua presença no sistema. Esta descrição funcional é o início do estudo dos modos e efeitos de falhas.

É sugerida a leitura do capítulo 4 para um entendimento maior sobre descrição funcional e outros aspectos da MCC.

A seguir é apresentada a Descrição Funcional da Turbina Hidráulica do Tipo Kaplan estudada. Note a presença apenas de funções primárias. Isto se deve pela exigência da turbina ser um sistema confiável e possuir componentes relativamente caros.

1. SISTEMA TURBINA HIDRÁULICA

Função Primária:

-Transformar energia potencial hidráulica em energia mecânica.

1.1. Subsistema Estrutura

Função Primária

-Servir de apoio para o Sistema Turbina Hidráulica.

1.2. Subsistema-Mancal Guia

Função Primária

-Permitir a rotação do eixo com o menor atrito possível

-Manter a concentricidade da rotação do eixo na operação da máquina

-Transmitir esforços radiais do eixo para a estrutura da máquina

1.2.1. Segmentos

Função Primária

-Garantir a concentricidade do Eixo.

-Prover sustentação para as cargas radiais atuantes no Eixo.

1.2.2. Sistema de Refrigeração e Lubrificação

Função Primária

-Prover um fluxo de óleo constante na pressão e temperatura requerida

1.2.2.1. Medidor de Vazão de Óleo

Função Primária

- Medir fluxo de óleo no Sistema de Refrigeração e Lubrificação

1.2.2.2. Tubulação de Óleo

Função Primária

-Encaminhar o fluxo de óleo

1.2.2.3. Conjunto Bomba

Função Primária

-Converter energia elétrica em energia fluídica numa pressão e vazão requerida

1.2.2.4. Conjunto Trocador de Calor

Função Primária

- Transferir calor do óleo para água de resfriamento com baixa perda de carga

1.2.2.4.1. Trocador de calor

Função Primária

- Trocar calor entre fluidos a temperaturas distintas

1.2.2.4.2. Tubulação de Água

Função Primária

- Encaminhar o fluido de resfriamento para o Conjunto Trocador de Calor

1.2.2.4.3. Sensores de Temperatura Óleo (Entrada e Saída)

Função Primária

- Medir a diferença de temperatura entre a entrada e a saída do óleo no Trocador de Calor

1.2.2.4.4. Medidor de Vazão de Água

Função Primária

- Medir o fluxo de água no Trocador de Calor

1.2.2.4.5. Sensores de Temperatura Água (Entrada e Saída)

Função Primária

- Medir a diferença de temperatura entre a entrada e a saída de água no Trocador de Calor

1.2.2.5. Filtro de Óleo

Função Primária

- Reter partículas de dimensões maiores ou iguais ao especificado

1.2.2.6. Óleo

Função Primária

- Reduzir o atrito de componentes mecânicos com movimento relativo entre si
- Formar e manter a lubrificação hidrodinâmica em toda faixa operativa

1.2.3. Sensor de Nível de Óleo

Função Primária

- Registrar o nível de óleo na Carcaça

1.2.4. Sensor de Temperatura do Óleo (Carcaça)

Função Primária

- Medir a temperatura do Óleo na Carcaça

1.2.5. Carcaça

Função Primária

- Fornecer alojamento e proteção aos componentes do Mancal Guia
- Transmitir os esforços radiais dos Segmentos para a Estrutura

1.2.6. Sensor de Temperatura Segmentos

Função Primária

- Medir a temperatura de óleo nos Segmentos

1.3. Regulador de Velocidade

Função Primária

- Manter a velocidade de rotação da turbina constante, alterando a abertura das Pás Kaplan do Rotor e das Palhetas do Distribuidor
- Controlar o fluxo de água pela turbina

1.3.1. Sistema Hidráulico do Rotor e Distribuidor

Função Primária

- Prover as forças hidráulicas necessárias para operação do Regulador de Velocidade
- Permitir o controle destas forças
- Fechar o distribuidor em caso de falha

1.3.1.1. Tubulação de Fluido Hidráulico

Função Primária

- Encaminhar o fluxo de fluido hidráulico

1.3.1.2. Trocador de Calor

Função Primária

- Prover um fluxo de óleo na temperatura requerida e livre de particulados acima de determinado tamanho

Descritos nos itens 1.2.2.4

1.3.1.3. Conjunto Acumulador Ar/Óleo

Função Primária

- Manter um volume de óleo pressurizado utilizando linha de ar comprimido
- Servir de reservatório com volume e pressão suficiente para fechamento do distribuidor numa eventual falha das bombas

1.3.1.3.1. Transdutor de Pressão

Função Primária

- Medir a pressão do acumulador de fluido hidráulico

1.3.1.3.2. Acumulador Ar/Óleo

Função Primária

- Acumular um volume de fluido hidráulico pressurizado

1.3.1.3.3. Filtro de Óleo

Função Primária

- Reter partículas de dimensões maiores ou iguais ao especificado

1.3.1.4. Conjunto Bomba

Função Primária

- Converter energia elétrica em energia fluídica numa pressão e vazão requerida

1.3.1.5. Sistema Pêndulo de Segurança

Função Primária

- Fechar o Distribuidor, impondo um limite superior para a turbina, abaixo da velocidade de disparo

1.3.1.6. Conjunto Reservatório

Função Primária

- Armazenar o óleo do Sistema Hidráulico do Rotor e Distribuidor
- Prover tempo para desaeração e assentamento de impurezas

1.3.1.6.1. Reservatório

Função Primária

- Prover um volume adequado e isolado do ambiente para armazenamento do fluido hidráulico

1.3.1.6.2. Respiro e Filtro de Ar

Função Primária

- Permitir a entrada ou saída de ar limpo, conforme mudança do nível de fluido hidráulico

1.3.1.6.3. Chaveador de Nível

Função Primária

- Indicar quando o volume de óleo no reservatório atingir níveis críticos

1.3.1.6.4. Sensor de Temperatura

Função Primária

- Medir a temperatura de óleo no Reservatório

1.3.1.7. Sistema de Isolamento

Função Primária

- Isolar parte do Sistema Hidráulico para manutenção ou segurança

1.3.1.8. Válvula Proporcional Distribuidor (Piloto)

Função Primária

- Comandar o estado da Válvula Reguladora Distribuidor (Comandada)

1.3.1.9. Válvula Reguladora Distribuidor (Comandada)

Função Primária

- Estabelecer o fluxo de óleo para os Servomotores do Distribuidor

1.3.1.10. Válvula Proporcional Sistema de Movimentação das Pás do Rotor (Piloto)

Função Primária

- Comandar o estado da Válvula Reguladora do Sistema de Movimentação das Pás do Rotor (Comandada)

1.3.1.11. Válvula Reguladora do Sistema de Movimentação das Pás do Rotor (Comandada)

Função Primária

- Estabelecer o fluxo de óleo para o Cilindro do Sistema de Movimentação das Pás do Rotor

1.3.1.12. Fluido Hidráulico

Função Primária

- Reduzir o atrito de componentes mecânicos com movimento relativo entre si
- Formar e manter a capacidade de lubrificação em toda faixa operativa
- Ter compressibilidade baixa em toda faixa operativa

1.3.2. Sistema de Movimentação das Pás do Rotor

Função Primária

- Movimentar as Pás do Rotor de acordo com os comandos hidráulicos do Sistema de Hidráulico do Rotor e Distribuidor

1.3.2.1. Êmbolo

Função Primária

- Isolar as duas câmaras do Cilindro, permitindo a existência de uma diferença de pressão hidráulica

1.3.2.2. Cilindro

Função Primária

- Converter a força hidráulica em movimento linear

1.3.2.3. Biela

Função Primária

- Transferir a força do Cilindro para a Pá do Rotor (como torque)

1.3.2.4. Haste de Posição

Função Primária

- Movimentar-se verticalmente de acordo com o cilindro

1.3.2.5. Transdutor de Posição (Angular)

Função Primária

- Transformar o movimento vertical da Haste de Posição em abertura angular das Pás do Rotor

1.3.3. Distribuidor

Função Primária

- Movimentar uniformemente as palhetas de acordo com os comandos hidráulicos do Sistema de Hidráulico do Rotor e Distribuidor

1.3.3.1. Palhetas

Função Primária

- Modificar a área da seção transversal do escoamento

1.3.3.2. Transdutor de Posição (Linear)

Função Primária

- Registrar o movimento linear do servomotor

1.3.3.3. Servomotor

Função Primária

- Converter a força hidráulica em movimento linear

1.3.3.4. Mecanismo de Regulação

Função Primária

- Movimentar uniformemente as palhetas em função do deslocamento do servomotor

1.3.3.5. Buchas (Mancais)

Função Primária

- Permitir o movimento do Mecanismo de Regulação com o mínimo de atrito

1.3.3.6. Sistema Travas

Função Primária

- Interromper a movimentação do servomotor (quando da parada da turbina)

1.4. Rotor

Função Primária

- Converter a energia hidráulica água em energia mecânica de rotação
- Prover um ambiente isolado da água para o Sistema de Movimentação das Pás do Rotor
- Transmitir esforços hidráulicos e do Sistema de Movimentação das Pás do Rotor para o Eixo

1.4.1. Ogiva

Função Primária

- Prover um ambiente isolado da água para o Sistema de Movimentação das Pás do Rotor
- Guiar o Cilindro do Sistema de Movimentação das Pás do Rotor

1.4.2. Pás Kaplan

Função Primária

- Converter a energia hidráulica água em energia mecânica

1.4.3. Cubo

Função Primária

- Prover um ambiente isolado da água para o Sistema de Movimentação das Pás do Rotor
- Transmitir esforços hidráulicos e do Sistema de Movimentação das Pás do Rotor para o Eixo
- Guiar o Cilindro do Sistema de Movimentação das Pás do Rotor e as Pás Kaplan

1.4.4. Buchas

Função Primária

- Permitir a movimentação das Pás com o menor atrito possível

1.5. Vedação do Eixo

Função Primária

- Vedar o Rotor da parte estacionária da máquina, permitindo o giro com o menor atrito possível quando em operação
- Vedar o Rotor da parte estacionária da máquina quando parada

1.5.1. Sistema de Vedação de Manutenção (Parada)

Função Primária

- Vedar o Rotor da parte estacionária da máquina quando parada

1.5.1.1. Tubulação de Ar Comprimido

Função Primária

- Encaminhar o ar para pressurização da guarnição

1.5.1.2. Válvula de Comando

Função Primária

- Comandar o acionamento do Sistema Vedação de Manutenção

1.5.1.3. Guarnição

Função Primária

- Ver o Eixo por contato mecânico sob pressão

1.5.1.4. Pressostato

Função Primária

- Indicar o estado do Sistema Vedação de Manutenção (Parada)

1.5.2. Sistema de Vedação de Serviço (Operacional)

Função Primária

- Vedar o Rotor da parte estacionária da máquina, permitindo o giro com o menor atrito possível quando em operação

1.5.2.1. Tubulação de Água

Função Primária

- Encaminhar o fluxo de água

1.5.2.2. Filtro

Função Primária

- Reter partículas de dimensões maiores ou iguais ao especificado

1.5.2.3. Conjunto Bomba

Função Primária

- Converter energia elétrica em energia fluídica numa pressão e vazão requerida

1.5.2.4. Hidrociclone

Função Primária

- Remover sólidos suspensos na água que passaram pelo filtro

1.5.2.5. Carvão

Função Primária

- Vedar o Eixo por contato mecânico sob pressão, fornecendo uma superfície de deslizamento com baixo atrito

1.5.2.6. Conjunto de Molas

Função Primária

- Exercer força de compressão sobre as pistas

1.5.2.7. Pistas

Função Primária

- Transferir a força de compressão do Conjunto de Molas para o Carvão uniformemente

1.5.2.8. Pressostato

Função Primária

- Indicar o estado do Sistema de Vedação de Serviço (Operacional)

1.5.3. Carcaça da Vedação

Função Primária

- Prover suporte estrutural para a Vedação do Eixo
- Prover um ambiente isolado para os componentes

1.6. Eixo

Função Primária

- Transmitir rotação e momento torsor

1.7. Acoplamento Rotor/Eixo

Função Primária

- Unir o Rotor ao Eixo sem deslocamento relativo
- Transmitir momento torso do Rotor para o Eixo
- Transmitir cargas axiais do Rotor para o Eixo

1.8. Mancal de Escora

Função Primária

- Transmitir os esforços axiais associados com a operação das partes girantes à parte estacionária da máquina
- Permitir o movimento de rotação do Eixo com o menor atrito possível

1.8.1. Chaveta

Função Primária

- Transmitir torque do Eixo para o Bloco de Escora para vencer as tensões viscosas do Óleo na Carcaça

1.8.2. Espelho/Bloco de Escora

Função Primária

- Transmitir esforços axiais uniformemente para as Sapatas e vencer as tensões viscosas

1.8.3. Sapatas

Função Primária

- Prover sustentação para as cargas axiais atuantes no Eixo

1.8.4. Sistema de Refrigeração e Lubrificação (Baixa Pressão)

Função Primária

- Prover um fluxo de óleo constante na pressão e temperatura requerida

1.8.4.1. Acumulador Ar/Óleo

Função Primária

- Acumular um volume de óleo pressurizado
- Servir de reservatório com volume de óleo frio suficiente para parada numa eventual falha

1.8.4.2. Medidor de Vazão de Óleo

Função Primária

- Registrar o fluxo do óleo no Sistema de Refrigeração e Lubrificação

1.8.4.3. Conjunto Bomba

Função Primária

- Converter energia elétrica em energia fluídica numa pressão e vazão requerida

1.8.4.4. Filtro de Óleo

Função Primária

- Reter partículas de dimensões maiores ou iguais ao especificado

1.8.4.5. Conjunto Trocador de Calor

Função Primária

- Transferir calor do óleo para água de resfriamento com baixa perda de carga

Descrito no item 1.2.2.5

1.8.4.6. Tubulação de óleo

Função Primária

- Encaminhar o fluxo de óleo

1.8.4.7. Óleo

Função Primária

- Reduzir o atrito de componentes mecânicos com movimento relativo entre si
- Formar e manter a lubrificação hidrodinâmica em toda faixa operativa

1.8.4.8. Conjunto Reservatório

Função Primária

- Armazenar o óleo do Mancal de Escora
- Prover tempo para desaeração e assentamento de impurezas

1.8.4.8.1. Reservatório

Função Primária

- Prover um volume adequado e isolado do ambiente para armazenamento do óleo

1.8.4.8.2. Respiro e Filtro de Ar

Função Primária

- Permitir a entrada ou saída de ar limpo, conforme o nível de óleo muda

1.8.4.8.3. Sensor de Nível

Função Primária

- Indicar quando o volume de óleo no reservatório atingir níveis críticos

1.8.5. Sistema de Lubrificação (Alta Pressão)

Função Primária

-Prover um fluxo de óleo constante na pressão requerida quando da parada da turbina

1.8.5.1. Tubulação de óleo

Função Primária

-Encaminhar o fluxo de óleo

1.8.5.2. Conjunto Bomba (Alta Pressão)

Função Primária

- Converter energia elétrica em energia fluídica numa pressão e vazão requerida

1.8.5.3. Filtro de Óleo

Função Primária

- Reter partículas de dimensões maiores ou iguais ao especificado

1.8.6. Sistema de Retirada de Vapor de óleo

Função Primária

-Retirar vapor de óleo acumulado na Carcaça do Mancal de Escora

1.8.6.1. Hidrociclone

Função Primária

-Separar vapor de óleo de outras fases

1.8.6.2. Conjunto Bomba

Função Primária

- Converter energia elétrica em energia fluídica numa pressão e vazão requerida

1.8.6.3. Tubulação de vapor de óleo

Função Primária

-Encaminhar o vapor de óleo

1.8.7. Carcaça

Função Primária

-Prover suporte estrutural para o Mancal de Escora

-Prover um ambiente isolado para os componentes

-Transferir os esforços axiais do eixo para a parte estacionária da turbina

1.8.8. Sensor de Nível de Óleo

Função Primária

-Registrar o nível de óleo na Carcaça

1.8.9. Sensor de Temperatura do Óleo (Carcaça)

Função Primária

-Registrar a temperatura do Óleo na Carcaça

1.8.10. Sensor de Temperatura do Óleo (Sapatas)

Função Primária

-Registrar a temperatura do Óleo nas Sapatas

1.8.10.1. Conjunto Reservatório

Função Primária

- Armazenar o óleo do Mancal de Escora
- Prover tempo para desaeração e assentamento de impurezas

1.8.10.1.1. Reservatório

Função Primária

- Prover um volume adequado e isolado do ambiente para armazenamento do óleo

1.8.10.1.2. Respiro e Filtro de Ar

Função Primária

- Permitir a entrada ou saída de ar limpo, conforme o nível de óleo muda

1.8.10.1.3. Sensor de Nível

Função Primária

- Indicar quando o volume de óleo no reservatório atingir níveis críticos

ANEXO C – FMEA da Turbina

Elaborada a Árvore Funcional e a Descrição Funcional, o passo final é o FMEA que dita a falha funcional (modo de falha), principais mecanismos de falha e efeito potencial da falha no sistema.

É sugerida a leitura do capítulo 4 para um entendimento maior sobre FMEA e outros aspectos da MCC.

A seguir é apresentado o FMEA da Turbina Hidráulica do Tipo Kaplan estudada. Note que a severidade foi avaliada segundo a Classificação de Severidade Empregada na Análise do Tipo FMEA de um Sistema de Geração de Energia apresentada no capítulo 4.

Sistema: Estrutura

Subsistema:

Componente:

Número de Identificação: 1

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Servir de apoio para o Sistema Turbina Hidráulica.	Ruptura	-Sobrecarga (Montagem incorreta, desalinhamento) -Propagação de trinca devido à fadiga -Falha de Projeto/Fabricação (esforços subdimensionados, material incorreto, fora das tolerâncias ou acabamento)	1) Incapacidade de suportar Turbina; vibrações do conjunto girante; danos a outros componentes; 2) Parada da Turbina;	9			9
	Deformação Permanente	-Sobrecarga (Montagem incorreta, desalinhamento) -Falha de Projeto/Fabricação (esforços subdimensionados, material incorreto, fora das tolerâncias ou acabamento)	1) Capacidade parcial de suportar Turbina; vibrações do conjunto girante; danos a outros componentes 2) Parada da Turbina	8			8

Sistema: Mancal Guia

Subsistema:

Componente: Segmentos

Número de Identificação: 2.1

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Garantir a concentricidade do Eixo Prover sustentação para as cargas radiais atuantes no Eixo	Ruptura do segmento	-Sobrecarga (Montagem incorreta, desalinhamento do eixo/mancal, vibração do eixo, operação em baixas velocidades) -Propagação de trinca devido à fadiga -Falha de Projeto/Fabricação (esforços subdimensionados, material incorreto, fora das tolerâncias ou acabamento)	1) Mancal guia sem capacidade guiar o eixo e prover sustentação radial; Aumento da temperatura do óleo e dos segmentos; Possibilidade de danos a outros segmentos; 2) Turbina com deficiências; Vibração do conjunto girante; Parada da turbina;	8			8
	Deformação permanente no segmento	-Sobrecarga (Montagem incorreta, desalinhamento do eixo/mancal, vibração do eixo, operação em baixas velocidades) -Falha de Projeto/Fabricação (esforços subdimensionados, material incorreto, fora das tolerâncias ou acabamento)	1) Mancal guia sem capacidade guiar o eixo e prover sustentação radial; Aumento da temperatura do óleo e dos segmentos; Possibilidade de danos a outros segmentos; 2) Turbina com deficiências; Vibração do conjunto girante; Turbina operando com potência bastante reduzida;	7			7
	Danos ao revestimento metálico (metal patente)	-Adesão insuficiente do revestimento ao segmento	1) Mancal guia com capacidade limitada de guiar o eixo e prover sustentação radial; Aumento da temperatura do óleo e dos segmentos; Possibilidade de danos a outros segmentos; 2) Turbina com capacidade limitada de guiar o eixo e prover sustentação; Vibração do conjunto girante;	6			6

Sistema: Mancal Guia

Subsistema:

Componente: Segmentos

Número de Identificação: 2.1

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
		-Sobrecarga (Montagem incorreta, desalinhamento do eixo/mancal, vibração do eixo, fora das tolerâncias ou acabamento, operação em baixas velocidades) -Fadiga do Revestimento -Falha devido a defeitos internos não detectados durante deposição					
	-Folga radial excessiva	-Montagem Incorreta -Vibração do Eixo (Desbalanceamento) -Deformação do mecanismo de ajuste	1) Mancal guia com capacidade limitada guiar o eixo e prover sustentação radial; 2) Turbina com deficiências; Vibração do conjunto girante;	5			5

Sistema: Mancal Guia

Subsistema: Sistema de Refrigeração e Lubrificação

Componente: Medidor de Vazão de Óleo

Número de Identificação: 2.2.1

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Medir o fluxo de óleo no Sistema de Refrigeração e Lubrificação	Indica fluxo quando não há	-Falha em componente mecânico -Falha em componente elétrico	(Falha Múltipla) 1. Possibilidade do Sistema de Refrigeração e Lubrificação inoperante (possível vazamento); 2. Possibilidade de queda do nível de óleo do Sistema Mancal; Aumento da temperatura do óleo e dos segmentos; 3. Possibilidade de parada da Turbina caso temperatura do mancal suba demasiadamente	7			7
	Não indica fluxo quando há	-Falha em componente mecânico -Falha em componente elétrico	1) Possibilidade do Sistema de Refrigeração e Lubrificação operando normalmente; 2) Possibilidade do Mancal Guia operando normalmente 3) Possibilidade da Turbina operando normalmente	4			4
	Indicação intermitente	-Falha em componente mecânico -Falha em componente elétrico	1) Possibilidade do Sistema de Refrigeração e Lubrificação estar inoperante; 2) Possibilidade de queda do nível de óleo do Mancal Guia; possibilidade do aumento da temperatura do óleo e dos segmentos; 3) Possibilidade de parada da Turbina caso temperatura do mancal suba demasiadamente;	5			5

Sistema: Mancel Guia

Subsistema: Sistema de Refrigeração e Lubrificação

Componente: Tubulação de Óleo

Número de Identificação: 2.2.2

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Encaminhar o fluxo de óleo	Ruptura/Vazamento Excessivo	-Corrosão -Pressão elevada -Apoios subdimensionados -Soldas com defeitos -Danos às vedações/válvulas	1) Sistema de Refrigeração e Lubrificação incapaz de manter a circulação adequada de óleo; Vazamento de óleo para o ambiente; vazão de óleo baixa ou nula; 2) Sistema Mancel Guia inoperante; queda no nível de óleo; aumento de temperatura dos segmentos do mancel e do óleo; queda da temperatura da água de resfriamento na saída; 3) Parada da turbina	7			7
	Obstrução total	-Acumulação de detritos	1) Sistema de Refrigeração e Lubrificação incapaz de manter a circulação adequada de óleo; vazão de óleo nula; 2) Sistema Mancel Guia inoperante; aumento de temperatura do óleo e dos segmentos; queda da temperatura da água de resfriamento na saída; 3) Parada da turbina	7			7
	Obstrução Parcial	Acumulação de detritos	1) Sistema de Refrigeração e Lubrificação incapaz de manter a circulação adequada de óleo; vazão de óleo baixa; 2) Sistema Mancel Guia operando com deficiência; aumento de temperatura do óleo e dos segmentos; queda da temperatura da água de resfriamento na saída; 3) Turbina operando com potência reduzida	6			6

Sistema: Mancal Guia

Subsistema: Sistema de Refrigeração e Lubrificação

Componente: Conjunto Bomba

Obs.: Comumente em redundância

Número de Identificação: 2.2.3

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Converter energia elétrica em energia fluidica numa pressão e vazão requerida	Não há transformação de energia elétrica em energia fluidica	-Desgaste da bomba por cavitação -Bloqueio do lado sucção ou pressão -Ruptura do rotor -Queima do enrolamento -Instalação errada -Falha nos mancais do Conjunto Bomba -Falha na fiação -Falha do conjunto (por outras razões)	1) Conjunto Bomba inoperante; Pressostato acionado; 2) Sistema de Refrigeração e Lubrificação incapaz de manter a circulação adequada de óleo; interrupção da vazão de óleo; 3) Sistema Mancal Guia inoperante; aumento de temperatura do óleo e dos segmentos; queda da temperatura da água de resfriamento; 4) Parada da turbina	7			7
	Há transformação parcial de energia elétrica em energia fluidica	-Desgaste da bomba por cavitação -Bloqueio parcial do lado sucção ou pressão da Bomba; -Falha nos mancais do Conjunto Bomba -Falha na fiação -Falha do conjunto (por outras razões)	1) Conjunto Bomba operando com capacidade limitada; 2) Sistema de Refrigeração e Lubrificação capaz de manter a circulação abaixo da adequada de óleo; queda da vazão de óleo; 3) Sistema Mancal Guia inoperante; aumento de temperatura do óleo e dos segmentos; queda da temperatura da água de resfriamento; 4) Turbina operando com potência reduzida;	6			6

Sistema: Mancal Guia

Subsistema: Conjunto Trocador de Calor

Componente: Trocador de Calor

Obs.: Comumente em redundância

Número de Identificação: 2.2.4.1

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Trocar calor entre fluidos a temperaturas distintas	-Incapacidade de trocar calor	-Furos no trocador (mistura e/ou perda de fluidos) -Obstrução da tubulação interna -Corrosão das paredes do trocador -Fadiga térmica -Aumento da resistência térmica (incrustações na parede)	1) Conjunto Trocador de Calor incapaz de transferir calor do óleo para a água de resfriamento; queda da temperatura da água de resfriamento; 2) Sistema de Refrigeração e Lubrificação inoperante; possibilidade de água no óleo; 3) Sistema Mancal Guia inoperante; possível queda do nível de óleo na carcaça; aumento de temperatura do óleo e dos segmentos; 4) Parada da Turbina;	8			8
	-Capacidade limitada de tocar calor	-Furos no trocador (mistura e/ou perda de fluidos) -Obstrução parcial da tubulação interna -Corrosão das paredes do trocador -Fadiga térmica -Aumento da resistência térmica (incrustações na parede)	1) Conjunto Trocador de Calor com capacidade reduzida de transferir calor do óleo para a água de resfriamento; queda da temperatura da água de resfriamento possibilidade de água no óleo; 2) Sistema de Refrigeração e Lubrificação operando com restrições; aumento de temperatura do óleo e dos segmentos; 3) Turbina operando com potência reduzida e possibilidade de parada	6			6

Sistema: Mancal Guia

Subsistema: Conjunto Trocador de Calor

Componente: Tubulação de Água

Número de Identificação: 2.2.4.2

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Encaminhar o fluido de resfriamento para o Conjunto Trocador de Calor	Ruptura/Vazamento Excessivo	-Corrosão -Pressão elevada -Apoios subdimensionados -Soldas com defeitos -Danos às vedações/válvulas	1) Conjunto Trocador de Calor incapaz de transferir calor do óleo para a água de resfriamento; vazão de água baixa ou nula; 2) Sistema de Refrigeração e Lubrificação incapaz de manter a circulação adequada de água; Vazamento de água para o ambiente; 3) Sistema Mancal Guia inoperante; aumento de temperatura do óleo e dos segmentos; 4) Parada da turbina	7			7
	Obstrução total	-Acumulação de detritos -Obstrução do bocal de captação de água ou do filtro	1) Conjunto Trocador de Calor incapaz de transferir calor do óleo para a água de resfriamento; vazão de água nula; 2) Sistema de Refrigeração e Lubrificação incapaz de manter a circulação adequada de água; 3) Sistema Mancal Guia inoperante; aumento de temperatura do óleo e dos segmentos; 4) Parada da turbina	7			7

Sistema: Mancal Guia

Subsistema: Conjunto Trocador de Calor

Componente: Tubulação de Água

Número de Identificação: 2.2.4.2

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
	Obstrução Parcial	-Acumulação de detritos -Obstrução parcial do bocal de captação de água ou do filtro	1) Conjunto Trocador de Calor incapaz de transferir calor do óleo para a água de resfriamento; queda da temperatura da água de resfriamento; vazão de água baixa 2) Sistema de Refrigeração e Lubrificação incapaz de manter a circulação adequada de água;; 3) Sistema Mancal Guia operando com deficiência; aumento de temperatura do óleo e dos segmentos; 4) Turbina operando com potência reduzida	6			6

Sistema: Mancal Guia

Subsistema: Conjunto Trocador de Calor

Componente: Sensores de Temperatura de Óleo (E/S)

Obs.: Análise da diferença de temperatura entre a entrada e a saída

Número de Identificação: 2.2.4.3

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Medir a diferença de temperatura entre a entrada e saída do óleo no Trocador de Calor	Não indica a temperatura	-Instalação errada -Sensor danificado -Queima -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Conjunto Trocador de Calor operando normalmente; Possível falha do sensor; 2) Sistema de Refrigeração e Lubrificação operando normalmente; 3) Sistema Mancal Guia operando normalmente 4) Turbina operando normalmente	4			4
	Indica diferença de temperatura menor que a real	-Instalação errada -Sensor danificado -Perda da calibração -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Informações incorretas sobre o Conjunto; Possibilidade do Conjunto Trocador de Calor operando com vazão de água baixa ou de óleo alta; 2) Possibilidade do Sistema de Refrigeração e Lubrificação operando com deficiências; 3) Possibilidade do Sistema Mancal Guia operando com deficiências; 4) Possibilidade da Turbina operando com deficiências;	5			5
	Indica diferença de temperatura maior que a real	-Instalação errada -Sensor danificado -Perda da calibração -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Informações incorretas sobre o Conjunto; Possibilidade do Conjunto Trocador de Calor operando com vazão de água alta ou de óleo baixa; 2) Possibilidade do Sistema de Refrigeração e Lubrificação operando com deficiências; 3) Possibilidade do Sistema Mancal Guia operando com deficiências; 4) Possibilidade da Turbina operando com deficiências;	5			5

Sistema: Mancal Guia

Subsistema: Conjunto Trocador de Calor

Componente: Medidor de Vazão de Água (E/S)

Número de Identificação: 2.2.4.4

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Medir o fluxo de água no Trocador de Calor	Indica fluxo quando não há	-Falha em componente mecânico -Falha em componente elétrico	1) Possibilidade do Sistema de Refrigeração e Lubrificação inoperante (possível vazamento); 2) Possibilidade de queda do nível de óleo do Mancal Guia; Aumento da temperatura do óleo e dos segmentos; 3) Possibilidade de parada da Turbina caso temperatura do mancal suba demasiadamente	7			7
	Não indica fluxo quando há	-Falha em componente mecânico -Falha em componente elétrico	1) Possibilidade do Sistema de Refrigeração e Lubrificação operando normalmente; 2) Possibilidade do Mancal Guia operando normalmente; 3) Possibilidade da Turbina operando normalmente;	5			5
	Indicação intermitente	-Falha em componente mecânico -Falha em componente elétrico	1) Possibilidade do Sistema de Refrigeração e Lubrificação estar inoperante; 2) Possibilidade de queda do nível de óleo do Mancal Guia; Possibilidade do aumento da temperatura do óleo e dos segmentos; 3) Possibilidade de parada da turbina caso temperatura do mancal suba demasiadamente;	6			6

Sistema: Mancal Guia

Subsistema: Conjunto Trocador de Calor

Componente: Sensores de Temperatura da Água (E/S)

Obs.: Análise da diferença de temperatura entre a saída e entrada

Número de Identificação: 2.2.4.5

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Medir a diferença de temperatura entre a entrada e saída de água no Trocador de Calor	Não indica a temperatura	-Instalação errada -Sensor danificado -Queima -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Conjunto Trocador de Calor operando normalmente; Possível falha do sensor; 2) Sistema de Refrigeração e Lubrificação operando normalmente; 3) Sistema Mancal Guia operando normalmente 4) Turbina operando normalmente	4			4
	Indica diferença de temperatura menor que a real	-Instalação errada -Sensor danificado -Perda da calibração -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Informações incorretas sobre o Conjunto; Possibilidade do Conjunto Trocador de Calor operando com vazão de água alta e de óleo baixa; 2) Possibilidade do Sistema de Refrigeração e Lubrificação operando com deficiências; 3) Possibilidade do Sistema Mancal Guia operando com deficiências; 4) Possibilidade da Turbina operando com deficiências;	5			5
	Indica diferença de temperatura maior que a real	-Instalação errada -Sensor danificado -Perda da calibração -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Informações incorretas sobre o Conjunto; Possibilidade do Conjunto Trocador de Calor operando com vazão de água baixa e de óleo alta; 2) Possibilidade do Sistema de Refrigeração e Lubrificação operando com deficiências; 3) Possibilidade do Sistema Mancal Guia operando com deficiências; 4) Possibilidade da Turbina operando com deficiências;	5			5

Sistema: Mancal Guia

Subsistema: Sistema de Refrigeração e Lubrificação

Componente: Filtro de Óleo

Obs.: Comumente em redundância (Filtro Duplex)

Número de Identificação: 2.2.5

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Reter partículas de dimensões maiores ou iguais ao especificado	Ruptura do elemento filtrante	-Pressões elevadas na linha -Instalação incorreta -Danos por detritos -Filtro com malha diferente do especificado	1) Sistema de Refrigeração e Lubrificação operando com impurezas no óleo maiores que a especificação; possibilidade de danos ao Conjunto Bomba; 2) Possibilidade de danos aos Segmentos do Mancal Guia e ao Eixo; possibilidade de elevação da temperatura do óleo e dos segmentos; 3) Operação da turbina pouco afetada; possibilidade de flutuações da condição nominal;	5			5
	Obstrução parcial	-Impurezas no óleo -Filtro com malha diferente do especificado -Filtro para vazão diferente da especificado	1) Sistema de Refrigeração e Lubrificação operando com limitação de vazão de óleo; 2) Mancal Guia operando com limitação de vazão de óleo; elevação da temperatura do óleo e dos segmentos; 3) Operação da turbina afetada; possibilidade de parada	6			6
	Entupimento do filtro	-Impurezas no óleo -Filtro com malha diferente do especificado -Filtro para vazão diferente da especificado	1) Sistema de Refrigeração e Lubrificação operando com limitação de vazão de óleo; 2) Mancal Guia operando com limitação de vazão de óleo; elevação da temperatura do óleo e dos segmentos; 3) Operação da turbina afetada; Parada da turbina;	7			7

Sistema: Mancal Guia

Subsistema: Sistema de Refrigeração e Lubrificação

Componente: Óleo

Número de Identificação: 2.2.6

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Reduzir o atrito de componentes mecânicos com movimento relativo entre si	Incapacidade limitada de formar a lubrificação hidrodinâmica	-Formação de espuma -Óleo vencido -Uso de óleo incorreto -Oxidação -Contaminação do óleo	1) Sistema de Refrigeração e Lubrificação com capacidade operativa reduzida; 2) Mancal Guia com capacidade operativa reduzida 3) Turbina operando potência reduzida e possibilidade de parada;	7			7
Formar e manter a lubrificação hidrodinâmica em toda faixa operativa	Capacidade limitada de formar a lubrificação hidrodinâmica	-Formação de espuma -Óleo vencido -Uso de óleo incorreto -Oxidação -Contaminação do óleo	1) Sistema de Refrigeração e Lubrificação com capacidade operativa reduzida; 2) Mancal Guia com capacidade operativa reduzida 3) Turbina operando potência reduzida e baixo rendimento;	6			6

Sistema: Mancal Guia

Subsistema:

Componente: Sensor de Nível

Número de Identificação: 2.3

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Registrar o nível de óleo na Carcaça	Não indica nível	-Instalação errada -Sensor danificado -Queima -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Sistema Mancal Guia operando normalmente; Possível falha do sensor; 2) Turbina operando normalmente	4			4
	Indica nível menor que o real	-Instalação errada -Sensor danificado -Perda da calibração -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Informações incorretas sobre o Conjunto; Possibilidade do Sistema Mancal Guia operando com nível de óleo baixo; 2) Possibilidade de Parada da Turbina;	6			6
	Indica maior que o real	-Instalação errada -Sensor danificado -Perda da calibração -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Informações incorretas sobre o Conjunto; Possibilidade do Sistema Mancal Guia operando com óleo abaixo do recomendado; 2) Possibilidade de Parada da Turbina;	6			6

Sistema: Mancal Guia

Subsistema:

Componente: Sensor de Temperatura Carcaça

Número de Identificação: 2.4

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Medir a temperatura de óleo na Carcaça	Não indica a temperatura	-Instalação errada -Sensor danificado -Queima -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema elétrico)	1) Sistema Mancal Guia operando normalmente; Possível falha do sensor 2) Turbina operando normalmente	4			4
	Indica temperatura menor que a real	-Instalação errada -Sensor danificado -Perda da calibração -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema elétrico)	1) Informações incorretas sobre o Conjunto; Possibilidade do Sistema Mancal Guia operando com deficiências; 2) Possibilidade da Turbina operando com deficiências; Possibilidade de parada;	5			5
	Indica temperatura maior que a real	-Instalação errada -Sensor danificado -Perda da calibração -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema elétrico)	1) Informações incorretas sobre o Conjunto; Possibilidade do Sistema Mancal Guia operando com deficiências; 2) Possibilidade da Turbina operando com deficiências; Possibilidade de parada;	5			5

Sistema: Mancal Guia

Subsistema:

Componente: Carcaça

Número de Identificação: 2.5

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Fornecer alojamento e proteção aos componentes do Mancal Guia	Incapacidade de isolar o alojamento do mancal	-Desgaste/Ruptura da vedação -Vedação pouco resistente ao óleo -Corrosão das paredes da carcaça -Montagem Incorreta	1) Mancal Guia operando com acúmulo de impurezas ou perda de óleo 2) Turbina operando com potência nominal	6			6
Transmitir os esforços radiais dos Segmentos para a estrutura	Ruptura	-Sobrecarga (Montagem incorreta, desalinhamento do eixo/mancal, vibração do eixo) -Propagação de trinca devido à fadiga -Falha de Projeto/Fabricação (esforços subdimensionados, material incorreto, fora das tolerâncias ou acabamento)	1) Mancal guia sem capacidade guiar o eixo e prover sustentação radial; presença de ruídos; Vazamento de óleo; 2) Turbina com incapacidade de guiar o eixo e prover sustentação; Vibração do conjunto girante; Parada da Turbina	8			8

Sistema: Mancel Guia

Subsistema:

Componente: Carcaça

Número de Identificação: 2.5

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
	Deformações permanentes	-Sobrecarga (Montagem incorreta, desalinhamento do eixo/mancel, vibração do eixo) -Propagação de trinca devido à fadiga -Falha de Projeto/Fabricação (esforços subdimensionados, material incorreto, fora das tolerâncias ou acabamento)	1) Mancel guia sem capacidade guiar o eixo e prover sustentação radial; 2) Turbina com incapacidade de guiar o eixo e prover sustentação; Vibração do conjunto girante; Parada da Turbina	7			7
	Folga dos componentes do mancel	-Montagem incorreta (sem aperto ou trava-rosca) -Afrouxamento ou solta de fixações devido a vibrações	1) Mancel guia com capacidade limitada guiar o eixo e prover sustentação radial; presença de ruídos; possibilidade de vazamento de óleo; 2) Turbina com capacidade limitada de guiar o eixo e prover sustentação; Vibração do conjunto girante;	5			5

Sistema: Mancal Guia

Subsistema:

Componente: Sensor de Temperatura Segmentos

Número de Identificação: 2.6

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Medir a temperatura de óleo nos Segmento	Não indica a temperatura	-Instalação errada -Sensor danificado -Queima -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Sistema Mancal Guia operando normalmente; Possível falha do sensor 2) Turbina operando normalmente	4			4
	Indica temperatura menor que a real	-Instalação errada -Sensor danificado -Perda da calibração -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Informações incorretas sobre o Conjunto; Possibilidade do Sistema Mancal Guia operando com deficiências; 2) Possibilidade da Turbina operando com deficiências; Possibilidade de parada;	6			6
	Indica temperatura maior que a real	-Instalação errada -Sensor danificado -Perda da calibração -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Informações incorretas sobre o Conjunto; Possibilidade do Sistema Mancal Guia operando com deficiências; 2) Possibilidade da Turbina operando com deficiências; Possibilidade de parada;	6			6

Sistema: Regulador de Velocidade

Subsistema: Sistema Hidráulico do Rotor e Distribuidor

Componente: Tubulação de Fluido Hidráulico

Número de Identificação: 3.1.1

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Encaminhar o fluxo de fluido hidráulico	Ruptura/Vazamento Excessivo	-Corrosão -Pressão elevada -Apoios subdimensionados -Soldas com defeitos -Danos às vedações/válvulas	1) Sistema Hidráulico incapaz de manter pressão e vazão adequadas para o Distribuidor e Sistema de Movimentação das Pás do Rotor; vazão e pressão de fluido hidráulico nulas ou muito baixas; 2) Sistema de Regulação incapaz de operar os Servomotores do Distribuidor e/ou Sistema de Movimentação das Pás do Rotor; 3) Parada da Turbina	7			7
	Obstrução total	-Acumulação de detritos	1) Sistema Hidráulico incapaz de manter pressão e vazão adequadas para o Distribuidor e Sistema de Movimentação das Pás do Rotor; vazão e pressão de fluido hidráulico nula; 2) Sistema de Regulação incapaz de operar os Servomotores do Distribuidor e/ou Sistema de Movimentação das Pás do Rotor; 3) Parada da Turbina	7			7
	Obstrução Parcial	-Acumulação de detritos	1) Sistema Hidráulico com capacidade limitada de manter pressão e vazão adequadas para o Distribuidor e Sistema de Movimentação das Pás do Rotor; vazão e pressão de fluido hidráulico baixa; 2) Sistema de Regulação com capacidade reduzida de operar os Servomotores do Distribuidor e/ou Sistema de Movimentação das Pás do Rotor; 3) Turbina operando com deficiências;	6			6

Sistema: Regulador de Velocidade

Subsistema: Conjunto Trocador de Calor

Componente: Trocador de Calor

Obs.: Comumente em redundância

Número de Identificação: 3.1.2.1

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Trocar calor entre fluidos a temperaturas distintas	-Incapacidade de trocar calor	-Furos no trocador (mistura e/ou perda de fluidos) -Obstrução da tubulação interna; -Corrosão das paredes do trocador -Fadiga térmica -Aumento da resistência térmica (incrustações na parede)	1) Conjunto Trocador de Calor incapaz de trocar calor com o fluido hidráulico; 2) Sistema Hidráulico do Rotor e Distribuidor operando com limitação; possibilidade de vazamentos e desgaste prematuro de componentes do sistema; elevação da temperatura do fluido hidráulico; 3) Regulador com capacidade limitada de operar Distribuidor e Sistema de Movimentação das Pás do Rotor; 4) Parada da Turbina;	7			7
	-Capacidade limitada de tocar calor	-Furos no trocador (mistura e/ou perda de fluidos) -Obstrução parcial da tubulação interna; -Corrosão das paredes do trocador -Fadiga térmica -Aumento da resistência térmica (incrustações na parede)	1) Conjunto Trocador de Calor com capacidade limitada de trocar calor com o fluido hidráulico; 2) Sistema Hidráulico do Rotor e Distribuidor operando com limitação; possibilidade de vazamentos e desgaste prematuro de componentes do sistema; elevação da temperatura do fluido hidráulico; 3) Regulador com capacidade limitada de operar Distribuidor e Sistema de Movimentação das Pás do Rotor; 4) Turbina operando com potência reduzida e possibilidade de parada;	6			6

Sistema: Regulador de Velocidade
 Subsistema: Conjunto Trocador de Calor
 Componente: Tubulação de Água
 Número de Identificação: 3.1.2.2

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Encaminhar o fluido de resfriamento para o Conjunto Trocador de Calor	Ruptura	-Corrosão -Pressão elevada -Apoios subdimensionados -Soldas com defeitos -Danos às vedações/válvulas	1) Conjunto Trocador de Calor incapaz de transferir calor do fluido hidráulico para a água de resfriamento; vazão de água baixa ou nula; 2) Sistema Hidráulico do Rotor e Distribuidor operando com limitação; possibilidade de vazamentos e desgaste prematuro de componentes do sistema; elevação da temperatura do fluido hidráulico; 3) Regulador com capacidade limitada de operar Distribuidor e Sistema de Movimentação das Pás do Rotor; 4) Parada da Turbina;	7			7
	Obstrução total	-Acumulação de detritos -Obstrução do bocal de captação de água	1) Conjunto Trocador de Calor incapaz de transferir calor do fluido hidráulico para a água de resfriamento; vazão de água nula; 2) Sistema Hidráulico do Rotor e Distribuidor operando com limitação; possibilidade de vazamentos e desgaste prematuro de componentes do sistema; elevação da temperatura do fluido hidráulico; 3) Regulador com capacidade limitada de operar Distribuidor e Sistema de Movimentação das Pás do Rotor; 4) Parada da Turbina;	7			7

Sistema: Regulador de Velocidade
 Subsistema: Conjunto Trocador de Calor
 Componente: Tubulação de Água
 Número de Identificação: 3.1.2.2

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
	Obstrução Parcial	-Acumulação de detritos -Obstrução do bocal de captação de água	1) Conjunto Trocador de Calor com capacidade limitada de trocar calor com o fluido hidráulico; 2) Sistema Hidráulico do Rotor e Distribuidor operando com limitação; possibilidade de vazamentos e desgaste prematuro de componentes do sistema; elevação da temperatura do fluido hidráulico; 3) Regulador com capacidade limitada de operar Distribuidor e Sistema de Movimentação das Pás do Rotor; 4) Turbina operando com deficiências	6			6

Sistema: Regulador de Velocidade

Subsistema: Conjunto Trocador de Calor

Componente: Medidor de Vazão de Água (E/S)

Número de Identificação: 3.1.2.2

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Medir o fluxo de água no Trocador de Calor	Indica fluxo quando não há	-Falha em componente mecânico -Falha em componente elétrico	1) Possibilidade do Conjunto Trocador de Calor inoperante (possível vazamento); 2) Possibilidade do Sistema Hidráulico do Rotor e Distribuidor operando com limitação; possibilidade de vazamentos e desgaste prematuro de componentes do sistema; elevação da temperatura do fluido hidráulico; 3) Possibilidade do Regulador operando com capacidade limitada de operar Distribuidor e Sistema de Movimentação das Pás do Rotor; 4) Possibilidade da Turbina operando com deficiências	6			6
	Não indica fluxo quando há	-Falha em componente mecânico -Falha em componente elétrico	1) Conjunto Trocador de Calor operando normalmente 2) Sistema Hidráulico do Rotor e Distribuidor operando normalmente 3) Turbina operando normalmente	5			5
	Indicação intermitente	-Falha em componente mecânico -Falha em componente elétrico	1) Possibilidade do Conjunto Trocador de Calor estar inoperante; 2) Possibilidade do Regulador de Velocidade operando com deficiências; possibilidade do aumento da temperatura do fluido hidráulico; 3) Possibilidade de a Turbina estar operando com deficiências	6			6

Sistema: Regulador de Velocidade

Subsistema: Conjunto Trocador de Calor

Componente: Sensores de Temperatura da Água (E/S)

Obs.: Análise da diferença de temperatura entre a saída e a entrada

Número de Identificação: 3.1.2.3

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Medir a diferença de temperatura entre a entrada e saída de água no Trocador de Calor	Não indica a temperatura	-Instalação errada -Sensor danificado -Queima -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Conjunto Trocador de Calor operando normalmente; Possível falha do sensor; 2) Regulador de Velocidade operando normalmente 3) Turbina operando normalmente	4			4
	Indica diferença de temperatura menor que a real	-Instalação errada -Sensor danificado -Perda da calibração -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Informações incorretas sobre o Conjunto; Possibilidade do Conjunto Trocador de Calor operando com vazão de água insuficiente; 2) Possibilidade do Regulador de Velocidade operando com deficiências; 3) Possibilidade da Turbina operando com deficiências;	4			4
	Indica diferença de temperatura maior que a real	-Instalação errada -Sensor danificado -Perda da calibração -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Informações incorretas sobre o Conjunto; Possibilidade do Conjunto Trocador de Calor operando com vazão de água insuficiente; 2) Possibilidade do Regulador de Velocidade operando com deficiências; 3) Possibilidade da Turbina operando com deficiências;	4			4

Sistema: Regulador de Velocidade

Subsistema: Conjunto Trocador de Calor

Componente: Filtro Fluido Hidráulico

Obs.: Comumente em redundância (Filtro Duplex)

Número de Identificação: 3.1.2.4

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Reter partículas de dimensões maiores ou iguais ao especificado	Ruptura do elemento filtrante	-Pressões elevadas na linha -Instalação incorreta -Danos por detritos -Filtro com malha diferente do especificado	1) Conjunto Trocador de Calor operando com impurezas no fluido hidráulico maiores que a especificação; 2) Possibilidade de danos às válvulas e às bombas do Regulador; 3) Operação da turbina pouco afetada; possibilidade de flutuações da condição nominal;	4			4
	Obstrução parcial	-Impurezas no fluido hidráulico -Filtro com malha diferente do especificado -Filtro para vazão diferente da especificado	1) Conjunto Trocador de Calor operando com limitação de vazão de fluido hidráulico; 2) Elevação da temperatura de fluido hidráulico do Regulador; 3) Turbina operando com deficiências	6			6
	Entupimento do filtro	-Impurezas no fluido hidráulico -Filtro com malha diferente do especificado -Filtro para vazão diferente da especificado	1) Conjunto Trocador de Calor inoperante, sem vazão de fluido hidráulico; 2) Elevação da temperatura de fluido hidráulico do Regulador; 3) Parada da Turbina	7			7

Sistema: Regulador de Velocidade

Subsistema: Conjunto Acumulador Ar/Fluido hidráulico

Componente: Transdutor de Pressão

Número de Identificação: 3.1.3.1

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Medir a pressão do acumulador de fluido hidráulico	Não indica pressão	-Instalação errada -Sensor danificado -Queima -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Possibilidade do Conjunto Acumulador operando com pressão fora da especificada; Possibilidade do Conjunto Bomba operando indevidamente; 2) Pressão do Sistema Hidráulico duvidosa 3) Capacidade de Regulação duvidosa 4) Possibilidade de flutuações da condição nominal;	6			6
	Indica pressão acima da real	-Instalação errada -Sensor danificado -Perda de calibração -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Possibilidade do Conjunto Acumulador operando com pressão fora da especificada; Possibilidade do Conjunto Bomba não operar o suficiente para repor a pressão do Acumulador; 2) Possibilidade da pressão do Sistema Hidráulico permanecer baixa 3) Possibilidade da capacidade de Regulação estar abaixo da especificada 4) Possibilidade de flutuações da condição nominal;	6			6
	Indica pressão abaixo da real	-Instalação errada -Sensor danificado -Perda de calibração -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Possibilidade do Conjunto Acumulador operando com pressão fora da especificada; Possibilidade do Conjunto Bomba operar mais que o suficiente para repor a pressão do Acumulador; 2) Possibilidade da pressão do Sistema Hidráulico permanecer alta 3) Possibilidade da capacidade de Regulação estar acima da especificada 4) Possibilidade de flutuações da condição nominal;	6			6

Sistema: Regulador de Velocidade

Subsistema: Conjunto Acumulador Ar/Fluido hidráulico

Componente: Acumulador Ar/Fluido hidráulico

Número de Identificação: 3.1.3.2

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Acumular um volume de fluido hidráulico pressurizado	Ruptura	-Pressão armazenada elevada -Ruptura por ação externa -Corrosão -Fadiga -Falha de projeto ou fabricação	1) Conjunto Acumulador operando sem pressão e volume de fluido hidráulico conforme especificado; Conjunto Bomba operando indevidamente; Vazamento de fluido hidráulico; 2) Sistema Hidráulico incapaz de manter a pressão da linha 3) Regulador de Velocidade inoperante 4) Parada da Turbina	9			9
	Incapacidade de manter pressão de fluido hidráulico	-Vazamento de ar pelas conexões -Ruptura por ação externa -Corrosão -Falhas nas soldas de união -Falha de projeto ou fabricação	1) Conjunto Acumulador operando com pressão fora da especificada; Conjunto Bomba operando indevidamente; 2) Sistema Hidráulico incapaz de manter a pressão da linha 3) Regulador de Velocidade inoperante 4) Parada da Turbina	8			8
	Incapacidade de manter o volume de fluido hidráulico	-Vazamento de fluido hidráulico pelas conexões -Ruptura por ação externa -Corrosão -Falhas nas soldas de união -Falha de projeto ou fabricação	1) Conjunto Acumulador operando com volume de fluido hidráulico fora do especificado; Conjunto Bomba operando indevidamente; 2) Sistema Hidráulico incapaz de manter a alimentação de fluido hidráulico linha; presença de ar na linha 3) Regulador de Velocidade inoperante 4) Parada da Turbina	8			8

Sistema: Regulador de Velocidade

Subsistema: Conjunto Acumulador Ar/Fluido hidráulico

Componente: Filtro de Fluido Hidráulico

Obs.: Comumente em redundância (Filtro Duplex)

Número de Identificação: 3.1.3.3

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Reter partículas de dimensões maiores ou iguais ao especificado	Ruptura do elemento filtrante	-Pressões elevadas na linha -Instalação incorreta -Danos por detritos -Filtro com malha diferente do especificado	1) Conjunto Acumulador operando com impurezas no fluido maiores que a especificação; 2) Possibilidade de danos às válvulas e às bombas do Regulador; 3) Operação da turbina pouco afetada; possibilidade de flutuações da condição nominal;	4			4
	Obstrução parcial	-Impurezas no fluido hidráulico -Filtro com malha diferente do especificado -Filtro para vazão diferente da especificado	1) Conjunto Acumulador operando com limitação de vazão de fluido hidráulico; 2) Regulador de Velocidade operando com capacidade limitada; 3) Possível parada da Turbina	6			6
	Entupimento do filtro	-Impurezas no fluido hidráulico -Filtro com malha diferente do especificado -Filtro para vazão diferente da especificado	1) Conjunto Acumulador operando sem vazão de fluido hidráulico; 2) Regulador de Velocidade incapaz de operar; 3) Parada da Turbina	7			7

Sistema: Regulador de Velocidade

Subsistema: Sistema Hidráulico do Rotor e Distribuidor

Componente: Conjunto Bomba

Obs.: Comumente em redundância

Número de Identificação: 3.1.4

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Converter energia elétrica em energia fluídica numa pressão e vazão requerida	Não há transformação de energia elétrica em energia fluídica	-Desgaste da bomba por cavitação -Bloqueio do lado sucção ou pressão -Ruptura do rotor -Queima do enrolamento -Instalação errada -Falha nos mancais do Conjunto Bomba -Falha na fiação -Falha do conjunto (por outras razões)	1) Conjunto Bomba inoperante; queda do nível de fluido hidráulico do Conjunto Acumulador; 2) Sistema Hidráulico Rotor e Distribuidor operando com limitações; 3) Regulador de Velocidades operando com limitações de volume de fluido hidráulico e pressão; fechamento do distribuidor; 4) Parada da turbina	7			8
	Há transformação parcial de energia elétrica em energia fluídica	-Desgaste da bomba por cavitação -Bloqueio parcial do lado sucção ou pressão da Bomba; -Falha nos mancais do Conjunto Bomba -Falha na fiação -Falha do conjunto (por outras razões)	1) Conjunto Bomba inoperante; queda do nível de fluido hidráulico do Conjunto Acumulador; 2) Sistema Hidráulico Rotor e Distribuidor operando com limitações; 3) Regulador de Velocidades operando com limitações de volume de fluido hidráulico e pressão; 4) Turbina operando com deficiências	6			6

Sistema: Regulador de Velocidade

Subsistema: Sistema Hidráulico do Rotor e Distribuidor

Componente: Sistema Pêndulo de Segurança

Número de Identificação: 3.1.5

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Impor um limite superior para a velocidade de rotação da Turbina, abaixo da velocidade de disparo	Atuação acima da velocidade disparo	-Falha no sensor de velocidade -Perda de regulação/regulação incorreta -Falha em válvula de comando -Outras falhas	1) Sistema Hidráulico operando com falha em dispositivo de segurança (falha escondida); 2) Regulador operando com falha em dispositivo de segurança (falha escondida); 3) Possibilidade de a turbina atingir a velocidade disparo;	8			8
	Não atua em nenhuma faixa de velocidades	-Falha no sensor de velocidade -Perda de regulação/regulação incorreta -Falha em válvula de comando -Outras falhas	1) Sistema Hidráulico operando com falha em dispositivo de segurança (falha escondida); 2) Regulador operando com falha em dispositivo de segurança (falha escondida); 3) Possível impossibilidade de parar a Turbina em caso de emergência; turbina atinge a velocidade disparo;	8			8
	Atuação muito abaixo da velocidade de disparo	-Falha no sensor de velocidade -Perda de regulação/regulação incorreta -Falha em válvula de comando -Outras falhas	1) Sistema Hidráulico operando com falha em dispositivo de segurança (falha escondida); 2) Regulador operando com falha em dispositivo de segurança (falha escondida); 3) Parada indevida da turbina em rejeição de carga;	7			7

Sistema: Regulador de Velocidade

Subsistema: Conjunto Reservatório

Componente: Reservatório

Número de Identificação: 3.1.6.1

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Prover um volume adequado e isolado do ambiente para armazenamento do fluido hidráulico	Capacidade parcial de armazenar o fluido hidráulico	-Corrosão da Parede -Vazamento nas conexões do circuito -Ruptura por ação externa -Falha nas uniões soldadas	1) Sistema Hidráulico operando com limitação de volume de fluido hidráulico; limitação de fornecimento de energia fluídica; 2) Regulador operando com deficiências 3) Turbina operando com deficiências	5			5
	Contaminação do fluido hidráulico	-Corrosão da parede do reservatório -Acúmulo de sedimentos no fundo do Reservatório	1) Sistema Hidráulico operando com fluido hidráulico fora das especificações do fabricante; possibilidade de danos ao Conjunto Bomba e Válvulas; 2) Regulador operando com deficiências 3) Turbina operando com deficiências	6			6

Sistema: Regulador de Velocidade

Subsistema: Conjunto Reservatório

Componente: Respiro e Filtro de Ar

Número de Identificação: 3.1.6.2

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Permitir a entrada ou saída de ar limpo, conforme mudança do nível de fluido hidráulico	Ruptura do elemento filtrante	-Danos por ação externa -Instalação incorreta -Danos por detritos -Filtro com malha diferente do especificado	1) Conjunto Reservatório operando normalmente; entrada de impurezas no reservatório; 2) Presença de impureza no fluido hidráulico do Sistema Hidráulico; 3) Regulador operando normalmente; 4) Turbina operando normalmente;	3			3
	Obstrução total do respiro/filtro	-Impurezas no ar -Filtro com malha diferente do especificado	1) Conjunto Reservatório resiste a variações do volume de fluido hidráulico; 2) Sistema Hidráulico operando o Conjunto Bomba com potência superior; 3) Regulador operando com eficiência menor; 4) Turbina operando com eficiência menor;	3			3
	Obstrução parcial do respiro/filtro	-Impurezas no ar -Filtro com malha diferente do especificado	1) Conjunto Reservatório resiste a variações do volume de fluido hidráulico; 2) Sistema Hidráulico operando o Conjunto Bomba com potência superior; 3) Regulador operando eficiência menor; 4) Turbina operando com eficiência menor;	3			3

Sistema: Regulador de Velocidade

Subsistema: Conjunto Reservatório

Componente: Chaveador de Nível

Número de Identificação: 3.1.6.3

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Indicar quando o volume de fluido hidráulico no reservatório atingir níveis críticos	Não indica o volume	-Instalação errada -Sensor danificado -Queima -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Conjunto Reservatório operando normalmente; Possível falha do sensor; 2) Sistema Hidráulico do Rotor e Distribuidor operando normalmente 3) Regulador de Velocidade operando normalmente 4) Turbina operando normalmente	4			4
	Indica volume superior ao real	-Instalação errada -Sensor danificado -Perda da calibração -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Informações incorretas sobre o Conjunto; Possibilidade do Conjunto Reservatório operando com volume de fluido hidráulico inferior ao especificado; 2) Possibilidade de falta de fluido hidráulico no Sistema Hidráulico 3) Possibilidade da capacidade de regulação estar limitada; 4) Possibilidade da Turbina operando com limitações;	4			4
	Indica volume menor que o real	-Instalação errada -Sensor danificado -Perda da calibração -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Informações incorretas sobre o Conjunto; Possibilidade do Conjunto Reservatório operando com volume de fluido hidráulico superior ao especificado; 2) Possibilidade do Sistema Hidráulico operando normalmente; 3) Possibilidade da capacidade de regulação estar limitada; 4) Possibilidade da Turbina operando com limitações;	4			4

Sistema: Regulador de Velocidade

Subsistema: Conjunto Reservatório

Componente: Sensor de Temperatura Reservatório

Número de Identificação: 3.1.6.4

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Medir a temperatura de fluido hidráulico no Reservatório	Não indica a temperatura	-Instalação errada -Sensor danificado -Queima -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Conjunto Reservatório operando normalmente; Possível falha no sensor; 2) Sistema Hidráulico operando normalmente; 3) Regulador operando normalmente; 4) Turbina operando normalmente;	3			3
	Indica temperatura menor que a real	-Instalação errada -Sensor danificado -Perda da calibração -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Conjunto Reservatório operando com falha escondida; Elevação da temperatura real do fluido hidráulico; 2) Possibilidade do Sistema Hidráulico operando com deficiências; 3) Possibilidade do Regulador operando com deficiências; 4) Possibilidade da Turbina operando com deficiências;	4			4
	Indica temperatura maior que a real	-Instalação errada -Sensor danificado -Perda da calibração -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Conjunto Reservatório operando com falha escondida; Aumento da frequência de acionamento do Conjunto Bomba; 2) Sistema Hidráulico operando normalmente; 3) Regulador operando normalmente; 4) Turbina operando normalmente;	3			3

Sistema: Regulador de Velocidade

Subsistema: Sistema Hidráulico do Rotor e Distribuidor

Componente: Sistema de Isolamento

Número de Identificação: 3.1.7

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Isolar parte do Sistema Hidráulico para manutenção ou segurança	Incapacidade de isolar	-Danos às válvulas de controle do sistema de isolamento -Válvula de isolamento travada (manualmente ou emperrada) -Outras falhas	1) Quando em operação, Turbina operando normalmente; 2) Quando em manutenção, refluxo em caso de fluido hidráulico do Sistema Hidráulico	4			4
	Isolamento parcial	-Danos às válvulas de controle do sistema de isolamento -Válvula de isolamento travada (manualmente ou emperrada) -Outras falhas	1) Quando em operação, Turbina operando normalmente; 2) Quando em manutenção, refluxo em caso de fluido hidráulico do Sistema Hidráulico	4			4
	Isolamento indevido	-Danos às válvulas de controle do sistema de isolamento -Válvula de isolamento travada (manualmente ou emperrada) -Outras falhas	1) Parada da Turbina por perda de fluxo do Sistema Hidráulico do Regulador;	7			7

Sistema: Regulador de Velocidade

Subsistema: Sistema Hidráulico do Rotor e Distribuidor

Componente: Válvula Proporcional Distribuidor (Piloto)

Número de Identificação: 3.1.8

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Comandar o estado da Válvula Reguladora do Distribuidor (Comandada)	Incapacidade de comandar	-Presença de ar na válvula ou na linha; -Válvula emperrada; -Falha no solenóide; -Desgaste de componente mecânico.; -Outras falhas;	1) Sistema Hidráulico incapaz de comandar o Distribuidor; 2) Regulador de Velocidade inoperante; 3) Parada da Turbina	7			7
	Comando parcial	-Presença de ar na válvula ou na linha; -Válvula emperrada; -Falha no solenóide; -Desgaste de componente mecânico.; -Outras falhas;	1) Sistema Hidráulico com capacidade limitada de comandar o Distribuidor; 2) Regulador de Velocidade operando com deficiências; 3) Turbina operando com baixo rendimento e possibilidade de parada	6			6

Sistema: Regulador de Velocidade

Subsistema: Sistema Hidráulico do Rotor e Distribuidor

Componente: Válvula Reguladora Distribuidor (Comandada)

Número de Identificação: 3.1.9

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Estabelecer o fluxo de fluido hidráulico para os Servomotores do Distribuidor	Incapacidade de regular	-Presença de ar na válvula ou na linha; -Válvula emperrada; -Falha no solenóide; -Desgaste de componente mecânico.; -Outras falhas;	1) Sistema Hidráulico incapaz de regular o Distribuidor; 2) Regulador de Velocidade inoperante; 3) Parada da Turbina	7			7
	Regulagem Parcial	-Presença de ar na válvula ou na linha; -Válvula emperrada; -Falha no solenóide; -Desgaste de componente mecânico.; -Outras falhas;	1) Sistema Hidráulico com capacidade limitada de regular o Distribuidor; 2) Regulador de Velocidade operando com deficiências; 3) Turbina operando com baixo rendimento e possibilidade de parada	6			6

Sistema: Regulador de Velocidade

Subsistema: Sistema Hidráulico do Rotor e Distribuidor

Componente: Válvula Proporcional Sistema de Movimentação das Pás do Rotor (Piloto)

Número de Identificação: 3.1.10

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Comandar o estado da Válvula Reguladora Sistema de Movimentação das Pás do Rotor (Comandada)	Incapacidade de comandar	-Presença de ar na válvula ou na linha; -Válvula emperrada; -Falha no solenóide; -Desgaste de componente mecânico.; -Outras falhas;	1) Sistema Hidráulico incapaz de comandar o Rotor; 2) Regulador de Velocidade inoperante; 3) Parada da Turbina	7			7
	Comando parcial	-Presença de ar na válvula ou na linha; -Válvula emperrada; -Falha no solenóide; -Desgaste de componente mecânico.; -Outras falhas;	1) Sistema Hidráulico com capacidade limitada de comandar o Rotor; 2) Regulador de Velocidade operando com deficiências; 3) Turbina operando com baixo rendimento e possibilidade de parada	6			6

Sistema: Regulador de Velocidade

Subsistema: Sistema Hidráulico do Rotor e Distribuidor

Componente: Válvula Reguladora Sistema de Movimentação das Pás do Rotor
(Comandada)

Número de Identificação: 3.1.11

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Estabelecer o fluxo de fluido hidráulico para Cilindro do Sistema de Movimentação das Pás do Rotor	Incapacidade de regular	-Presença de ar na válvula ou na linha; -Válvula emperrada; -Falha no solenóide; -Desgaste de componente mecânico.; -Outras falhas;	1) Sistema Hidráulico incapaz de regular o Rotor; 2) Regulador de Velocidade inoperante; 3) Parada da Turbina	7			7
	Regulagem Parcial	-Presença de ar na válvula ou na linha; -Válvula emperrada; -Falha no solenóide; -Desgaste de componente mecânico.; -Outras falhas;	1) Sistema Hidráulico com capacidade limitada de regular o Rotor; 2) Regulador de Velocidade operando com deficiências; 3) Turbina operando com baixo rendimento e possibilidade de parada	6			6

Sistema: Regulador de Velocidade

Subsistema: Sistema Hidráulico do Rotor e Distribuidor

Componente: Fluido Hidráulico

Número de Identificação: 3.1.12

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Reduzir o atrito de componentes mecânicos com movimento relativo entre si Formar e manter capacidade de lubrificação em toda faixa operativa Ter compressibilidade baixa em toda faixa operativa	Incapacidade de reduzir o atrito ou ter baixa a compressibilidade	-Formação de espuma -Fluido vencido -Uso de fluido incorreto -Oxidação -Contaminação do fluido -Aumento da compressibilidade	1) Sistema Hidráulico com capacidade limitada de regular o Rotor; 2) Regulador de Velocidade operando com deficiências; 3) Turbina operando com deficiências	6			6

Sistema: Regulador de Velocidade

Subsistema: Sistema de Movimentação das Pás do Rotor

Componente: Êmbolo

Número de Identificação: 3.2.1

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Isolar as duas câmaras do Cilindro, permitindo a existência de um diferencial de pressão hidráulica	Ruptura do êmbolo	-Sobrecarga (Montagem incorreta, desalinhamento do cilindro/êmbolo) -Propagação de trinca devido à fadiga -Falha de Projeto/Fabricação (esforços subdimensionados, material incorreto, fora das tolerâncias ou acabamento)	1) Sistema de Movimentação das Pás do Rotor inoperante; vazamento de fluido hidráulico; 2) Regulador de Velocidades com deficiências 3) Parada da Turbina	8			8
	Deformação permanente do êmbolo	-Sobrecarga (Montagem incorreta, desalinhamento do cilindro/êmbolo) -Falha de Projeto/Fabricação (esforços subdimensionados, material incorreto, fora das tolerâncias ou acabamento)	1) Sistema de Movimentação das Pás do Rotor inoperante; possível vazamento de fluido hidráulico; 2) Regulador de Velocidades com deficiências 3) Possibilidade de parada da Turbina	7			7
	Folga radial excessiva	-Dano à parede externa -Desgaste Vedação Cilindro -Montagem Incorreta -Falha na fabricação -Falha no projeto	1) Sistema de Movimentação das Pás do Rotor com capacidade limitada de atuação; possível vazamento de fluido hidráulico; 2) Regulador de Velocidades com deficiências 3) Turbina deficiente (possível parada)	7			7

Sistema: Regulador de Velocidade

Subsistema: Sistema de Movimentação das Pás do Rotor

Componente: Cilindro

Número de Identificação: 3.2.2

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Converter a força hidráulica em movimento linear	Ruptura do Cilindro	-Sobrecarga (Montagem incorreta, desalinhamento do cilindro/êmbolo) -Propagação de trinca devido à fadiga -Falha de Projeto/Fabricação (esforços subdimensionados, material incorreto, fora das tolerâncias ou acabamento)	1) Sistema de Movimentação das Pás do Rotor inoperante; vazamento de fluido hidráulico; 2) Regulador de Velocidades com deficiências 3) Parada da Turbina	8			8
	Deformação permanente do Cilindro	-Sobrecarga (Montagem incorreta, desalinhamento do cilindro/êmbolo) -Falha de Projeto/Fabricação (esforços subdimensionados, material incorreto, fora das tolerâncias ou acabamento)	1) Sistema de Movimentação das Pás do Rotor inoperante; possível vazamento de fluido hidráulico; 2) Regulador de Velocidades com deficiências 3) Possibilidade de parada da Turbina	7			7
	Folga radial excessiva	-Dano à parede interna -Desgaste Vedação Cubo -Montagem Incorreta -Falha na fabricação -Falha no projeto	1) Sistema de Movimentação das Pás do Rotor com capacidade limitada de atuação; possível vazamento de fluido hidráulico; 2) Regulador de Velocidades com deficiências 3) Turbina deficiente (possível parada)	7			7

Sistema: Regulador de Velocidade

Subsistema: Sistema de Movimentação das Pás do Rotor

Componente: Biela

Número de Identificação: 3.2.3

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Transferir a força do Cilindro para a Pá do Rotor (como torque)	Ruptura da Biela	-Sobrecarga (Montagem incorreta, desalinhamento da Biela com o Cilindro ou Pá) -Propagação de trinca devido à fadiga -Falha de Projeto/Fabricação (esforços subdimensionados, material incorreto, fora das tolerâncias ou acabamento)	1) Sistema de Movimentação das Pás do Rotor inoperante; vazamento de fluido hidráulico; 2) Regulador de Velocidades com deficiências 3) Parada da Turbina	8			8
	Deformação permanente da Biela	-Sobrecarga (Montagem incorreta, desalinhamento da Biela com o Cilindro ou Pá) -Falha de Projeto/Fabricação (esforços subdimensionados, material incorreto, fora das tolerâncias ou acabamento)	1) Sistema de Movimentação das Pás do Rotor inoperante; possível vazamento de fluido hidráulico; 2) Regulador de Velocidades com deficiências 3) Possibilidade de parada da Turbina	7			7

Sistema: Regulador de Velocidade

Subsistema: Sistema de Movimentação das Pás do Rotor

Componente: Haste de Posição

Número de Identificação: 3.2.4

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Movimentar-se verticalmente de acordo com o cilindro	Ruptura da Haste ou desacoplamento	-Sobrecarga (Montagem incorreta, atrito elevado na movimentação, travamento da haste) -Propagação de trinca devido à fadiga -Desacoplamento com cilindro ou entre os segmentos da Haste -Outras falhas	1) Sistema de Movimentação das Pás do Rotor incapaz de detectar posição angular das Pás 2) Regulador de Velocidades incapaz de posicionar angularmente as Pás do Rotor 3) Parada da Turbina	7			8
	Deformação permanente da Haste	-Sobrecarga (Montagem incorreta, atrito elevado na movimentação, ravamento da haste, flambagem) -Outras falhas	1) Sistema de Movimentação das Pás do Rotor incapaz de detectar com precisão posição angular das Pás 2) Regulador de Velocidades incapaz de posicionar com precisão angularmente as Pás do Rotor 3) Turbina operando com baixa eficiência	6			6
	Folga axial	-Vibração excessiva -Aerto insuficiente dos parafusos -Deformação elástica excessiva	1) Sistema de Movimentação das Pás do Rotor incapaz de detectar com precisão posição angular das Pás 2) Regulador de Velocidades incapaz de posicionar com precisão angularmente as Pás do Rotor 3) Turbina operando com baixa eficiência	6			6

Sistema: Regulador de Velocidade

Subsistema: Sistema de Movimentação das Pás do Rotor

Componente: Transdutor de Posição Angular

Número de Identificação: 3.2.5

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Transformar o movimento vertical da Haste de Posição em abertura angular das Pás do Rotor	Não indica angulação	-Instalação errada -Sensor danificado -Queima -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Sistema de Movimentação das Pás do Rotor incapaz de detectar posição angular das Pás 2) Regulador de Velocidades incapaz de posicionar angularmente as Pás do Rotor 3) Turbina operando com baixa eficiência	7			7
	Indica angulação maior que a real	-Instalação errada -Sensor danificado -Perda da calibração -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Sistema de Movimentação das Pás do Rotor incapaz de detectar com precisão posição angular das Pás 2) Regulador de Velocidades incapaz de posicionar com precisão angularmente as Pás do Rotor 3) Turbina operando com baixa eficiência	6			6
	Indica angulação menor que a real	-Instalação errada -Sensor danificado -Perda da calibração -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Sistema de Movimentação das Pás do Rotor incapaz de detectar com precisão posição angular das Pás 2) Regulador de Velocidades incapaz de posicionar com precisão angularmente as Pás do Rotor 3) Turbina operando com baixa eficiência	6			6

Sistema: Regulador de Velocidade

Subsistema: Distribuidor

Componente: Palhetas

Número de Identificação: 3.3.1

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Modificar a área da seção transversal do escoamento	Ruptura	-Sobrecarga (Montagem incorreta, travamento do mecanismo sem atuação do dispositivo de segurança) -Propagação de trinca devido à fadiga -Defeitos de fabricação (fundição) -Vibração auto-excitada -Material inadequado -Falha de projeto	1) Distribuidor com deficiências de acionar o mecanismo; possibilidade de quebra em cascata; outros componentes do mecanismo em sobrecarga; vazamento excessivo quando fechado; 2) Regulador com impossibilidade de controlar o fluxo; 3) Parada da Turbina	8			8
	Deformação permanente	-Sobrecarga (Montagem incorreta, travamento do mecanismo sem atuação do dispositivo de segurança) -Defeitos de fabricação (fundição) -Vibração auto-excitada -Material inadequado -Falha de projeto	1) Distribuidor com deficiências de acionar o mecanismo; outros componentes do mecanismo em sobrecarga; vazamento excessivo quando fechado; 2) Regulador com deficiências para controlar o fluxo; 3) Parada da Turbina	8			8
	Perda do perfil hidráulico	-Desgaste Abrasivo -Material inadequado -Falha de projeto/fabricação	1) Distribuidor com vazamento excessivo quando fechado; vibrações no mecanismo; sobrecarga do mecanismo; 2) Regulador com deficiências; 3) Turbina operando com rendimento baixo e vibrações;	6			6

Sistema: Regulador de Velocidade

Subsistema: Distribuidor

Componente: Transdutor de Posição (Linear)

Número de Identificação: 3.3.2

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Registrar o movimento linear do servomotor	Não indica posição	-Instalação errada -Sensor danificado -Queima -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Distribuidor incapaz de detectar posição angular das Palhetas do Distribuidor; Possibilidade de acionamento do dispositivo de segurança ou dificuldades de fechamento do distribuidor; 2) Regulador de Velocidades incapaz de posicionar as Palhetas do Distribuidor corretamente; 3) Parada da Turbina;	7			7
	Indica posição maior que a real	-Instalação errada -Sensor danificado -Perda da calibração -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Distribuidor incapaz de determinar com precisão posição angular das Palhetas do Distribuidor; Possibilidade do fechamento do distribuidor comprometido; 2) Regulador de Velocidades incapaz de posicionar as Palhetas do Distribuidor corretamente; 3) Turbina operando com baixa eficiência	6			6
	Indica posição menor que a real	-Instalação errada -Sensor danificado -Perda da calibração -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Distribuidor incapaz de determinar com precisão posição angular das Palhetas do Distribuidor; Possibilidade de acionamento do dispositivo de segurança do Distribuidor; 2) Regulador de Velocidades incapaz de posicionar as Palhetas do Distribuidor corretamente; 3) Turbina operando com baixa eficiência	6			6

Sistema: Regulador de Velocidade

Subsistema: Distribuidor

Componente: Servomotor

Número de Identificação: 3.3.3

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Converter a força hidráulica em movimento linear	Ruptura do Cilindro/Haste	-Sobrecarga (Montagem incorreta, desalinhamento do cilindro/êmbolo); -Flambagem; -Propagação de trinca devido à fadiga -Falha de Projeto/Fabricação (esforços subdimensionados, material incorreto, fora das tolerâncias ou acabamento);	1) Distribuidor inoperante; vazamento de fluido hidráulico; 2) Regulador de Velocidades com deficiências 3) Parada da Turbina	8			8
	Deformação permanente do Cilindro/Haste	-Sobrecarga (Montagem incorreta, desalinhamento do cilindro/êmbolo); -Flambagem -Falha de Projeto/Fabricação (esforços subdimensionados, material incorreto, fora das tolerâncias ou acabamento);	1) Distribuidor inoperante; vazamento de fluido hidráulico; 2) Regulador de Velocidades com deficiências 3) Parada da Turbina	7			7
	Folga radial excessiva	-Dano à parede interna -Desgaste vedação -Montagem Incorreta -Falha na fabricação -Falha no projeto	1) Distribuidor operando com deficiências; vazamento de fluido hidráulico; redução da força axial do servomotor 2) Regulador de Velocidades com deficiências 3) Possibilidade de parada da Turbina	6			6

Sistema: Regulador de Velocidade

Subsistema: Distribuidor

Componente: Servomotor

Número de Identificação: 3.3.3

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
	Ar no cilindro	-Instalação incorreta do servomotor -Desgaste vedação	1) Distribuidor operando com deficiências; 2) Regulador de Velocidades com deficiências 3) Possibilidade de parada da Turbina	6			6
	Travamento da rótula	-Instalação incorreta do servomotor -Desgaste -Falta de lubrificação	1) Distribuidor operando com deficiências; sobrecarga no Mecanismo 2) Regulador de Velocidades com deficiências 3) Possibilidade de parada da Turbina	6			6

Sistema: Regulador de Velocidade

Subsistema: Distribuidor

Componente: Mecanismo de Regulação

Número de Identificação: 3.3.4

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Movimentar uniformemente as palhetas em função do deslocamento do servomotor	Ruptura do mecanismo	-Sobrecarga (Montagem incorreta, desalinhamento) -Propagação de trinca devido à fadiga -Falha de Projeto/Fabricação (esforços subdimensionados, material incorreto, fora das tolerâncias ou acabamento)	1) Distribuidor inoperante; Possível funcionamento do dispositivo de segurança; 2) Regulador de Velocidades com deficiências 3) Parada da Turbina	7			7
	Deformação do mecanismo	-Sobrecarga (Montagem incorreta, desalinhamento) -Falha de Projeto/Fabricação (esforços subdimensionados, material incorreto, fora das tolerâncias ou acabamento)	3) Distribuidor inoperante; Possível funcionamento do dispositivo de segurança; 4) Regulador de Velocidades com deficiências 5) Parada da Turbina	7			7

Sistema: Regulador de Velocidade

Subsistema: Distribuidor

Componente: Buchas (Mancais)

Número de Identificação: 3.3.5

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Permitir o movimento do Mecanismo de Regulação com o mínimo de atrito	Cisalhamento da bucha	-Instalação incorreta -Falha de Projeto /Fabricação do Mecanismo (Desalinhamento excessivo do mecanismo, esforços subdimensionados, fora das tolerâncias ou acabamento) -Bucha inapropriada para esta aplicação (alto coeficiente de atrito, baixas pressões admissíveis)	1) Distribuidor com deficiências de movimentar mecanismo; 2) Regulador de Velocidades com deficiências 3) Possibilidade de parada da Turbina	6			6
	Desgaste localizado	-Instalação incorreta - Falha de Projeto /Fabricação do Mecanismo (Desalinhamento excessivo do mecanismo, esforços subdimensionados, fora das tolerâncias ou acabamento) -Bucha inapropriada para esta aplicação (alto coeficiente de atrito, baixas pressões admissíveis)	1) Distribuidor com deficiências de movimentar mecanismo; 2) Regulador de Velocidades com deficiências 3) Possibilidade de parada da Turbina	6			6

Sistema: Regulador de Velocidade

Subsistema: Distribuidor

Componente: Sistema Travas

Número de Identificação: 3.3.6

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Interromper a movimentação do servomotor (quando da parada da turbina)	Incapacidade de travar o mecanismo	-Servomotor não atinge o fim de curso -Falha no sistema hidráulico de comando das travas	1) Quando em operação, sem efeito potencial no funcionamento da turbina 2) Quando em parada, sem travamento manual e risco de acidentes	5			5
	Travamento quando em operação	-Falha no sistema hidráulico de comando das travas -Acionamento manual (indevido)	1) Sobrecarga no mecanismo do distribuidor (servomotor não bloqueado); 2) Regulador inoperante, travado; 3) Parada da turbina	7			7

Sistema: Vedação do Eixo

Subsistema: Sistema Vedação de Manutenção (Parada)

Componente: Tubulação de Ar (Comprimido)

Número de Identificação: 5.1.1

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Encaminhar o ar para pressurização da guarnição	Ruptura	-Corrosão -Pressão elevada -Apoios subdimensionados -Soldas com defeitos	1) Quando da turbina operando normalmente, sem efeito potencial; 2) Quando da parada da turbina, impossibilidade de pressurizar a guarnição, vazamento da vedação do eixo, possibilidade de elevação de nível no poço da turbina;	5			5
	Obstrução total	-Acumulação de detritos -Obstrução do bocal de captação de ar	1) Quando da turbina operando normalmente, sem efeito potencial; 2) Quando da parada da turbina, impossibilidade de pressurizar a guarnição, vazamento da vedação do eixo, possibilidade de elevação de nível no poço da turbina;	4			4
	Obstrução Parcial	-Acumulação de detritos -Obstrução do bocal de captação de água	1) Quando da turbina operando normalmente, sem efeito potencial; 2) Quando da parada da turbina, pressurização parcial ou demorada da guarnição, vazamento da vedação do eixo, possibilidade de elevação de nível no poço da turbina;	3			3

Sistema: Rotor

Subsistema:

Componente: Ogiva

Número de Identificação: 4.1

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Prover um ambiente isolado da água para o Sistema de Movimentação das Pás do Rotor Guiar o Cilindro do Sistema de Movimentação das Pás do Rotor	Ruptura	-Sobrecarga (Montagem incorreta, desalinhamento) -Propagação de trinca devido à fadiga -Falha de Projeto/Fabricação (esforços subdimensionados, material incorreto, fora das tolerâncias ou acabamento)	3) Rotor com deficiências. vibrações do conjunto girante; vazamento de óleo; 4) Parada da Turbina;	7			7
	Deformação permanente	-Sobrecarga (Montagem incorreta, desalinhamento) -Falha de Projeto/Fabricação (esforços subdimensionados, material incorreto, fora das tolerâncias ou acabamento)	1) Rotor com deficiências. vibrações do conjunto girante; 2) Parada da Turbina	6			6
	Perda da Isolação	-Corrosão (Rompimento da proteção contra umidade, material inadequado) -Erosão -Falha na vedação	1) Entrada de umidade dentro do rotor; 2) Possibilidade de danos a outros componentes do Rotor e do Sistema de Movimentação das Pás do Rotor; dificuldades de regulação das Pás 3) Possibilidade de Parada	6			6

Sistema: Rotor

Subsistema:

Componente: Pás Kaplan

Número de Identificação: 4.2

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Converter a energia hidráulica em mecânica	Ruptura	-Sobrecarga (Montagem incorreta, operação em regime não especificado) -Propagação de trinca devido à fadiga ou cavitação -Defeitos de fabricação (fundição) -Vibração auto-excitada -Material inadequado -Falha de projeto	1) Rotor inoperante; vibrações excessivas 2) Parada da Turbina;	8			8
	Deformação permanente	-Sobrecarga (Montagem incorreta, operação em regime não especificado) -Defeitos de fabricação (fundição) -Vibração auto-excitada -Material inadequado -Falha de projeto	1) Rotor com deficiências; vibrações excessivas 2) Parada da Turbina;	7			7
	Perda do perfil hidráulico	-Desgaste Abrasivo -Desgaste Cavitação -Material inadequado -Falha de projeto/fabricação	1) Rotor vibrando e com baixo rendimento 2) Turbina operando com rendimento baixo e vibrações;	6			6

Sistema: Rotor

Subsistema:

Componente: Cubo

Número de Identificação: 4.3

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Prover um ambiente isolado da água para o Sistema de Movimentação das Pás do Rotor Transmitir esforços hidráulicos e do Sistema de Movimentação das Pás do Rotor para o Eixo Guiar o Cilindro do Sistema de Movimentação das Pás do Rotor e as Pás Kaplan	Ruptura	-Sobrecarga (Montagem incorreta, desalinhamento) -Propagação de trinca devido à fadiga -Falha de Projeto/Fabricação (esforços subdimensionados, material incorreto, fora das tolerâncias ou acabamento)	1) Rotor com deficiências; vibrações do conjunto girante; 2) Parada da Turbina	8			8
	Deformação permanente	-Sobrecarga (Montagem incorreta, desalinhamento) -Falha de Projeto/Fabricação (esforços subdimensionados, material incorreto, fora das tolerâncias ou acabamento)	1) Rotor com deficiências; vibrações do conjunto girante; 2) Parada da Turbina	7			7
	Perda da Isolação	-Corrosão (Rompimento da proteção contra umidade, material inadequado) -Erosão -Falha na vedação	1) Entrada de umidade dentro do rotor; 2) Possibilidade de danos a outros componentes do Rotor e do Sistema de Movimentação das Pás do Rotor; dificuldades de regulação das Pás 3) Possibilidade de Parada	6			6

Sistema: Rotor

Subsistema:

Componente: Buchas (Mancais)

Número de Identificação: 4.4

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Permitir o movimento do Mecanismo de Regulação com o mínimo de atrito	Cisalhamento da bucha	-Instalação incorreta -Falha de Projeto /Fabricação do Mecanismo (Desalinhamento excessivo do mecanismo, esforços subdimensionados, fora das tolerâncias ou acabamento) -Bucha inapropriada para esta aplicação (alto coeficiente de atrito, baixas pressões admissíveis)	1) Rotor com deficiências; dificuldades de regulação das Pás 2) Possibilidade de parada da Turbina	6			6
	Desgaste	-Instalação incorreta - Falha de Projeto /Fabricação do Mecanismo (Desalinhamento excessivo do mecanismo, esforços subdimensionados, fora das tolerâncias ou acabamento) -Bucha inapropriada para esta aplicação (alto coeficiente de atrito, baixas pressões admissíveis)	1) Rotor com deficiências; dificuldades de regulação das Pás 2) Possibilidade de parada da Turbina	6			6

Sistema: Vedação do Eixo

Subsistema: Sistema Vedação de Manutenção (Parada)

Componente: Válvula de Comando

Número de Identificação: 5.1.2

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Comandar o acionamento do Sistema Vedação de Manutenção	Incapacidade de comandar	-Válvula emperrada; -Falha no solenóide; -Desgaste de componente mecânico.; -Outras falhas;	1) Quando turbina operando normalmente, sem efeito potencial; 2) Quando da parada da turbina, impossibilidade de pressurizar a guarnição, vazamento da vedação do eixo, possibilidade de elevação de nível no poço da turbina;	5			5
	Comando parcial	-Válvula emperrada; -Falha no solenóide; -Desgaste de componente mecânico.; -Outras falhas;	1) Quando turbina operando normalmente, sem efeito potencial; 2) Quando da parada da turbina, pressurização parcial ou demorada da guarnição, vazamento da vedação do eixo, possibilidade de elevação de nível no poço da turbina;	4			4

Sistema: Vedação do Eixo

Subsistema: Sistema Vedação de Manutenção (Parada)

Componente: Guarnição

Número de Identificação: 5.1.3

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Vedar o Eixo por contato mecânico sob pressão	Incapacidade de vedar	-Rompimento da guarnição por envelhecimento -Rompimento por pressão elevada -Danos por detritos do escoamento -Outras falhas	1) Quando turbina operando normalmente, sem efeito potencial; 2) Quando da parada da turbina, impossibilidade de pressurizar a guarnição, vazamento da vedação do eixo, possibilidade de elevação de nível no poço da turbina;	5			5
	Vedação parcial	-Rompimento da guarnição por envelhecimento -Rompimento por pressão elevada -Danos por detritos do escoamento -Outras falhas	1) Quando turbina operando normalmente, sem efeito potencial; 2) Quando da parada da turbina, pressurização parcial ou demorada da guarnição, vazamento da vedação do eixo, possibilidade de elevação de nível no poço da turbina;	4			4

Sistema: Vedação do Eixo

Subsistema: Sistema Vedação de Manutenção (Parada)

Componente: Pressostato

Número de Identificação: 5.1.4

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Indicar o estado do Sistema Vedação de Manutenção (Parada)	Não indica o estado	-Instalação errada -Sensor danificado -Queima -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema elétrico)	1) Quando turbina operando normalmente, sem efeito potencial; 2) Quando da parada da turbina, impossibilidade de detectar pressão na guarnição; Possível falha do sensor;	3			3
	Indicação intermitente do estado	-Instalação errada -Sensor danificado -Queima -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema elétrico)	1) Quando turbina operando normalmente, sem efeito potencial; 2) Quando da parada da turbina, impossibilidade de detectar pressão na guarnição; Possível falha do sensor;	3			3

Sistema: Vedação do Eixo

Subsistema: Sistema Vedação de Serviço (Operacional)

Componente: Tubulação de Água

Número de Identificação: 5.2.1

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Encaminhar o fluxo de água	Ruptura/Vazamento Excessivo	-Corrosão -Pressão elevada -Apoios subdimensionados -Soldas com defeitos	1) Sistema de Vedação de Serviço sem fornecimento de água limpa; aumento da temperatura dos carvões; possibilidade de danos aos mesmos; 2) Vedação do eixo operando com deficiências 3) Turbina operando com deficiências	7			7
	Obstrução total	-Acumulação de detritos -Obstrução do bocal de captação de água	1) Sistema de Vedação de Serviço sem fornecimento de água limpa; aumento da temperatura dos carvões; possibilidade de danos aos mesmos; 2) Vedação do eixo operando com deficiências 3) Turbina operando com deficiências	7			7
	Obstrução Parcial	-Acumulação de detritos -Obstrução do bocal de captação de água	1) Sistema de Vedação de Serviço com fornecimento limitado de água limpa; aumento da temperatura dos carvões; possibilidade de danos aos mesmos; 2) Vedação do eixo operando com deficiências 3) Turbina operando com deficiências	6			6

Sistema: Vedação do Eixo

Subsistema: Sistema Vedação de Serviço (Operacional)

Componente: Filtro

Obs.: Comumente em redundância (Filtro Duplex)

Número de Identificação: 5.2.2

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Reter partículas de dimensões maiores que o especificado	Ruptura do elemento filtrante	-Pressões elevadas na linha -Instalação incorreta -Danos por detritos -Filtro com malha diferente do especificado	1) Sistema de Vedação de Serviço operando com impurezas; possibilidade de danos aos carvões; 2) Vedação do eixo operando com deficiências 3) Operação da Turbina pouco afetada	4			4
	Obstrução parcial	-Impurezas na água -Instalação incorreta -Filtro com malha diferente do especificado -Filtro para vazão diferente da especificado	1) Sistema de Vedação de Serviço com fornecimento limitado de água limpa; aumento da temperatura dos carvões; possibilidade de danos aos mesmos; 2) Vedação do eixo operando com deficiências 3) Turbina operando com deficiências	6			6
	Obstrução total	-Impurezas na água -Instalação incorreta -Filtro com malha diferente do especificado -Filtro para vazão diferente da especificado	1) Sistema de Vedação de Serviço sem fornecimento de água limpa; aumento da temperatura dos carvões; possibilidade de danos aos mesmos; 2) Vedação do eixo operando com deficiências 3) Turbina operando com deficiências	7			7

Sistema: Vedação do Eixo

Subsistema: Sistema Vedação de Serviço (Operacional)

Componente: Conjunto Bomba

Obs.: Comumente em redundância

Número de Identificação: 5.2.3

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Garantir o fluxo requerido de água a pressão constante	Não há transformação de energia elétrica em energia fluídica	-Desgaste da bomba por cavitação -Bloqueio do lado sucção ou pressão -Ruptura do rotor -Queima do enrolamento -Instalação errada -Falha nos mancais -Falha na fiação -Falha do conjunto (por outras razões)	1) Sistema de Vedação de Serviço sem fornecimento de água limpa; aumento da temperatura dos carvões; possibilidade de danos aos mesmos; 2) Vedação do eixo operando com deficiências 3) Turbina operando com deficiências	7			7
	Há transformação parcial de energia elétrica em energia fluídica	-Desgaste da bomba por cavitação -Bloqueio parcial do lado sucção ou pressão da Bomba; -Falha nos mancais -Falha na fiação -Falha do conjunto (por outras razões)	1) Sistema de Vedação de Serviço com fornecimento limitado de água limpa; aumento da temperatura dos carvões; possibilidade de danos aos mesmos; 2) Vedação do eixo operando com deficiências 3) Turbina operando com deficiências	6			6

Sistema: Vedação do Eixo

Subsistema: Sistema Vedação de Serviço (Operacional)

Componente: Hidrociclone

Obs.: Comumente em redundância

Número de Identificação: 5.2.4

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Remover sólidos suspensos na água que passaram pelo filtro	Não remove sólidos	-Entupimento -Furos no interior -Mal dimensionado -Outras falhas	1) Sistema de Vedação de Serviço operando com impurezas; possibilidade de danos aos carvões; 2) Vedação do eixo operando com deficiências 3) Operação da Turbina pouco afetada	4			4
	Remove parcialmente os sólidos	-Entupimento -Furos no interior -Mal dimensionado -Outras falhas	1) Sistema de Vedação de Serviço operando com impurezas; possibilidade de danos aos carvões; 2) Vedação do eixo operando com deficiências 3) Operação da Turbina pouco afetada	3			3

Sistema: Vedação do Eixo

Subsistema: Sistema Vedação de Serviço (Operacional)

Componente: Carvão

Número de Identificação: 5.2.5

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Vedar o Eixo por contato mecânico sob pressão, fornecendo uma superfície de deslizamento com baixo atrito	Impossibilidade de vedar	-Desgaste -Quebra por deformação, vibração ou choques excessivos -Deformação excessiva -Instalação incorreta -Outras falhas	1) Sistema de Vedação de Serviço incapaz de vedar o eixo; 2) Vedação do eixo inoperante; possibilidade da vazão de drenagem ser inferior à necessária 3) Parada da turbina pela elevação de nível de água na tampa;	7			7
	Vedação parcial	-Desgaste -Quebra por deformação, vibração ou choques excessivos -Deformação excessiva -Instalação incorreta -Outras falhas	1) Sistema de Vedação de Serviço com capacidade limitada de vedar o eixo; 2) Vedação do eixo operando com deficiências; possibilidade da vazão de drenagem ser inferior à necessária 3) Possibilidade de parada da turbina pela elevação de nível de água na tampa;	6			6

Sistema: Vedação do Eixo
 Subsistema: Sistema Vedação de Serviço (Operacional)
 Componente: Conjunto de Molas
 Número de Identificação: 5.2.6

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Exercer força de compressão sobre as pistas	Ruptura	-Fadiga -Esforços subdimensionados -Montagem incorreta -Outras falhas	1) Sistema de Vedação de Serviço incapaz de vedar o eixo; 2) Vedação do eixo inoperante; possibilidade da vazão de drenagem ser inferior à necessária 3) Parada da turbina pela elevação de nível de água na tampa;	7			7
	Deformação permanente	-Esforços subdimensionados -Montagem incorreta -Outras falhas	1) Sistema de Vedação de Serviço com capacidade limitada de vedar o eixo; 2) Vedação do eixo operando com deficiências; possibilidade da vazão de drenagem ser inferior à necessária 3) Possibilidade de parada da turbina pela elevação de nível de água na tampa;	6			6
	Forças em outras direções ou insuficiente	-Montagem incorreta -Afrouxamento dos bujões guias -Falha de projeto (dimensionamento) -Outras falhas	1) Sistema de Vedação de Serviço com capacidade limitada de vedar o eixo; 2) Vedação do eixo operando com deficiências; possibilidade da vazão de drenagem ser inferior à necessária 3) Possibilidade de parada da turbina pela elevação de nível de água na tampa;	6			6

Sistema: Vedação do Eixo

Subsistema: Sistema Vedação de Serviço (Operacional)

Componente: Pistas

Número de Identificação: 5.2.7

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Transferir a força de compressão do Conjunto de Molas para o Carvão uniformemente	Ruptura	-Fadiga -Esforços subdimensionados -Montagem incorreta -Corrosão -Falha de projeto -Outras falhas	1) Sistema de Vedação de Serviço incapaz de vedar o eixo; possibilidade de danos aos Carvões 2) Vedação do eixo inoperante; possibilidade da vazão de drenagem ser inferior à necessária 3) Parada da turbina pela elevação de nível de água na tampa;	7			7
	Deformação permanente	-Esforços subdimensionados -Montagem incorreta -Falha de projeto -Outras falhas	1) Sistema de Vedação de Serviço com capacidade limitada de vedar o eixo; possibilidade de danos aos Carvões 2) Vedação do eixo operando com deficiências; possibilidade de vazamento 3) Turbina operando com deficiências	6			6
	Deformação elástica excessiva	-Esforços subdimensionados -Montagem incorreta -Falha de projeto -Outras falhas	1) Sistema de Vedação de Serviço com capacidade limitada de vedar o eixo; possibilidade de danos aos Carvões 2) Vedação do eixo operando com deficiências; possibilidade de vazamento 3) Turbina operando com deficiências	6			6

Sistema: Vedação do Eixo

Subsistema: Sistema Vedação de Serviço (Operacional)

Componente: Pressostato

Número de Identificação: 5.2.8

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Indicar o estado do Sistema Vedação de Serviço (Operacional))	Não indica o estado	-Instalação errada -Sensor danificado -Queima -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Impossibilidade de detectar funcionamento do Conjunto Bomba do Sistema de Vedação de Serviço; possível falha do sensor 2) Vedação do eixo operando normalmente 3) Turbina operando normalmente, sem efeito potencial;	4			4
	Indicação intermitente do estado	-Instalação errada -Sensor danificado -Queima -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Impossibilidade de detectar funcionamento do Conjunto Bomba do Sistema de Vedação de Serviço; possível falha do sensor 2) Vedação do eixo operando normalmente 3) Turbina operando normalmente, sem efeito potencial;	4			4

Sistema: Vedação do Eixo

Subsistema: Carcaça

Componente:

Número de Identificação: 5.3

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Prover um ambiente isolado para a Vedação do Eixo	Incapacidade de isolar o alojamento do mancal	-Desgaste/Ruptura da vedação -Corrosão das paredes da carcaça -Montagem Incorreta	1) Sistema de Vedação de Serviço com vazamentos pela carcaça 2) Vedação do eixo operando com deficiências 3) Operação da Turbina pouco afetada	4			4
Prover suporte estrutural para a Vedação do Eixo	Ruptura	-Sobrecarga (Montagem incorreta, desalinhamento do eixo/vedação, vibração do eixo) -Propagação de trinca devido à fadiga -Falha de Projeto/Fabricação (esforços subdimensionados, material incorreto, fora das tolerâncias ou acabamento)	1) Sistema de Vedação de Serviço com danos na carcaça; vazamentos 2) Vedação do eixo operando com deficiências 3) Possibilidade de parada da Turbina	7			7

Sistema: Vedação do Eixo

Subsistema: Carcaça

Componente:

Número de Identificação: 5.3

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
	Deformações permanentes	-Sobrecarga (Montagem incorreta, desalinhamento do eixo/mancal, vibração do eixo) -Propagação de trinca devido à fadiga -Falha de Projeto/Fabricação (esforços subdimensionados, material incorreto, fora das tolerâncias ou acabamento)	1) Sistema de Vedação de Serviço com danos na carcaça; 2) Vedação do eixo operando com deficiências 3) Possibilidade de parada da Turbina	7			7

Sistema: Eixo

Subsistema:

Componente:

Número de Identificação: 6

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Transmitir rotação e momento torsor	Ruptura	-Sobrecarga (Montagem incorreta, desalinhamento) -Propagação de trinca devido à fadiga -Falha de Projeto/Fabricação (esforços subdimensionados, material incorreto, fora das tolerâncias ou acabamento)	1) Eixo inoperante; vibrações do conjunto girante; danos a outros componentes; 2) Parada da Turbina;	9			9
	Deformação permanente	-Sobrecarga (Montagem incorreta, desalinhamento) -Falha de Projeto/Fabricação (esforços subdimensionados, material incorreto, fora das tolerâncias ou acabamento)	1) Eixo com deficiências; vibrações do conjunto girante; 2) Parada da Turbina	8			8

Sistema: Acoplamento

Subsistema:

Componente:

Número de Identificação: 7

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Unir o Rotor ao Eixo sem deslocamento relativo Transmitir momento torção do Rotor para o Eixo Transmitir cargas axiais do Rotor para o Eixo	Ruptura tirante	-Sobrecarga (Montagem incorreta, desalinhamento) -Propagação de trinca devido à fadiga -Falha de Projeto/Fabricação (esforços subdimensionados, material incorreto, fora das tolerâncias ou acabamento)	1) Incapacidade de transmitir esforços axiais do Rotor para o Eixo; vibrações do conjunto girante; danos a outros componentes; 2) Parada da Turbina;	9			9
	Deformação permanente tirante	-Sobrecarga (Montagem incorreta, desalinhamento) -Falha de Projeto/Fabricação (esforços subdimensionados, material incorreto, fora das tolerâncias ou acabamento)	1) Capacidade de transmitir esforços axiais do Rotor para o Eixo; vibrações do conjunto girante; 2) Parada da Turbina	8			8

Sistema: Acoplamento

Subsistema:

Componente:

Número de Identificação: 7

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
	Ruptura bucha cisalhamento	-Sobrecarga (Montagem incorreta, desalinhamento) -Propagação de trinca devido à fadiga -Falha de Projeto/Fabricação (esforços subdimensionados, material incorreto, fora das tolerâncias ou acabamento)	1) Incapacidade de transmitir momento torsor para o Eixo; vibrações do conjunto girante; danos a outros componentes; 2) Parada da Turbina;	7			7
	Deformação permanente bucha cisalhamento	-Sobrecarga (Montagem incorreta, desalinhamento) -Falha de Projeto/Fabricação (esforços subdimensionados, material incorreto, fora das tolerâncias ou acabamento)	1) Capacidade parcial de transmitir momento torsor para o Eixo; vibrações do conjunto girante; 2) Parada da Turbina	7			7

Sistema: Mancal Escora

Subsistema:

Componente: Chaveta

Número de Identificação: 8.1

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Transmitir torque do Eixo para o Bloco de Escora para vencer a tensão viscosa do Óleo na Carcaça	Ruptura	-Sobrecarga (Montagem incorreta, desalinhamento do Eixo/Bloco de Escora/Chaveta) -Propagação de trinca devido à fadiga -Falha de Projeto/Fabricação (esforços subdimensionados, material incorreto, fora das tolerâncias ou acabamento)	1) Mancal de Escora incapaz de acompanhar movimento do Eixo; Possibilidade de danos ao Eixo e ao Bloco de Escora; 2) Turbina com deficiências; Vibração do conjunto girante; Parada da turbina;	8			8
	Deformação permanente	-Sobrecarga (Montagem incorreta, desalinhamento do Eixo/Bloco de Escora/Chaveta) -Propagação de trinca devido à fadiga -Falha de Projeto/Fabricação (esforços subdimensionados, material incorreto, fora das tolerâncias ou acabamento)	1) Mancal de Escora incapaz de acompanhar movimento do Eixo; Possibilidade de danos ao Eixo e ao Bloco de Escora; 2) Turbina com deficiências; Vibração do conjunto girante; Parada da turbina;	7			7

Sistema: Mancal Escora

Subsistema:

Componente: Espelho/Bloco de Escora

Número de Identificação: 8.2

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Transmitir esforços axiais uniformemente para as Sapatas e torque para vencer as tensões viscosas	Ruptura	-Sobrecarga (Montagem incorreta, desalinhamento do Eixo/Bloco de Escora) -Propagação de trinca devido à fadiga -Falha de Projeto/Fabricação (esforços subdimensionados, material incorreto, fora das tolerâncias ou acabamento, defeitos internos de fundição)	1) Mancal de Escora incapaz de suportar carga axial; Possibilidade de danos ao Espelho e às Sapatas; 2) Turbina com deficiências; Vibração do conjunto girante; Parada da turbina;	8			8
	Deformação permanente	-Sobrecarga (Montagem incorreta, desalinhamento do Eixo/Bloco de Escora) -Propagação de trinca devido à fadiga -Falha de Projeto/Fabricação (esforços subdimensionados, material incorreto, fora das tolerâncias ou acabamento, defeitos internos de fundição)	1) Mancal de Escora incapaz de suportar carga axial; Possibilidade de danos ao Espelho e às Sapatas; 2) Turbina com deficiências; Vibração do conjunto girante; Parada da turbina;	7			7

Sistema: Mancal Escora

Subsistema:

Componente: Sapatas

Número de Identificação: 8.3

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Prover sustentação para as cargas axiais atuantes no eixo	Ruptura	-Sobrecarga (Montagem incorreta, desalinhamento do eixo/mancal, vibração do eixo, operação em baixas velocidades) -Propagação de trinca devido à fadiga -Falha de Projeto/Fabricação (esforços subdimensionados, material incorreto, fora das tolerâncias ou acabamento)	1) Mancal Escora sem capacidade de suportar o conjunto girante; Aumento da temperatura do óleo e das Sapatas; Possibilidade de danos a outras Sapatas; 2) Turbina com deficiências; Vibração do conjunto girante; Parada da turbina;	8			8
	Deformação permanente	-Sobrecarga (Montagem incorreta, desalinhamento do eixo/mancal, vibração do eixo, operação em baixas velocidades) -Falha de Projeto/Fabricação (esforços subdimensionados, material incorreto, fora das tolerâncias ou acabamento)	1) Mancal Escora sem capacidade de suportar o conjunto girante; Aumento da temperatura do óleo e das Sapatas; 2) Turbina com deficiências; Vibração do conjunto girante; Turbina operando com potência bastante reduzida;	7			7
	Danos ao revestimento metálico (metal patente)	-Adesão insuficiente do revestimento à Sapata	3) Mancal Escora com capacidade limitada de sustentar o Conjunto Girante; Aumento da temperatura do óleo e das Sapatas; Possibilidade de danos a outras Sapatas; 4) Turbina com capacidade limitada de suportar o conjunto girante; Vibração do conjunto girante;	6			6

Sistema: Mancal Escora

Subsistema:

Componente: Sapatas

Número de Identificação: 8.3

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
		-Sobrecarga (Montagem incorreta, desalinhamento do eixo/mancal, vibração do eixo, fora das tolerâncias ou acabamento, operação em baixas velocidades) -Fadiga do Revestimento -Falha devido a defeitos internos não detectados durante deposição					

Sistema: Miscal Escora

Subsistema: Sistema Refrigeração e Lubrificação (Baixa Pressão)

Componente: Acumulador Ar/Óleo

Número de Identificação: 8.4.1

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Acumular um volume de óleo pressurizado	Ruptura	-Pressão armazenada elevada -Ruptura por ação externa -Corrosão -Fadiga -Falha de projeto ou fabricação	1) Acumulador operando sem pressão e volume de óleo conforme especificado; Conjunto Bomba operando indevidamente; Vazamento de óleo; 2) Sistema de Refrigeração incapaz de manter a pressão da linha 3) Miscal Escora inoperante 4) Parada da Turbina	9			9
Servir de reservatório com volume de óleo frio suficiente para parada numa eventual falha	Incapacidade de manter pressão de óleo	-Vazamento de ar pelas conexões -Ruptura por ação externa -Corrosão -Falhas nas soldas de união -Falha de projeto ou fabricação	1) Acumulador operando com pressão fora da especificada; Conjunto Bomba operando indevidamente; 2) Sistema Refrigeração incapaz de manter a pressão da linha 3) Miscal Escora inoperante 4) Parada da Turbina	8			8
	Incapacidade de manter o volume de óleo	-Vazamento de óleo pelas conexões -Ruptura por ação externa -Corrosão -Falhas nas soldas de união -Falha de projeto ou fabricação	1) Acumulador operando com volume de óleo fora do especificado; Conjunto Bomba operando indevidamente; 2) Sistema Refrigeração incapaz de manter a alimentação de óleo linha; presença de ar na linha 3) Miscal Escora inoperante 4) Parada da Turbina	8			8

Sistema: Mancal Escora

Subsistema: Sistema de Refrigeração e Lubrificação (Baixa Pressão)

Componente: Medidor de Vazão de Óleo

Número de Identificação: 8.4.2

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Medir o fluxo de óleo no Sistema de Refrigeração e Lubrificação	Indica fluxo quando não há	-Falha em componente mecânico -Falha em componente elétrico	1) Possibilidade do Sistema de Refrigeração e Lubrificação inoperante (possível vazamento); 2) Possibilidade de queda do nível de óleo do Sistema Mancal; Aumento da temperatura do óleo e das Sapatas; 3) Possibilidade de parada da Turbina caso temperatura do Mancal suba demasiadamente	7			7
	Não indica fluxo quando há	-Falha em componente mecânico -Falha em componente elétrico	1) Possibilidade do Sistema de Refrigeração e Lubrificação operando normalmente; 2) Possibilidade do Mancal Escora operando normalmente 3) Possibilidade da Turbina operando normalmente	4			4
	Indicação intermitente	-Falha em componente mecânico -Falha em componente elétrico	1) Possibilidade do Sistema de Refrigeração e Lubrificação estar inoperante; 2) Possibilidade de queda do nível de óleo do Mancal Escora; possibilidade do aumento da temperatura do óleo e das Sapatas; 3) Possibilidade de parada da Turbina caso temperatura do Mancal suba demasiadamente;	5			5

Sistema: Mancal Escora

Subsistema: Sistema de Refrigeração e Lubrificação (Baixa Pressão)

Componente: Conjunto Bomba

Obs.: Comumente em redundância

Número de Identificação: 8.4.3

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Converter energia elétrica em energia fluidica numa pressão e vazão requerida	Não há transformação de energia elétrica em energia fluidica	-Desgaste da bomba por cavitação -Bloqueio do lado sucção ou pressão -Ruptura do rotor -Queima do enrolamento -Instalação errada -Falha nos mancais do Conjunto Bomba -Falha na fiação -Falha do conjunto (por outras razões)	1) Conjunto Bomba inoperante; Pressostato acionado; 2) Sistema de Refrigeração e Lubrificação incapaz de manter a circulação adequada de óleo; interrupção da vazão de óleo; 3) Sistema Mancal Escora inoperante; aumento de temperatura do óleo e das Sapatas; queda da temperatura da água de resfriamento; 4) Parada da turbina	7			7
	Há transformação parcial de energia elétrica em energia fluidica	-Desgaste da bomba por cavitação -Bloqueio parcial do lado sucção ou pressão da Bomba; -Falha nos mancais do Conjunto Bomba -Falha na fiação -Falha do conjunto (por outras razões)	1) Conjunto Bomba operando com capacidade limitada; 2) Sistema de Refrigeração e Lubrificação capaz de manter a circulação abaixo da adequada de óleo; queda da vazão de óleo; 3) Sistema Mancal Escora inoperante; aumento de temperatura do óleo e das Sapatas; queda da temperatura da água de resfriamento; 4) Turbina operando com potência reduzida;	6			6

Sistema: Mancal Escora

Subsistema: Sistema de Refrigeração e Lubrificação (Baixa Pressão)

Componente: Filtro de Óleo

Obs.: Comumente em redundância (Filtro Duplex)

Número de Identificação: 8.4.4

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Reter partículas de dimensões maiores ou iguais ao especificado	Ruptura do elemento filtrante	-Pressões elevadas na linha -Instalação incorreta -Danos por detritos -Filtro com malha diferente do especificado	1) Sistema de Refrigeração e Lubrificação operando com impurezas no óleo maiores que a especificação; possibilidade de danos ao Conjunto Bomba; 2) Possibilidade de danos às Sapatas e ao Espelho do Mancal Escora; possibilidade de elevação da temperatura do óleo e das Sapatas; 3) Operação da Turbina pouco afetada; possibilidade de flutuações da condição nominal;	5			5
	Obstrução parcial	-Impurezas no óleo -Filtro com malha diferente do especificado -Filtro para vazão diferente da especificado	1) Sistema de Refrigeração e Lubrificação operando com limitação de vazão de óleo; 2) Mancal Escora operando com limitação de vazão de óleo; elevação da temperatura do óleo e das Sapatas; 3) Operação da Turbina afetada; possibilidade de parada	6			6
	Entupimento do filtro	-Impurezas no óleo -Filtro com malha diferente do especificado -Filtro para vazão diferente da especificado	1) Sistema de Refrigeração e Lubrificação operando com limitação de vazão de óleo; 2) Mancal Escora operando com limitação de vazão de óleo; elevação da temperatura do óleo e das Sapatas; 3) Operação da Turbina afetada; Parada da turbina;	7			7

Sistema: Mancal Escora

Subsistema: Conjunto Trocador de Calor

Componente: Trocador de Calor

Número de Identificação: 8.4.5.1

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Trocar calor entre fluidos a temperaturas distintas	-Incapacidade de trocar calor	-Furos no trocador (mistura e/ou perda de fluidos) -Obstrução da tubulação interna -Corrosão das paredes do trocador -Fadiga térmica -Aumento da resistência térmica (incrustações na parede)	1) Conjunto Trocador de Calor incapaz de transferir calor do óleo para a água de resfriamento; queda da temperatura da água de resfriamento; 2) Sistema de Refrigeração e Lubrificação inoperante; possibilidade de água no óleo; 3) Sistema Mancal Escora inoperante; possível queda do nível de óleo na carcaça; aumento de temperatura do óleo e das Sapatas; 4) Parada da Turbina;	8			8
	-Capacidade limitada de tocar calor	-Furos no trocador (mistura e/ou perda de fluidos) -Obstrução parcial da tubulação interna -Corrosão das paredes do trocador -Fadiga térmica -Aumento da resistência térmica (incrustações na parede)	1) Conjunto Trocador de Calor com capacidade reduzida de transferir calor do óleo para a água de resfriamento; queda da temperatura da água de resfriamento possibilidade de água no óleo; 2) Sistema de Refrigeração e Lubrificação operando com restrições; aumento de temperatura do óleo e das Sapatas; 3) Turbina operando com potência reduzida e possibilidade de parada	6			6

Sistema: Mancal Escora
 Subsistema: Conjunto Trocador de Calor
 Componente: Tubulação de Água
 Número de Identificação: 8.4.5.2

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Encaminhar o fluido de resfriamento para o Conjunto Trocador de Calor	Ruptura	-Corrosão -Pressão elevada -Apoios subdimensionados -Soldas com defeitos	1) Conjunto Trocador de Calor incapaz de transferir calor do óleo para a água de resfriamento; vazão de água baixa ou nula; 2) Sistema de Refrigeração e Lubrificação incapaz de manter a circulação adequada de água; Vazamento de água para o ambiente; 3) Sistema Mancal Escora inoperante; aumento de temperatura do óleo e das Sapatas; 4) Parada da turbina	7			7
	Obstrução total	-Acumulação de detritos -Obstrução do bocal de captação de água ou do filtro	1) Conjunto Trocador de Calor incapaz de transferir calor do óleo para a água de resfriamento; vazão de água nula; 2) Sistema de Refrigeração e Lubrificação incapaz de manter a circulação adequada de água; 3) Sistema Mancal Escora inoperante; aumento de temperatura do óleo e das Sapatas; 4) Parada da turbina	7			7

Sistema: Mancal Escora
 Subsistema: Conjunto Trocador de Calor
 Componente: Tubulação de Água
 Número de Identificação: 8.4.5.2

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
	Obstrução Parcial	-Acumulação de detritos -Obstrução parcial do bocal de captação de água ou do filtro	1) Conjunto Trocador de Calor incapaz de transferir calor do óleo para a água de resfriamento; queda da temperatura da água de resfriamento; vazão de água baixa 2) Sistema de Refrigeração e Lubrificação incapaz de manter a circulação adequada de água; 3) Sistema Mancal Escora operando com deficiência; aumento de temperatura do óleo e das Sapatas; 4) Turbina operando com potência reduzida	6			6

Sistema: Mancal Escora

Subsistema: Conjunto Trocador de Calor

Componente: Sensores de Temperatura de Óleo (E/S)

Obs.: Análise da diferença de temperatura entre a entrada e a saída

Número de Identificação: 8.4.5.3

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Medir a diferença de temperatura entre a entrada e saída do óleo no Trocador de Calor	Não indica a temperatura	-Instalação errada -Sensor danificado -Queima -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Conjunto Trocador de Calor operando normalmente; Possível falha do sensor; 2) Sistema de Refrigeração e Lubrificação operando normalmente; 3) Sistema Mancal Escora operando normalmente 4) Turbina operando normalmente	4			4
	Indica diferença de temperatura menor que a real	-Instalação errada -Sensor danificado -Perda da calibração -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Informações incorretas sobre o Conjunto; Possibilidade do Conjunto Trocador de Calor operando com vazão de água baixa ou de óleo alta; 2) Possibilidade do Sistema de Refrigeração e Lubrificação operando com deficiências; 3) Possibilidade do Sistema Mancal Escora operando com deficiências; 4) Possibilidade da Turbina operando com deficiências;	5			5
	Indica diferença de temperatura maior que a real	-Instalação errada -Sensor danificado -Perda da calibração -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Informações incorretas sobre o Conjunto; Possibilidade do Conjunto Trocador de Calor operando com vazão de água alta ou de óleo baixa; 2) Possibilidade do Sistema de Refrigeração e Lubrificação operando com deficiências; 3) Possibilidade do Sistema Mancal Escora operando com deficiências; 4) Possibilidade da Turbina operando com deficiências;	5			5

Sistema: Mancal Escora

Subsistema: Conjunto Trocador de Calor

Componente: Medidor de Vazão de Água (E/S)

Número de Identificação: 8.4.5.4

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Medir o fluxo de água no Trocador de Calor	Indica fluxo quando não há	-Falha em componente mecânico -Falha em componente elétrico	1) Possibilidade do Sistema de Refrigeração e Lubrificação inoperante (possível vazamento); 2) Possibilidade de queda do nível de óleo do Mancal Escora; Aumento da temperatura do óleo e das Sapatas; 3) Possibilidade de parada da Turbina caso temperatura do Mancal suba demasiadamente	7			7
	Não indica fluxo quando há	-Falha em componente mecânico -Falha em componente elétrico	1) Possibilidade do Sistema de Refrigeração e Lubrificação operando normalmente; 2) Possibilidade do Mancal Escora operando normalmente; 3) Possibilidade da Turbina operando normalmente;	5			5
	Indicação intermitente	-Falha em componente mecânico -Falha em componente elétrico	1) Possibilidade do Sistema de Refrigeração e Lubrificação estar inoperante; 2) Possibilidade de queda do nível de óleo do Mancal Escora; Possibilidade do aumento da temperatura do óleo e das Sapatas; 3) Possibilidade de parada da turbina caso temperatura do Mancal suba demasiadamente;	6			6

Sistema: Mancal Escora

Subsistema: Conjunto Trocador de Calor

Componente: Sensores de Temperatura da Água (E/S)

Obs.: Análise da diferença de temperatura entre a saída e entrada

Número de Identificação: 8.4.5.5

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Medir a diferença de temperatura entre a entrada e saída de água no Trocador de Calor	Não indica a temperatura	-Instalação errada -Sensor danificado -Queima -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Conjunto Trocador de Calor operando normalmente; Possível falha do sensor; 2) Sistema de Refrigeração e Lubrificação operando normalmente; 3) Sistema Mancal Escora operando normalmente 4) Turbina operando normalmente	4			4
	Indica diferença de temperatura menor que a real	-Instalação errada -Sensor danificado -Perda da calibração -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Informações incorretas sobre o Conjunto; Possibilidade do Conjunto Trocador de Calor operando com vazão de água alta e de óleo baixa; 2) Possibilidade do Sistema de Refrigeração e Lubrificação operando com deficiências; 3) Possibilidade do Sistema Mancal Escora operando com deficiências; 4) Possibilidade da Turbina operando com deficiências;	5			5
	Indica diferença de temperatura maior que a real	-Instalação errada -Sensor danificado -Perda da calibração -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Informações incorretas sobre o Conjunto; Possibilidade do Conjunto Trocador de Calor operando com vazão de água baixa e de óleo alta; 2) Possibilidade do Sistema de Refrigeração e Lubrificação operando com deficiências; 3) Possibilidade do Sistema Mancal Escora operando com deficiências; 4) Possibilidade da Turbina operando com deficiências;	5			5

Sistema: Mancal Escora

Subsistema: Sistema de Refrigeração e Lubrificação (Baixa Pressão)

Componente: Tubulação de Óleo

Número de Identificação: 8.4.6

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Encaminhar o fluxo de óleo	Ruptura	-Corrosão -Pressão elevada -Apoios subdimensionados -Soldas com defeitos	1) Sistema de Refrigeração e Lubrificação incapaz de manter a circulação adequada de óleo; Vazamento de óleo para o ambiente; vazão de óleo baixa ou nula; 2) Sistema Mancal Escora inoperante; queda no nível de óleo; aumento de temperatura das Sapatas do Mancal e do óleo; queda da temperatura da água de resfriamento na saída; 3) Parada da turbina	7			7
	Obstrução total	-Acumulação de detritos	1) Sistema de Refrigeração e Lubrificação incapaz de manter a circulação adequada de óleo; vazão de óleo nula; 2) Sistema Mancal Escora inoperante; aumento de temperatura do óleo e das Sapatas; queda da temperatura da água de resfriamento na saída; 3) Parada da turbina	7			7
	Obstrução Parcial	Acumulação de detritos	1) Sistema de Refrigeração e Lubrificação incapaz de manter a circulação adequada de óleo; vazão de óleo baixa; 2) Sistema Mancal Escora operando com deficiência; aumento de temperatura do óleo e das Sapatas; queda da temperatura da água de resfriamento na saída; 3) Turbina operando com potência reduzida	6			6

Sistema: Mancel Escora

Subsistema: Sistema de Refrigeração e Lubrificação (Baixa Pressão)

Componente: Óleo

Número de Identificação: 8.4.7

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Reduzir o atrito de componentes mecânicos com movimento relativo entre si	Incapacidade de formar a lubrificação hidrodinâmica	-Formação de espuma -Óleo vencido -Uso de óleo incorreto -Oxidação -Contaminação do óleo	1) Sistema de Refrigeração e Lubrificação com capacidade operativa reduzida; 2) Mancel Escora com capacidade operativa reduzida 3) Turbina operando potência reduzida e possibilidade de parada;	7			7
Formar e manter a lubrificação hidrodinâmica em toda faixa operativa	Capacidade limitada de formar a lubrificação hidrodinâmica	-Formação de espuma -Óleo vencido -Uso de óleo incorreto -Oxidação -Contaminação do óleo	1) Sistema de Refrigeração e Lubrificação com capacidade operativa reduzida; 2) Mancel Escora com capacidade operativa reduzida 3) Turbina operando potência reduzida e baixo rendimento;	6			6

Sistema: Mancal Escora

Subsistema: Conjunto Reservatório

Componente: Reservatório

Número de Identificação: 8.4.8.1

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Prover um volume adequado e isolado do ambiente para armazenamento do óleo	Capacidade parcial de armazenar o óleo	-Corrosão da Parede -Vazamento nas conexões do circuito -Ruptura por ação externa -Falha nas uniões soldadas	1) Sistema de Refrigeração e Lubrificação operando com limitação de volume de óleo; limitação de fornecimento de energia fluídica; 2) Mancal Escora operando com deficiências 3) Turbina operando com deficiências	5			5
	Contaminação do óleo	-Corrosão da parede do reservatório -Acúmulo de sedimentos no fundo do Reservatório	1) Sistema de Refrigeração e Lubrificação operando com óleo fora das especificações do fabricante; possibilidade de danos ao Conjunto Bomba, Sapatas e Espelho; 2) Mancal Escora operando com deficiências 3) Turbina operando com deficiências	6			6

Sistema: Mancal Escora

Subsistema: Conjunto Reservatório

Componente: Respiro e Filtro de Ar

Número de Identificação: 8.4.8.2

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Permitir a entrada ou saída de ar limpo, conforme mudança do nível de óleo	Ruptura do elemento filtrante	-Danos por ação externa -Instalação incorreta -Danos por detritos -Filtro com malha diferente do especificado	1) Conjunto Reservatório operando normalmente; entrada de impurezas no reservatório; 2) Presença de impureza no óleo do Sistema Refrigeração e Lubrificação; 3) Mancal Escora operando normalmente; 4) Turbina operando normalmente;	3			3
	Obstrução total do respiro/filtro	-Impurezas no ar -Filtro com malha diferente do especificado	1) Conjunto Reservatório resiste a variações do volume de óleo; 2) Sistema Refrigeração e Lubrificação operando o Conjunto Bomba com potência superior; 3) Mancal Escora operando com eficiência menor; 4) Turbina operando com eficiência menor;	3			3
	Obstrução parcial do respiro/filtro	-Impurezas no ar -Filtro com malha diferente do especificado	1) Conjunto Reservatório resiste a variações do volume de óleo; 2) Sistema Refrigeração e Lubrificação operando o Conjunto Bomba com potência superior; 3) Mancal Escora operando eficiência menor; 4) Turbina operando com eficiência menor;	3			3

Sistema: Mancal Escora

Subsistema: Conjunto Reservatório

Componente: Sensor de Nível

Número de Identificação: 8.4.8.3

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Indicar quando o volume de óleo no reservatório atingir níveis críticos	Não indica o volume	-Instalação errada -Sensor danificado -Queima -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Conjunto Reservatório operando normalmente; Possível falha do sensor; 2) Sistema Refrigeração e Lubrificação operando normalmente 3) Mancal Escora operando normalmente 4) Turbina operando normalmente	4			4
	Indica volume superior ao real	-Instalação errada -Sensor danificado -Perda da calibração -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Informações incorretas sobre o Conjunto; Possibilidade do Conjunto Reservatório operando com volume de óleo inferior ao especificado; 2) Possibilidade de falta de óleo no Sistema Refrigeração e Lubrificação 3) Possibilidade da capacidade do Mancal Escora estar limitada; 4) Possibilidade da Turbina operando com limitações;	4			4
	Indica volume menor que o real	-Instalação errada -Sensor danificado -Perda da calibração -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Informações incorretas sobre o Conjunto; Possibilidade do Conjunto Reservatório operando com volume de óleo superior ao especificado; 2) Possibilidade do Sistema Refrigeração e Lubrificação operando normalmente; 3) Possibilidade da capacidade do Mancal Escora estar limitada; 4) Possibilidade da Turbina operando com limitações;	4			4

Sistema: Mancel Escora

Subsistema: Sistema de Lubrificação (Alta Pressão)

Componente: Tubulação de Óleo

Número de Identificação: 8.5.1

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Encaminhar o fluxo de óleo	Ruptura	-Corrosão -Pressão elevada -Apoios subdimensionados -Soldas com defeitos	Quando operando normalmente, possibilidade de vazamento de óleo Quando da parada da Turbina, Sistema Lubrificação Alta Pressão com deficiências; vazamento de óleo e possibilidade danos às Sapatas e ao Espelho	5/7			5/7
	Obstrução total	-Acumulação de detritos	Quando operando normalmente, sem efeito potencial Quando da parada da Turbina, Sistema de Lubrificação Alta Pressão inoperante; danos às Sapatas e ao Espelho; falha escondida	2/7			2/7
	Obstrução Parcial	Acumulação de detritos	Quando operando normalmente, sem efeito potencial Quando da parada da Turbina, Sistema de Lubrificação Alta Pressão com capacidade reduzida; danos às Sapatas e ao Espelho; falha escondida	2/6			2/6

Sistema: Mancal Escora

Subsistema: Sistema de Lubrificação (Alta Pressão)

Componente: Conjunto Bomba Alta Pressão

Obs.: Comumente em redundância

Número de Identificação: 8.5.2

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Converter energia elétrica em energia fluidica numa pressão e vazão requerida	Não há transformação de energia elétrica em energia fluidica	-Desgaste da bomba por cavitação -Bloqueio do lado sucção ou pressão -Ruptura do rotor -Queima do enrolamento -Instalação errada -Falha nos mancais do Conjunto Bomba -Falha na fiação -Falha do conjunto (por outras razões)	Quando operando normalmente, sem efeito potencial Quando da parada da Turbina, Sistema de Lubrificação Alta Pressão inoperante; danos às Sapatas e ao Espelho; Falha escondida	2/7			2/7
	Há transformação parcial de energia elétrica em energia fluidica	-Desgaste da bomba por cavitação -Bloqueio parcial do lado sucção ou pressão da Bomba; -Falha nos mancais do Conjunto Bomba -Falha na fiação -Falha do conjunto (por outras razões)	Quando operando normalmente, sem efeito potencial Quando da parada da Turbina, Sistema de Lubrificação Alta Pressão com capacidade reduzida; danos às Sapatas e ao Espelho; falha escondida	2/6			2/6

Sistema: Mancal Escora

Subsistema: Sistema de Lubrificação (Alta Pressão)

Componente: Filtro de Óleo

Obs.: Comumente em redundância

Número de Identificação: 8.5.3

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Reter partículas de dimensões maiores ou iguais ao especificado	Ruptura do elemento filtrante	-Pressões elevadas na linha -Instalação incorreta -Danos por detritos -Filtro com malha diferente do especificado	Quando operando normalmente, sem efeito potencial Quando da parada da Turbina, Sistema de Lubrificação Alta Pressão operando com deficiências; possibilidade de danos às Sapatas e ao Espelho; Falha escondida	2/5			2/5
	Obstrução parcial	-Impurezas no óleo -Filtro com malha diferente do especificado -Filtro para vazão diferente da especificado	Quando operando normalmente, sem efeito potencial Quando da parada da Turbina, Sistema de Lubrificação Alta Pressão com capacidade reduzida; possibilidade de danos às Sapatas e ao Espelho; falha escondida	2/6			2/6
	Entupimento do filtro	-Impurezas no óleo -Filtro com malha diferente do especificado -Filtro para vazão diferente da especificado	Quando operando normalmente, sem efeito potencial Quando da parada da Turbina, Sistema de Lubrificação Alta Pressão inoperante; danos às Sapatas e ao Espelho; Falha escondida	2/7			2/7

Sistema: Mancal Escora

Subsistema: Sistema Retirada de Vapor de Óleo

Componente: Hidrociclone

Número de Identificação: 8.6.1

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Separar vapor de óleo de outras fases	Não separa as fases	-Entupimento -Furos no interior -Mal dimensionado -Outras falhas	1) Sistema Retirada de Vapor perdendo óleo; 2) Mancal Escora operando normalmente 3) Turbina operando normalmente	5			5
	Separa parcialmente as fases	-Entupimento -Furos no interior -Mal dimensionado -Outras falhas	1) Sistema Retirada de Vapor perdendo óleo; 2) Mancal Escora operando normalmente 3) Turbina operando normalmente	4			4

Sistema: Mancal Escora

Subsistema: Sistema Retirada de Vapor de Óleo

Componente: Conjunto Bomba

Número de Identificação: 8.6.2

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Converter energia elétrica em energia fluídica numa pressão e vazão requerida	Não há transformação de energia elétrica em energia fluídica	-Desgaste da bomba por cavitação -Bloqueio do lado sucção ou pressão -Ruptura do rotor -Queima do enrolamento -Instalação errada -Falha nos mancais do Conjunto Bomba -Falha na fiação -Falha do conjunto (por outras razões)	1) Sistema Retirada de Vapor inoperante; Acúmulo e deposição de óleo nas intermediações do Mancal Escora 2) Mancal Escora operando normalmente 3) Turbina operando normalmente	5			5
	Há transformação parcial de energia elétrica em energia fluídica	-Desgaste da bomba por cavitação -Bloqueio parcial do lado sucção ou pressão da Bomba; -Falha nos mancais do Conjunto Bomba -Falha na fiação -Falha do conjunto (por outras razões)	1) Sistema Retirada de Vapor operando com deficiências; Acúmulo e deposição de óleo nas intermediações do Mancal Escora 2) Mancal Escora operando normalmente 3) Turbina operando normalmente	4			4

Sistema: Mancal Escora

Subsistema: Sistema Retirada de Vapor de Óleo

Componente: Tubulação de Vapor de Óleo

Número de Identificação: 8.6.3

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Encaminhar o vapor de óleo	Ruptura	-Corrosão -Pressão elevada -Apoios subdimensionados -Soldas com defeitos	1) Sistema Retirada de Vapor perdendo óleo; 2) Mancal Escora operando normalmente 3) Turbina operando normalmente	5			5
	Obstrução total	-Acumulação de detritos	1) Sistema Retirada de Vapor inoperante; Acúmulo e deposição de óleo nas intermediações do Mancal Escora 2) Mancal Escora operando normalmente 3) Turbina operando normalmente	5			5
	Obstrução Parcial	-Acumulação de detritos	1) Sistema Retirada de Vapor operando com deficiências; Acúmulo e deposição de óleo nas intermediações do Mancal Escora 2) Mancal Escora operando normalmente 3) Turbina operando normalmente	4			4

Sistema: Mancal Escora

Subsistema:

Componente: Carcaça

Número de Identificação: 8.7

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Fornecer alojamento e proteção aos componentes do Mancal Escora	Incapacidade de isolar o alojamento do mancal	-Desgaste/Ruptura da vedação -Vedação pouco resistente ao óleo -Corrosão das paredes da carcaça -Montagem Incorreta	1) Mancal Escora operando com acúmulo de impurezas ou perda de óleo 2) Turbina operando com potência nominal	4			4
Transmitir os esforços axiais das Sapatas para a parte estacionária da Turbina	Ruptura	-Sobrecarga (Montagem incorreta, desalinhamento do eixo/mancal, vibração do eixo) -Propagação de trinca devido à fadiga -Falha de Projeto/Fabricação (esforços subdimensionados, material incorreto, fora das tolerâncias ou acabamento)	1) Mancal Escora sem capacidade de prover sustentação para o conjunto girante; presença de ruídos; Vazamento de óleo; 2) Turbina com incapacidade de sustentar o conjunto girante; Vibração do conjunto girante; Parada da Turbina	8			8

Sistema: Mancal Escora

Subsistema:

Componente: Carcaça

Número de Identificação: 8.7

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
	Deformações permanentes	-Sobrecarga (Montagem incorreta, desalinhamento do eixo/mancal, vibração do eixo) -Propagação de trinca devido à fadiga -Falha de Projeto/Fabricação (esforços subdimensionados, material incorreto, fora das tolerâncias ou acabamento)	1) Mancal Escora sem capacidade limitada de prover sustentação para o conjunto girante; presença de ruídos; Vazamento de óleo; 2) Turbina com capacidade limitada de sustentar o conjunto girante; Vibração do conjunto girante; Parada da Turbina	7			7
	Folga dos componentes do mancal	-Montagem incorreta (sem aperto ou trava-rosca) -Afrouxamento ou solta de fixações devido a vibrações	1) Mancal Escora sem capacidade limitada de prover sustentação para o conjunto girante; presença de ruídos; Vazamento de óleo; 2) Turbina com capacidade limitada de sustentar o conjunto girante; Vibração do conjunto girante; Parada da Turbina	5			5

Sistema: Mancal Escora

Subsistema:

Componente: Sensor de Nível

Número de Identificação: 8.8

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Registrar o nível de óleo na Carcaça	Não indica nível	-Instalação errada -Sensor danificado -Queima -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Sistema Mancal Escora operando normalmente; Possível falha do sensor; 2) Turbina operando normalmente	4			4
	Indica nível menor que o real	-Instalação errada -Sensor danificado -Perda da calibração -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Informações incorretas sobre o Conjunto; Possibilidade do Sistema Mancal Escora operando com nível de óleo baixo; 2) Possibilidade de Parada da Turbina;	5			5
	Indica maior que o real	-Instalação errada -Sensor danificado -Perda da calibração -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Informações incorretas sobre o Conjunto; Possibilidade do Sistema Mancal Escora operando com óleo abaixo do recomendado; 2) Possibilidade de Parada da Turbina;	5			5

Sistema: Mancal Escora

Subsistema:

Componente: Sensor de Temperatura Óleo (Carcaça)

Número de Identificação: 8.9

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Medir a temperatura de óleo na Carcaça	Não indica a temperatura	-Instalação errada -Sensor danificado -Queima -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema elétrico)	1) Sistema Mancal Escora operando normalmente; Possível falha do sensor 2) Turbina operando normalmente	4			4
	Indica temperatura menor que a real	-Instalação errada -Sensor danificado -Perda da calibração -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema elétrico)	1) Informações incorretas sobre o Conjunto; Possibilidade do Sistema Mancal Escora operando com deficiências; 2) Possibilidade da Turbina operando com deficiências; Possibilidade de parada;	5			5
	Indica temperatura maior que a real	-Instalação errada -Sensor danificado -Perda da calibração -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema elétrico)	1) Informações incorretas sobre o Conjunto; Possibilidade do Sistema Mancal Escora operando com deficiências; 2) Possibilidade da Turbina operando com deficiências; Possibilidade de parada;	5			5

Sistema: Mancal Escora

Subsistema:

Componente: Sensor de Temperatura de Óleo (Sapatas)

Número de Identificação: 8.10

Função	Modos de Falha	Causa(s) e Mecanismo (s) Potencial(is) da Falha	Efeito Potencial da Falha	SEV	OCC	DET	RPN
Medir a temperatura de óleo na Sapata	Não indica a temperatura	-Instalação errada -Sensor danificado -Queima -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Sistema Mancal Escora operando normalmente; Possível falha do sensor 2) Turbina operando normalmente	4			4
	Indica temperatura menor que a real	-Instalação errada -Sensor danificado -Perda da calibração -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Informações incorretas sobre o Conjunto; Possibilidade do Sistema Mancal Escora operando com deficiências; 2) Possibilidade da Turbina operando com deficiências; Possibilidade de parada;	5			5
	Indica temperatura maior que a real	-Instalação errada -Sensor danificado -Perda da calibração -Falha na fiação -Falha na transmissão do sinal (sistema eletrônico)	1) Informações incorretas sobre o Conjunto; Possibilidade do Sistema Mancal Escora operando com deficiências; 2) Possibilidade da Turbina operando com deficiências; Possibilidade de parada;	5			5

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANEEL, “Atlas de Energia Elétrica do Brasil”, 2ª Edição, Agência Nacional de Energia Elétrica, Brasília, Brasil, 2005.
- [2] ANEEL, site da Agência Nacional de Energia Elétrica, 2007, disponível: <http://www.aneel.org.br> . Acessado em 25 de abril de 2007.
- [3] BAZOVSKY, I., “Reliability Theory and Practice”, Dover Publications, 2004.
- [4] BLISCHKE, W. R., MURTHY, D.N.P, “Case Studies in Reliability and Maintenance”, John Wiley, 2003.
- [5] BUSSAB, W. O., MORETTIN, P. A., “Estatística Básica”, Ed. Saraiva, 5ª Edição, 2006.
- [6] CARAZAS, F. J. G., “Análise de Disponibilidade de Turbinas a Gás Empregadas em Usinas Termelétricas a Ciclo Combinado”, Dissertação de Mestrado, EPUSP, 2006.
- [7] CARDOSO, I. A. P., “Elaboração de Políticas de Manutenção: Uma Abordagem Voltada à Análise de Confiabilidade”, Dissertação de Mestrado, EPUSP, 2000.
- [8] JARDINE A. K. S., BUZACOTT J. A., “Equipment Reliability and Maintenance”, European Journal of Operational Research, 1986, 285-296.
- [9] LEWIS, E. E., “Introduction to Reliability Engineering”, John Wiley, 1987.
- [10] LYONNET, P., ”Maintenance Planning. Methods and Mathematics”, Chapman & Hall, 1991.
- [11] MASSARANI, M., “Engenharia do Valor”, Apostila da disciplina de pós-graduação, EPUSP, 2003.
- [12] MOUBRAY, J., “Reliability-Centred Maintenance”, Butterworth-Heinemann; 2ª Edição, 1999.
- [13] NOWLAN, F. S., HEAP, H. F., “Reliability-Centered Maintenance”, Technical Report AD/A066-579, US Department of Commerce, Springfield, 1978.
- [14] ONS, Site do Operador Nacional do Sistema, 2007, disponível: <http://www.ons.org.br> . Acessado em 25 de abril de 2007.

- [15] RAUSAND, M., “Reliability Centered Maintenance”, Reliability Engineering and System Safety, 1998, 121-132.
- [16] Revista Furnas, número 340, Ano XXXII, Maio 2007.
- [17] SIQUEIRA, I. P., “Manutenção Centrada em Confiabilidade”, Ed. Qualitymark, Rio de Janeiro, 2005.
- [18] SMITH, A. M., HINCHCLIFFE, G. R., “RCM - Gateway to World Class Maintenance”, Butterworth-Heinemann, 2ª Edição, 2003.
- [19] SMITH, D. J., “Reliability, Maintainability and Risk”, Butterworth-Heinemann; 6ª Edição, 2001.
- [20] SOUZA, Z., “Dimensionamento de maquinas de fluxo : turbinas, bombas, ventiladores”, Ed. Edgard Blucher, São Paulo, 1991.
- [21] VOITH SIEMENS HYDRO POWER GENERATION GMBH & CO. KG. Brochures, Heidenheim, Germany, Voith AG, 2004.