

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA  
ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE**

**FABIANO LOSS**

**ANÁLISE DE DADOS DE VIDA DE ATUADORES ELETRO-  
HIDRÁULICOS DAS TURBINAS DE UMA CENTRAL  
TERMOELÉTRICA**

**MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO**

**CURITIBA  
2017**

**FABIANO LOSS**

**ANÁLISE DE DADOS DE VIDA DE ATUADORES ELETRO-  
HIDRÁULICOS DAS TURBINAS DE UMA CENTRAL  
TERMOELÉTRICA**

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Engenharia da Confiabilidade, do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Mariano

**CURITIBA**

**2017**



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campus Curitiba  
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação  
Departamento Acadêmico de Eletrotécnica  
Especialização em Engenharia da Confiabilidade



---

## TERMO DE APROVAÇÃO

### ANÁLISE DE DADOS DE VIDA DE ATUADORES ELETRO-HIDRÁULICOS DAS TURBINAS DE UMA CENTRAL TERMOELÉTRICA

por

FABIANO LOSS

Esta monografia foi apresentada em 10 de novembro de 2017, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Engenharia da Confiabilidade, outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O aluno foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Carlos Henrique Mariano, Dr.  
Professor Orientador - UTFPR

---

Prof. Emerson Rigoni, Dr. Eng.  
Membro Titular da Banca – UTFPR

---

Prof. Marcelo Rodrigues, Dr.  
Membro Titular da Banca – UTFPR

O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso.

*Dedico este trabalho à minha esposa Raquel e aos meus filhos Henrique e Guilherme, pelo amor e encorajamento, e, principalmente, pela compreensão quanto aos meus momentos de ausência e cansaço durante este processo.*

## **AGRADECIMENTOS**

Este trabalho expressa mais uma vitória conquistada sob os alicerces de perseverança e dedicação, herdados de meus queridos avós e pais, e aperfeiçoados por Deus durante minha caminhada rumo ao amadurecimento.

Neste sentido, agradeço primeiramente a Deus na figura de Jesus Cristo, por ter me guiado sob seu amor, proteção, força, inspiração e modelo.

Aos meus pais e avós, pela formação e caráter em seus exemplos de vida desbravadora e fiel aos seus propósitos.

À minha querida família: Raquel, Henrique e Guilherme, pelo acolhimento do lar, com muito amor, paciência e encorajamento.

Ao meu orientador Prof. Carlos Henrique Mariano, pela paciência, disponibilidade e competência em me guiar no desenvolvimento deste trabalho.

Ao amigo e gerente Fabricio Victor de Assis, por ter me proporcionado esta oportunidade sob patrocínio da ArcelorMittal Tubarão, empresa na qual trabalhamos, incentivando-me a aceitar e a vencer mais este desafio, acreditando em meu potencial.

A todos os demais professores pela dedicação sincera no ensino e compartilhamento de experiências durante os módulos ministrados.

Aos amigos colegas deste curso, que compartilharam comigo muitas horas de estudo e ajuda no desenvolvimento de nossos trabalhos.

Aos colegas de trabalho da ArcelorMittal Tubarão, que me ajudaram na construção deste trabalho, durante as pesquisas, levantamentos e estudos dos equipamentos, compartilhando comigo suas experiências profissionais na busca dos benefícios comuns dos resultados deste trabalho.

*“E não somente isto, mas também nos gloriamos nas tribulações, sabendo que a tribulação produz a paciência, e a paciência produz a experiência, e a experiência produz a esperança.”*

Carta de Paulo, Apóstolo de Jesus Cristo, aos Romanos, cap. 5, vers. 3 e 4.

## RESUMO

LOSS, Fabiano. **Análise de Dados de Vida de Atuadores Eletro-Hidráulicos das Turbinas de Uma Central Termoelétrica**. 2017. 101 pgs. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

Este trabalho foi concebido a partir da constatação de um problema existente de variabilidade na vida útil de atuadores eletro-hidráulicos de acionamentos das turbinas dos geradores elétricos da Central Termoelétrica da ArcelorMittal Tubarão. Com isso, a partir das metodologias de análises de dados de vida e RCM estudadas neste curso, identificou-se a possibilidade de aplicação das mesmas para se determinar o comportamento da vida útil de tais atuadores (também chamados de posicionadores) e estimar os seus os tempos de campanha ótima a partir de requisitos do processo. O desenvolvimento do trabalho passa pela metodologia de identificação dos modos de falha de tais equipamentos bem como pela definição de suas curvas de confiabilidade através de levantamentos históricos dos eventos de falhas e/ou substituições ocorridas, quer sejam preventivas ou corretivas, durante todos os seus ciclos de operação, visando se estabelecer os tempos ótimos de campanha desses equipamentos para suas substituições preventivas sem impactos operacionais. Como resultado, um modelo de comportamento temporal para a confiabilidade dos equipamentos objetos do estudo é então estabelecido, bem como o tempo de campanha ideal para substituição preventiva dos mesmos com base em certa confiabilidade definida, de forma a se esperar o funcionamento normal dentro desse período previsto, nas condições normais de operação. Notam-se, entretanto, como dificuldades para o pleno desenvolvimento do trabalho: a existência de histórico suficiente para a amostragem de falhas / sucessos destes equipamentos, quer seja pela dificuldade de se ter registros confiáveis quanto pela possibilidade de existência de “contaminação” de registros (falhas por eventos não intrínsecos ao equipamento, tais como: defeitos externos, erros de set-points de operação, operação fora de faixas recomendada pelo fabricante, dentre outros). Outra dificuldade inerente ao pleno sucesso é relacionada à obtenção de consenso para a definição de um parâmetro razoável de confiabilidade esperada para os equipamentos devido à cultura de “zero falha”, quando comparada aos custos envolvidos para tal. Após a implementação das melhorias identificadas no processo (tais como novas rotinas de manutenção com base nos estudos de confiabilidade realizados), espera-se que haja redução de defeitos dos posicionadores nos períodos de suas novas campanhas, e, em última análise, redução dos custos de paradas não programadas devido a falhas e/ou custos variáveis de operação limitada por defeitos nos mesmos (ex.: redução de geração elétrica durante operação com carga limitada devido à presença de certa falha no atuador, até que seja possível uma parada para atuação corretiva no mesmo).

**Palavras-chave:** Atuador Posicionador Eletro-hidráulico, Central Termoelétrica, Análise de Dados de Vida, Set-Point.

## ABSTRACT

LOSS, Fabiano. **Life Data Analysis of Turbines Electro Hydraulic Positioners of a Power Plant**. 2017. 101 pg. Monograph (Specialization in Reliability Engineering) - Universidade Technological Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

This work was conceived from the observation of an existing problem of variability in the useful life of the turbine's electro-hydraulic positioner actuator of the ArcelorMittal Tubarão Power Plant. Thereby, from the methodologies studied in the present course, a possibility of both LDA and RCM studies was identified to determine the behavior of such positioners in terms of life span as well as to estimate its optimal useful life from the requirements of the process. The development of the work involves the methodology of identification of failure modes for this equipment as well as the definition of their reliability curves by historical surveys about its failure events or preventive replacements, occurred during their entire operation lifetime, in order to establish the optimal lifetime for these equipment for its preventive replacements without operational impacts. As a final result, it's established a reliability temporal model for the equipment under this study, as well as the ideal lifetime for its preventive overall or replacement based on a certain defined reliability in order to expect its normal operation within that foreseen period under normal operating conditions. However, there are difficulties for the full development of the work, such as sufficient historical background for sampling of failures / successes about those equipment whether the possibility of wrong records events which could be not intrinsic for the equipment (like external fails, errors of operation, operation out of recommended range by the manufacturer, among others). Another difficulty is related to obtaining consensus to define the expected feasible reliability parameter for the equipment due to the "zero failure" culture, in comparison with its involved costs. After implementing the improvements to be identified in the involved process (as well as a new maintenance routines based on the reliability studies performed) it is expected the reduction of the failures in those positioners during its new period of operation. In a final analysis, it's expected a reduction of the cost of Power Plant's non-programming shutdown or operation in limited conditions due to failures in these positioners (for example, operation with reduced electrical generation during operation under load limitation due to the presence of a positioner failure until a future moment to get a safety turbine's shutdown for its replacement).

**Keywords:** Electro-hydraulic Actuator Positioner, Power plant, Life Data Analysis, Set-Point.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma Geral da Central Termoelétrica da ArcelorMittal Tubarão	24
Figura 2 – Fluxograma do Ciclo Fechado de Uma Única Planta da Central Termoelétrica da AMT	26
Figura 3 - Tipos fundamentais de turbinas a vapor: ação (esquerda) e reação (direita).	31
Figura 4 - Representação simbólica de turbinas	33
Figura 5 - Vista em corte de uma turbina de condensação com extração	35
Figura 6 - Diagrama esquemático de uma instalação de turbina de condensação com extrações de vapor.	36
Figura 7 - Esquema típico de controle de uma turbina	40
Figura 8 - Foto do Atuador Posicionador Eletro-hidráulico EG-10P	43
Figura 9 – Vistas Gerais do Atuador Posicionador Eletro-hidráulico EG-10P	44
Figura 10 - Esquema de funcionamento do atuador posicionador EG-10P	45
Figura 11 - Foto do Atuador Posicionador Eletro-hidráulico TM-25LP	47
Figura 12 - Vistas Gerais do Atuador Posicionador Eletro-hidráulico TM-25LP	48
Figura 13 - Esquema de funcionamento do atuador posicionador TM-25LP	49
Figura 14 – Diagrama de Blocos Funcionais de um Turbo-Gerador-Soprador	56
Figura 15– Função $R(t)$ versus Função $F(t)$	66
Figura 16 – Tela de configuração inicial dos dados de vida no Weibull++	81
Figura 17 – Tela com a inserção dos dados históricos de falha no Weibull++	81
Figura 18 – Probabilidade de Falha com limites de confiança de 90% bilateral – Em Escala Probabilística Logarítmica de Weibull	83
Figura 19 – Probabilidade de Confiabilidade versus Tempo com limites de confiança em 90% bilateral	84
Figura 20 – Probabilidade Acumulada de Falha no Tempo com limites de confiança em 90% bilateral – Escala Linear	85
Figura 21 – Gráfico da Densidade de Probabilidade de Falha	86
Figura 22 – Interface CQP do Weibull ++ com Simulação de Tempo de Garantia para 97,4% de Confiabilidade.	88
Figura 23 - Interface CQP do Weibull ++ com simulação de confiabilidade para tempo final de operação de 24 meses.	88

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais dados técnicos das Turbinas da CTE da AMT.....	33
Tabela 2 – Resultados das Simulações de Tempo de Vida e Confiabilidades Esperadas Para os Cenários Testados.....	90

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Descrição técnica dos atuadores eletro-hidráulicos das turbinas da CTE da MT.....	42
Quadro 2 – FMECA ilustrativa do rolamento da roda de um automóvel.....	63
Quadro 3 – FMECA do Posicionador Eletro-hidráulico da Turbina AMT.....	76
Quadro 4 – Histórico de Falhas dos Posicionadores Eletro-hidráulicos das Turbinas da AMT.....	79
Quadro 5 – Tratamento dos dados históricos para inserção no software.....	80

## LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 – Foto mostrando parte de uma turbina aberta (corpo, eixo roto com as palhetas rotativas).....	29
---	----

## LISTA DE ABREVIATURAS

BAC	Bomba de Água de Alimentação de Caldeira
BC	Bomba de Água Condensado de Turbina
BFG	Blast Furnance Gas (gás produzido no processo de Altos Fornos siderúrgicos)
COG	Coke Oven Gas (gás produzido no processo de Coqueria siderúrgica)
CTE	Central Termoelétrica
FMEA	Fault Mode and Effect Analysis
FMECA	Fault Mode and Criticality Analysis
LDA	Life Data Analisys
LDG	Linz-Donawitz Gas (gás produzido no processo de Aciara siderúrgica leva o nome das duas cidades austríacas onde o esse processo for: desenvolvido)
MLE	Maximum Likelihood Estimation
MTTF	Mean Time Between Failure
MTTR	Mean Time Between Repair
MV	Manipulates Variable (variável manipulada)
PAA	Pré Aquecedor de Ar
PF	Potential Failure
PV	Process Variable (variável medida do processo)
QCP	Quick Calculator Pad (ferramenta de cálculos para simulações no software Weibull++, da empresa Reliasoft Corporation)
rpm	Rotações por minuto
RPN	Risk Priority Number
SAH	Steam Air Heater
SP	Set Point
TGS	Turbo-Gerador-Soprador
UMSR	Unplanned Maintenance Stoppage Ratio

## LISTA DE SIGLAS

AMT	ArcelorMittal Tubarão (unidade operacional siderúrgica pertencente ao grupo ArcelorMittal Brasil, subsidiária brasileira do grupo multinacional ArcelorMittal)
RCM	Reliability Centered Maintenance

## LISTA DE ACRÔNIMOS

ESCAPES	Environment, Safety, Control, Appearance, Protection, Efficiency Superfluous
PROCOM	Sistema de Computador de Processo Nível 2 da AMT
SISMANA	Sistema de Manutenção da ArcelorMittal Tubarão

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\beta$  – “Beta”: Representação do parâmetro de forma da função de distribuição probabilística de Weibull.

$\eta$  – “Eta”: Representação do parâmetro de vida característica da função de distribuição probabilística de Weibull.

$\gamma$  – “Gamma”: Representação do parâmetro de vida inicial da função de distribuição probabilística de Weibull

$\lambda$  – “Lambda”: representação para função de distribuição probabilística da taxa de falha no tempo.

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>17</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>19</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>20</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>21</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>22</b>
<b>LISTA DE QUADROS</b> .....	<b>22</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b> .....	<b>22</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	<b>24</b>
<b>SUMÁRIO</b> .....	<b>25</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1 TEMA DO TRABALHO.....	14
1.1.1 Aspectos Gerais.....	14
1.1.2 Aspectos Específicos.....	15
1.2 OBJETIVOS.....	17
1.2.1 Objetivos Gerais.....	17
1.2.2 Objetivos Específicos.....	17
1.3 METODOLOGIA APLICADA.....	19
1.4 ASPECTOS PRÁTICOS DS TRABALHO.....	20
1.5 RESULTADOS ESPERADOS.....	22
<b>2 APRESENTAÇÃO DO OBJETO DA PESQUISA</b> .....	<b>23</b>
2.1 MACROFLUXO DA CENTRAL TERMOELÉTRICA DA AMT.....	25
2.2 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA TURBINA A VAPOR.....	29
2.2.1 Princípio de Funcionamento da Turbina a Vapor.....	30
2.2.2 Componentes clássicos de uma turbina.....	34
2.2.3 Descrição do Funcionamento da turbina a vapor.....	38
2.2.3.1 Funcionamento do sistema de controle da turbina a vapor.....	39
2.3 O POSICIONADOR ELETRO-HIDRÁULICO DE CONTROLE DA TURBINA 41	
2.3.1 Posicionadores Eletro-hidráulicos das Turbinas da CTE da AMT.....	42
2.3.1.1 Atuador Eletro-hidráulicos Woodward EG-10P.....	42
2.3.1.1.1 <i>Descrição de funcionamento do Posicionador EG-10P</i> .....	45
2.3.1.2 Atuador Eletro-hidráulico Woodward TM-25LP.....	47
2.3.1.2.1 <i>Descrição de funcionamento do Atuador Posicionador TM-25LP</i> .....	49
2.4 SÍNTESE DO CAPÍTULO 2.....	51
<b>3 REFERENCIAL TEÓRICO DE ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE DO TRABALHO</b> .....	<b>52</b>
3.1 CONCEITOS E APLICAÇÕES DO RCM.....	52
3.1.1 O contexto operacional para a análise crítica do RCM.....	52
3.1.2 Mapeamento Funcional.....	53

3.1.2.1.1	<i>Tipos de funções</i> .....	54
3.1.2.1.2	<i>Diagrama de Blocos</i> .....	55
3.1.2.1.3	<i>Descrição das funções</i> .....	57
3.1.3	Conceitos da Falha Funcional no RCM .....	58
3.1.3.1	Modos de Falha.....	58
3.1.4	Conceitos de FMEA e FMECA .....	59
3.1.4.1	Priorização da Análise dos Modos das Falhas .....	61
3.1.4.2	Sintetização da documentação de uma FMECA .....	62
3.2	CONCEITOS E FUNDAMENTOS SOBRE DE ANÁLISE DE DADOS DE VIDA (LDA) .....	63
3.2.1	Conceitos e fundamentos da Confiabilidade .....	63
3.2.2	Funções de distribuições probabilísticas da Confiabilidade .....	66
3.2.2.1	Funções de Confiabilidade, Probabilidade Acumulada de Falha e Densidade de Probabilidade de Falha .....	66
3.2.2.2	Distribuição de Weibull .....	68
3.2.2.2.1	<i>Equações Aplicadas à Distribuição de Weibull</i> .....	68
3.3	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO 3 .....	71
<b>4</b>	<b>APLICAÇÃO DO REFERENCIAL TEÓRICO NO OBJETO DA PESQUISA</b> .....	<b>72</b>
4.1	APLICAÇÃO DO RCM NOS EQUIPAMENTOS OBJETOS DO ESTUDO .....	72
4.1.1	Funções Operacionais dos Posicionadores Eletro-Hidráulicos das Turbinas. ....	72
4.1.2	Falhas funcionais dos Posicionadores Eletro-Hidráulicos das Turbinas.....	73
4.1.3	Modos de falha dos Posicionadores Eletro-Hidráulicos das Turbinas... ..	74
4.1.4	FMECA dos Posicionadores Eletro-Hidráulico das Turbinas.....	75
4.2	LDA DOS POSICIONADORES ELETROHIDRÁULICOS DAS TURBINAS. ....	77
4.2.1	Eventos de falha e manutenções preventivas (suspensões) ds Posicionadores Eletro-hidráulicos. ....	78
4.2.2	Tratamento dos dados de falha e suspensão distribuição de confiabilidade. ....	80
4.2.3	Estimativas de tempo de operação versus confiabilidade. ....	86
4.2.3.1	Estimativa de confiabilidade alinhada à meta de UMSR da AMT. ....	87
4.2.3.2	Comparação de medidas de confiabilidade para diferentes cenários. ...	89
4.3	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO 4 .....	91
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E CONCLUSÕES</b> .....	<b>92</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>96</b>
	<b>ÍNDICE ONOMÁSTICO</b> .....	<b>97</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 TEMA DO TRABALHO

### 1.1.1 Aspectos Gerais

A evolução das técnicas de manutenção preventiva tem sido motivada pela necessidade de redução contínua dos custos fixos (manutenção, peças, sobressalentes) bem como dos custos variáveis (lucro cessante devido ao tempo de parada dos equipamentos para manutenção tanto preventiva quanto corretiva), impostas por um mercado cada vez mais competitivo e globalizado.

Por outro lado, as culturas das indústrias brasileiras ainda levam em consideração as experiências passadas de seus corpos técnicos e gerenciais, criadas a partir dos implantadores das tecnologias aplicadas em suas construções e startups (no caso do Brasil, em particular da siderurgia, objeto do caso desta monografia, há traços fortes da cultura tradicional japonesa, italiana e alemã no modo de operar e manter as plantas e seus equipamentos industriais).

Tais culturas insistem na prática tradicional de operação e manutenção de forma preventiva e conservadora a partir dos históricos das empresas e plantas originadoras das referidas tecnologias aplicadas (detentoras do *know-how* de concepção, montagem e aplicação), e que consistem, basicamente, na operação dos ativos estritamente dentro (ou abaixo) das condições máximas de operação descritas no projeto, sem considerar os fatores de trabalho e de segurança utilizados na elaboração dos mesmos ou em eventuais otimizações de operação realizadas ao longo do tempo. Nestes casos, as substituições e ou manutenção de componentes e/ou equipamentos se baseiam em filosofias preventivas pelas recomendações dos fabricantes somadas às técnicas tradicionais de inspeções periódicas preventivas e preditivas, as quais visam trazer informações relevantes que eventualmente possam divergir das recomendações iniciais, a fim de alterar os períodos inicialmente programados para as devidas execuções de manutenção preventivas.

A questão crucial é que, com a competitividade acirrada no mercado atual globalizado, a pressão para redução dos custos é contínua, sendo a mesma o fator fundamental para a sobrevivência do negócio. Com isso as culturas e técnicas

tradicionais implantadas deixaram de satisfazer as demandas de sobrevivência das corporações, levando à necessidade de se modificar as formas de operar e manter os seus ativos, de forma a se obter continuamente a otimização dos processos, com o desafio de se extrair “mais com menos”, maximizando os resultados das empresas pela redução dos custos fixos e variáveis, os quais passam a ser as únicas variáveis passivas de serem controladas no negócio, visando se manter margens de lucro mínimas para a sobrevivência da empresa (já que, no mercado, especialmente na siderurgia, não é possível se controlar o valor final do produto, o qual é ditado única e exclusivamente pelo mercado).

Devido ao exposto, nota-se a presença de constante demanda para se aperfeiçoar a gestão dos ativos (operação x manutenção otimizadas), o que tem trazido consenso geral no âmbito das indústrias de que as culturas tradicionais devem ser modificadas por novas metodologias de utilização dos ativos, baseadas em estudos de confiabilidade reais, tais como o estudo estatístico dos dados de vida de equipamentos e componentes – metodologia chamada, em inglês, de *Life Data Analysis* (LDA) – aliado a outras técnicas de realização de manutenção baseada em confiabilidade – *Reliability Centered Maintenance* (RCM), dentre outras.

### 1.1.2 Aspectos Específicos

O caso prático apresentado neste trabalho visa aperfeiçoar uma abordagem de realização de manutenção preventiva em posicionadores eletro-hidráulicos de turbinas a vapor de grande porte, os quais tem como função principal a realização de abertura controlada da válvula de entrada de vapor da turbina, visando manter a carga da turbina em um valor determinado, conforme necessidade demandada pelos processos, seja em geração elétrica para utilização no parque industrial (decorrente de gerador elétrico acoplado) ou em geração de energia mecânica (decorrente de compressores rotativos axiais para envio de ar para os Altos Fornos da planta siderúrgica).

Tais posicionadores têm apresentado variabilidade em seus modos de falhas com o tempo, e não têm um plano definido de forma metodológica para suas substituições preventivas, os quais são, atualmente, baseados nas experiências dos técnicos e recomendações do fabricante. Entretanto, tais planos demonstram não



ser suficientes nas condições de trabalho a que esses posicionadores estão expostos, uma vez que há indícios de ocorrência de eventos de substituições e/ou manutenções preventivas desnecessárias, bem como, por outro lado, há situações em que modos de falha têm sido revelados antes dos finais das campanhas de funcionamento estabelecidas pelos prazos atuais pré-definidos em conjunto com as paradas programadas das plantas.

Um fator dificultador de se estabelecer um plano de manutenção preventiva por metodologia de manutenção baseada em confiabilidade nesses equipamentos é que nem sempre o intervalo *Potential Failure* (PF) dos mesmos é suficiente para se realizar uma parada preventiva sem prejuízos de custos variáveis não previstos, pois quando uma falha potencial é detectada, pode ocorrer de não haver tempo suficiente de operação segura remanescente até a próxima parada programada da planta operacional em questão (paradas previstas no plano de produção anual da empresa) para se realizar a manutenção preventiva no equipamento, uma vez que essas plantas não podem ser paradas por determinação pura e simplesmente de uma ocorrência de um ponto de falha potencial. O lucro cessante nesses casos é significativamente grande comparado ao tempo de parada para se realizar tal manutenção.

Com isso, o desafio deste trabalho está em se estabelecer o tempo ótimo de campanha de operação deste tipo de equipamento antes mesmo da ocorrência do ponto PF, de forma a permitir a sua manutenção dentro de uma “janela” de parada já pré-definida no plano de produção. Outro aspecto deste desafio está em otimizar os custos de manutenção, evitando manutenções preventivas desnecessárias, e, em última análise, trazer a redução dos custos totais envolvidos (paradas não programadas devido à ocorrências de falhas em operação ou custos de manutenção elevados por realização de manutenções desnecessárias e/ou redução de tempo de campanha de operação pela substituição preventiva desnecessária do equipamento em operação por um sobressalente.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivos Gerais

Determinar o comportamento da vida útil de atuadores eletro-hidráulicos de controle das Turbinas de uma Central Termoelétrica da ArcelorMittal Tubarão, por meio da Análise de Dados de Vida.

Em última análise, o trabalho visa estimar o tempo de campanha ótima para as condições normais de operação para uma estimativa de confiabilidade desejada, a partir de requisitos do processo em questão, visando suas substituições preventivas de forma otimizada, sem que haja troca desnecessária (situação conservadora) ou sobrevida com risco de parada dos processos para manutenções ou substituições corretivas não programadas.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

A partir da constatação de um problema existente de variabilidade na vida útil dos posicionadores eletro-hidráulicos das turbinas da Central Termoelétrica (CTE) da AMT, este estudo tem como objetivos específicos:

- Identificar os modos de falhas desses posicionadores eletro-hidráulicos e ranqueá-los para aplicação de metodologia de manutenção centrada em confiabilidade, correlacionando-os à falhas reais ocorridas durante certo período histórico de observação de dados de vida desses atuadores.
- Realizar estudo detalhado dos componentes dos atuadores, suas características e formas de atuação, bem como as funções integradas do equipamento montado como um conjunto único.
- Criar um histórico de eventos de falhas e/ou substituição preventiva dos atuadores, para servir como banco de dados para os estudos de confiabilidade dos mesmos.
- Gerar um modelo coerente para as funções relativas aos comportamentos confiabilidade e falhas no tempo para os equipamentos estudados, a partir da amostragem de eventos pré-existentes dentro do período do histórico definido. Tais eventos devem ser constituídos de: falhas

ocorridas, resultados de conformidade de inspeções preventivas e também de substituições preventivas por equipamentos sobressalentes durante as paradas programadas das plantas em que os mesmos estão instalados.

- Identificar e propor possíveis adequações para variáveis externas que possam estar afetando a confiabilidade de tais equipamentos. Tais variáveis externas são identificadas nas amostras de ocorrências de falhas prematuras não imputadas a defeitos intrínsecos dos equipamentos, o que deve ser evidenciado por análise minuciosa dos modos de falha, através diagnósticos técnicos complementares das mesmas.
- Definir, em conjunto com o corpo técnico e de gestores pertinentes, uma faixa de valores de confiabilidade aceitáveis para os equipamentos objeto deste estudo, através de critérios operacionais e de manutenção, tais como: criticidades relacionadas aos processos envolvidos, requisitos de certificações existentes, metas de disponibilidades e tempos admissíveis de paradas (caso haja), existência de redundâncias, política de sobressalentes, existência de equipamento *hot-standby*, previsões de ociosidade operacional, dentre outros. Essa medida de confiabilidade será utilizada para se traçar o tempo ótimo de funcionamento em função da curva levantada para tal.
- Estabelecer o tempo ótimo de campanha para tais equipamentos, a partir da curva de confiabilidade definida para os mesmos, visando substituições preventivas sem impactos operacionais, dentro de uma confiabilidade definida e esperada, levando-se em consideração o desafio do sincronismo entre o tempo de vida ótimo do atuador (para sua substituição) com as “janelas” de períodos disponíveis para tais manutenções, as quais ocorrem durante paradas pré-programadas das plantas em questão. Tais paradas consideram outros fatores além da premissa de confiabilidade desses equipamentos, tais como: exigências legais de inspeções periódicas em caldeiras, paradas para manutenções preventivas gerais nas turbinas nas quais tais atuadores estão instalados e paradas programadas de outras plantas clientes do complexo siderúrgico em questão (que levam à necessidade de paradas parciais ou

totais das plantas da Central Termoelétrica; ex.: uma parada do Alto Forno leva à parada do conjunto turbina-gerador-soprador que se encontra alinhado para esse Alto Forno).

- Por último, sob o ponto de vista acadêmico, este trabalho tem o propósito de exercitar e aplicar, de forma prática e objetiva, teorias e ferramentas de engenharia de confiabilidade relacionadas à análise de dados de vida aliadas às técnicas de manutenção centrada em confiabilidade para estabelecimento de plano de manutenção eficaz e otimizado.

### 1.3 METODOLOGIA APLICADA

O desenvolvimento do trabalho passa por algumas fases bem definidas, algumas dependentes entre si e outras realizadas em paralelo durante todo período de pesquisa, análise e formatação do estudo, que podem ser pontuadas como segue:

- Estudo técnico dos manuais e relatórios de manutenção junto aos fornecedores e prestadores de serviço dos equipamentos em questão, com foco no pleno entendimento do funcionamento do equipamento bem como de definição e entendimentos dos seus modos de falha.
- Realização de levantamentos históricos de eventos através de relatórios de paradas programadas, registros no Sistema de Gestão de Manutenção (SISMANA), entrevistas com técnicos e operadores relativos à este equipamento.
- Classificação das ocorrências pelas origens, pertinências e sob influência de efeitos externos (outras anomalias durante o processo de operação / manutenção eventualmente identificados).
- Identificação das causas básicas que levaram às ocorrências das falhas observadas não intrínsecas ao processo de operação e/ou manutenção normal visando tratamento à parte, quer seja através de melhorias nos processos com eliminação de pontos fracos, mudança de forma de operação, mudança de método de manutenção / montagem, etc. através da proposição de plano de ação para as correções / melhorias identificadas.

- Definir modelos matemáticos para análise dos dados de vida dos equipamentos, utilizando-se de dados confiáveis e intrínsecos ao processo de operação e manutenção normal dos equipamentos (expurgando-se os eventos não intrínsecos mencionados no ponto anterior), pelo estabelecendo da função mais coerente para definição do comportamento de confiabilidade dos equipamentos. Estes dados são levantados historicamente, e são, basicamente, classificados como: evento de falhas real (perda da função); evento de conformidade de funcionamento (observado em inspeção periódica); evento de substituição preventiva; eventos de falhas potenciais (ex.: defeitos que não interferem na operação, identificados após a retirada de operação, no ato de uma manutenção preventiva).
- A partir do modelo definido para o comportamento da confiabilidade do equipamento, serão feitos cruzamentos temporais desta curva de confiabilidade esperada com todos os tipos de períodos de paradas programadas já previstas para se levantar as confiabilidades reais esperadas dentro desses períodos e apresentá-las para o corpo técnico e gerencial visando entendimento e consenso das ações decorrentes para definição das estratégias de manutenção preventivas e os riscos a serem assumidos. Um outro fator para verificação da conformidade dos valores de confiabilidade esperados com a realidade operacional seria o confronto do resultado obtido para o tempo definido de com outras referências de gestão correlacionadas à confiabilidade esperada, tais como: criticidade dos equipamentos, indicadores atuais e metas de manutenção já praticadas na planta.

#### 1.4 ASPECTOS PRÁTICOS DS TRABALHO

A realização dos trabalhos práticos e estudos do trabalho se dará na Central Termoelétrica da ArcelorMittal Tubarão, através de levantamentos de montagem, modos de operação, inspeções preventivas, acompanhamento de paradas para manutenção, bem como no escritório da equipe de manutenção para os estudos dos

manuais dos equipamentos, relatórios de manutenção realizados, registros históricos de eventos de inspeção, etc.

Espera-se, ao longo do processo de pesquisa e definições, algumas dificuldades relacionadas aos resultados das pesquisas e à participação do corpo técnico no tocante às fases demandadas para o trabalho em questão, tais como:

- Insuficiência de histórico para a amostragem de falhas / sucessos e geração de modelo coerente com o comportamento desses equipamentos, quer seja tanto pela dificuldade de se ter registros confiáveis quanto pela possibilidade de existência de “contaminação” nos registros (ex.: falhas por eventos não intrínsecos ao equipamento, tais como: defeitos em filtros de óleo, erros de set-points de operação; operação fora de faixas recomendada pelo fabricante, etc.).
- Dificuldade de se obter consenso para a definição do parâmetro de confiabilidade esperada para os equipamentos, devido à cultura de “zero falha”, quando comparada aos custos envolvidos para tal, bem como devido à impossibilidade de realização de manutenção preventiva a qualquer tempo estabelecido pelo modelo, uma vez que para realização dessas manutenções, as máquinas em questão (conjuntos turbinas-geradores-sopradores) devem ser tiradas de operação, o que não é possível a qualquer momento, tendo em vista os requisitos de operação integrada ao processo siderúrgico (atendem diretamente aos Altos Fornos), bem como devido à perda de receita financeira obtida pela geração elétrica (um dos produtos fornecidos por esses conjuntos). Neste sentido, já existem períodos pré-programados para paradas operacionais em sincronismo com todos os demais requisitos da usina, e, portanto, as campanhas de operação dos equipamentos objetos deste estudo devem estar harmonizadas com estes períodos pré-existent, o que poderá comprometer à confiabilidade definida (caso estes períodos sejam maiores do que o estabelecido pelo estudo).

## 1.5 RESULTADOS ESPERADOS

Ao final do trabalho, espera-se que, como resultado prático, obter as curvas de confiabilidade e falhas para os atuadores em questão, e, a partir destes perfis de confiabilidade, padronizar e implantar os planos de manutenção preventiva de forma sistematizada para os atuadores eletro-hidráulicos das turbinas da Central Termoelétrica da ArcelorMittal Tubarão. Tais planos estabelecerão os ciclos ótimos para a realização de manutenção geral nos atuadores, levando-se em consideração as limitações determinadas por períodos pré-existentes de paradas gerais das plantas em questão, de forma que os tempos definidos para as preventivas dos atuadores sejam adaptados a coincidir com tais períodos, uma vez que os mesmos não podem ser retirados para manutenção com as máquinas em funcionamento, assim como não é viável promover paradas das máquinas somente para realização de tais manutenções.

Com estes planos estabelecidos e funcionando, espera-se que no longo prazo (após alguns ciclos de períodos de realização), haja a eliminação de defeitos dos atuadores dentro dos períodos de suas campanhas de operação, o que deverá ser constatado através de inspeções de manutenção sensível e observação de seus comportamentos operacionais, os quais não deverão evidenciar nenhum modo de falha real ou potencial manifesto.

Em última análise, espera-se a redução dos custos de paradas não programadas devido à falhas nesses atuadores e/ou redução dos custos variáveis por geração de receita de energia elétrica produzida (pelos geradores atendidos pelos atuadores em questão) devido a eventuais modos de operação limitada por defeitos nos atuadores (ex.: limitação de geração máxima em operação, até parada segura da turbina para troca do atuador com defeito). Tais reduções de custos deverão ser demonstradas pelo aperfeiçoamento da gestão dos ativos envolvidos (ex.: menor h/h de manutenção; menor frequência de realização de manutenção preventiva; menor custo com sobressalentes desnecessários; etc).

## 2 APRESENTAÇÃO DO OBJETO DA PESQUISA

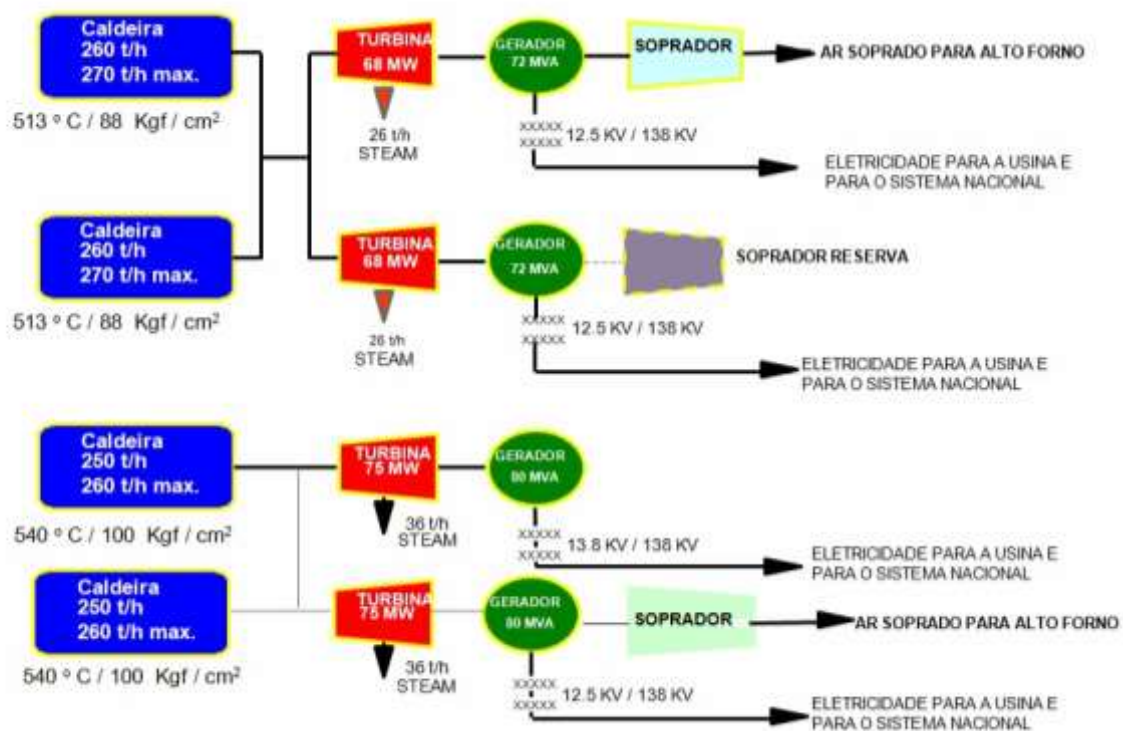
Este capítulo detalhará o equipamento objeto de aplicação da metodologia deste trabalho, a saber, os posicionadores eletro-hidráulicos utilizados para controle de carga das turbinas instalados na Central Termoelétrica da ArcelorMittal Tubarão. Tal abordagem se dará partir da visão sistêmica do processo correlacionado ao mesmo, de forma a trazer o pleno entendimento de todo o contexto operacional envolvido. Neste sentido, este capítulo traz esta proposta através de uma abordagem técnica de forma a tratar dos requisitos mínimos para a fundamentação do desenvolvimento deste trabalho.

A partir do entendimento do contexto técnico e funcional do equipamento objeto do estudo, será então possível se estimar o perfil de comportamento temporal da confiabilidade dos mesmos. Tal estimativa visa, ao fim, a determinação do tempo de campanha ótima para as condições normais de operação desses posicionadores. Para efeitos deste estudo, é razoável estimar que os equipamentos relacionados relacionados neste este trabalho sejam similares e sujeitos às mesmas condições, conforme premissas apresentadas a seguir, a partir do macroprocesso que compreende a Unidade Operacional em questão, representada pelo fluxograma mostrado na



Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma Geral da Central Termoeletrica da ArcelorMittal Tubarão



Fonte: arquivos de apresentação da área de Energia da AMT (2016).

Conforme se pode observar na

Figura 1, A Central Termoelétrica da AMT é composta por quatro plantas de produção de energia eletromecânica, com capacidade total de geração de 286MW, cuja geração de energia se dá a partir da transformação de energia térmica de combustíveis coprodutos do processo siderúrgico da AMT, os quais são queimados em caldeiras aquo-tubulares que, por sua vez, produzem vapor superaquecido em alta pressão, que move as palhetas das turbinas a vapor, transformando então a energia térmica proveniente do vapor das caldeiras em energia mecânica, em forma de rotação de turbinas. Cada turbina tem seu eixo acoplado solidaria de forma axial ao eixo do rotor do gerador elétrico e este, por sua vez, acoplado da mesma forma ao rotor de um compressor axial de ar, de tal forma que se tenha um único conjunto rotativo denominado de TGS (turbo-gerador-soprador).

Cada caldeira foi concebida sob porte e projeto similares, com capacidade individual média de produção de 260 t/h de vapor superaquecido à pressão e temperatura médias controladas, respectivamente, a valores médios de 94kgf/cm<sup>2</sup> e 526°C, totalizando 1.040t/h de produção de vapor de toda a Central. O excedente do vapor produzido (não enviado às turbinas, ou extraído das mesmas parcialmente durante o processo de realização do trabalho na turbina) é enviado à rede de vapor da usina para as mais diversas utilizações nos processos auxiliares da planta siderúrgica.

Após ter gerado trabalho pelo movimento rotativo do rotor da turbina, o vapor exausto, já saturado, é captado em um condensador onde será resfriado e novamente transformado em água para ser retornado ao ciclo fechado de produção de vapor da caldeira.

Cada turbina tem concepção e potência similar entre si, da ordem de 70MW cada, sob a rotação nominal de 3600rpm, com o trabalho do vapor dividido em estágios de expansão intermediários axiais com possibilidade de extrações de vapor nos mesmos.

Os quatro geradores elétricos têm capacidade média de 68MVA cada (capacidade total de geração elétrica da Central em torno de 272MW), de forma que se tem uma configuração de autossuficiência em energia elétrica para toda a planta siderúrgica (uma vez que os combustíveis para esta produção são oriundos do próprio processo siderúrgico). Desta forma, o excedente de energia elétrica é disponibilizado para venda ao sistema elétrico nacional interligado.

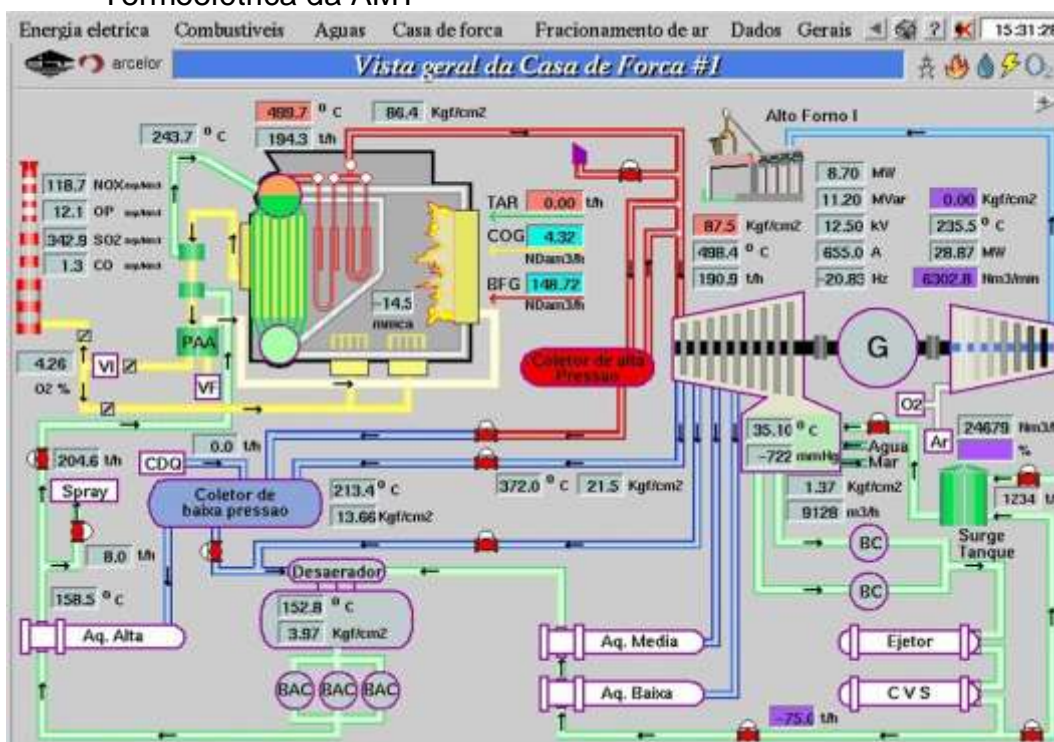
Os sopradores axiais de ar são utilizados para envio de ar para o funcionamento dos Altos-Fornos da planta siderúrgica integrada, com capacidade de volume de sopro de ar da ordem de 8.300m<sup>3</sup>/min por soprador, com potência estimada em torno de 25 a 35MW cada, dependendo das vazões de ar solicitadas pelos processos clientes (Altos Fornos).

O próximo tópico apresenta o fluxograma detalhado do ciclo térmico fechado de produção de energia térmica x mecânica dessa Central Termoelétrica.

## 2.1 MACROFLUXO DA CENTRAL TERMOELÉTRICA DA AMT

A Figura 2 apresenta a visão geral do ciclo térmico fechado de uma única planta da Central Termoelétrica da AMT, apresentando seus principais equipamentos e sistemas, a saber: caldeira, circuito de vapor superaquecido, circuito de vapor saturado, conjunto rotativo turbina-gerador-soprador, circuito de água de alimentação de caldeira, sistema de combustíveis, sistemas de ar de alimentação e sistemas de gases exaustos da fornalha da caldeira.

Figura 2 – Fluxograma do Ciclo Fechado de Uma Única Planta da Central Termoelétrica da AMT



Fonte: Tela de Supervisão do Sistema Informatizado de Monitoração dos Processos em Nível 2 da ArcelorMittal Tubarão (Sistema PROCOM) (2017).

- Combustíveis utilizados na caldeira: alcatrão (linha-seta verde – Tar: alcatrão em inglês), COG (linha-seta amarela) e BFG (linha-seta vermelha).
- Circuito de água de alimentação: linha verde, a partir do condensador da turbina até o tubo reservatório superior da caldeira (chamado de tubulão). O circuito é fechado, ou seja, a água que retorna para a caldeira é proveniente do vapor condensado no Condensador da turbina. Entretanto há reposição das perdas através de água desmineralizada, fornecida a partir do Surge-Tanque (tanque específico para reposição de água no circuito da CTE, identificado em verde, na posição centro-direita da Figura 2). Nota-se, ao longo deste circuito, a existência de bombas de condensado (BC - de baixa pressão, para coleta da água do condensador) e bombas de água de alimentação (BAC – que elevam a pressão da água à pressão do tubulão superior, onde a mesma é entregue à caldeira para ser convertida em vapor). Ao longo do trajeto, a água é pré-aquecida por trocadores de calor que realizam a troca térmica com parte do próprio vapor produzido (aquecedores de baixa, média e alta pressão), bem como também pelo calor cedido pelos gases exaustos antes de serem descartados na chaminé, através de trocadores de calor denominados “economizadores”.
- Corpo da caldeira: no caso da planta em questão, a mesma é do tipo aquo-tubular, com fornalha retangular com queimadores tangenciais. O seu sistema água-vapor é composto por um tubulão inferior e um tubulão superior conectados a tubos de ascensão de água, os quais compõem as paredes da fornalha e receberão a incidência direta do calor proveniente da queima dos combustíveis, transformando a água em vapor saturado (úmido), sob circulação ascendente. Há também os tubos descendentes, que não têm contato direto com as chamas, e permitem, portanto a circulação de água do tubulão superior para o inferior, por simples convecção térmica. Também compõe a caldeira os tubos dos superaquecedores de vapor (destacados na Figura 2 na cor vermelha, no interior da caldeira). Os superaquecedores tem a função de transformar o vapor saturado produzido na caldeira, coletado a partir do tubulão

superior, em vapor superaquecido (seco), pela ação de um segundo aquecimento em um ambiente isento de água em ebulição, produzindo assim o superaquecimento do vapor. Isso é possível devido à condução do vapor a um ambiente sob ganho de calor adicional através troca térmica com os gases exaustos provenientes da queima na fornalha.

- Vapor superaquecido - linha vermelha: conforme já explicado, esse é o produto da caldeira, que na representação da Figura 2, é entregue à turbina a 498°C e 87,5Kgf/cm<sup>2</sup>, à vazão nominal de 260t/h, como propulsor do conjunto rotativo TGS (turbo-gerador-soprador), que no caso gira à rotação nominal de 3.600rpm. Conforme observado na Figura 2, parte deste vapor superaquecido também pode ser desviado para o Coletor de Alta Pressão, e, na sequência, para o Coletor de Baixa Pressão, onde o mesmo é reduzido à condição de vapor saturado sob valores de temperatura e pressão nos patamares de 210 a 240°C e 12 a 15Kgf/cm<sup>2</sup>, para serem utilizados em outras aplicações auxiliares da planta. Outro ponto de transformação de vapor superaquecido em vapor saturado é a própria turbina, através da realização de extrações de vapor pelos seus estágios de expansão. No caso da turbina mostrada na Figura 2 (turbina 1), há quatro estágios de extração de vapor. Este vapor é também utilizado para otimização da energia térmica do processo, no reaquecimento inicial da água recirculada (aquecedores de baixa e média), no pré-aquecimento do ar de combustão (em um trocador de calor denominado SAH – Steam Air Heater), e nas demais aplicações de processo, via circuito do Coletor de Baixa. Seu circuito é representado pelas linhas em azul da Figura 2).
- Gases de exaustão - linha amarela: são os gases resultantes da queima dos combustíveis na fornalha da caldeira. Parte desses gases é eliminada pela chaminé e parte retorna para a fornalha de queima, para controle de pressão da mesma (chamado de “gás recirculado”). Ao longo do circuito de exaustão há também os seguintes trocadores de calor, com a finalidade de ganho de energia térmica desses gases: superaquecedor (já apresentado), PAA (Pré Aquecedor de Ar) - trocador de calor com ar de alimentação da fornalha, e Economizadores: trocadores de calor com os circuitos de água de alimentação da caldeira (representados pelos

quadros em verde na Figura 2, na interseção entre os circuitos de água de alimentação e gases de exaustão, à esquerda da fornalha).

Além dos sistemas descritos, há a turbina a vapor, principal equipamento “cliente” deste processo da Central Termoelétrica, pois tem a finalidade de produzir a energia mecânica a partir do vapor produzido, pela transformação dos insumos de entrada (energia térmica dos combustíveis convertida em energia térmica de transformação da água para vapor, e, por último, conversão da energia térmica do vapor em energia mecânica cinética de rotação da turbina).

A turbina, por sua vez, é composta por vários elementos. Dentre os tais estão os posicionadores eletro-hidráulicos de controle de admissão de vapor, objetos de estudo neste trabalho. Com isso, para o correto entendimento do funcionamento desses atuadores, bem como de seus modos de falha, tipos e criticidades de seus defeitos, faz-se necessário também o detalhamento do equipamento “turbina a vapor” e seus componentes, conforme apresentado no próximo parágrafo.

## 2.2 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA TURBINA A VAPOR

A Fotografia 1 ilustra o exemplo de uma turbina a vapor, equipamento através do qual a energia contida no vapor gerado pela caldeira é convertida em energia cinética, através da rotação a rotação mecânica de seu eixo, pela realização de trabalho do vapor nos diversos estágios de expansão constituídos de palhetas radiais angulares.

Fotografia 1- Foto mostrando parte de uma turbina aberta (corpo, eixo roto com as palhetas rotativas)



Fonte: (MAN TURBO, 2008).

Ao eixo da turbina é acoplado, de forma axial, o eixo de outro conjunto rotativo que utilizará essa energia cinética gerada, como, por exemplo, um gerador elétrico ou um compressor rotativo.

Ao deixar a turbina, o vapor exausto é lançado no condensador, que o converte em água. A água formada no condensador passa por vários estágios de reaquecimento e retirada bolhas de ar antes de chegar às bombas de água de alimentação da caldeira para novamente ser transformada em vapor, fechando o ciclo de seu trabalho.

### 2.2.1 Princípio de Funcionamento da Turbina a Vapor

No interior da turbina, o vapor é distribuído em bocais formados por estágios axiais sucessivos de palhetas radiais, cuja disposição é alternada entre fixadas ao corpo (carcaça) da turbina, e palhetas móveis, presas ao eixo (ver



Fotografia 1).

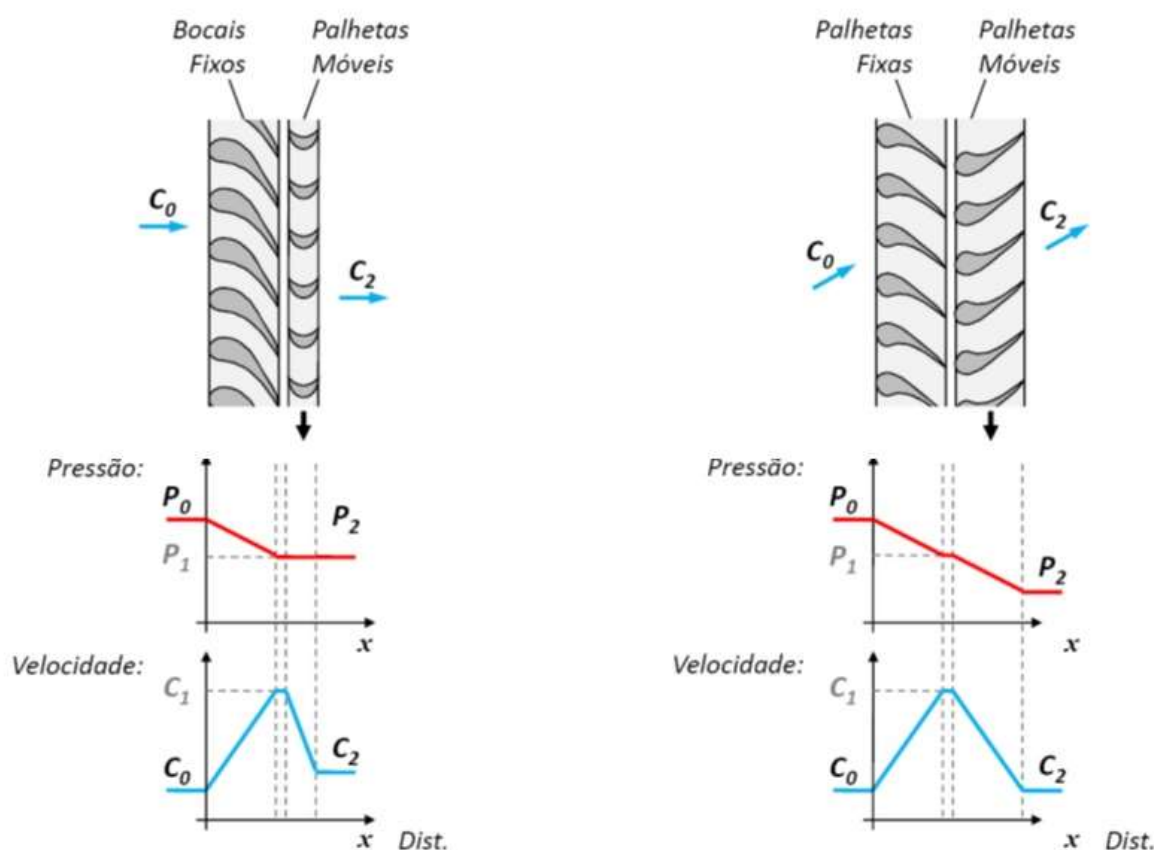
As turbinas a vapor podem ser classificadas segundo diferentes critérios. Quanto à finalidade, podem ser (LORA; NASCIMENTO, 2004):

- Para geração de energia elétrica: utilizadas para acionar um gerador elétrico. Geralmente, operam com velocidade síncrona (1800 ou 3600 rpm) devido à interligação a sistemas elétricos, e com potências na faixa de 16 a 1.300 MW;
- Para acionamento mecânico: utilizadas para acionamento de equipamentos mecânicos, tais como, ventiladores, bombas, compressores, propulsão de navios e outros grandes equipamentos girantes. Normalmente, operam com velocidades de 900 a 10.000 rpm e potências na faixa de 500 kW a 10 MW.

Com relação ao princípio de funcionamento, as turbinas a vapor podem ser classificadas em dois tipos fundamentais:

- Turbinas de ação (ou impulso): possuem bocais fixos (também chamados de diafragmas distribuidores fixos) que guiam a vazão de vapor para a formação de jatos de alta velocidade que incidem sobre as palhetas do rotor (pás angulares rotativas fixadas radialmente no rotor da turbina), convertendo a energia cinética em trabalho mecânico. Apenas nos bocais fixos ocorre queda de pressão, enquanto que nas palhetas do rotor o vapor atravessa à pressão constante, atuando sobre elas unicamente em virtude de sua velocidade (ver Figura 3**Erro! Autoreferência de indicador não válida.** – lado esquerdo).
- Turbinas de reação: neste tipo de turbina as palhetas do rotor são construídas na forma de bocais convergentes. Desta maneira, utilizam, ao mesmo tempo, a pressão do vapor e a sua expansão nas palhetas do rotor. Parte da expansão do vapor ocorre nas palhetas fixas do estator e outra parte nas palhetas móveis, provocando uma queda de pressão gradativa em relação ao percurso do vapor nas palhetas fixas e móveis, com um aumento e uma redução da velocidade do vapor na mesma proporção (ver Figura 3**Erro! Autoreferência de indicador não válida.** – lado direito).

Figura 3 - Tipos fundamentais de turbinas a vapor: ação (esquerda) e reação (direita).



Fonte: (LORA; NASCIMENTO, 2004).

Define-se estágio expansão de uma turbina como grupo em linha radial de bocais distribuidores fixos seguidos de um conjunto rotativo radial de palhetas móveis, tendo o primeiro a função de converter a energia cinética do vapor em trabalho mecânico, enquanto que o segundo tem a função de redirecionar o fluxo de vapor e converter parte da energia térmica do fluxo que escoar em energia cinética, aumentando a velocidade do fluxo para a palheta móvel seguinte (LORA; NASCIMENTO, 2004).

As turbinas também podem ser classificadas quanto à descarga de vapor. De acordo com esta classificação, destacam-se os seguintes tipos:

- Turbina de contrapressão de fluxo direto;
- Turbinas de contrapressão com sangria ou extração(ões) controlada(s);
- Turbina de condensação de fluxo direto;
- Turbina de condensação com extrações;
- Turbina de condensação com reaquecimento.

O termo “contrapressão” é utilizado para indicar que o vapor na saída da turbina está a uma pressão igual ou superior à atmosférica, que é uma condição necessária para atender às demandas de vapor em temperaturas superiores a 100°C. As turbinas de contrapressão, geralmente, são instaladas em indústrias onde há necessidade de vapor nos processos de fabricação (LORA; NASCIMENTO, 2004).

As turbinas de condensação descarregam vapor para um condensador a uma pressão menor que a pressão atmosférica, a fim de aumentar a eficiência térmica do ciclo Rankine, mediante ao aumento máximo da queda de entalpia.

As turbinas a vapor se diferenciam também conforme a direção do fluxo no interior da turbina. Desta maneira, podem-se ter os seguintes tipos:

- Turbina de fluxo axial: o escoamento do vapor através das palhetas é paralelo ao eixo da turbina;
- Turbina de fluxo radial: o escoamento do vapor através das palhetas ocorre na direção radial ao eixo, podendo ser radial centrífuga, quando o vapor passa do centro para a periferia, ou radial centrípeta, quando o vapor escoar da periferia para o centro.

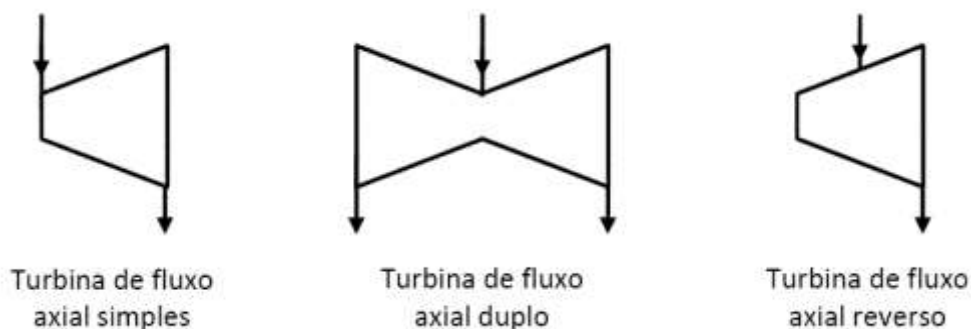
A maioria das turbinas modernas é de fluxo axial, sendo que as mesmas podem ser encontradas em três configurações distintas:

- Fluxo simples: quando o fluxo de vapor principal escoar no mesmo sentido desde a sua entrada até a sua saída, no último estágio;
- Fluxo duplo: quando o fluxo principal é admitido no centro do eixo e é dividido em dois sentidos axiais opostos com relação ao rotor. Esse tipo de arranjo é aplicado para as seguintes finalidades: redução dos esforços axiais à zero (esforços causados pelas forças do fluxo de vapor nas palhetas móveis) e redução do tamanho das palhetas dos últimos estágios;
- Fluxo reverso: apresentam duas carcaças, sendo uma interna e outra externa, onde o fluxo de vapor flui em um sentido através de um grupo de estágios, sendo então conduzido externamente para um segundo grupo de estágios em sentido axialmente oposto. As principais vantagens na utilização deste tipo de turbina são a redução dos esforços axiais,

melhoria do resfriamento da carcaça interna e possibilidade de partidas mais rápidas.

A Figura 4 mostra a simbologia típica utilizada para a representação das turbinas comentadas acima.

Figura 4 - Representação simbólica de turbinas



Fonte: (MANUAL DE CURSO INTERNO DA AMT, 2013).

A

Tabela 1 traz as principais características das turbinas da CTE da AMT, nas quais estão instalados os atuadores alvos deste trabalho. Todas as quatro turbinas são de mesma concepção e grandeza: do tipo por condensação de vapor com extrações, de impulso axial horizontal simples, com eixo único com múltiplos estágios (alguns de ação e outros de reação).

Tabela 1 - Principais dados técnicos das Turbinas da CTE da AMT

# Turbina	Pot. Nom. (MW)	Vaz. Nom. Vapor Entr. (t/h)	Pres. Nom. Vapor Entr. (Kgf/cm <sup>2</sup> g)	Temp. Nom. Vapor Entr. (°C)	Pres. Nom. Exaustão (mmHg)	Rotação (rpm)	# extrações	# estágios
1	66	250	85	510	-710	3600	4	12
2	66	250	85	510	-710	3600	4	12
3	75	251	99	540	-710	3600	5	14
4	75	251	99	540	-710	3600	5	14

Fonte: (Manuais e dados de placa dos equipamentos da AMT).

As diferenças entre as mesmas se dão somente devido a pequenos aspectos relacionados à potência, número de extrações e estágios de expansão, abaixo descritas.

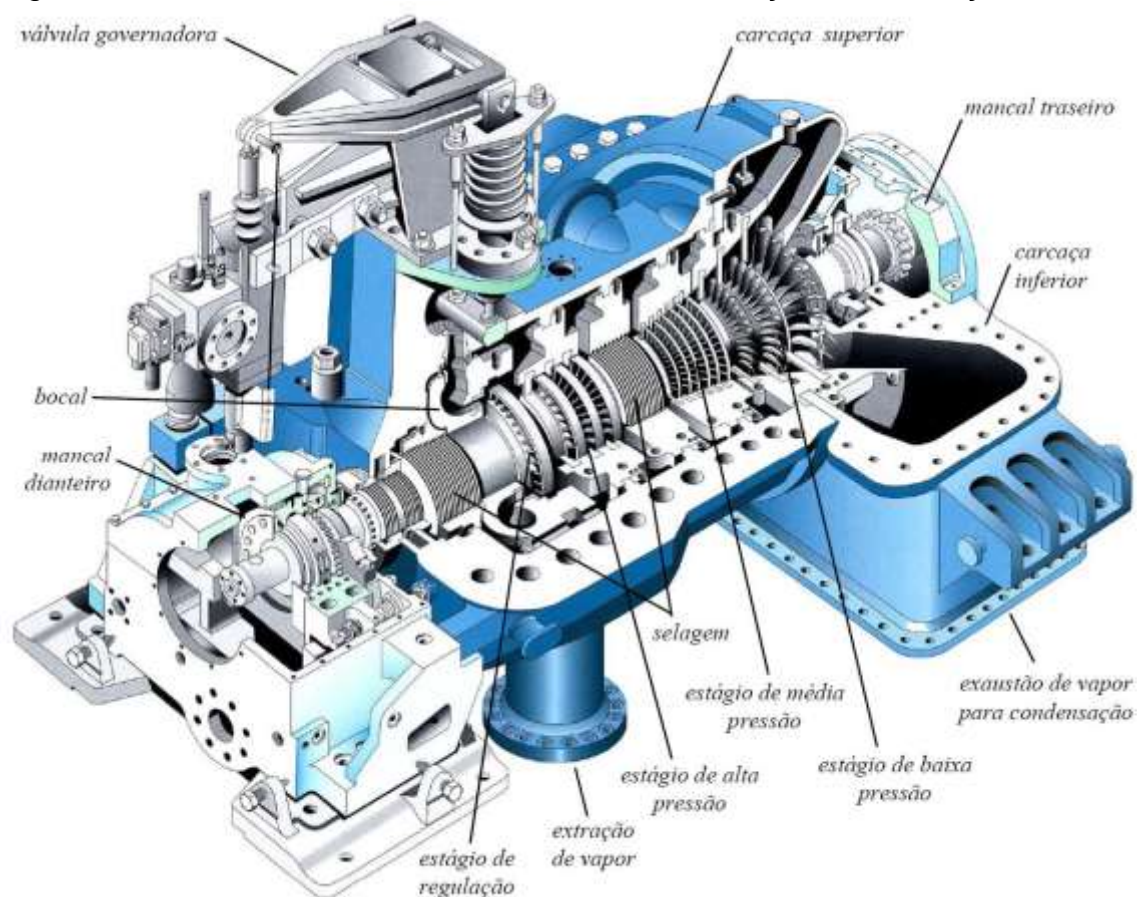
### 2.2.2 Componentes clássicos de uma turbina

Embora existam diversos tipos e configurações de turbinas a vapor. Entretanto alguns componentes são comuns a quase todos os tipos de instalações, como, por exemplo, componentes externos às turbinas, como a válvula governadora, a válvula de parada de emergência e a válvula de desvio (by-pass). Tais componentes são fundamentais para o controle e a operação segura das turbinas.

As turbinas objeto de estudo do trabalho são do tipo a vapor de condensação com fluxo axial e extração.

Figura 5 apresenta a constituição física deste tipo de turbina, indicando os seus principais componentes. Nota-se que o estágio de baixa pressão é constituído de palhetas de maior altura, visando realizar maior queda entálpica no mesmo, reduzindo-se os parâmetros de pressão e temperatura para a transferência do mesmo para o condensador de vapor da turbina.

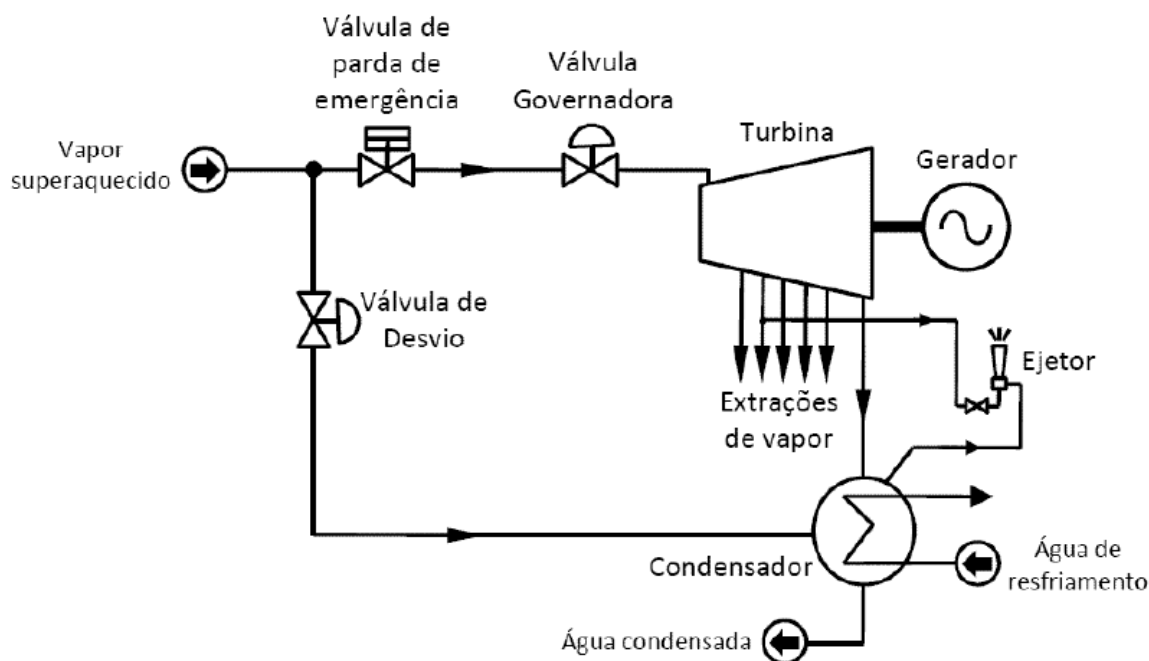
Figura 5 - Vista em corte de uma turbina de condensação com extração



Fonte: (MANUAL DE CURSO INTERNO DA AMT, 2013).

Além dos componentes internos, existem outros componentes auxiliares externos à turbina, que são igualmente importantes para a operação esperada e segura da turbina. Esses componentes estão indicados no diagrama esquemático da Figura 6.

Figura 6 - Diagrama esquemático de uma instalação de turbina de condensação com extrações de vapor.



Fonte: (MANUAL DE CURSO INTERNO DA AMT, 2013).

Segue breve descrição dos mesmos:

- Válvula governadora, ou válvula de controle: controla a quantidade de vapor que flui para a turbina. Portanto, controla a potência mecânica entregue à turbina, quer seja controlando a sua velocidade, quando o gerador não está conectado à rede elétrica de transmissão, ou determinando a potência elétrica de saída do gerador, quando esse está conectado ao sistema elétrico externo (sincronizado à rede elétrica). Ela normalmente é instalada junto à carcaça da turbina, fazendo parte dela.
- Válvula de parada de emergência: tem a função de interromper imediata e seguramente o fluxo de vapor para a turbina durante a ocorrência de algum evento que possa causar danos à turbina (por ex.: alta vibração mecânica, deslocamento axial severo do eixo, alta temperatura de mancal, baixa pressão de óleo nos mancais, ou eventos críticos no equipamento rotativo acoplado à turbina como um gerador ou compressor). Portanto, este equipamento é o elemento final de garantia de proteção do conjunto rotativo turbina-gerador-compressor.
- Válvula de desvio de vapor: realiza o redirecionamento do fluxo de vapor diretamente da admissão da turbina para o condensador da mesma, no



caso de ocorrência uma redução súbita de vazão de vapor da turbina, em virtude de variações bruscas da potência demandada no eixo da turbina. Desta maneira, a válvula de desvio reduz significativamente a ocorrência de efeitos transientes indesejados da carga da turbina, possibilitando manter a mesma taxa de vazão e pressão anterior a algum evento súbito na turbina que poderia refletir em variabilidade subida na caldeira (corte rápido de vapor com elevação de pressão na caldeira não corrigido pelo seu sistema de controle de pressão) até que a turbina se restabeleça nas novas condições de regime requeridas. No caso de uma parada de emergência da turbina, por exemplo, ela permite que a caldeira permaneça operando em suas condições normais, pela permanência do fluxo do vapor diretamente para o condensador da turbina, reduzindo assim o tempo da nova partida da turbina (pois a caldeira continua enviando vapor normalmente para o sistema da turbina).

- Extrações de vapor: as extrações de vapor são utilizadas em turbinas de grande potência para o aumento da eficiência do ciclo térmico, pelo uso do vapor extraído para alimentar aquecedores de água de alimentação da caldeira, ao invés de lançar todo o vapor superaquecido no condensador. As extrações também podem ser utilizadas para suprir vapor de processo tanto para a própria planta da CTE quanto para outras plantas integradas ao complexo industrial a que pertencem, para aplicação em seus processos (ex.: vapor para aquecimento de linhas de combustíveis oleosos, vaporizadores de líquidos criogênicos, sistemas de limpeza a vapor, etc.).
- Condensador: é um trocador de calor no qual se realiza a conversão do vapor de exaustão da turbina em água, através de um circuito de água de refrigeração independente do vapor exausto. A redução súbita do volume do vapor devido à sua condensação produz vácuo no condensador. Devido à expansão do vapor no interior da turbina, normalmente, os últimos estágios da turbina operam com pressão negativa, fazendo com que nesta região aconteçam infiltrações de ar. Desta forma, é necessário manter um valor adequado de vácuo no condensador e garantir a remoção contínua dos gases não condensáveis, advindos do ar atmosférico. Um equipamento chamado ejetor de ar remove os gases

não-condensáveis do condensador e mantém o patamar mínimo de vácuo, necessário para operação da turbina.

- Ejetor de ar: equipamento que remove gases não condensáveis do condensador. Utiliza o mesmo princípio de funcionamento das pistolas de pintura de veículos para succionar o ar no condensador, com a diferença de utilizar vapor ao invés de ar comprimido para causar o efeito de sucção pelo princípio do Venturi. Normalmente, utilizam-se dois tipos de ejetores. Um ejetor a vapor de processo, para partida da unidade, e outro ejetor, chamado de ejetor de serviço, que utiliza o jato do próprio vapor proveniente da turbina em funcionamento, para utilização durante a operação normal da unidade. A diferença entre ambos é que o ejetor de serviço possui câmaras para recuperação de vapor, que é inevitavelmente expelido junto com o ar, sendo o mesmo condensado em suas câmaras e devolvido ao condensador, enquanto que o ejetor de ar de partida (*starting ejector*) não possui este recurso, lançando para a atmosfera o vapor utilizado.

### 2.2.3 Descrição do Funcionamento da turbina a vapor

O vapor é introduzido na turbina através da válvula governadora, que é a válvula de controle de velocidade da turbina. Partindo desta válvula o vapor entra na turbina de forma controlada, visando atender exatamente à carga instantânea demandada pelo sistema. Na turbina, o vapor é expandido através do conjunto de bocais fixos e golpeia as palhetas rotativas fazendo-as girar e, conseqüentemente, gerando um torque no eixo da turbina.

O fluxo de vapor passa então, respectivamente pelos estágios de alta e média pressão da turbina, onde opera com altas pressões e temperaturas. Palhetas (ou pás) fixas causam uma queda de pressão do vapor com aumento de sua velocidade e direcionam este vapor em velocidade aumentada com um ângulo de ataque ideal para as palhetas rotativas, de forma que o mesmo realize o trabalho com o maior aproveitamento possível. Alguns anéis de palhetas fixas têm extratores de vapor para utilização secundária no processo da CTE (ex.: aquecimento da água de alimentação ou vapor de processos auxiliares).

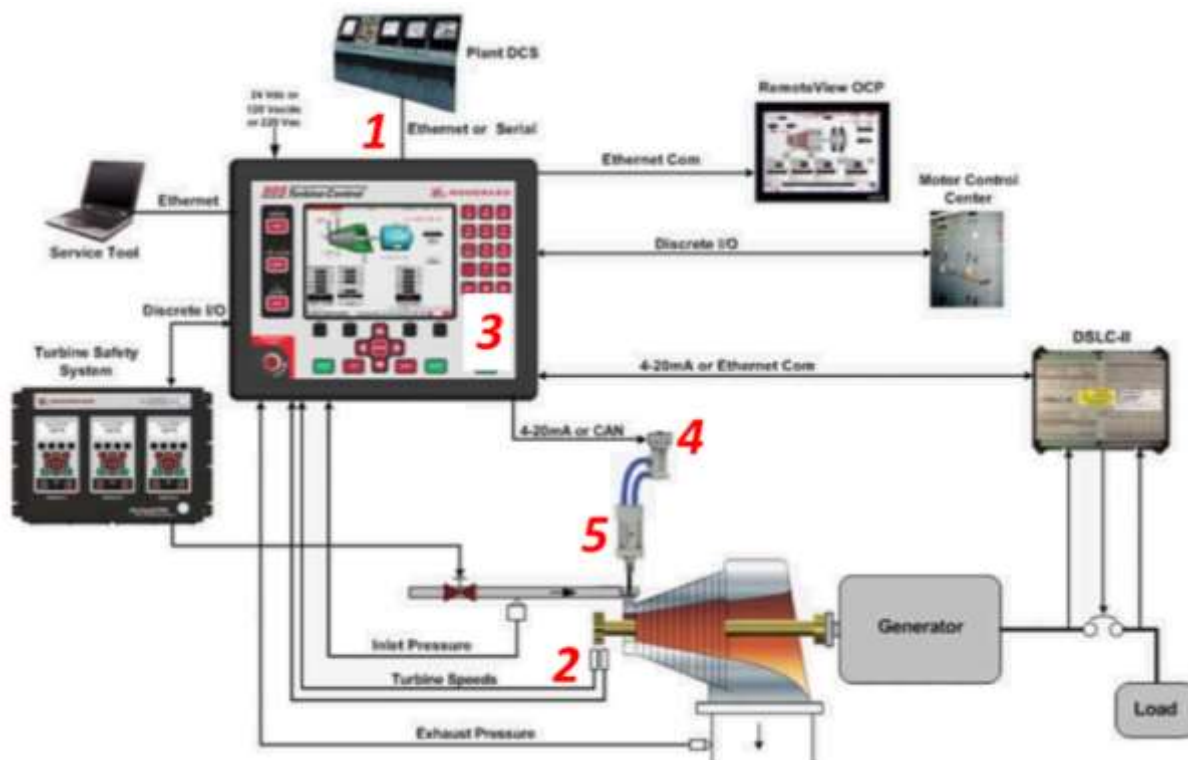
### 2.2.3.1 Funcionamento do sistema de controle da turbina a vapor

O sistema de controle de uma turbina a vapor é comumente chamado de “Governor” (em inglês, que traduzindo significa “governador”, fazendo alusão ao controlador ou determinador do funcionamento da turbina). Todos os “governadores” de turbinas a vapor são compostos por cinco componentes fundamentais que definem a sua “malha fechada” de controle da turbina, detalhados a seguir e ilustrados no esquema típico de controle de turbina, na Figura 7:

- Um componente para se determinar a velocidade desejada da turbina (definição do SP – *set point* – de controle, definido pelo operador da turbina, representado com o indicador “1” na Figura 7).
- Um componente para se medir a velocidade real (PV – *process variable*) da turbina, em revoluções por tempo (como por exemplo: em rpm). Este componente é chamado de sensor (ou “pick-up”) de velocidade (representado com o indicador “2” na Figura 7).
- Um componente para se comparar automaticamente a velocidade real atual com a o valor de velocidade desejada (set-point) e gerar o sinal de controle (correção do erro devido à diferença entre os sinais de SP e PV) a ser enviado para o elemento final de controle do *governor* (sinal de correção – MV – *manipulated variable*). Este componente é chamado de Regulador (ou controlador) do *governor* (representado com o indicador “3” na Figura 7).
- Um componente para realizar a movimentação da válvula governadora de controle de vapor de admissão para a turbina, através da conversão do sinal de controle enviado (MV) em sinal de força, a fim de mudar a posição de abertura da válvula governadora para uma nova posição, de forma a estabilizar a velocidade da turbina no valor desejado (SP), corrigindo assim eventuais erros de velocidade devido a distúrbios externos (tanto na carga da turbina quanto na fonte de vapor da caldeira para a turbina). Este componente é o posicionador eletro-hidráulico de controle do *governor* (representado com o indicador “4” na Figura 7).
- O elemento físico final de controle da turbina em si, chamado de válvula governadora (mostrada no esquema da Figura 6 e também na Figura 7,

indicador “5”), que realiza, enfim, a ação de controle de vazão do vapor admitido na turbina para mantê-la em controle de acordo com a necessidade (carga demandada x velocidade desejada).

Figura 7 - Esquema típico de controle de uma turbina



Fonte: (WOODWARD. REFERENCE GUIDE FOLDER: 505 & 505XT CONTROLLERS FOR INDUSTRIAL STEAM TURBINES, 2015).

Nota-se, na Figura 7, outros elementos de controle que não são abordados neste trabalho, pois não fazem parte deste escopo, mas mencionados a seguir em uma rápida descrição, como simples fonte de consulta para o caso de eventual intenção de se aprofundar no estudo deste complexo sistema, em outro trabalho:

- Sinais de medição de pressão do vapor de exaustão e de pressão de vapor de entrada na turbina. Ambos são usados de forma auxiliar no “ajuste fino” dos controles da turbina, ou até mesmo para permitir outros modos de controle (como por exemplo, controle da turbina pela pressão de vapor de entrada, ao invés de velocidade).
- Controle de proteção da turbina: tem a função de fechar de forma imediata a válvula de segurança de bloqueio de vapor para a turbina (localizada na linha de vapor de entrada da turbina, à montante da válvula

controladora). Este intertravamento é necessário para se permitir a parada imediata da turbina (*shut-down*) em caso de alguma anomalia grave no sistema (componente representado na Figura 7, descrito como *Turbine Safety System*)

- Sistema de sincronismo automático do gerador: utilizado em caso da turbina ter a função de acionar um gerador elétrico que funciona sincronizado a uma rede elétrica externa. O sistema de controle principal da turbina (representado pelo indicador “3” na Figura 7) realiza, neste caso, o controle de velocidade durante a ação momentânea de sincronismo do gerador, pela comunicação com esse segundo sistema (descrito na Figura 7 como *DSLII - Digital Synchronizer and Load Control* – sistema dedicado de sincronismo). O sistema de sincronismo atua então no disjuntor de conexão elétrica do gerador, conectando-o à rede no momento do sincronismo (representado na Figura 7 na linha de saída de saída entre o gerador e as cargas elétricas do sistema).

### 2.3 O POSICIONADOR ELETRO-HIDRÁULICO DE CONTROLE DA TURBINA

Uma vez apresentado todo o processo envolvido neste trabalho, partindo da descrição do seu macroprocesso, descendo para os níveis de equipamentos e seus sistemas e, por fim, chegando aos seus principais componentes, tem-se o Posicionador Eletro-Hidráulico de Controle da Turbina (apresentado genericamente na Seção 2.2.3.1).

Este componente é, enfim o item funcional objeto de estudo de caso deste trabalho e é apresentado detalhadamente nesta Seção, pois o pleno entendimento de seu funcionamento é imprescindível para o desenvolvimento de todo o trabalho.

### 2.3.1 Posicionadores Eletro-hidráulicos das Turbinas da CTE da AMT

Os posicionadores eletro-hidráulicos utilizados nas turbinas da CTE da AMT encontram-se detalhados no Quadro 1.

**Quadro 1 – Descrição técnica dos atuadores eletro-hidráulicos das turbinas da CTE da MT**

Turbina	Tipo de Atuador Posicionador de Controle	Fornecedor	Modelo	Pressão de óleo de suprimento (psi g)	Viscosid. óleo (SUS)	Temperatura de trabalho do óleo (°C)	Temperatura de trabalho do atuador (°C)	Corrente de entrada (mA)	Curso do pistão de saída (piloto de controle)
#1, #2 e #4	Atuador posicionador eletro-hidráulico proporcional, por input de corrente elétrica via solenóide polarizável, e saída física em deslocamento linear.	Woodward	TM-25LP	80 a 375	100 to 200	16 a 79	-40 a 121	20 a 200	0 a 25 mm (1 inch)
#3	Atuador posicionador eletro-hidráulico proporcional, por input de corrente elétrica via solenóide polarizável, e saída física em deslocamento rotativo (angular).	Woodward	EG-10P	100 a 400	150 to 200	60 a 93	-29 a 93	20 a 160	2 a 36 ° (angular)

Fonte: (WOODWARD. MANUAIS 82566 E 82451M, 2015).

Nota-se que os modelos / tipos dos atuadores das turbinas 1, 2 e 4 são diferentes do modelo da turbina 3. Ambos encontram-se apresentados nas próximas Seções, onde os aspectos destas diferenças encontram-se abordados:

#### 2.3.1.1 Atuador Eletro-hidráulicos Woodward EG-10P

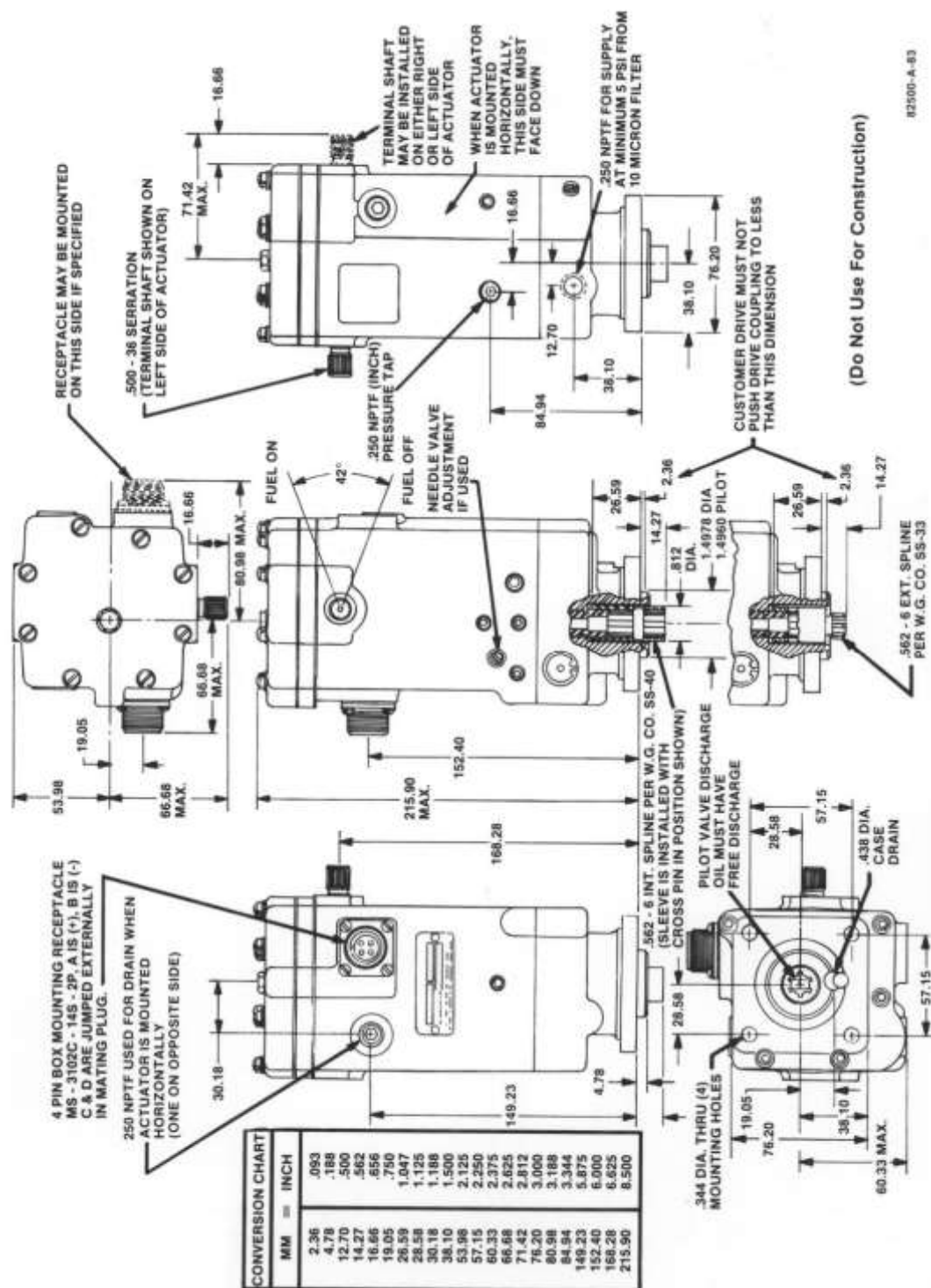
As principais características técnicas deste atuador estão descritas no Quadro 1, anteriormente apresentado. As Figura 8 e Figura 9 ilustram os aspectos dimensionais do mesmo.

Figura 8 - Foto do Atuador Posicionador Eletro-hidráulico EG-10P



Fonte: (WOODWARD. PRODUCT MANUAL 82566, 2015).

Figura 9 – Vistas Gerais do Atuador Posicionador Eletro-hidráulico EG-10P



Fonte: (WOODWARD. PRODUCT MANUAL 82566, 2015).

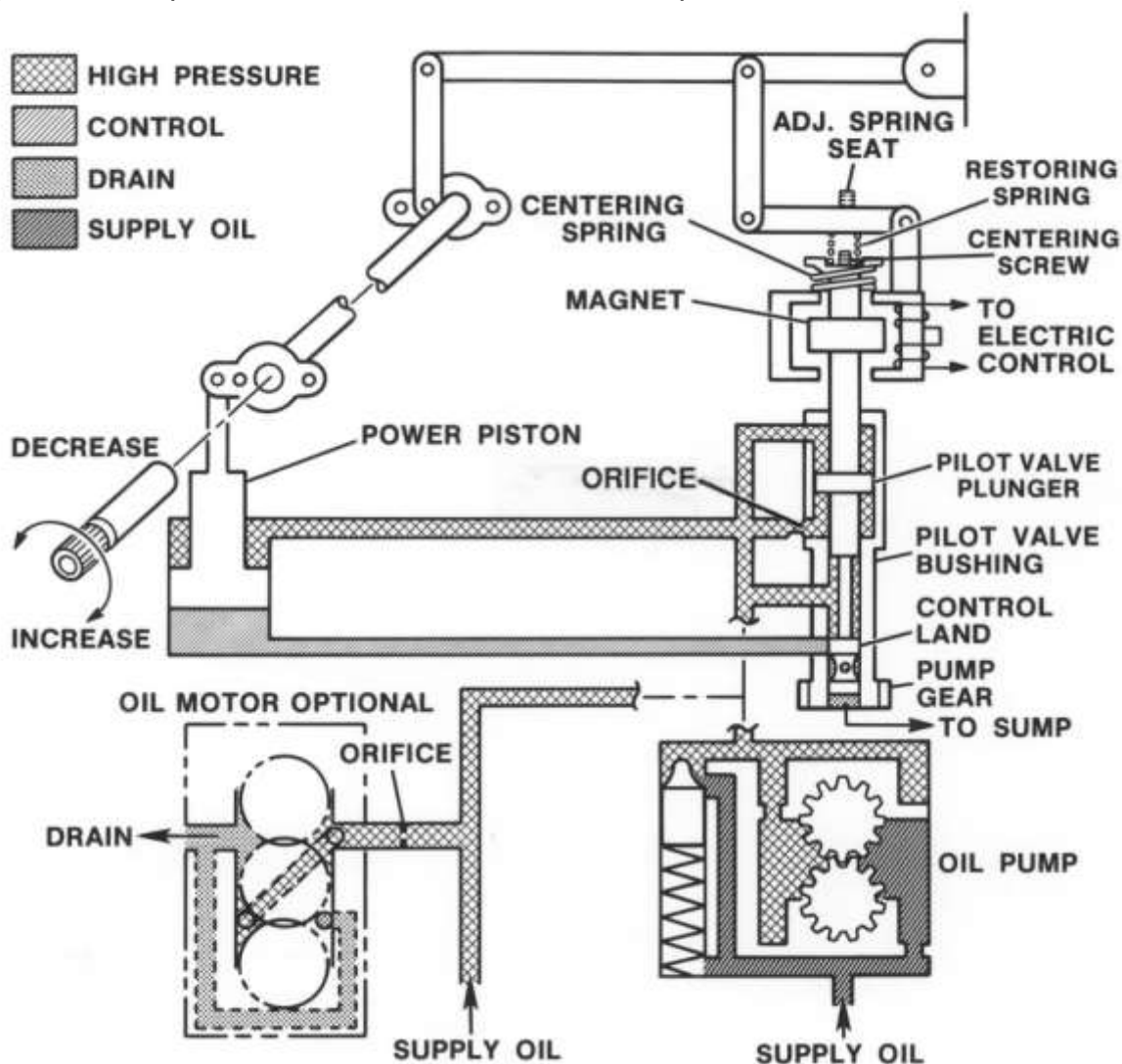
Tais aspectos dimensionais estão aqui apresentados para efeitos de verificação de ordem de grandeza dimensional desses equipamentos, como suporte decisório quanto à baixa complexidade de sua substituição, caso necessário. Já os aspectos funcionais encontram-se detalhados no tópico 2.3.1.1.1, a seguir.



### 2.3.1.1.1 Descrição de funcionamento do Posicionador EG-10P

O funcionamento deste atuador é descrito nesta Seção, tendo como base o esquema apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Esquema de funcionamento do atuador posicionador EG-10P



Fonte: (WOODWARD. PRODUCT MANUAL 82566, 2015).

Seu funcionamento se dá a partir de uma fonte externa de óleo (circuito de bombeamento de óleo de controle), de forma que o óleo entra pressurizado no interior da câmara do pistão-piloto (*"pilot valve plunger"*). Este pistão-piloto regula então o fluxo de óleo de controle que entre e que sai do pistão de força (*"power piston"*) por sua câmara de alta pressão.

O pistão-piloto encontra-se centralizado quando sua válvula de controle de óleo de dreno (*“control land”*: pistão pequeno que regula a saída do óleo do pistão de força para dreno) encontra-se posicionada de forma a impedir totalmente a saída de óleo da câmara inferior do pistão de força para o dreno. Nesta situação o sistema está em equilíbrio, sem movimentação.

O eixo do pistão-piloto é conectado ao ímã permanente da solenoide, que por sua vez, recebe o sinal elétrico (em mA) de posição desejada do atuador, proveniente do regulador eletrônico de controle do governador (não representado na Figura 10). A corrente imposta à bobina da solenoide produz uma força eletromotriz proporcional a esta corrente, que por sua vez tenta mover o pistão-piloto para baixo. Já a força da mola de centralização (*“centering spring”*) aplica uma força contrária que tenta mover o pistão-piloto (com o ímã) para cima.

Por outro lado, a mola de restauração (*“restoring spring”*) exerce uma força complementar descendente no pistão-piloto (e ascendente na alavanca de restauração - alavanca de *“feed-back”* que está conectada ao conjunto de alavancas de deslocamento externo), com a finalidade de atuar como ponto de equilíbrio dinâmico, em balanço, entre a força resultante do torque do pistão de força (*“power piston”*) e o deslocamento do pistão-piloto. Tal equilíbrio de forças torna-se possível devido às conexões mecânicas móveis entre a alavanca de restauração (conectada à mola de restauração) e a alavanca de torque de feed-back do eixo de saída (torque contrário ao torque produzido pelo pistão de força no eixo de saída).

Resumindo, o funcionamento do atuador se dá da seguinte maneira: em equilíbrio o pistão-piloto está posicionado no centro do curso, impedindo a saída de óleo do pistão de força para dreno. Sempre que houver necessidade de reposicionamento do eixo de saída (em rotação), há um desequilíbrio momentâneo de forças do conjunto de alavancas, causado pela variação da corrente na solenoide, que por sua vez causa uma variação proporcional de força de deslocamento do pistão-piloto, que por sua vez causa uma variação proporcional no deslocamento de óleo na câmara de alta pressão do pistão de força (e ao mesmo tempo permite um desvio proporcional de óleo da câmara de baixa pressão do cilindro de força, para o dreno). O deslocamento do pistão de força causa um deslocamento angular do eixo de saída, que por sua vez causa um torque contrário (feed-back) para o conjunto de alavancas de feed-back, que por sua vez causa uma força proporcional na alavanca de restauração contrária à força da mola de

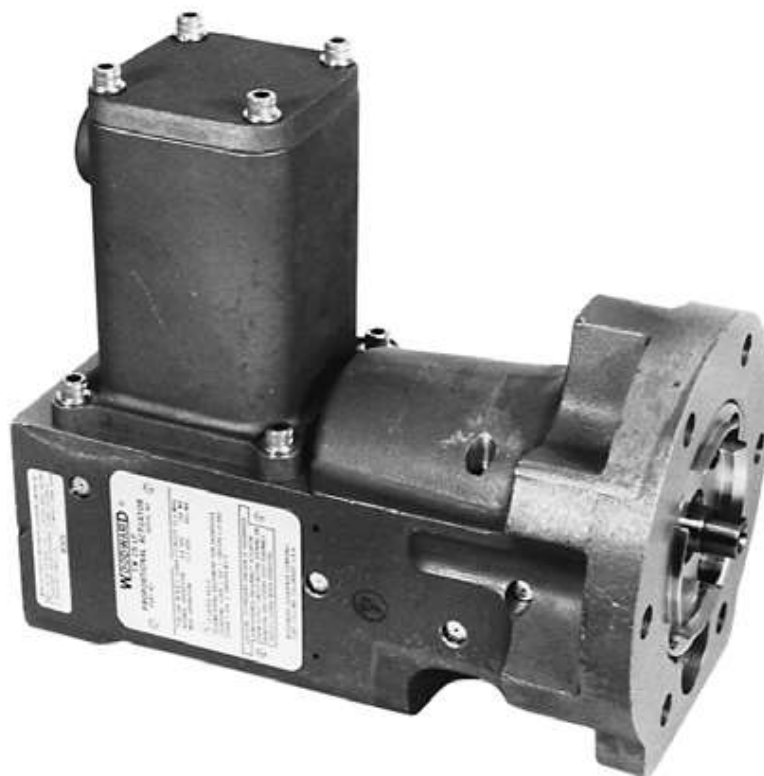
restauração. Quando essas forças se igualam, o sistema entra novamente em equilíbrio estacionário no novo patamar de corrente elétrica aplicada à solenoide, com o pistão-piloto novamente posicionado de forma centralizada. Este estado é mantido até que uma nova variação de corrente seja imposta, e o processo de reequilíbrio de forças é reiniciado atingindo nova posição estacionária do conjunto mecânico.

### 2.3.1.2 Atuador Eletro-hidráulico Woodward TM-25LP

As principais características técnicas do atuador TM-25LP estão descritas na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, apresentada conjuntamente com o atuador EG-10P, nos parágrafos anteriores.

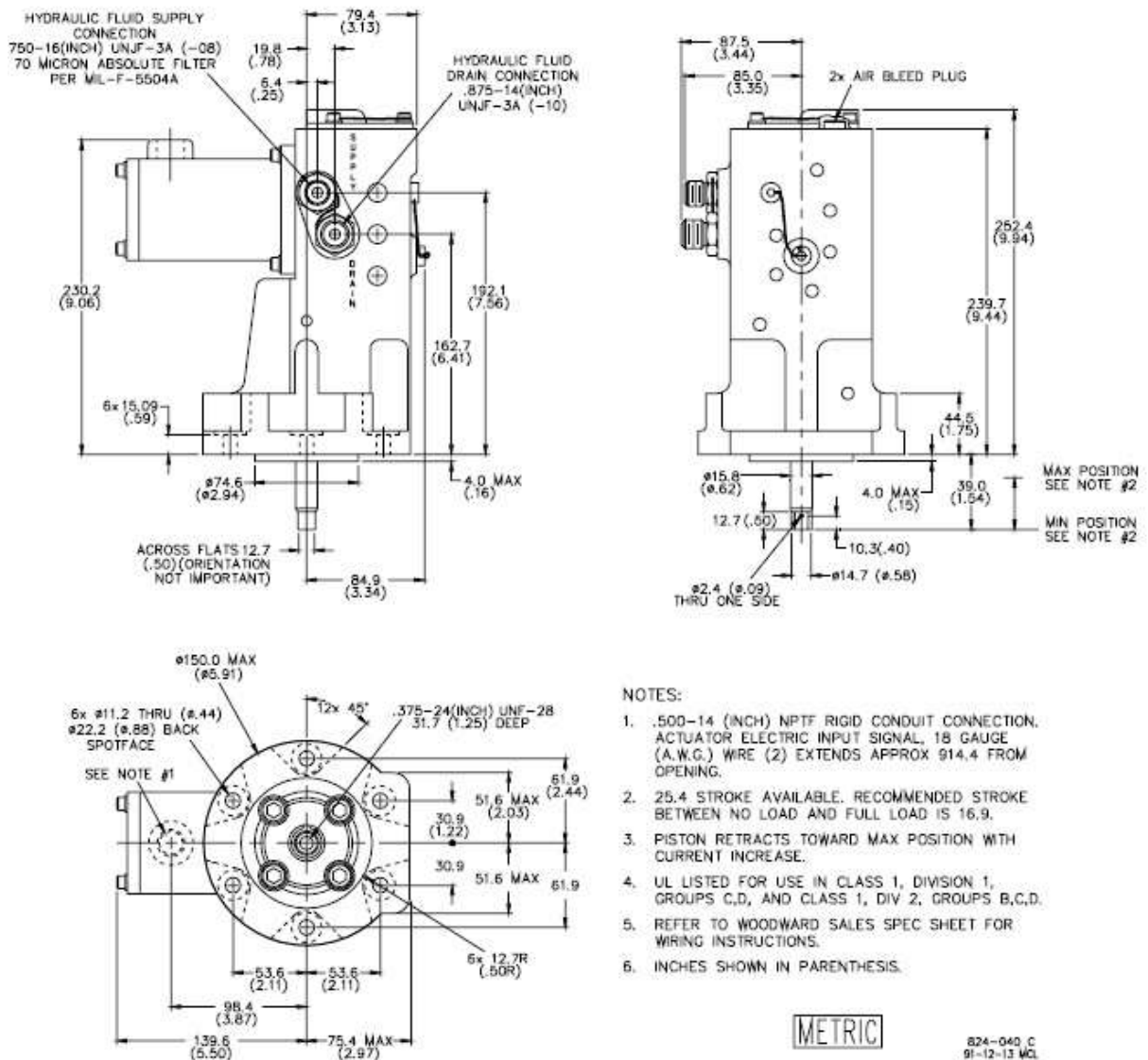
As Figura 11 e Figura 12 ilustram os aspectos dimensionais do atuador TM-25LP.

Figura 11 - Foto do Atuador Posicionador Eletro-hidráulico TM-25LP



Fonte: (WOODWARD. PRODUCT MANUAL 82451M, 1999).

Figura 12 - Vistas Gerais do Atuador Posicionador Eletro-hidráulico TM-25LP



Fonte: (WOODWARD. PRODUCT MANUAL 82451M, 1999).

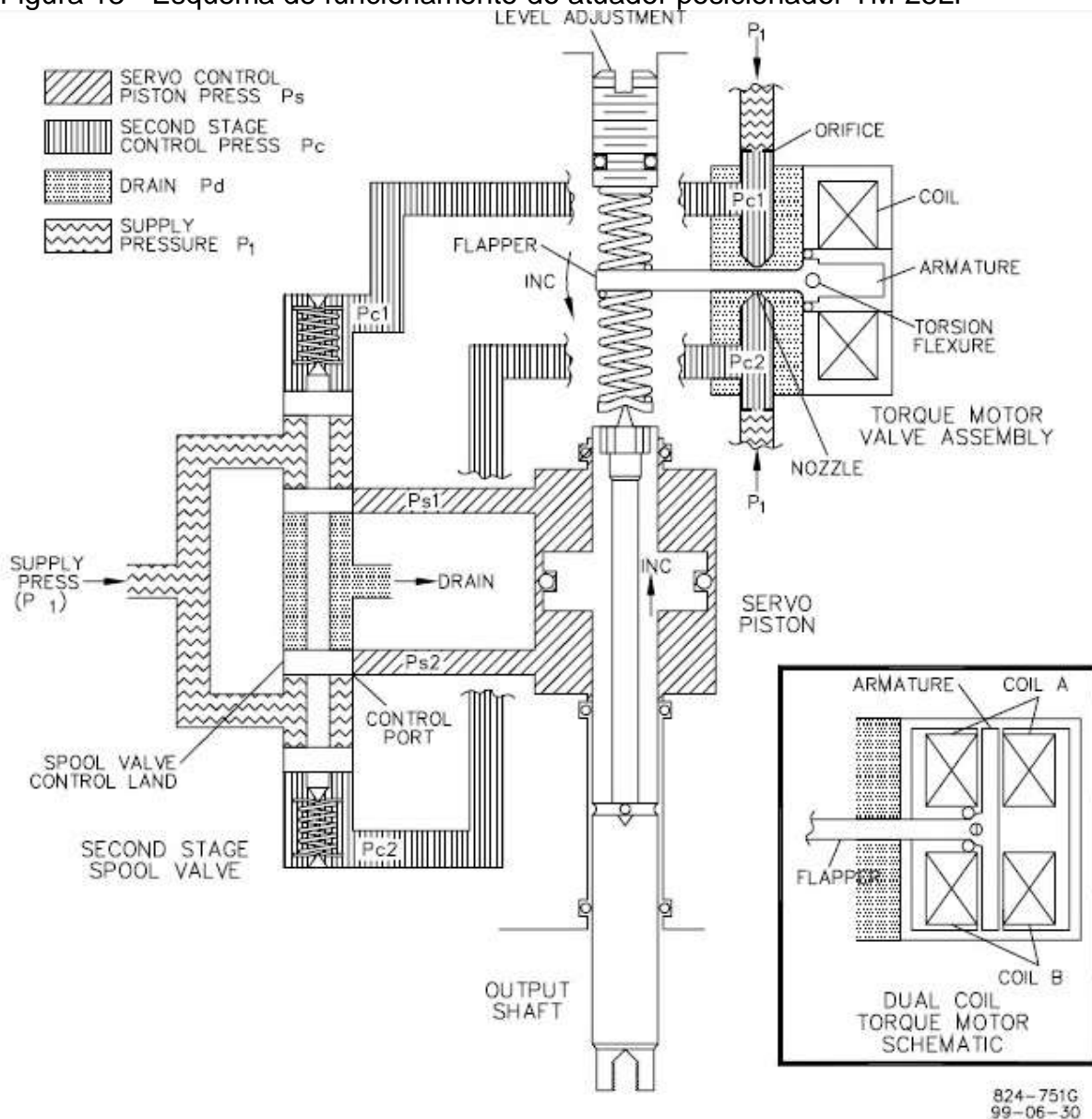
Tais aspectos estão aqui apresentados para efeitos de verificação de ordem de grandeza dimensional desses equipamentos, como suporte decisório quanto à baixa complexidade de sua substituição, caso necessário.

Já os aspectos funcionais dos mesmos encontram-se descritos no tópico 2.3.1.2.1, a seguir.

### 2.3.1.2.1 Descrição de funcionamento do Atuador Posicionador TM-25LP

O funcionamento deste atuador é descrito nesta Seção, tendo como base o esquema apresentado na Figura 13.

Figura 13 - Esquema de funcionamento do atuador posicionador TM-25LP



Fonte: (WOODWARD. PRODUCT MANUAL 82451M, 1999).

Uma variação do sinal elétrico (em mA) de controle para o atuador resulta em um deslocamento linear proporcional do eixo de saída do atuador para a válvula de controle principal de vapor da turbina.

Isso ocorre da seguinte forma: no atuador, a solenoide do “*torque motor*” (bobina-solenoide) converte o sinal elétrico proveniente do sistema de controle do *governor* em deslocamento linear da palheta (“*flapper*”) fixada à armadura da solenoide (na conexão “*torsion flexure*”), a qual muda a abertura de bicos de controle de pressão de óleo (“*nozzle*”) variando, de forma oposta, as pressões de óleo nas câmaras do eixo-piloto (Pc1 e Pc2), o qual contém pistões que funcionam como válvulas (válvulas-pistões: “*spool valve control land*”) que regulam as aberturas para o acesso do óleo às câmaras do pistão de força. Desta forma, o eixo-piloto tem a finalidade de regular a vazão de óleo para o pistão de força (eixo de saída), realizando a abertura controlada da linha pressurizada de óleo para uma das câmaras do pistão de força ao mesmo tempo em que realiza a abertura igualmente controlada da outra câmara do pistão de força para dreno (Ps1 e Ps2). Desta forma o pistão de força é deslocado pela força do óleo de sua câmara pressurizada (enquanto a outra câmara é aliviada para dreno).

A contra-força de equilíbrio do sistema mecânico (*feed-back*) é dada pelo realinhamento da palheta dos bicos de controle (*flapper*) pela conexão mecânica de sua extremidade à mola de ajuste de *feed-back* do sistema, de forma que à medida que o eixo de força se desloca, leva junto a palheta dos bicos (*flapper*), mudando novamente as pressões internas destes bicos, que novamente as retransmitem para as câmaras do pistão-piloto, que, por sua vez, é deslocado novamente até que suas válvulas-pistões fechem os acessos às câmaras do pistão de força, cessando o movimento deste, restabelecendo o equilíbrio do sistema, e, por fim, posicionando o eixo de saída de forma correspondente à corrente elétrica aplicada ao *torque-motor*.

Há ainda a possibilidade de ajuste de ganho (calibração do atuador) através deslocamento do parafuso que muda a tensão da mola de *feed-back* (*level adjustment*).

## 2.4 SÍNTESE DO CAPÍTULO 2

O contexto geral deste capítulo consistiu na apresentação do processo, sistemas e equipamentos envolvidos neste trabalho, partindo de uma metodologia da visualização geral para o detalhe dos itens pertinentes ao contexto, em uma visão de escalonamento descendente dos níveis hierárquicos construtivos da planta, ou seja, da unidade operacional para o equipamento, do equipamento para o sistema e finalmente do sistema para seus componentes, de forma a trazer a base técnica suficiente para o pleno entendimento contextual do item funcional cerne do trabalho, a saber, os posicionadores eletro-hidráulicos de controle das turbinas da Central Termoelétrica da AMT.

A partir dessa exposição, pode-se concluir que todos os posicionadores eletro-hidráulicos de controle de turbinas objetos deste estudo têm o mesmo princípio de funcionamento, apesar de construtivamente diferentes, estando sob as mesmas condições de uso, sujeitos aos mesmos modos de falha, sob as mesmas variabilidades, stress, desgastes e intempéries provenientes do ambiente comum a que se encontram expostos.

O correto entendimento de tais conclusões a respeito desses equipamentos bem como do contexto operacional industrial envolvido são de suma importância para viabilizar os subsídios técnicos necessários para aplicação de referenciais teóricos adequados ao trabalho.

No próximo capítulo são descritos, portanto, tais referenciais teóricos, os quais são necessários para se definir os requisitos de confiabilidade e manutenibilidade (visando, ao final, a disponibilidade) destes posicionadores, tendo como fundamentos técnicos as premissas e informações disponibilizadas neste Capítulo 2.

Resumidamente, serão utilizados recursos de mapeamentos de RCM (a partir de FMEA, análise de criticidade e proposição de tarefas de manutenção) aliados aos fundamentos de LDA (*life data analysis*) para se definir o comportamento da confiabilidade dos mesmos, visando se estimar o tempo adequado de seu funcionamento a uma certa confiabilidade conhecida.

### **3 REFERENCIAL TEÓRICO DE ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE DO TRABALHO**

#### **3.1 INTRODUÇÃO SOBRE O REFERENCIAL TEÓRICO UTILIZADO**

Neste capítulo serão apresentados os conceitos sobre o RCM e LDA, os quais serão utilizados para se definir uma política e um plano de manutenção para os equipamentos objeto de estudo neste trabalho, os quais serão baseados em tarefas em períodos definidos, estabelecidas de acordo com os resultados da aplicação de tais conceitos sobre os casos práticos em questão.

#### **3.2 CONCEITOS E APLICAÇÕES DO RCM**

O RCM (Reliably Centered Maintenance) define um processo de manutenção para se determinar o que precisa ser feito de forma a assegurar que qualquer ativo continue a atender as necessidades dos usuários, no seu contexto operacional atual (MOUBRAY, 1990).

A aplicação do RCM nos equipamentos objeto deste trabalho (posicionadores eletro-hidráulicos de controle das turbinas da CTE da AMT) é de fundamental importância para se estabelecer um plano de manutenção que seja otimizado e eficaz, focando nos pontos realmente importantes e pertinentes, de forma a se buscar a antecipação de eliminação de potenciais falhas que eventualmente venham a se manifestar antes do fim previsto para a campanha de funcionamento do mesmo, de acordo com a curva de confiabilidade a ser definida em estudo para os equipamentos sob escopo do trabalho.

##### **3.2.1 O contexto operacional para a análise crítica do RCM**

A fase inicial de preparação de uma análise crítica para o RCM de um ou mais item (que pode ser um equipamento, um sistema, ou um simples item funcional) consiste na elaboração do descritivo funcional do processo no qual o item a ser submetido ao RCM faz parte. Tal descritivo tem que ser capaz de definir: a



importância do sistema no processo e do processo no negócio, como contexto operacional (MOUBRAY, 1990).

Tal descritivo deve conter as informações quantitativas e qualitativas necessárias para o entendimento do processo em que o item é usado, bem como do papel (função) desempenhado pelo item no processo aliado à sua relevância dentro desse processo.

Para o delineamento do RCM, é necessário definir exatamente qual o sistema a ser estudado, tais como: suas fronteiras, riscos operacionais, ambientais e de segurança envolvidos, condições de funcionamento, redundância, critérios de disponibilidade e manutenibilidade, bem como as razões para a escolha do sistema e os objetivos finais de se aplicar o RCM para o caso.

### 3.2.2 Mapeamento Funcional

Conforme MOUBRAY, 1990, o estabelecimento do RCM deve considerar, além do contexto operacional, o mapeamento funcional do ativo ao qual esta metodologia de manutenção será aplicada, bem como as falhas funcionais relacionadas às funções mapeadas, e, em última análise, considerar os modos de falha associados a cada falha funcional visando o estabelecimento de um método eficaz de manutenção para prevenção da ocorrência de tais falhas, priorizando-se os modos de falha mais críticos para o processo em questão.

Resumidamente, o mapeamento funcional consiste na descrição qualitativa e quantitativa de todas as funções que possui o ativo no seu contexto operacional, com o propósito de se garantir que tal ativo continue cumprindo essas suas funções. Essas, por sua vez, devem ser identificadas juntamente com os seus padrões de desempenho, e, por último, com os seus potenciais modos de falha.

Uma vez definidos todos os modos de falha funcionais, os mesmos deverão ser eliminados e/ou mitigados de acordo com técnicas de manutenção adequadas e factíveis de serem aplicadas. Tais técnicas dependem de conhecimento e experiência pessoal do corpo técnico especializado nos equipamentos e seus itens funcionais.

Nas próximas Seções, estes conceitos encontram-se apresentados de forma detalhada.

### 3.2.2.1.1 Tipos de funções

As funções de um ativo podem ser definidas como primárias ou secundárias, e depois divididas em várias sub-categorias (MOUBRAY, 1990).

- Funções primárias: Definem os principais propósitos pelos quais o ativo foi configurado. São as razões de existência do ativo, por isso deve-se ter cuidado para defini-las tão precisamente quanto possível. Esta definição deve levar em consideração os padrões de desempenho associados, tais como, velocidades, pesos, volumes, vazões, capacidades, etc. A qualidade do produto deve ser considerada nesta fase, visando se definir as funções primárias de forma mais precisa possível.
- Funções secundárias: Normalmente os ativos realizam, além de suas funções principais, outras funções auxiliares e/ou complementares, chamadas de funções secundárias. Normalmente estas funções não são tão óbvias quanto as funções primárias. Entretanto, com a utilização de uma técnica de investigação, é possível identificar existência destas funções. Tal técnica divide as funções secundárias em sete categorias definidas pelo acrônimo *ESCAPES* (que estabelece as categorias, do inglês: *Environment, Safety Control, Appearance, Protection, Efficiency, Superfluous*). Como as categorias definidas por esta técnica sugerem, é fácil observar que apesar de serem classificadas como secundárias, a perda de algumas destas funções pode ser mais relevante do que a perda da própria função primária, tais como integridade ambiental (ex.: filtragem de gases a serem descartados em chaminés), segurança para pessoas (ex.: válvulas de segurança para alívio de sobre-pressão em vasos pressurizados), proteção do ativo (ex.: desligamento de emergência do equipamento em caso de funcionamento anormal).

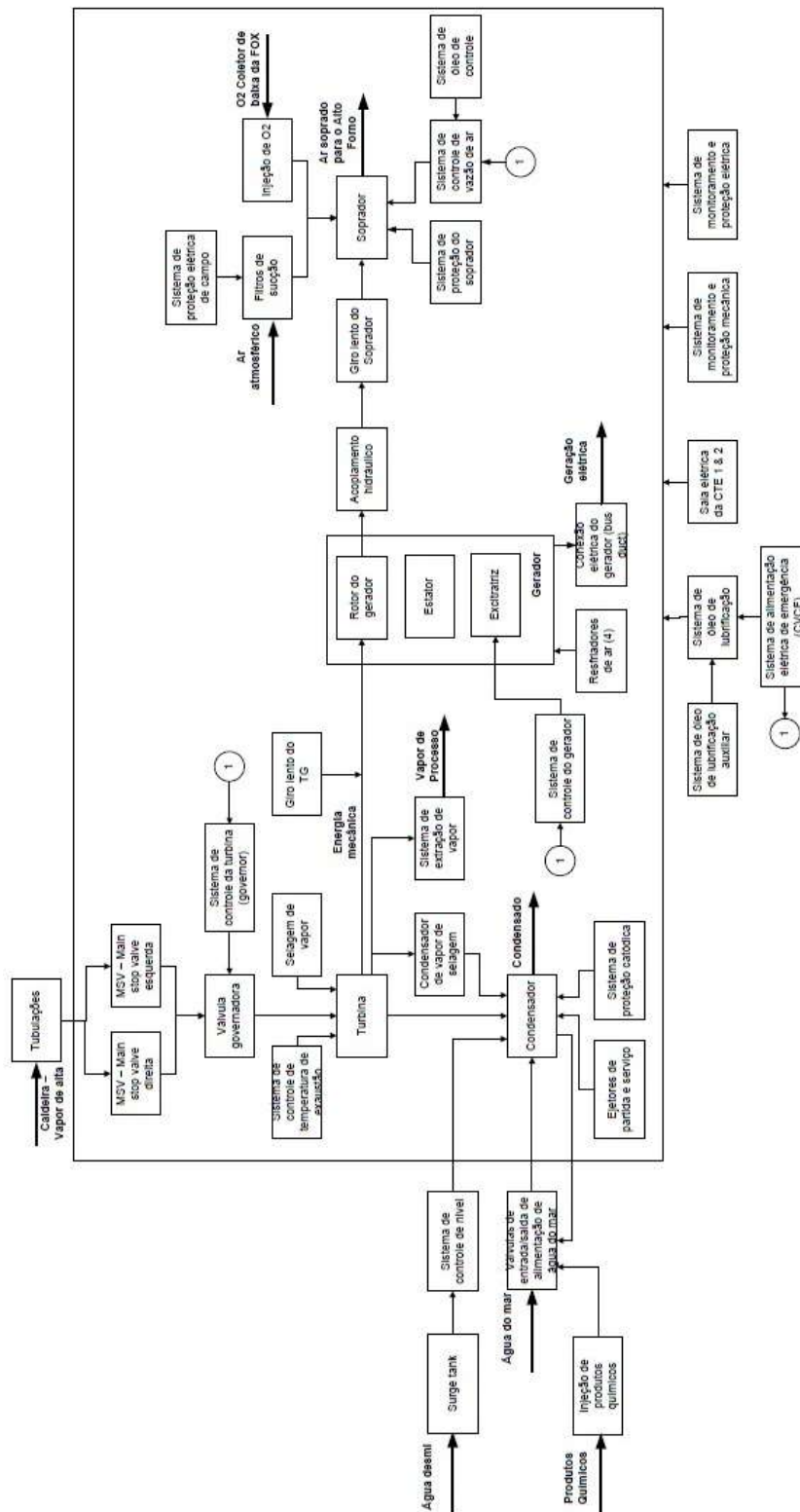
### 3.2.2.1.2 Diagrama de Blocos

Caso um ativo seja muito complexo (um sistema com múltiplas interações entre equipamentos interdependentes), é conveniente esclarecer todo o contexto operacional para se mapear todas as funções primárias e secundárias possíveis. Tal esclarecimento é feito, neste caso, através de uma ferramenta chamada de Diagrama de Blocos. Trata-se de um diagrama mostrando todas as funções e ligações sequenciais entre os sistemas e seus sub-sistemas, em uma forma relacional que represente o fluxograma operacional do contexto (tais sistemas e subsistemas podem ser equipamentos, itens funcionais relevantes, sistemas de controle, etc.).

Um exemplo de um diagrama de blocos funcionais é apresentado na

Figura 14, sendo o mesmo construído sobre o modelo dos equipamentos envolvidos neste trabalho, representando um conjunto mecânico formado por uma turbina, um gerador e um soprador, os quais se encontram acoplados solidariamente de forma axial.

Figura 14 – Diagrama de Blocos Funcionais de um Turbo-Gerador-Soprador



Fonte: Material próprio – Estudos de RCM da área de Energia da AMT

### 3.2.2.1.3 Descrição das funções

Uma especificação funcional escrita apropriadamente deve estar totalmente quantificada bem como definir precisamente os objetivos específicos funcionais do ativo correlacionado, parametrizando quantitativa e qualitativamente cada função. Em última análise, deve assegurar que cada profissional envolvido nas atividades de gestão do ativo conheça exatamente o ativo do ponto vista funcional, de forma a dar todos os subsídios necessários para os profissionais aplicarem as técnicas de gestão de manutenção corretas.

Como exemplo, são listadas a seguir algumas funções primárias e secundárias de uma turbina a gás de 5MW com rotação a 1800 rpm (exemplo hipotético):

- Função primária: Fornecer potência mecânica de até 5MW (dependente da demanda da carga) a um gerador elétrico, através do seu eixo de saída, a uma rotação fixa de 1800 rpm com variação de até +- 0,5% (+- 9 rpm).
- Função secundária: canalizar todos os gases emanados da turbina, sem restrições, a um ponto fixo a 10m acima do telhado, através de uma chaminé.
- Função secundária: manter os níveis de ruído em, no máximo, 70db, a uma distância acima de 100m.
- Função secundária: transmitir um sinal de alarme para o sistema de controle da turbina se a temperatura de exaustão dos gases exceder a 475°C, e um sinal de parada de emergência caso a mesma temperatura exceder a 500°C em um ponto, no duto de descarga de gases, a 4m da saída da turbina.
- Permitir movimento livre das tubulações em respostas às mudanças de temperatura das mesmas durante partidas e paradas da turbina.

### 3.2.3 Conceitos da Falha Funcional no RCM

A falha funcional define-se como a perda da função, levando à incapacidade do ativo de cumprir tal função, quer seja de forma parcial ou total.

Em outras palavras, a falha total refere-se à perda total da capacidade do ativo em exercer a função relacionada e deve ser definida com um “não” antes da descrição da função. Já a falha parcial refere-se à perda parcial da capacidade do ativo em exercer sua função e está relacionada ao funcionamento do ativo fora do padrão de desempenho (acima, abaixo ou diferente).

Como exemplo de falha total e parcial, cita-se a seguir um exemplo (igualmente hipotético) da função primária de uma máquina de empacotar doces, listada como sendo “empacotar 250 g  $\pm$ 1 g de doces em sacos, a um valor mínimo de 75 sacos por minutos”. Esta máquina pode apresentar as seguintes falhas funcionais:

- Falha total: parar completamente de empacotar os doces. Ou seja: não empacotar doces.
- Falha parcial: empacotar menos de 249 g de doces em qualquer saco.
- Falha parcial: empacotar mais de 249 g de doces em qualquer saco.
- Falha parcial: empacotar menos de 75 sacos por minutos.

#### 3.2.3.1 Modos de Falha

As definições descritas nesta Seção são construídas, de forma sucinta, a partir da referência de MOUBRAY, 1990. Sob tais referências, os modos de falha são os eventos que causam as falhas funcionais. Ou seja, o modo de falha é definido como sendo a causa raiz da falha funcional.

A partir da definição de um modo de falha, é então aplicada ao mesmo, de forma individual, uma técnica de manutenção para sua prevenção. Portanto, essas práticas e técnicas de manutenção são gerenciadas no nível individual de cada modo de falha.

A descrição do modo de falha deve consistir de, ao menos, um substantivo para referenciar o item em falha e um verbo associado para se definir a falha. Ex.: *Rolamento travado.*

Em uma evolução da metodologia do estudo do modo de falha visando o mapeamento da(s) técnica(s) adequada ao mesmo, a causa do modo de falha deve ser associada ao mesmo. Do exemplo anterior, por exemplo, a definição do modo de falha e sua causa poderiam ser: *Rolamento travado por falta de lubrificação*.

A quantidade de modos de falha identificados pode contribuir de forma positiva ou negativa para uma análise RCM. Por isso, algumas regras devem ser consideradas para se determinar os modos de falhas funcionais:

- Deve-se levar em conta o histórico de falhas do sistema.
- Deve-se registrar os modos de falha já previstos no plano de manutenção existente.
- Deve-se registrar os modos de falhas potenciais (que ainda não ocorreram) com probabilidade real de ocorrência.
- Deve-se considerar possíveis erros humanos na operação e/ou manutenção do item em questão.

#### 3.2.4 Conceitos de FMEA e FMECA

O conceito da *Fault Mode and Effect Analysis* (FMEA) surgiu em engenharia de sistemas, e é uma ferramenta amplamente utilizada para o controle de qualidade de linhas de produção. Tal ferramenta consiste no mapeamento dos modos de falha de um sistema, correlacionando-os com a análise dos seus efeitos para o sistema, com a finalidade de prever as falhas antes que elas aconteçam, através do mapeamento de suas possíveis causas raízes. Por exemplo, considerando os eventos de falhas dos rolamentos de um automóvel, a sua FMEA poderia ser composta pelas seguintes descrições:

- Modo de falha 1: rolamento folgado.
  - Análise do efeito: quebra do rolamento com risco de desprendimento da roda e risco grave de acidente.
- Modo de falha 2: rolamento vibrando.
  - Análise do efeito: aquecimento com baixo risco de acidente.

Já a *Fault Mode and Criticality Analysis* (FMECA) é uma variação da FMEA original, pela inserção de uma metodologia de classificação de criticidade dos modos



das falhas que podem afetar as funções do sistema, evidenciando-os sob a ótica de priorização de seus tratamentos e controles. Desta forma, a FMECA é amplamente utilizada em processos de melhoria de sistemas de manutenção, visando aplicar técnicas eficazes para se eliminar as principais causas de potenciais modos de falhas presentes em sistemas e equipamentos.

Para que uma análise FMECA seja corretamente aplicada, as técnicas de prevenção dos modos de falha e seus efeitos devem ser priorizados através de critérios bem definidos, tais como criticidade da função analisada ou probabilidade de ocorrência do modo de falha.

Estas técnicas de análise são fundamentais para a elaboração de um sistema de manutenção eficaz pela aplicação de RCM, pois fornecem uma base sólida para a identificação de causas raiz das falhas bem como para o desenvolvimento efetivo de ações corretivas, identificando componentes críticos e facilitando a investigação de alternativas em todas as fases do processo de gestão de manutenção.

Em uma variação do exemplo anterior, a FMECA da análise de falhas do rolamento do automóvel poderia ser:

- Para o modo de falha 1: rolamento folgado.
  - Análise do efeito: quebra do rolamento com risco de desprendimento da roda e risco grave de acidente; alta criticidade e baixa probabilidade.
  - Causas:
    - Montagem errada.
    - Defeito de fabricação.
    - Especificação (dimensões) erradas.
- Para o modo de falha 2: rolamento vibrando.
  - Análise do efeito: aquecimento com baixo risco de acidente; baixa criticidade e baixa probabilidade.
  - Causas:
    - Falta de lubrificação (erro humano / de procedimento).
    - Baixa qualidade do rolamento (falha na especificação / aquisição de rolamento de fabricante qualificado).
    - Falha aleatória devido a condições externas. Ex.: água (inundações), pista irregular (buracos, lombadas).

### 3.2.4.1 Priorização da Análise dos Modos das Falhas

Conforme mencionado na Seção anterior, a elaboração de uma análise FMECA considera a priorização por criticidade dos modos de falha. Uma das formas de se implementar esta priorização é aplicação da técnica *Risk Priority Number* (RPN), que utiliza pesos de 1 a 10 para se priorizar os quesitos de *severidade*, *ocorrência* e *detecção* de um determinado modo de falha, sendo os pesos “um” e “dez” atribuídos aos graus extremos classificados, respectivamente, entre “irrelevante” e “máxima relevância”, de forma a se “medir” a importância (ou influência ou impacto) de um dado quesito desse modo de falha.

A partir dessa classificação, o número final RPN é dado pela multiplicação dos pesos de *severidade*, *ocorrência* e *detecção*. Ou seja:

$$RPN = Severidade \times Ocorrência \times Detecção$$

Onde:

- *Severidade*: está relacionada ao impacto ou consequência da ocorrência do modo de falha. Isto é: correlaciona o efeito do modo de falha à gravidade do dano relativo para o processo, segurança de pessoas, produto ou meio-ambiente.
- *Ocorrência*: está relacionada à frequência de materialização do modo de falha em um determinado período de tempo. Isto é: reflete a quantidade de eventos de ocorrência do modo de falha em relação aos demais, durante um ciclo definido (ex.: mês, ano).
- *Detecção*: está relacionada à dificuldade de se identificar a presença do modo de falha durante um evento de falha no sistema ou equipamento. Isto é: durante a tarefa de busca e identificação de falha, este quesito deve representar quão difícil é detecção do mesmo.

Como ilustração, voltando ao exemplo dos modos de falha do rolamento de um automóvel, os RPN de cada modo poderiam ser determinados conforme a seguir (esta escolha é empírica e baseada na experiência dos profissionais técnicos que estão elaborando a FMECA):

- Modo de falha 1: rolamento folgado.
  - Severidade: Risco considerável de grave acidente: *Peso 9*
  - Ocorrência: Não ocorre com grande frequência, mas há algum histórico de ocorrência do mesmo: *Peso 4*.
  - Detecção: Não é facilmente detectável pelo condutor durante o uso do automóvel. Sua detecção só é possível através de um procedimento de inspeção especializada em oficina: *Peso 6*.
  - *RPN do modo de falha:  $9 \times 4 \times 6 = 216$*
- Modo de falha 2: rolamento vibrando.
  - Severidade: Risco relativamente baixo de graves consequências: *Peso 4*
  - Ocorrência: Ocorre com frequência relativamente considerável: *Peso 6*.
  - Detecção: É facilmente detectável pelo próprio condutor durante o uso do automóvel, pois normalmente causa um ruído característico e direcionado para a roda que está sob efeito desse modo de falha: *Peso 3*.
  - *RPN do modo de falha:  $4 \times 6 \times 3 = 72$ .*

Sob esta análise, o modo de falha 1 deve ser priorizado na proposição de tarefas de manutenção em relação ao modo de falha 2, pois apresentou uma criticidade significativamente maior em relação a esse (RPN do modo de falha 1 é três vezes maior que o RPN do modo de falha 2).

#### 3.2.4.2 Sintetização da documentação de uma FMECA

Na prática, o estudo dos modos e causas das falhas funcionais de um sistema pode ser apresentado de forma sintetizada e documentada em uma tabela resumida, cujas colunas trazem o desdobramento hierárquico sequencial entre: funções, falhas funcionais, modo de falha, causas, RPN e tarefas propostas. As linhas trazem as descrições de cada item identificado no desdobramento.

Como ilustração, na continuação do exemplo em andamento (dos modos de falha do rolamento do automóvel), a tabela correspondente para esta FMECA

poderia ser dada como mostrado no Quadro 2 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Quadro 2 – FMECA ilustrativa do rolamento da roda de um automóvel

Sistema: Automóvel										
Equipamento / Sub-sistema	Item / componente	Função	Falha Funcional	Modos de Falha	S	O	D	RPN	Causas	Tarefas propostas
Roda	Rolamento	Realizar o acoplamento do cubo central da roda ao eixo fixo da mesma.	Não realizar o acoplamento do cubo da roda ao seu eixo, permitindo o seu desprendimento do eixo.	Rolamento folgado.	9	4	6	216	Montagem errada.	Estabelecer procedimento formal padronizado para <b>desmontagem e montagem</b> . Treinar
									Defeito de fabricação.	Estabelecer controle de qualidade para aquisição de fornecedor certificado.
		Permitir que o cubo central da roda gire livremente quando acoplado ao eixo da mesma.	Não permitir o giro livre do cubo da roda quando acoplado ao eixo.	Rolamento vibrando.	4	6	3	72	Dimensões erradas (especificação errada).	Estabelecer especificação documentada para cada tipo de rolamento x automóvel.
									Falta de lubrificação (erro humano / de procedimento).	Estabelecer procedimento formal padronizado para lubrificação e inspeção de rotina. Treinar
									Baixa qualidade (aquisição de fabricante não qualificado).	Estabelecer controle de qualidade para aquisição de fornecedor certificado.
									Falha aleatória - condições externas. Ex.: inundações, pista	Manter sobressalente mínimo para substituição em emergência.

Percebe-se que o Quadro 2 traz de forma sintetizada e organizada todos os requisitos apresentados para se definir a FMECA em questão, relativa ao exemplo apresentado.

### 3.3 CONCEITOS E FUNDAMENTOS SOBRE DE ANÁLISE DE DADOS DE VIDA (LDA)

#### 3.3.1 Conceitos e fundamentos da Confiabilidade

Como de praxe para qualquer estudo que envolva confiabilidade, é de fundamental importância que seja lembrado o seu referido conceito, o qual, de uma forma geral, está associado à operação bem sucedida (sem falhas ou quebras) de um equipamento, ou sistema de uma linha de produção, ou mesmo de produto fornecido. Assim, pode se assumir que a confiabilidade de um determinado item “corresponde à sua probabilidade de desempenhar adequadamente o seu propósito por um determinado período de tempo e sob condições predeterminadas.” (FOGLIATTO; RIBEIRO; 2009).

Desta forma, nota-se então que a confiabilidade é dada por um modelo probabilístico de uma variável aleatória, também chamado de função de distribuição estatística no tempo, pois representa a probabilidade do elemento sob avaliação funcionar corretamente (estar confiável) ou falhar (não funcionar) ao longo do tempo. Portanto, o valor da confiabilidade pode variar entre 1 (probabilidade do item estar 100% confiável) e 0 (probabilidade do item estar sem nenhuma confiabilidade, ou, de outra forma, probabilidade de 100% do item falhar).

Conforme visto no Capítulo 1, a estimativa dessa função de confiabilidade x tempo para o equipamento sob avaliação é o objetivo principal deste trabalho, de forma a dar subsídios suficientes para a gestão de risco da expectativa de seu funcionamento por certo período definido, na forma de manutenção proativa, a qual se baseia em correção antes da existência de algum evento PF, baseado no histórico de falha e mapeamento dos modos de falha. Entretanto, uma eventual ocorrência de um evento PF antes da atuação de manutenção proativa, funcionaria, em uma segunda abordagem, como um “gatilho” para a atuação de manutenção preventiva, como retaguarda da manutenção proativa não realizada. Desta forma, percebe-se que a estimativa da confiabilidade passa a ser um atributo de extrema importância para um equipamento, visto que a mesma tem o objetivo de se definir um ciclo de vida coerente para o mesmo, sob risco de falha conhecido e assumido.

A medida da confiabilidade é dada de forma multidisciplinar, uma vez que pode envolver várias especialidades técnicas e científicas relativas ao elemento sob esta estimativa. Sua aplicação está estruturada em técnicas de análises qualitativas, tais como a FMECA apresentada na Seção 3.2.4, e quantitativas, através de métodos estatísticos baseados no histórico de verificação de funcionamento e de falhas do equipamento, como base para determinação de funções de distribuição estatística de confiabilidade (ou falha) ao longo do seu tempo de missão avaliado. Tais funções estatísticas são os objetos de estudo deste capítulo, e encontram-se apresentadas na Seção 3.3.2.

De certa maneira, a utilização dessas diferentes técnicas ou modelos estatísticos necessita de informações técnicas e dados básicos, registradas com um mínimo de conhecimento específico, em linguagem apropriada, e obtida ao longo do ciclo de vida dos itens, e de preferência de forma constante (regular, no tempo).

Complementarmente, dentre os conceitos e fundamentos associados à confiabilidade, destaca-se: qualidade, disponibilidade, manutenibilidade, dependabilidade e segurança. Tais conceitos são definidos a partir das referências de FOGLIATTO; RIBEIRO; 2009.

*Qualidade* pode ser definida, de uma forma prática, como “o cumprimento às especificações de projeto e manufatura com menor variabilidade possível.” (FOGLIATO; RIBEIRO; 2009). Sob esta premissa, maior será a qualidade tanto quanto menor for a variabilidade às medidas das especificações estabelecidas.

*Disponibilidade* é definida como a capacidade de um elemento desempenhar sua função em um determinado período definido. Ou seja, é relativa à capacidade do elemento estar disponível para ser utilizado sempre que necessário.

Para itens não-reparáveis, os conceitos de disponibilidade e confiabilidade são similares, pois a vida útil do elemento se finda juntamente com o seu tempo disponível. Já para itens reparáveis, segundo FOGLIATTO; RIBEIRO; 2009, disponibilidade pode ser definida como segue:

Os possíveis estados da unidade em um tempo  $t$  de análise são “funcionando” ou “em manutenção” (isto é, sofrendo reparo). Nesses casos, costuma-se supor que reparos devolvam a unidade à condição de nova e trabalha-se com um valor médio de disponibilidade para a unidade (1), dado por:

$$A = \frac{MTTF}{MTTF+MTTR} \quad (1)$$

onde  $A$  (do inglês availability) denota a disponibilidade média da unidade, é o tempo médio entre falhas (ou seja, o tempo médio de funcionamento da unidade) e  $MTTR$  é o tempo médio até conclusão de reparos feitos na unidade.

*Mantenabilidade* representa a capacidade de um item ser submetido à manutenção após um estado de falha real ou potencial, e retornar à sua operação sob suas condições funcionais plenas.

*Segurança* é definida como “a ausência de condições que possam causar morte, dano ou doenças ocupacionais a pessoas, bem como dano ou perda de equipamentos ou de propriedade.” (FOGLIATTO; RIBEIRO; 2009). É bem verdade que na prática é impossível chegar-se a uma condição de total ausência dessas condições de risco, e passa-se assumir níveis aceitáveis de riscos sob controle.

*Dependabilidade* (ou *confiança*) representa “um conjunto que inclui a disponibilidade e seus seguintes fatores determinantes: o desempenho da confiabilidade, da manutenabilidade e do suporte técnico. Pode-se considerar os conceitos de confiança e confiabilidade como análogos. O termo confiança, todavia, estaria associado a uma definição mais ampla, não estritamente probabilística de confiabilidade.” (FOGLIATTO; RIBEIRO; 2009).

### 3.3.2 Funções de distribuições probabilísticas da Confiabilidade

#### 3.3.2.1 Funções de Confiabilidade, Probabilidade Acumulada de Falha e Densidade de Probabilidade de Falha

De acordo com FOGLIATTO; RIBEIRO; 2009, em termos matemáticos, a confiabilidade de um elemento é dada como a probabilidade acumulada de seu funcionamento até o tempo  $t$  definido (ausência de falha funcional).

Para esta demonstração matemática, considere:

- $n_0$  elementos idênticos submetidos a testes controlados,
- $(t - \Delta t, t)$ : intervalo transcorrido de observação do teste,
- $nf(t)$ : elementos que falharam até o intervalo  $t$ ,
- $ns(t)$ : elementos que sobreviveram até o intervalo  $t$ ,

Desta forma  $nf(t) + ns(t) = n_0$ .

Com isso, a função de confiabilidade  $R(t)$  é dada por (2):

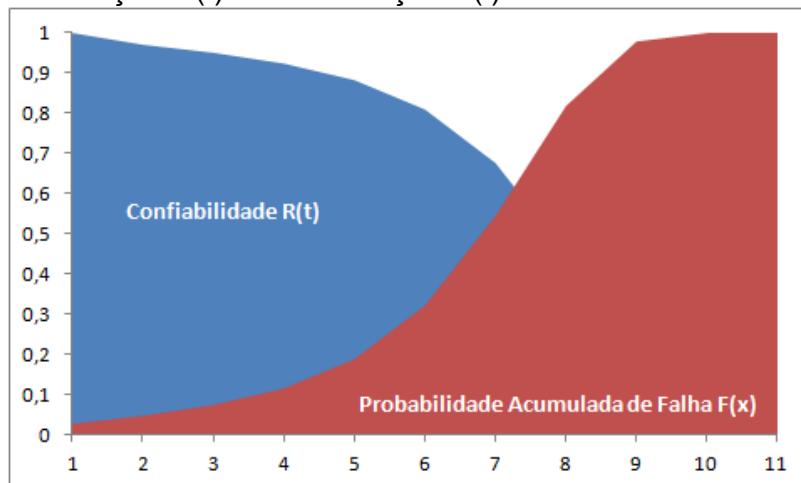
$$R(t) = \frac{ns(t)}{ns(t) + nf(t)} = \frac{ns(t)}{n_0} \quad (2)$$

Já a função de distribuição de probabilidade de falhas acumuladas, definida por  $F(t)$  (3), é dada como o complemento de  $R(t)$  (4), ou seja:

$$F(t) = 1 - R(t), \quad (3)$$

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (4)$$

Figura 15– Função  $R(t)$  versus Função  $F(t)$



Neste contexto, há também a *Função Densidade de Probabilidade de Falha*  $f(t=x)$  (5) (ou *pdf: probability density function*), dada pela derivada da *função da distribuição de probabilidade de falhas acumuladas* no instante  $t = x$ , ou seja:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} \quad (5)$$

De forma análoga, a distribuição acumulada de falhas até o tempo  $t$ ,  $F(t)$  (6) pode ser dada por

$$F(t) = \int_0^t f(u)du \quad (6)$$

Então, em termos de função de confiabilidade até o tempo  $t$ ,  $R(t)$  (7), tem-se:

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(u)du = \int_t^{+\infty} f(u)du \quad (7)$$

Outro conceito importante na matemática da estimativa de confiabilidade relacionado à densidade de probabilidade de falhas é a *taxa de falhas*  $(\lambda(\Delta t))$  (8), que determina o número de falhas ocorridas durante um certo intervalo de tempo  $(\Delta t)$  para um certo número de itens expostos à falha nesse período.

$$\lambda(\Delta t) = \left( \frac{\# \text{falhas totais}}{\# \text{itens expostos à falha}} \right) \quad (8)$$

Extrapolando-se este conceito de taxa de falha, tem-se que seu valor instantâneo, denominado de *taxa instantânea de falha*, seria equivalente à função densidade de probabilidade,  $f(t)$ , quando o limite de  $\Delta t$  tende a zero ( $\Delta t \rightarrow 0$ ). Neste caso, a taxa de falha instantânea também é chamada de *função de risco*, dada como  $h(t)$  (9), a seguir:

$$h(t) = \lambda(x) = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \left( \frac{R(t) - R(t+\Delta t)}{R(t)\Delta t} \right) = \frac{f(t)}{R(t)}, t \geq 0 \quad (9)$$

E deve satisfazer as seguintes condições:

$$\int_0^{\infty} h(t)dt = +\infty \quad \text{e} \quad h(t) \geq 0, \text{ para todo } t \geq 0 \quad (9)$$

A partir das equações definidas, define-se, portanto, a equação geral da confiabilidade (10), como segue:

$$\lambda(x) = \frac{f(x)}{R(x)} = \frac{1}{R(x)} \times \left( -\frac{dR(x)}{dx} \right) = -\frac{1}{R(x)} \times \frac{dR(x)}{dx} \quad (10)$$

Como  $R(0) = 1$ , para qualquer tempo  $= x$ ,  $R(x)$  (11) será



$$\int_0^x \lambda(x)dx = - \int_1^{R(x)} \frac{1}{R(x)} dR(x) \quad \therefore \ln[R(x)] = - \int_0^x \lambda(x)dx \quad \therefore$$

$$R(x) = e^{-\int_0^x \lambda(x)dx} \quad (11)$$

### 3.3.2.2 Distribuição de Weibull

Segundo FOGLIATTO; RIBEIRO; 2009, a distribuição de Weibull é apropriada na modelagem de tempos até falha para quaisquer funções de risco (taxas de falha), quer sejam constantes, crescentes ou decrescentes. Por essa razão, a análise de Weibull tem sido, atualmente, o método líder no mundo para encontrar e encaixar os dados de vida de sistema e equipamentos.

Trata-se, portanto, de uma das distribuições mais importantes na modelagem de confiabilidade, devido à sua flexibilidade e capacidade de representação de amostras de tempos até falha de itens com comportamentos distintos, sendo amplamente utilizada em estudos de dados de vida relacionados à confiabilidade de equipamentos e sistemas (RAUSAND; HOYLAND; 2004).

Esta distribuição leva o nome do engenheiro e matemático sueco Ernest Hjalmar Waloddi Weibull (1887 - 1979), o qual foi reconhecido pelo seu trabalho na área da fadiga de materiais e na estatística, levando a estudos que culminaram no desenvolvimento desta função de distribuição estatística.

Por ser adaptável, a distribuição de Weibull pode, através da escolha adequada de seus parâmetros, modelar muitos tipos de comportamentos de falhas, sendo especialmente aplicável na análise de amostras de tempos até falha de sistemas com pequeno universo amostral (poucas amostras), fornecendo, normalmente, um bom ponto de partida para a análise de dados de vida dos componentes desses sistemas (FOGLIATTO; RIBEIRO; 2009).

#### 3.3.2.2.1 Equações Aplicadas à Distribuição de Weibull

Segundo FOGLIATTO; RIBEIRO; 2009, as equações de distribuição probabilística de Weibull (confiabilidade, falha acumulada, densidade de falha, taxa

de falha) levam em consideração os seguintes parâmetros (RELIAWIKI.ORG. **THE WEIBULL DISTRIBUTION**):

- $\eta = \text{parâmetro de escala, ou, vida característica, para } \eta > 0$ . Este parâmetro representa o tempo para que cerca de 63% das falhas tenham ocorrido. Assim, no tempo decorrido igual a  $\eta$ , a equação da Confiabilidade fica reduzida a  $R(x) = 1 - 0,63 = 0,37$ . Portanto, pode-se afirmar que no tempo igual a  $\eta$  há 37% de itens que não falharam.
- $\beta = \text{parâmetro de forma (ou inclinação), para } \beta > 0$ . Este parâmetro define a “inclinação” da curva da função. Ao apresentar  $\beta$  menores que 1, a equação de taxa de falhas de Weibull apresentará uma função decrescente no tempo, e indicará uma curva típica de falhas prematuras. Já para  $\beta$  igual a 1, essa função tem inclinação nula e, neste caso, apresenta taxa de falhas constantes no tempo (ou falhas aleatórias). Já para valores de  $\beta$  maiores que 1, a inclinação da curva de taxa de falhas de Weibull torna-se crescente no tempo, indicando aumento de quantidade de falhas com o tempo, o que caracteriza existência de falhas por desgaste.
- $\gamma = \text{parâmetro de localização (ou tempo de vida livre de falha), para } -\infty < \gamma < +\infty$ . Este parâmetro, também definido como “ $t_0$ ”, representa o tempo pré-definido de vida inicial do item sob análise, de forma que  $\gamma$  negativos indicam que o item sofreu degradação antes de ser colocado em uso. Neste caso, o tempo de vida de degradação de pré-uso (ou “em prateleira”) é diretamente proporcional ao módulo de  $\gamma$  (quanto mais negativo for  $\gamma$ , maior será a degradação de pré-uso). De forma contrária, quanto maior (positivo) for  $\gamma$ , maior será o tempo do item em uso livre de falha (também chamado, neste caso, de tempo de garantia).

A partir da determinação dos parâmetros anteriormente definidos, a equação que representa a função *densidade de probabilidade de falha de Weibull* é dada como segue:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta^\beta} \cdot (t - \gamma)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad p/x \geq 0$$

$$f(t) = 0 \quad p/x < 0$$

A partir da equação acima, de acordo com as deduções das funções de distribuição de confiabilidades apresentadas no capítulo 3.3.2.1, as equações de *confiabilidade* e de *probabilidade acumulada de falha de Weibull* são dadas, respectivamente, como segue:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta} \quad e \quad F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta}$$

E a taxa de falhas é dada como segue:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^{\beta-1}$$

De uma maneira geral, os parâmetros das equações de Weibull podem ser obtidos, na prática, de forma manual a partir da plotagem em papel probabilístico de Weibull (escala logarítmica com marcações paramétricas de Weibull) dos pontos que representam os tempos até a falha das amostras observadas, e, a partir de tais pontos, traça-se a reta que mais aproxima tais pontos, para, enfim, se encontrar os parâmetros de Weibull  $(\eta, \beta, \gamma)$ , de acordo com as respectivas marcações de escalas específicas, para cada parâmetro, definidas nesse papel. Não é propósito deste trabalho detalhar tal método manual de determinação de parâmetros, o que pode ser obtido em literaturas específicas, tais como, por exemplo, **ABERNETHY, Robert**. *The New Weibull Handbook*, ou em sites específicos, tais como <http://www.weibull.com/GPaper>, mantido pela empresa ReliaSoft Corporation.

Atualmente, há vários softwares disponíveis, tanto livres quanto pagos, para geração dos parâmetros de equações de Weibull, pela simples inserção dos tempos até a falha de amostras observadas do item sob análise. Dessa forma, uma vez inseridos no software tais dados históricos, os mesmos são parametrizados, e definem os parâmetros de Weibull, encontrando assim as equações de confiabilidade para tal item. A partir da definição das equações, simulações podem ser obtidas para quaisquer cenários de vida do item, com estimativas de confiabilidade e/ou falhas esperadas, segundo necessidade de avaliação, como suporte às decisões estratégicas de gestão do ativo relacionado.

A seguir são listados exemplos de softwares livres e pagos (um de cada) para determinar equações de Weibull e simulação de cenários probabilísticos relacionados (além de disponibilizarem outras equações de distribuição de probabilidade relacionadas a dados de vida e confiabilidade de ativos):

- Software livre: Reliability Analytics Toolkit, disponibilizado pela empresa Reliability Analytics Corporation, no endereço de Internet <http://reliabilityanalyticstoolkit.appspot.com>.
- Software pago: Weibull++, da Empresa Reliasoft Corporation, disponível no site da empresa, endereço: <http://www.reliasoft.com.br/Weibull>

### 3.4 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO 3

Em concordância com o objetivo do trabalho, este capítulo apresentou os conceitos fundamentais das técnicas de mapeamento de processo, de gestão de manutenção e definição de estimativas probabilísticas para mapeamento temporal da confiabilidade de um item funcional, conceitos estes que serão aplicados ao caso prático específico em questão, através de ferramentas de priorização de modos de falhas por FMECA, bem como pela definição das equações de distribuição probabilísticas de confiabilidade para o item funcional sob estudo.

Os conceitos apresentados servirão de base para se estabelecer uma política coerente e eficaz de manutenção para os itens funcionais abordados, devidamente apresentados no Capítulo 2, bem como fundamentarão a estimativa de vida para abordagem de manutenção proativa, sob certa expectativa de confiabilidade a partir de seus dados históricos de vida. Sendo assim, a política de manutenção preventiva definida sob as métricas do RCM servirá de “retaguarda” para a manutenção proativa definida a partir das equações de confiabilidade de tais itens.

Dessa forma, o próximo capítulo traz o desenvolvimento prático do trabalho e seus resultados, relativos à aplicação das técnicas apresentadas neste capítulo.

## **4 APLICAÇÃO DO REFERENCIAL TEÓRICO NO OBJETO DA PESQUISA**

### **4.1 INTRODUÇÃO SOBRE A APLICAÇÃO DO REFERENCIAL TEÓRICO**

Neste capítulo será apresentado todo o desenvolvimento do RCM para o caso prático relacionado ao trabalho em questão bem como a aplicação da metodologia de LDA para se determinar as curvas de distribuição de probabilidades de confiabilidade e falhas dos equipamentos objeto deste estudo, e, ao final, se definir o tempo ótimo previsto para a operação normal de tais equipamentos sob uma probabilidade de confiabilidade esperada.

### **4.2 APLICAÇÃO DO RCM NOS EQUIPAMENTOS OBJETOS DO ESTUDO**

Conforme apresentado nos parágrafos 2.3 e 2.4, os posicionadores eletro-hidráulicos das turbinas da Central Termoelétrica da AMT carecem de uma metodologia de manutenção de abordagem eficaz focada na otimização dos custos envolvidos, sem perda da garantia de suas funções primordiais. Para tal será aplicada, nos próximos parágrafos, a metodologia de RCM sobre estes equipamentos, conforme apresentado no parágrafo 3.2.

#### **4.2.1 Funções Operacionais dos Posicionadores Eletro-Hidráulicos das Turbinas.**

Sob a mesma metodologia apresentada no parágrafo 3.2.2.1.1, as funções dos equipamentos em questão encontram-se apresentadas neste capítulo.

Tais funções, bem como todas as demais etapas para o estabelecimento do RCM na planta da Central Termoelétrica da AMT, foram definidas em agenda específica de reuniões de trabalho para implantação de RCM, através de equipe multidisciplinar composta de especialistas em Manutenção Elétrica, Automação, Mecânica, Operação e Engenharia de Confiabilidade, com o aval do corpo gerencial das áreas envolvidas.

De fato, foi realizado por essa equipe um mapeamento funcional de toda a Central Termoelétrica da AMT, o qual, entretanto, extrapola o propósito deste

trabalho (cujo escopo está devidamente delimitado no Capítulo 2 em seu parágrafo 2.3).

Desta forma, as funções dos Posicionadores Eletro-Hidráulicos das Turbinas da Central Termoelétrica da AMT são listadas a seguir:

- Função Primária 1 (FP1): comandar a abertura controlada da válvula hidráulica de admissão de vapor para a turbina, conforme demanda de geração. Comentário: esta função visa suprir, de forma estável, a vazão de vapor necessária para manter a carga exata demandada pelo grupo gerador-soprador (ver descrição completa deste conjunto rotativo na introdução do Capítulo 2 e em seu parágrafo 2.1, bem como no detalhamento do funcionamento deste controle, descrito no parágrafo 2.2.3).
- Função Primária 2 (FP2): Fechar totalmente a válvula hidráulica de admissão de vapor em caso de trip da turbina.  
Comentário: esta função visa garantia de segurança de interrupção do envio de vapor em caso de parada da turbina.
- Função Secundária 1 (FS1): Conter todo o óleo de controle enviado para o mesmo, sem vazamentos.
- Função Secundária 2 (FS2): Manter-se fixado à estrutura do pedestal de admissão de vapor da turbina e às conexões dos links mecânicos de movimentação do atuador principal da válvula hidráulica de admissão de vapor.

#### 4.2.2 Falhas funcionais dos Posicionadores Eletro-Hidráulicos das Turbinas.

As falhas funcionais correspondentes às funções descritas para o posicionador eletro-hidráulico de controle da turbina são, respectivamente:

- Falha referente à Função Primária 1 (FFP1): não comandar a abertura controlada da válvula hidráulica de admissão de vapor para a turbina.
- Falha referente à Função Primária 2 (FFP2): Não fechar totalmente a válvula hidráulica de admissão de vapor em caso de trip da turbina.
- Falha referente à Função Secundária 1 (FFS1): Não conter todo o óleo de controle enviado para o mesmo (vazamentos).

- Falha referente à Função Secundária 2 (FFS2): Não manter-se fixado à estrutura do pedestal de admissão de vapor da turbina ou às conexões dos links mecânicos de movimentação do atuador principal.

#### 4.2.3 Modos de falha dos Posicionadores Eletro-Hidráulicos das Turbinas.

Os modos de falha relativos às falhas apresentadas encontram-se descritos a seguir e foram baseados nos princípios de funcionamento dos posicionadores, detalhados nos parágrafos 2.3.1.1.1 e 2.3.1.2.1:

- Modo de Falha 1 referente à Função Primária 1 (MFP1.1): cabos de sinal de controle para o posicionador com mal contatos.
- Modo de Falha 2 referente à Função Primária 1 (MFP1.2): pistão principal de força do posicionador com agarramento.
- Modo de Falha 3 referente à Função Primária 1 (MFP1.3): spool valve desgastado, aumentando a folga e passagens internas de óleo de controle.
- Modo de Falha 4 referente à Função Primária 1 (MFP1.4): mola de feedback do flapper com perda das constantes de mola.
- Modo de Falha 5 referente à Função Primária 1 (MFP1.5): bobina do torque motor queimada.
- Modo de Falha 6 referente à Função Primária 1 (MFP1.6): óleo de controle com pressão abaixo da especificada.
- Modo de Falha 1 referente à Função Primária 2 (MFP2.1): Posicionador descalibrado.
- Modo de Falha 1 referente à Função Secundária 1 (MFS1.1): pistão principal de força do posicionador desgastado.
- Modo de Falha 2 referente à Função Secundária 1 (MFS1.2): anéis de vedação ressecados.
- Modo de Falha 3 referente à Função Secundária 1 (MFS1.3): conexões hidráulicas externas danificadas / frouxas.
- Modo de Falha 1 referente à Função Secundária 2 (MFS2.1): Parafusos frouxos.

- Modo de Falha 2 referente à Função Secundária 2 (MFS2.2): Parafusos, porcas, pinos e contra-pinos desgastados ou oxidados.

#### 4.2.4 FMECA dos Posicionadores Eletro-Hidráulico das Turbinas.

A partir da definição das funções dos posicionadores eletro-hidráulicos, de suas falhas funcionais e de seus modos de falha, foi elaborada a sua FMECA, de acordo com os conceitos apresentados nos capítulos 3.2.4.

A classificação da criticidade de cada modo de falha foi feita através da metodologia de RPN (ver item 3.2.4.1), cujos limites foram deliberados da seguinte forma, seguindo os critérios utilizados nas elaborações de FMECA de equipamentos da AMT:

- $RPN \leq 80$ : baixa criticidade.
- RPN entre 80 e 125: criticidade média.
- $RPN \geq 125$ : criticidade alta.

A tabela completa da FMECA desenvolvida para este equipamento encontra-se apresentada no Quadro 3, elaborada a partir de arquivo excel específico, apresentado à parte neste trabalho.



Quadro 3 – FMECA do Posicionador Eletro-hidráulico da Turbina AMT

FMECA - Sistema: Turbina a Vapor Central Termoeleétrica AMT - Substema: Sistema de Contr. Velocidade da Turbina - Equipamento: Posicionador Eletro-hidráulico da turbina												
Sub-sistema	Equipamento / componente	Função	Falha Funcional	Modos de Falha	S	O	D	RPN	Causas	Tarefas propostas	Frequencia	
Sistema de Controle de Velocidade da Turbina	Posicionador Eletro-hidráulico da Turbina	FP1: comandar a abertura controlada da válvula hidráulica de admissão de vapor para a turbina, conforme demanda de geração.	FP1: não comandar a abertura controlada da válvula hidráulica de admissão de vapor para a turbina.	MFP1.1: cabos de sinal de controle para o posicionador com mal contatos.	5	2	5	50	Não será tratado.	Não será tratado.		
				MFP1.2: pistão principal de força do posicionador com agarramento.	8	7	6	336	Óleo de controle fora das características (borra, resíduos sólidos)	Inspeção preditiva de análise periódica do óleo (água, resíduos sólidos).	28 dias	
				MFP1.3: spool valve desgastado, aumentando a folga e passagens internas de óleo de controle.	7	6	6	252	Óleo de controle fora das características (borra, resíduos sólidos)	Inspeção sensível periódica para verificação de perfil de funcionamento da malha)	28 dias	
		FP2: Fechar totalmente a válvula hidráulica de admissão de vapor em caso de trip da turbina.	FP2: Não fechar totalmente a válvula hidráulica de admissão de vapor em caso de trip da turbina.	MFP1.4: mola de feedback do flap com perda das constantes de mola.	6	6	7	252	Prolongamento de vida útil	Idem proposto acima.	Idem proposto acima.	
				MFP1.5: bobina do torque motor queimada.	8	3	5	120	Prolongamento de vida útil	Idem proposto acima.	Idem proposto acima.	
				MFP1.6: óleo de controle com pressão abaixo da especificada.	7	3	5	105	Filtro de óleo obstruído.	Inspeção periódica preditiva para verificar pressão diferencial no filtro de óleo de controle	28 dias	
		FP3: Conter todo o óleo de controle enviado para o mesmo, sem vazamentos.	FP3: Não conter todo o óleo de controle enviado para o mesmo, sem vazamentos.	MFP2.1: Posicionador descalibrado.	5	6	6	180	Bomba de óleo com vazamento interno.	Inspeção periódica preditiva para verificar pressão da linha principal de óleo de controle	28 dias	
				MFS1.1: pistão principal de força do posicionador desgastado.	6	5	6	180	Erro de posicionamento / calibração após montagem durante parada programada da unidade.	Realizar procedimento de calibração padronizado sempre após atuação de manutenção no sistema.	A definir, conforme estudo LDA	
				MFS1.2: anéis de vedação ressecados.	5	5	4	100	Prolongamento de vida útil	Idem proposto acima.	28 dias	
		FP4: Manter-se fixado à estrutura do pedestal de admissão de vapor da turbina e às conexões dos links mecânicos de movimentação do atuador	FP4: Não manter-se fixado à estrutura do pedestal de admissão de vapor da turbina ou às conexões dos links mecânicos de movimentação do atuador	MFS1.3: conexões hidráulicas externas danificadas / frouxas.	5	3	3	45	Não será tratado.	Não será tratado.	Não será tratado.	
				MFS2.1: Parafusos frouxos.	7	1	3	21	Não será tratado.	Não será tratado.	Não será tratado.	
				MFS2.2: Parafusos, porcas, pinos e contra-pinos desgastados ou oxidados.	6	3	3	54	Não será tratado.	Não será tratado.	Não será tratado.	

Fonte: O autor. Estudos RCM da Área de Energia da AMT

Nota-se, a partir do Quadro 3, que as tarefas relacionadas à restauração programada estão com a definição da frequência pendente, constando como “*A definir, conforme estudo LDA*” por se tratar de atuação sobre modos de falha não passíveis de evidências através de métodos de inspeção em funcionamento (componentes internos do equipamento), bem como por estarem relacionados a requisitos de tempo de vida útil, e, finalmente, por se tratar de componentes que são simplesmente substituídos por outros novos, ao fim de suas campanhas.

Tal estudo de LDA é apresentado a seguir, na Seção 4.3.

#### 4.3 LDA DOS POSICIONADORES ELETROHIDRÁULICOS DAS TURBINAS.

O estudo de LDA destes equipamentos passa pelas fases de levantamento de histórico de falhas dos mesmos desde o início de suas vidas em linha (em operação), bem como dos equipamentos sobressalentes que já estiveram em linha no passado e foram retirados para manutenção preventiva e/ou corretiva junto ao fornecedor, e atualmente encontram-se disponíveis para utilização.

Nota: as manutenções gerais feitas junto ao fornecedor são consideradas como “de restauração total das condições originais”, trazendo o equipamento à condição de equipamento novo (restauração “*as good as new*”). Esta conclusão é firmada com base nos fatos de que uma manutenção preventiva total, feita pelo fornecedor (e garantida como tal pelo mesmo) contempla substituição dos componentes de desgaste por componentes novos originais (conforme consta nos relatórios de manutenção geral obtidos junto ao fornecedor). Na prática, puderam-se observar tais comprovações, sendo verificados tempos de vida útil similares entre equipamentos novos e sobressalentes postos em operação após manutenção geral pelo fornecedor.

A partir do levantamento de falhas históricas, foi utilizado software *Weibull++* (*Reliasoft Corporation*) para tratamento dos dados e realização de simulações a fim de se encontrar as curvas de distribuição de probabilidades de confiabilidade e falhas, e definir os tempos previstos de operação normal até a manutenção preventiva geral, de forma proativa, sendo conhecida a probabilidade de confiabilidade esperada para a campanha de funcionamento desses equipamentos em linha.

Para se definir este período de funcionamento até a manutenção preventiva, foi feita também uma análise dos planos de paradas gerais das plantas envolvidas, de forma a “encaixar” da melhor forma, sob o ponto de vista de confiabilidade esperada, o maior período possível de campanha entre manutenções preventivas, buscando-se reduzir os custos temporais plurianuais das mesmas, pela redução da quantidade de intervenções no tempo, tendo como retaguarda desta manutenção “proativa” as inspeções periódicas feitas com os equipamentos durante o período em operação, conforme tarefas definidas na FMECA apresentada na Seção 4.2.4.

#### 4.3.1 Eventos de falha e manutenções preventivas (suspensões) dos Posicionadores Eletro-hidráulicos.

Após investigar todo o histórico de manutenção nestes equipamentos, desde os startups das turbinas da Central Termoelétrica da AMT, considerando-se relatórios de anomalias, relatórios de paradas, eventos de manutenção lançados no sistema de manutenção e entrevistas de “chão de fábrica”, chegou-se ao resumo de eventos identificados para cada posicionador (7 unidades ao todo, estando 4 em operação + 3 como sobressalentes), sintetizados no Quadro 4, elaborado a partir de arquivo excel específico, apresentado à parte neste trabalho.

Quadro 4 – Histórico de Falhas dos Posicionadores Eletro-hidráulicos das Turbinas da AMT.

Tipo Atuador	SN	Data Montagem Campo	Situação operacional	Data Última Manutenção	Data próxima Manutenção	Tempo em operação total na última campanha	Tempo em operação após manutenção, sendo mantido em campanha	Tempo em estoque quando em sobressalente (meses)	Observação
EG10P	20747444	jun/17	Em operação Turbina #1	NA	Em aberto	3,9	NA	NA	<b>Atualmente encontra-se em operação.</b> Equipamento novo sobressalente adquirido em março/2017, colocado em operação na turbina #1
EG10P	14219152	jul/16	Em operação Turbina #2	nov/16	Em aberto	15,1	11,0	NA	<b>Atualmente encontra-se em operação.</b> - Situação anterior: Sobressalente novo (startup CTE4), colocado em operação pela primeira vez em julho/16, na turbina #2. - Após menos de 6 meses operando, apresentou uma falha potencial (suposta histerese nas regiões próximas a zero e 100% do stroke), sem comprometer a operação normal. O mesmo foi recalibrado. Segue em operação normal.
EG10P	16922215	dez/16	Em operação Turbina #4	out/16	Em aberto	10,0	NA	NA	<b>Atualmente encontra-se em operação.</b> - Situação anterior: instalado originalmente na turbina 2 (após a modernização do sistema), onde operou por 6 anos (entre 2010 e 2016). - Retirado de operação por defeito em 2016, sendo realizada manutenção geral na DLC. - Após ficar como sobressalente, foi montado na turbina #4
EG10P	16922216	jul/11	Sobressalente	jun/17	NA	72,1	NA	3,9	<b>Atualmente encontra-se como sobressalente.</b> Atuador funcionando desde o startup (reforma governor turbina 1), retirado em manutenção preventiva em jun/17 sem falhas (sinais de erosão externa por incidência de calor no corpo do mesmo devido à falhas no isolamento térmico na região de admissão da turbina). <b>Considerar suspensão por preventiva.</b>
EG10P	13183600	jun/06	Sobressalente	dez/16	NA	127,9	NA	10,0	<b>Atualmente encontra-se como sobressalente.</b> - Sobressalente anteriormente montado na turbina 4, desde o startup, em 2006, sendo retirado de operação por defeito após 10 anos de operação (2006 a 2016). - Realizada manutenção geral na DLC em jan/17.
TM25	12031934	jun/98	Histórico Turbina #3	mai/02	NA	47,67	NA	NA	Operando desde o startup da CTE3. Retirado para manutenção geral
TM25	12167720	mai/02	Histórico Turbina #3	mar/04	NA	22,40	NA	NA	Identificado pequeno vazamento de óleo e agarramentos. Dada manutenção geral.
TM25	12031934	mar/04	Histórico Turbina #3	dez/12	NA	106,50	NA	NA	Merejamento de óleo e agarramentos. Dada manutenção geral.
TM25	12167720	dez/12	Sobressalente	jul/16	NA	43,97	NA	14,73	<b>Atualmente encontra-se como sobressalente.</b> Março/2016: Agarramentos. Reparado em emergência, em campo, sendo detectada causa por borra de óleo. Desconsiderar falha do atuador (interferência externa). 28/05/2016: Agarramentos. Novamente, idem ocorrência anterior. 12/07/2016: Retirado preventivamente, merejamento de óleo. <b>Considerar suspensão por preventiva.</b>
TM25	12031934	jul/16	Em operação Turbina #3	jan/17	NA	14,73	8,43	NA	<b>Atualmente encontra-se em operação.</b> A última intervenção (17/01/2017) foi realizada em campo, durante parada programada da unidade, não sendo encontrada nenhuma anormalidade. <b>Considerar suspensão por preventiva.</b> Revisão geral anterior realizada na DLC, ficando pendente a substituição do eixo principal (verificado com desgaste acentuado) e torque motor (funcionamento no limite da validade recomendada de 5 anos).

Fonte: O autor. Estudos RCM da Área de Energia da AMT

#### 4.3.2 Tratamento dos dados de falha e suspensão distribuição de confiabilidade.

A partir do histórico de funcionamento dos equipamentos, apresentado na Seção 4.3.1, definiu-se tratamento dos dados para inserção e tratamento dos mesmos no software *Weibull++*, classificando-os como “falha” ou “suspensão”.

Os dados considerados como em “suspensão”, são referentes aos eventos de observação nos quais os equipamentos não foram encontrados em falha. Ou seja, nestes eventos, os posicionadores objeto de estudo ou permaneceram funcionando corretamente, ou foram inspecionados sem ocorrência de falha prévia (manutenção preventiva proativa sem nenhum evento PF).

Nos casos observados, tais eventos de suspensão são considerados como “censurados à direita” do tipo aleatório, por se referirem a eventos com tempo de censura diferentes entre si e ocorridos sob circunstâncias diferentes, conforme eventos detalhados no Quadro 4 (FOGLIATTO; RIBEIRO; 2009).

Sob estes critérios, os tratamentos prévios dos dados de funcionamento e falhas para inserção no software encontram-se apresentado no Quadro 5, a seguir.

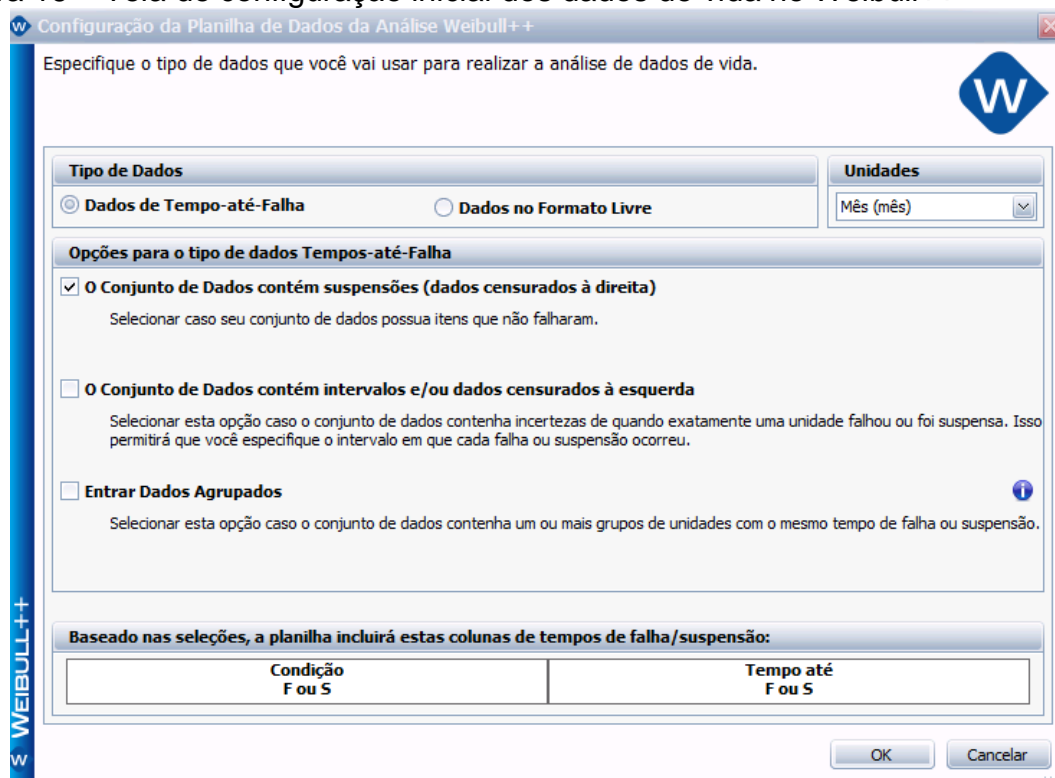
Quadro 5 – Tratamento dos dados históricos para inserção no software.

Data	Tempo até falha (meses)	Evento	Memorial para classificação do evento como falha ou suspensão
mai/02	47,67	S	Retirado para manutenção preventiva geral sem falha evidenciada.
mar/04	22,40	F	Identificado pequeno vazamento de óleo e agarramentos. Dada manut. corretiva geral.
dez/12	106,50	F	Identificado pequeno vazamento de óleo e agarramentos. Dada manut. corretiva geral.
jul/16	43,97	S	Retirado para manutenção preventiva geral após falhas por interferência externa (óleo com problema).
dez/16	127,87	F	Apresentou travamentos em operação sendo retirado para manutenção corretiva geral.
jun/17	72,07	S	Retirado para manutenção preventiva geral sem falha evidenciada.
set/17	10,00	S	Tempo total em operação até hoje. Segue operando sem falhas.
set/17	15,10	S	Tempo total em operação até hoje. Segue operando sem falhas.
set/17	14,73	S	Tempo total em operação até hoje. Segue operando sem falhas.
set/17	3,93	S	Tempo total em operação até hoje. Segue operando sem falhas.

Fonte: O autor. Estudos RCM da Área de Energia da AMT

Os dados das colunas “Tempo até falha” e “Evento” foram então inseridos na interface de entrada do *Weibull++*, considerando-se a entrada em “planilha padrão”, com “configuração de dados censurados à direita”, conforme prints das respectivas telas do software, mostrados nas Figura 16 e Figura 17.

Figura 16 – Tela de configuração inicial dos dados de vida no Weibull++



Fonte: O autor. Aplicação do Weibull ++, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017

Figura 17 – Tela com a inserção dos dados históricos de falha no Weibull++

Fonte: O autor. Aplicação do Weibull ++, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017

Em seguida foi realizado o teste de aderência, sendo a distribuição Gumbel apresentada pelo software como sendo a mais adequada. Tal função não será

detalhada neste escopo, mas, basicamente representa uma função logarítmica da função de Weibull. Entretanto, pelo conhecimento técnico prévio das características de funcionamento destes equipamentos (apresentados na Seção 2.3.1), optou-se pela distribuição de *Weibull 2 parâmetros*, conforme teoria apresentada na Seção 3.3.2.2, considerando-a uma boa aproximação para distribuições de confiabilidade para o caso em questão (equipamentos eletromecânicos sujeitos à desgastes, fadiga, perda de características de material por degradação, etc.), utilizando-se as seguintes configurações de análise, conforme configurado na interface de entrada de dados do Weibull++, mostrado da Figura 17, listadas a seguir, cujo aprofundamento teórico extrapola o escopo deste trabalho:

- 2P-Weibull: para definição dos parâmetros  $\eta$  (“eta”: *vida característica*) e  $\beta$  (“beta”: *parâmetro de forma*) da função de Weibull.
- MLE (Maximum Likelihood Estimation – Estimativa de Máxima Verossimilhança): método estatístico para estimativa de parâmetros, não gráfico, que leva em consideração dados censurados à direita (no caso, censuras do tipo aleatório), conforme classificação para os casos em questão, segundo FOGLIATTO; RIBEIRO; 2009.
- SRM (Standard Ranking Method - Método de Ranqueamento Padrão): sugestão padrão do software.
- FM (Matriz de Fisher): utilizada para estimar a variância dos valores observados sob a premissa de máxima verossimilhança da função que define o espaço amostral das falhas.
- MED (Método do Ranking Mediano): método que estima os valores de probabilidade de falha baseado no número de ordem da falha, considerando os dados de suspensão pelo ajuste da ordem de cada falha.

A partir das configurações de entrada, foi então gerada a análise no software, sendo encontrados os parâmetros:

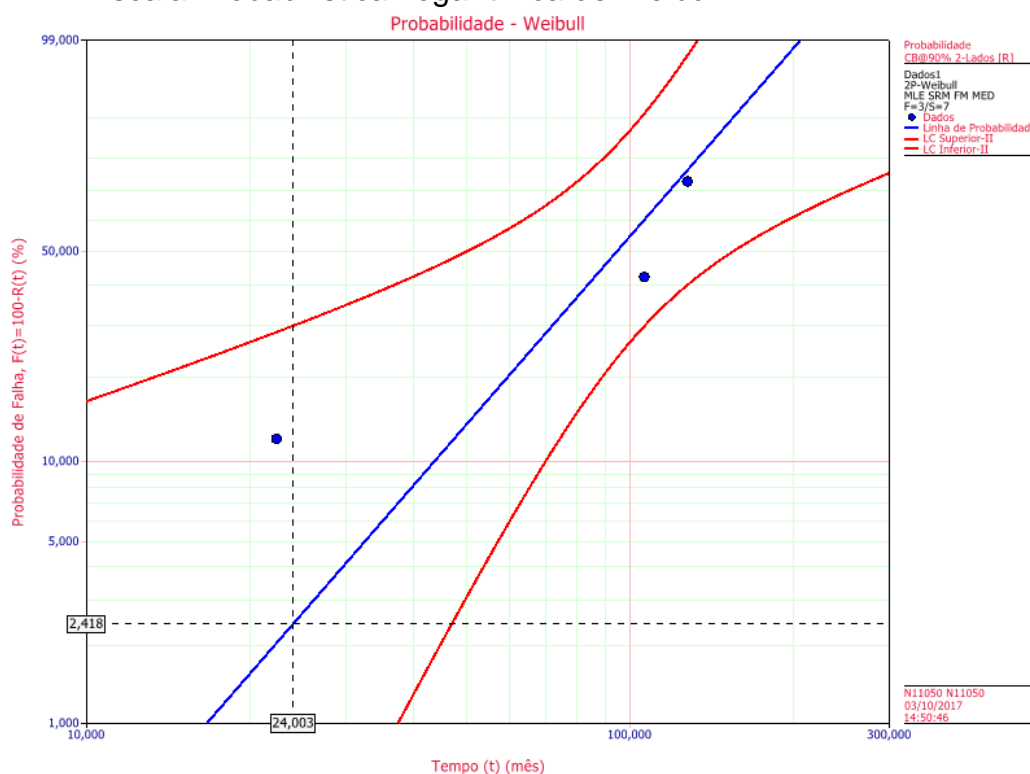
- $\eta$  (*vida característica*) = 110,01 meses
- $\beta$  (*parâmetro de forma*) = 2,44

Resultando nas equações de probabilidade de confiabilidade, falhas acumuladas, e taxa de falhas como segue, de acordo com a teoria apresentada na Seção 3.3.2.2.1, apresentadas a seguir:

- Confiabilidade no tempo:  $R(t) = e^{-\left(\frac{t}{110,01}\right)^{2,44}}$
- Falhas acumuladas no tempo:  $F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{110,01}\right)^{2,44}}$
- E a taxa de falhas é dada como segue:  $\lambda(t) = 0,02218 \cdot \left(\frac{t}{110,01}\right)^{1,44}$

A partir da parametrização das equações definidas pelo software, foram obtidos os gráficos referentes às funções definidas, apresentados nas Figura 18 à Figura 21, a seguir.

Figura 18 – Probabilidade de Falha com limites de confiança de 90% bilateral – Em Escala Probabilística Logarítmica de Weibull

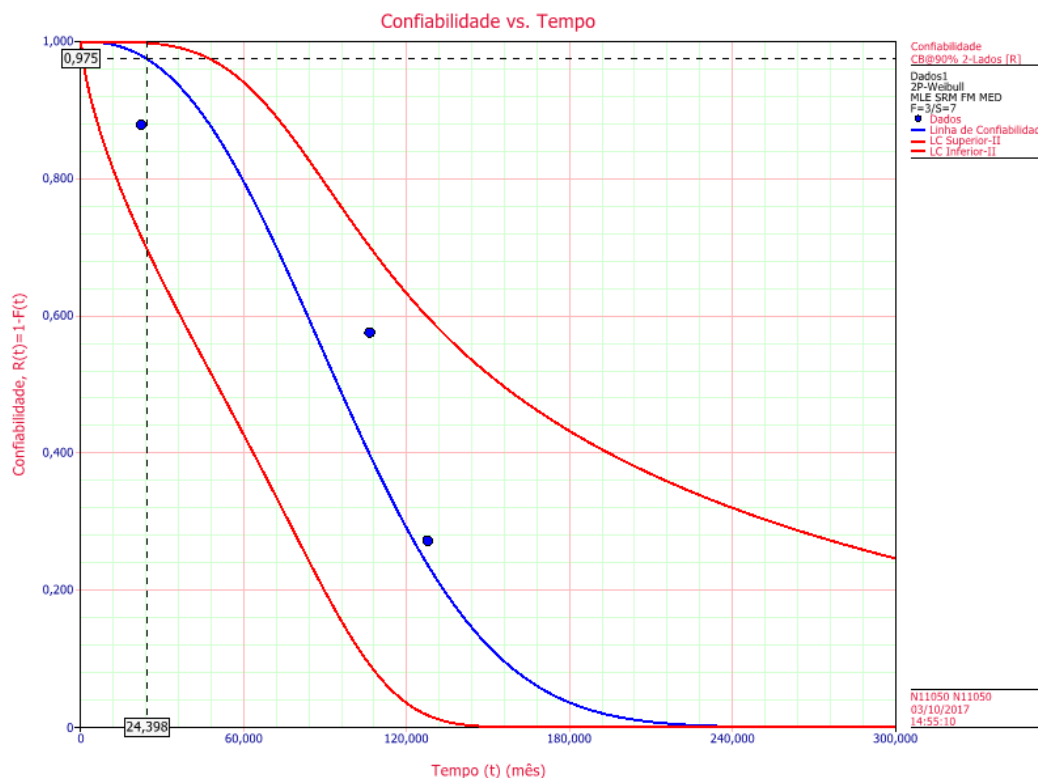


Fonte: O autor. Aplicação do Weibull ++, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017

Nota-se, conforme ponto marcado no gráfico da Figura 18, que para o tempo aproximado de 24 meses de operação, tem-se, aproximadamente 2,4% de probabilidade de ocorrência de falha, o que equivale a uma operação com confiabilidade de 97,6% (100 - 2,4). Se for considerado os limites de confiança de 90% demarcados no gráfico, a probabilidade de falha para 24 meses de operação ficaria entre 0 e 30%, aproximadamente.



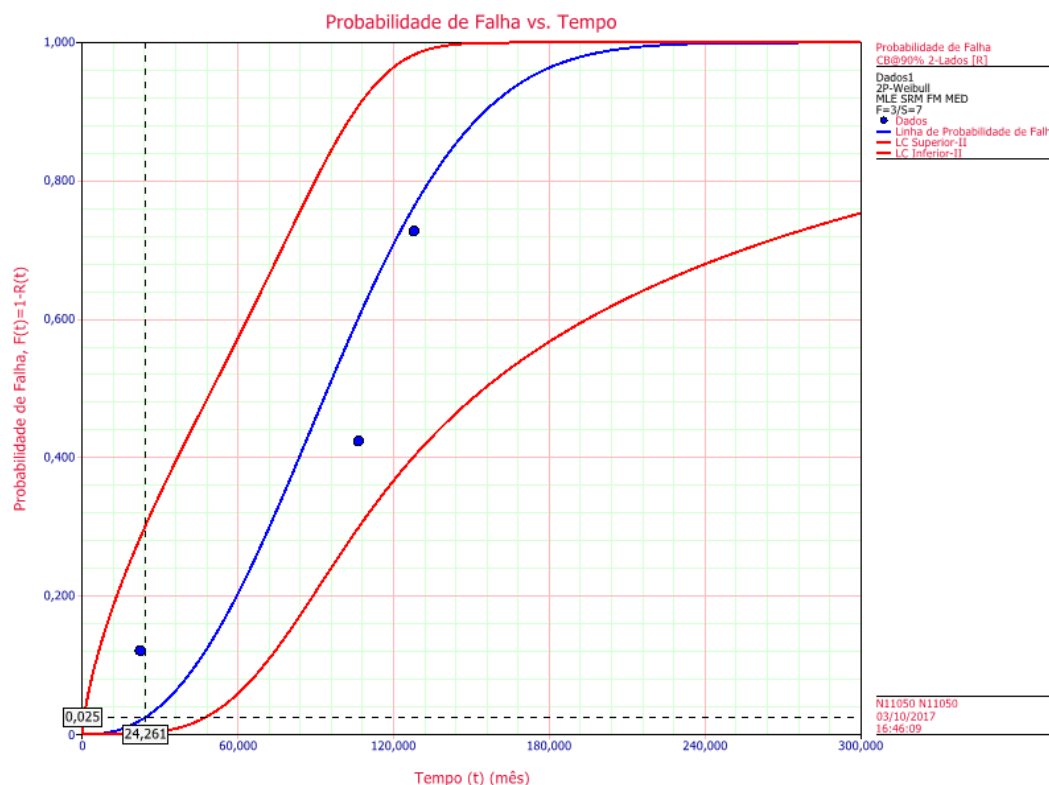
Figura 19 – Probabilidade de Confiabilidade versus Tempo com limites de confiança em 90% bilateral



Fonte: O autor. Aplicação do Weibull ++, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017

O ponto marcado no gráfico da Figura 19, demonstra diretamente o valor aproximado de confiabilidade encontrada de 0,975 (97,5%) para o tempo próximo de 24 meses de operação, em concordância com o demonstrado a partir do gráfico da Figura 18.

Figura 20 – Probabilidade Acumulada de Falha no Tempo com limites de confiança em 90% bilateral – Escala Linear

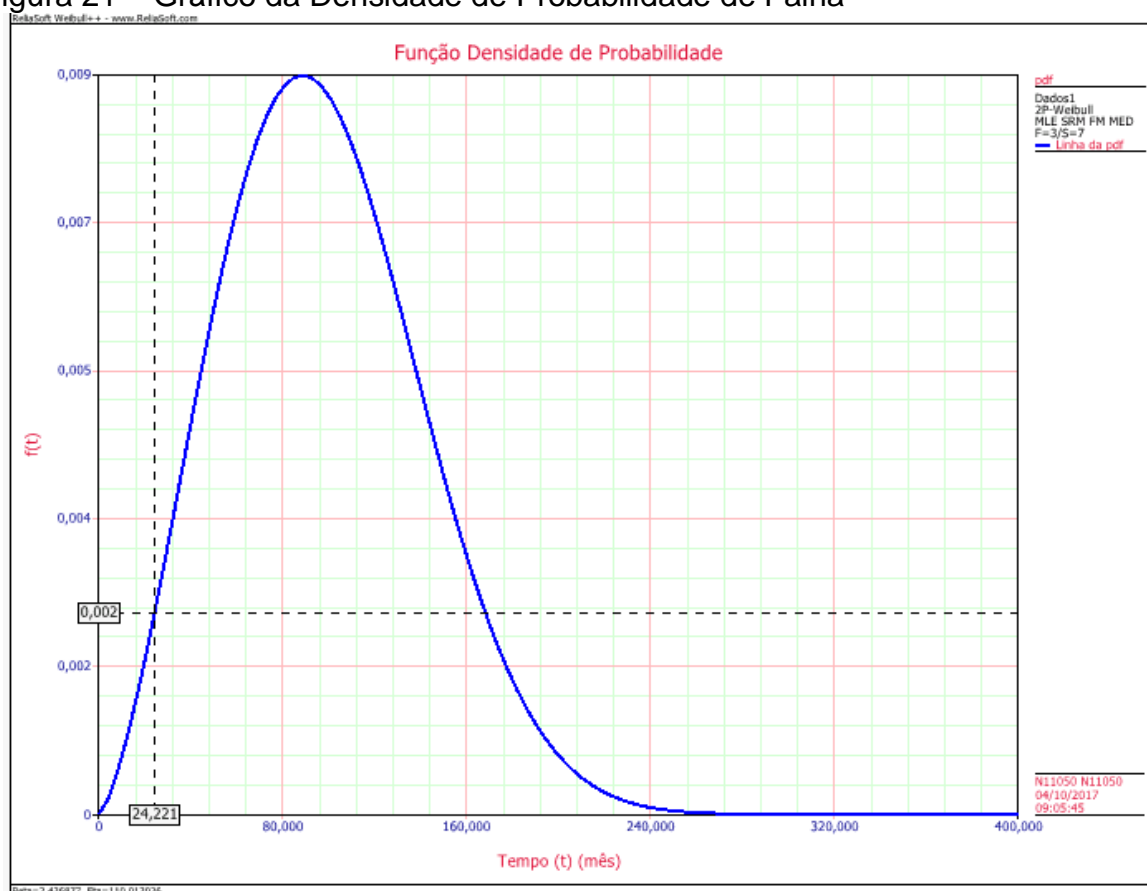


Fonte: O autor. Aplicação do Weibull ++, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017

O gráfico apresentado na Figura 20 traz uma forma alternativa de se representar a probabilidade acumulada de falha no tempo (em escalas lineares) em relação ao gráfico probabilístico de Weibull (que é construído em escalas logarítmicas).

Outra forma de se verificar a evolução das falhas é através da função de densidade de probabilidade de falha (pdf) do equipamento. O gráfico apresentado na Figura 21 traz esta abordagem. Como exemplo, encontra-se plotado no mesmo o ponto equivalente à probabilidade instantânea de falha para o período decorrido de 24,22 meses, sendo observada a probabilidade pontual de 0,2% de ocorrência de falha nesse momento.

Figura 21 – Gráfico da Densidade de Probabilidade de Falha



Fonte: O autor. Aplicação do Weibull ++, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017

Nota-se, também a partir do gráfico da Figura 21, a quantidade de falhas máximas pontuais em torno de 89 meses, quando se estima que 44,93% dos itens já falharam (estimado pela ferramenta QCP do Weibull++), ou, em outras palavras, que a probabilidade acumulada de falha para este período é de 44,93% (dada pela integral da área da curva sob o gráfico para o tempo entre 0 e 89 meses).

#### 4.3.3 Estimativas de tempo de operação versus confiabilidade.

Uma vez determinadas as funções de distribuição probabilística de confiabilidade e falha dos equipamentos sob este estudo, é possível realizar simulações de quantificação de confiabilidade e falha para qualquer tempo decorrido de operação contínua destes equipamentos, via ferramenta QCP do software Weibull++, de forma a fornecer subsídios necessários tomadas de decisão relativas ao melhor momento para a realização de manutenção proativa, sob estimativa

conhecida para a probabilidade de falha, o que será apresentado nas próximas Seções, para diferentes cenários encontrados nas plantas em questão.

#### 4.3.3.1 Estimativa de confiabilidade alinhada à meta de UMSR da AMT.

Atualmente, a meta para o percentual de tempo de parada não programada na AMT (denominada de UMSR: Unplanned Maintenance Stoppage Ratio) é de 2,6%, dada pela equação:

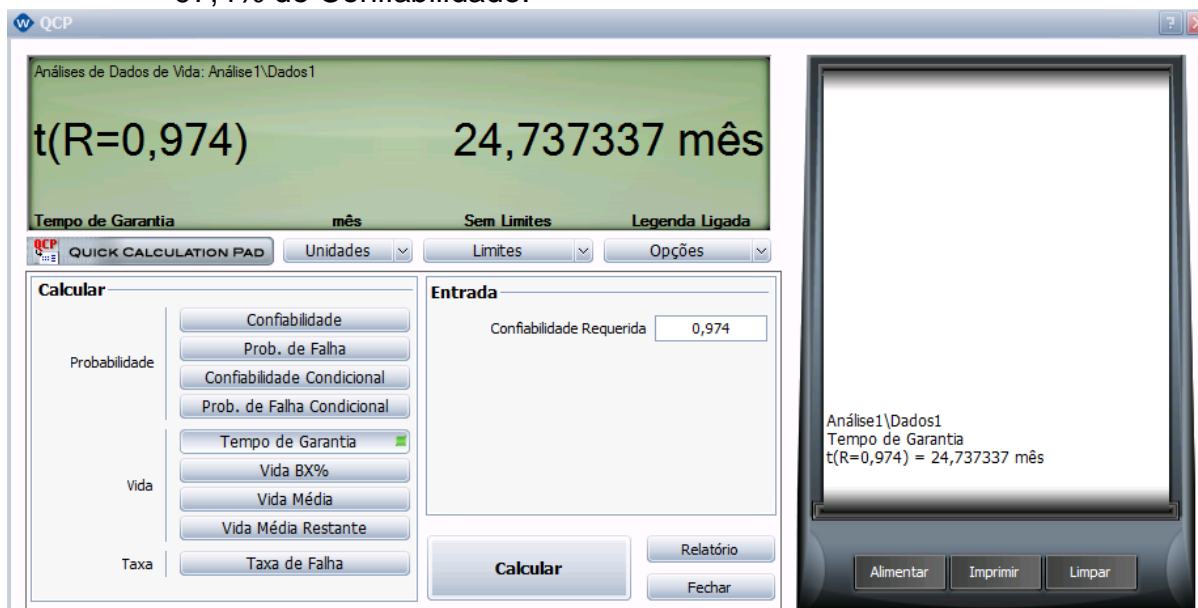
$$UMSR(\%) = \frac{\sum \text{tempo paradas/ano}}{\text{tempo da planta disponível]/ano} \times 100$$

Este indicador é, portanto, um bom estimador para a confiabilidade esperada dos equipamentos em questão.

Alinhando, por exemplo, de forma simplória, a expectativa da medida de confiabilidade destes equipamentos à meta geral de UMSR, tem-se que a confiabilidade mínima esperada para estes equipamentos seria de 97,4% (=100% - 2,6%).

A partir da expectativa acima, utilizou-se a ferramenta calculadora QCP do software Weibull++ para se definir o tempo de operação esperado para a confiabilidade de 97,4% (tempo em garantia para 0,974 de medida de confiabilidade), chegando-se ao período decorrido de 24,74 meses, conforme print do resultado obtido através desta ferramenta do software, apresentado na Figura 22.

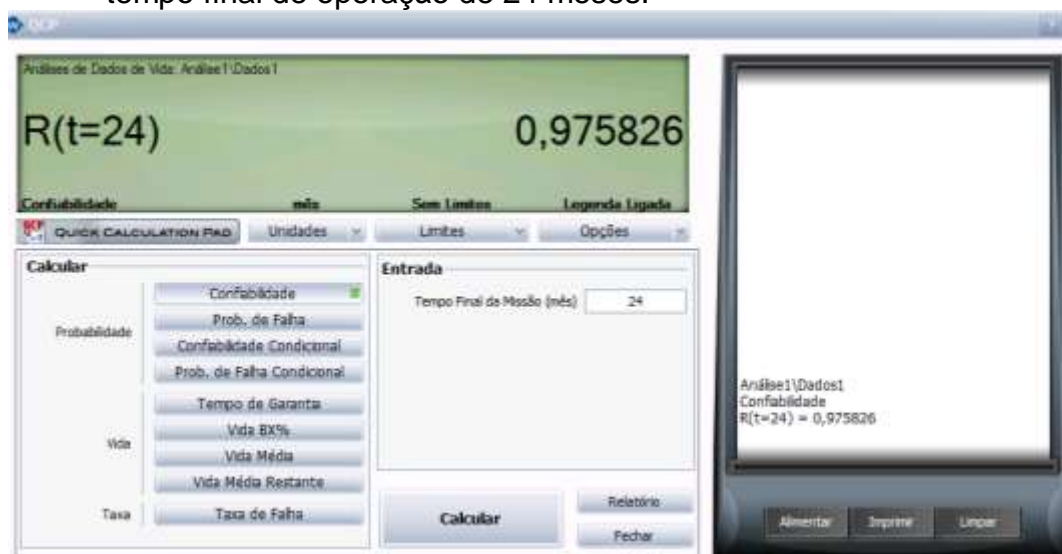
Figura 22 – Interface CQP do Weibull ++ com Simulação de Tempo de Garantia para 97,4% de Confiabilidade.



Fonte: O autor. Aplicação do Weibull ++, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017

Considerando que as oportunidades de realização manutenção preventiva nestes equipamentos sem impacto na produção da usina tornam-se viáveis durante as paradas programadas das unidades operacionais às quais os equipamentos fazem parte, e que tais paradas ocorrem a cada 2 anos, o período adequado para a se realizar tal manutenção, de forma que se garanta a expectativa de confiabilidade mínima definida, seria a cada 01 parada programada (equivalentes a 24 meses).

Figura 23 - Interface CQP do Weibull ++ com simulação de confiabilidade para tempo final de operação de 24 meses.



Fonte: O autor. Aplicação do Weibull ++, versão 11 – Reliasoft Corporation 2017

Desta forma, o período de operação contínua de 24 meses resultaria na confiabilidade ajustada de 97,58%, conforme cálculo apresentado pela ferramenta calculadora QCP demonstrado na Figura 23.

#### 4.3.3.2 Comparação de medidas de confiabilidade para diferentes cenários.

Apesar do tempo de operação ideal para substituição / manutenção proativa ser de 24 meses para o folio de dados coletados, conforme demonstrado pelas simulações iniciais apresentadas na Seção 4.3.3.1, outros cenários de estudos foram simulados para melhor comparação e suporte decisório no planejamento de atuação proativa, cujos resultados encontram-se apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, e detalhados a seguir:

- Cenário 1: Simulação com todos os dados levantados, de acordo com o apresentado no Quadro 5, já realizado na demonstração inicial, conforme apresentado na Seção 4.3.3.1.
- Cenário 2: Dados simulados desconsiderando-se o dado de suspensão de julho/16, que, conforme apresentado no Quadro 5, fora devido a uma falha causada por interferência externa de contaminação de óleo, transferida indevidamente para o equipamento, e, segundo uma interpretação alternativa, tal evento poderia não ter sido considerado como falha do equipamento e tampouco como suspensão, por se tratar de algo não intrínseco do equipamento (falha causada por não cumprimento dos requisitos mínimos operacionais).
- Cenário 3: Além da eliminação do evento de suspensão de Julho/16, foram também eliminados as constatações de suspensão para os equipamentos que estão operando normalmente no momento. Esta seria outra interpretação alternativa, pois nestes casos tais suspensões não seriam devidas à inspeção formal nos equipamentos, mas sim pela não constatação de falha evidente pela Operação até o momento.
- Cenário 4: Uma alternativa do cenário 3, retornando-se para o folio de dados a suspensão do evento ocorrido em Julho/16 (falha por evento externo transferida ao equipamento, que, ao ser constatada como “não falha” do equipamento, fora considerada como suspensão).

Para cada cenário, foi simulado:

- Tempo de vida esperada para a confiabilidade alvo de 97,4% (confiabilidade mínima alvo, segundo critério estabelecido na Seção 4.3.3.1).
- Confiabilidade esperada para operação contínua entre uma campanha da unidade operacional (02 anos = 24 meses de tempo de missão).
- Confiabilidade esperada para operação contínua entre duas campanhas da unidade operacional (04 anos = 48 meses de tempo de missão).
- Confiabilidade esperada para operação contínua entre três campanhas da unidade operacional (06 anos = 72 meses de tempo de missão).

Realizadas as simulações no Weibull++, criando-se as planilhas dos dados conforme cenários apresentados, e utilizando-se da ferramenta QCP, de forma semelhante ao apresentado na Seção 4.3.3.1 (que corresponde ao cenário 1), chegou-se aos resultados apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Tabela 2 – Resultados das Simulações de Tempo de Vida e Confiabilidades Esperadas Para os Cenários Testados.

Cenários		Tempo vida (meses) para $R(t) = 0,974$	Confiabilidade Esperada		
			Operação de 1 campanha CTE (2 anos)	Operação de 2 campanhas CTE (4 anos)	Operação de 3 campanhas CTE (6 anos)
1	Incluindo todos os dados coletados.	24,85	97,58%	87,59%	70,05%
2	Eliminando o evento de suspensão de julho/16 (falha por fatores externos).	22,81	97,08%	86,14%	68,13%
3	Eliminando o evento de julho/16 (acima) mais os últimos eventos de suspensão (unidades em funcionamento).	21,86	96,79%	85,44%	67,34%
4	Eliminando os últimos eventos de suspensão (unidades em funcionamento), mantendo a suspensão de julho/16.	24,03	97,41%	87,12%	69,50%

Fonte: O autor. 2017.

Percebe-se que os diferentes cenários não alteram substancialmente os tempos de vida estimados a partir da confiabilidade desejada, permanecendo em torno dos 24 meses, que representa um ciclo de campanha da unidade operacional da Central Termoelétrica.

Percebe-se também que o aumento do tempo de missão dos equipamentos para tempos múltiplos de campanhas de paradas programadas da CTE, afeta sensivelmente as estimativas de confiabilidade dos mesmos. Com isso, sugere-se, pelos resultados das simulações, que o tempo ótimo para substituição e/ou realização de manutenção proativa, mesmo sem evidencia de evento PF, seria de

uma campanha entre paradas programadas Central Termoelétrica, a cada 2 anos de operação.

#### 4.4 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO 4

Viu-se, neste capítulo, a aplicação dos conceitos da metodologia de Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM), bem como de estimativas de confiabilidade e falha sob análises de histórico e aplicação de conceitos de LDA, através de simulações em software especializado para tais aplicações.

As aplicações de tais metodologias e conceitos serão utilizadas para guiar a gestão de manutenção dos referidos equipamentos, visando aumentar a sua confiabilidade ao menor custo possível, evitando-se intervenções desnecessárias e reduzindo-se o risco de falhas inesperadas que levem ao risco de paradas não programadas para intervenções corretivas nestes equipamentos.

As tarefas de manutenção preventiva definidas foram adequadamente escolhidas pela aplicação dos conceitos do RCM e FMECA, tendo como resultado ações práticas de gestão de rotina de manutenção, definidas no Parágrafo 4.1, sintetizados na Seção 0, através de sua FMECA.

A definição do período adequado para realização da manutenção proativa, de forma a se atuar antes do surgimento de falhas, foi realizada com base nos fundamentos de LDA apresentados no Parágrafo 3.3, tendo como base o levantamento e tratamento de histórico coerente do funcionamento de tais equipamentos, bem como da consideração de pré-existência de paradas programadas das referidas unidades operacionais (independentes das condições operacionais particulares dos equipamentos sob este estudo), e resultados das resoluções matemáticas obtidas através de software dedicado (Weibull++ da Reliasoft).

No próximo capítulo encontram-se sintetizados os produtos finais e resultados esperados com a execução deste trabalho.



## 5 RESULTADOS E CONCLUSÕES

O desenvolvimento deste trabalho trouxe vários resultados práticos relacionados aos equipamentos objeto deste estudo. Viu-se que os objetivos descritos no Capítulo 1 foram alcançados, sendo os mesmos evidenciados no Capítulo 4, pela identificação e priorização dos modos de falha dos posicionadores eletro-hidráulicos das turbinas da Central Termoelétrica da AMT através da metodologia de RCM aliada à FMECA (Seção 0), como evidenciado no Capítulo 4.

Foi estabelecido também o tempo ótimo de campanha para tais equipamentos através de estudo da LDA, baseado em levantamento histórico de eventos de falha destes equipamentos, definindo-se funções temporais de distribuição de probabilidades de falha, que guiaram a tomada de decisão para se estabelecer o sincronismo do tempo ótimo de campanha (Seção 4.3.3) com períodos disponíveis para realização de manutenções preventivas disponibilizados através de paradas já programadas em períodos pré-definidos sob outras premissas, tais como paradas para inspeção geral nas caldeiras da CTE para atendimento de regulamentação de segurança (ex.: NR13, para inspeção em vasos de pressão e caldeiras).

Tais resultados fundamentaram o estabelecimento de políticas de manutenção, até então inexistentes, para os referidos equipamentos, visando aumentar a sua confiabilidade ao menor custo possível, evitando-se intervenções desnecessárias e reduzindo-se o risco de falhas inesperadas que pudessem levar a paradas não programadas da planta para intervenções corretivas nestes equipamentos.

As políticas de manutenção criadas através deste trabalho consideraram planos de manutenção com tarefas periódicas de inspeção preditiva, sensitiva e de restauração programada.

As tarefas de inspeção periódica preditiva e sensitiva foram adequadamente escolhidas pela aplicação dos conceitos do RCM e FMECA, tendo como resultado ações práticas de gestão de rotina de manutenção, definidas no Parágrafo 4.1, sintetizados na Seção 0, através de sua FMECA. Já a tarefa de restauração programada foi definida sob o estudo da LDA apresentado no Parágrafo 4.3, com resultados apresentados na Seção 4.3.3.2.

Como resultado prático do trabalho, os seguintes planos de manutenção foram estabelecidos para cada posicionador montado, conforme Seção 0:

- Inspeção preditiva periódica – análise das características do óleo de controle (por amostra): físico-química, presença de água, presença de partículas sólidas – frequência: 01 mês (28 dias).
- Inspeção preditiva periódica – verificação da pressão na linha principal de óleo de controle – frequência: 01 mês (28 dias).
- Inspeção preditiva periódica – verificação da pressão diferencial do filtro de óleo de controle – frequência: 01 mês (28 dias).
- Inspeção sensitiva periódica – verificação de indícios de agarramento do posicionador (solicitar à Operação a variação de carga em pequenos steps de patamar, em torno de 5%, e verificar variação de posição em campo; forma: visual) – frequência: 01 mês (28 dias).
- Inspeção sensitiva periódica – verificação de indícios de piora de desempenho da malha de controle (solicitar à Operação a variação de carga em pequenos steps de patamar, em torno de 5%, e verificar resposta geral da malha de controle (aspectos: aumento de tempo morto, maior variabilidade, perda de repetibilidade; forma: visual, no supervisório) – frequência: 01 mês (28 dias).
- Inspeção sensitiva periódica – verificação de indícios de vazamento de óleo no posicionador (forma: visual, no posicionador montado na turbina) – frequência: 01 mês (28 dias).
- Realização de manutenção proativa geral no posicionador (conforme check-list do fornecedor, com desmontagem em bancada, limpeza, substituição de componentes avariados, e testes em bancada) – frequência: 24 meses (em conjunto com a parada programada da planta).
- Realizar de calibração do conjunto posicionador x atuador da turbina, após remontagem em campo, durante parada programa da planta.

Durante a realização do trabalho, houve certa dificuldade para se levantar um histórico fiel de falhas destes equipamentos, tendo em vista que não havia uma política de gestão de manutenção clara que fomentasse o registro dos eventos de

falhas ao longo de suas vidas, bem como não havia o domínio técnico suficiente sobre os seus modos de falha que propiciasse o julgamento correto dos mesmos.

Além disso, houve carência de recurso humano para a realização de tal levantamento, devido à rotatividade dos profissionais responsáveis pelo mesmo ao longo de todo o período investigado (desde junho/98, *startup* da primeira unidade de controle deste tipo). Tais descrições de falha foram obtidas junto ao fornecedor (empresa dedicada e exclusiva para atuação técnica especializada nesses equipamentos), resgatando-se os relatórios de manutenções realizadas externamente, bem como de pesquisa interna de relatórios de ocorrências (registros de Operação e Manutenção) ao longo de todos os períodos de operação de cada turbina envolvida, desde os seus respectivos *startups*.

Sob os aspectos dos benefícios vislumbrados para os resultados deste trabalho, pode-se observar que as definições claras para o tratamento de tarefas de manutenção sobre estes equipamentos, por si, já foi considerado o primeiro e imediato benefício devidamente materializado, pois até então não havia uma política de manutenção sistematizada com foco em confiabilidade qualitativa e quantitativa, o que foi precisamente definido através deste trabalho e implantado de forma estruturada no sistema informatizado de gestão de manutenção da AMT.

Ainda sobre os benefícios dos resultados vislumbrados, tem-se como benefício maior e final, ainda potencial, a redução das falhas funcionais, tanto pela detecção de falhas potenciais evidentes, pela execução das tarefas de inspeções preditivas e sensitivas, determinadas segundo estudo de confiabilidade qualitativa, quanto pelas atividades previstas para restauração programada de vida desses equipamentos, a serem realizadas em tempo definido segundo estudo de confiabilidade quantitativa realizada. Em última análise, a redução das falhas trará eliminação de perda de lucro cessante devido às paradas não previstas das turbinas e de suas unidades geradoras (paradas estas ocorridas em quatro ocasiões ao longo de todo o levantamento histórico, conforme apresentado na Seção 4.3.1.).

Finalmente, com a experiência deste trabalho, nota-se um grande campo de estudo e aplicação das mesmas metodologias aqui associadas, de análise combinada de confiabilidade qualitativa e quantitativa, trazendo propostas de realização de manutenção proativa com base em estimativas de falha no tempo aliada à política de inspeções sob condição, para o caso em que os eventos de falha possam extrapolar aos tempos definidos para atuação de restauração programada.

Tal campo de estudo se amplia muito, tanto para as plantas industriais avaliadas neste trabalho quanto para outras plantas, pois ainda percebe-se uma forte cultura resistente de abordagem de manutenção tradicional com foco no equipamento e não na função operacional, sob critérios definidos rigidamente pelos fabricantes dos mesmos, aliada à insuficiência de conhecimento técnico dos fundamentos e ferramentas de confiabilidade, tais como as aplicadas neste trabalho (conforme mencionado na Seção 1.1.1).

Com isso, a partir deste trabalho, pretende-se aplicar confiabilidade qualitativa, através de RCM, e quantitativa, através de LDA, para os demais equipamentos críticos da Central Termoelétrica da AMT (área de atuação do autor), a partir do DBF construído para os equipamentos envolvidos, conforme apresentado na Seção 3.2.2.1.2 (que mostra o diagrama de blocos funcionais de um conjunto Turbina, Gerador, Soprador Axial da Central Termoelétrica da AMT), e, em se confirmando o sucesso dos resultados alcançados (evidências de melhoras na gestão de manutenção e na redução de falhas), expandir os trabalhos para outras áreas da usina.

## REFERÊNCIAS

ABERNETHY, Robert. **The New Weibull Handbook**. Reliability and Statistical Analysis for Predicting Life, Safety, Supportability, Risk, Cost and Warranty Claims. Spiral-bound, 2006

FOGLIATTO, Flávio Sanson; RIBEIRO, José Luis Duarte. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**, Rio de Janeiro: Elsevier Editora, 2004; 2.

LORA, Electo Eduardo Silva; NASCIMENTO, Marco Antonio Rosa do. **Geração Termelétrica - Planejamento, Projeto e Operação**, Rio de Janeiro: Interciência, 2004.

MORTELARI, Denis; SIQUEIRA, Kleber; PIZZATI, Nei. **O RCM na Quarta Geração da Manutenção**. A Moderna Gestão de Ativos, 2. ed. São Paulo: RG Editores, 2014.

MOUBRAY, John. **RCM II - Reliability-centered Maintenance**. Industrial Press Inc., 1990.

RAUSAND, Marvin; HOYLAND, Arnljot. **System Reliability Theory. Models. Statistical Methods, and Applications**; Wiley-Interscience, 2004).

RELIAWIKI.ORG. **The Weibull Distribution**. Disponível em [http://reliawiki.org/index.php/The\\_Weibull\\_Distribution](http://reliawiki.org/index.php/The_Weibull_Distribution), Acesso em: 31/08/2017

WOODWARD GOVERNOR COMPANY. **Reference Guide Folder: 505 & 505XT CONTROLLERS FOR INDUSTRIAL STEAM TURBINES**. Fort Collins - Colorado, 2015. Disponível em: <http://www.woodward.com/Search.aspx?searchtext=reference%20manual>, Acesso em: 11.06.2017.

RELISOFT CORPORATION. **WEIBULL ++**, Versão 11. Tucson, AZ, USA, 2017

WOODWARD GOVERNOR COMPANY. **Reference Manual: Governing Fundamentals and Power Management**. Fort Collins - Colorado, 2015. Disponível em: <http://www.woodward.com/Search.aspx?searchtext=reference%20manual>, Acesso em: 09.06.2017.

**ÍNDICE ONOMÁSTICO**

FOGLIATTO; Ribeiro (2009)	2   7   10   29   30   31
LORA, Electo Eduardo Silva (2004)	251   252   253   254   255   256   257   258   259   260
MOUBRAY, John (1990)	55   59   68   69   262   263
RAUSAND, Marvin (2004)	37