

# Desenvolvimento de Políticas de Manutenção Centradas em Confiabilidade para Turbinas a Gás Empregadas em Usinas Termelétricas a Ciclo Combinado

G. F. M. de Souza, EPUSP, F. J. Guevara, EPUSP e J. N. Torres, AES Tietê

**Resumo-** Este trabalho apresenta a metodologia de análise de confiabilidade empregada para estimativa da confiabilidade de turbinas a gás empregadas em usinas termelétricas a ciclo combinado, baseada nos conceitos básicos de confiabilidade e de manutenção. Adicionalmente apresenta-se a aplicação desta metodologia para a análise de confiabilidade para as turbinas a gás da usina termelétrica de Uruguaiana, que foi utilizada como caso exemplo neste estudo. Ao final do artigo são apresentadas as principais conclusões obtidas neste trabalho, não somente relativas à análise das turbinas a gás instalado na usina termelétrica de Uruguaiana, mas também associadas com a própria aplicação da metodologia ora proposta.

**Palavras-chave**—manutenção, confiabilidade, turbina a gás, disponibilidade, termelétrica.

## I. INTRODUÇÃO

### A. Considerações Iniciais

Os diversos setores industriais que atuam junto à sociedade moderna têm buscado produzir sistemas com desempenho mais eficiente a custo cada vez mais baixo, ou seja, atendendo aos anseios de um mercado consumidor cada vez mais exigente. Dentre as exigências deste mercado consumidor pode ser citada a necessidade de produtos que apresentem reduzida probabilidade de falha, e com custo de manutenção bastante baixo.

Como o processo de garantia do desempenho de um produto está bastante associado a uma política de minimização da possibilidade de ocorrência de falhas, o estudo dos mecanismos envolvidos na indução das mesmas bem como a avaliação da probabilidade de sua ocorrência passa a ser de fundamental importância para a garantia do desempenho de um produto.

É neste contexto que os conceitos de Confiabilidade passaram a ser empregados no projeto de um produto. De uma forma genérica, a confiabilidade está associada com a operação do equipamento com sucesso, ou seja, que este execute as funções para o qual foi projetado, preferencialmente na ausência de falhas. Dessa forma, a confiabilidade, de uma forma simplista, pode ser definida como a possibilidade de um componente, equipamento, ou sistema executar a sua função, por um período de tempo específico, sem apresentar falhas.

Sob o ponto de vista do usuário final, a confiabilidade dos sistemas de geração de energia elétrica deve ser bastante elevada, pois o mesmo tem como objetivo utilizar a energia elétrica para atender suas necessidades, quer sejam de natureza industrial, de serviços, ou mesmo particular.

A disponibilidade de qualquer sistema de geração de energia elétrica envolve a combinação da confiabilidade do mesmo, que representa a probabilidade de um sistema operar conforme um desempenho específico, sob condições pré-definidas de utilização, por um período de tempo pré-determinado. Também com a sua manutenibilidade, que mede a rapidez com que o sistema é reparado quando a ocorrência de uma falha.

A disponibilidade de um sistema está relacionada com a confiabilidade dos equipamentos que o compõe, com as políticas de manutenção associadas aos mesmos, que não só influencia no tempo de retorno a operação dos mesmos em caso de falha, mas também podem retardar a degradação da confiabilidade do equipamento, no caso de aplicação de técnicas preventivas ou preditivas. Adicionalmente a disponibilidade do equipamento também está associada com aspectos econômicos de sua operação, pois quanto maior a disponibilidade maior é a capacidade de produzir um produto específico a ser vendido, gerando faturamento para uma empresa.

Através da aplicação de técnicas de avaliação da confiabilidade de sistemas, mais especificamente da Análise de Modos e Efeitos de Falhas (do inglês "Failure Modes and Effects Analysis" - FMEA), podem-se definir quais são os modos de falha dos componentes do sistema cuja ocorrência implica em conseqüências deletérias para o mesmo, mais especificamente a perda de produção. Especificamente no caso de sistemas de geração de energia elétrica, a conseqüência de maior gravidade para o mesmo é perda da capacidade de geração.

Uma vez identificado os modos de falha de maior severidade para o sistema, pode-se estudar, em função da natureza da falha do componente, qual a prática de manutenção mais adequada ao mesmo, visando a minimização da sua probabilidade de falha.

Estes conceitos caracterizam a técnica de seleção de políticas de manutenção denominada Manutenção Centrada em Confiabilidade (do inglês "Reliability Centered Maintenance" - RCM), a qual tem por objetivo a seleção da melhor política de manutenção para os componentes considerados críticos para o sistema de geração de energia, visando a minimização de ocorrências de falha.

Uma vez identificados os componentes críticos e seus

Este trabalho foi apoiado pela AES Tietê.

G. F.M. de Souza é professor associado da Escola Politécnica da USP (e-mail: [gfmsoouza@usp.br](mailto:gfmsoouza@usp.br)).

F. J.Guevara é mestre pela Escola Politécnica da USP (e-mail: [fernando.carazas@poli.usp.br](mailto:fernando.carazas@poli.usp.br)).

J.N.Torres trabalha na AES Tietê (e-mail [julisano.nicoliello@AES.com](mailto:julisano.nicoliello@AES.com)).

modos de falha, pode-se determinar, em função dos dados históricos dos instantes de falha, quais seriam os períodos mais adequados para a execução de uma intervenção preventiva, a fim de evitar a falha em serviço. Adicionalmente, em função das características dos modos de falha, pode-se, inclusive, indicar uma prática de manutenção preventiva ou preditiva.

Sob o ponto de vista das empresas geradoras, das empresas distribuidoras e dos próprios consumidores de energia elétrica, tem-se que a questão de geração de energia elétrica no Brasil tem sido foco de uma série de discussões, desde a crise de 2001, que causou a necessidade de aplicação de uma política de racionamento.

Ao longo destas discussões um dos pontos que tem sido mais debatido é a utilização de sistemas de geração de energia baseados em termelétricas como complemento ao modelo de geração de energia com o emprego de recursos hídricos, tradicionalmente utilizado no Brasil. Os defensores deste sistema têm levantado algumas vantagens importantes dos mesmos tais como: a proximidade entre gerador e consumidor, menor impacto ambiental em comparação com a instalação de uma usina hidrelétrica e utilização de rejeitos térmicos para fins de cogeração. Adicionalmente, com a maior disponibilidade de gás natural, importado da Bolívia através do gasoduto Brasil-Bolívia, há uma maior atratividade para o emprego deste gás como combustível industrial, incluindo a sua utilização em usinas termelétricas.

Entretanto, para uma melhor comparação entre sistemas de geração de energia elétrica, tais como os baseados em geração hidrelétrica e termelétrica, necessita-se estabelecer um índice de comparação que englobe aspectos técnicos e econômicos associados a estes sistemas.

Considerando que o principal requisito de qualquer sistema de geração de energia é a sua disponibilidade, ou seja, a probabilidade do mesmo estar disponível para operação quando solicitado pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), este valor pode ser empregado como padrão de comparação entre diferentes sistemas de geração de energia.

### *B. Escopo do Artigo*

Considerando a necessidade de obter subsídios técnicos que possibilitem uma melhora nas ações de manutenção de sistemas de geração de energia elétrica e tendo como objetivo aumentar a disponibilidade, a AES Tietê desenvolveu junto com a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo um projeto de pesquisa e desenvolvimento intitulado: “Desenvolvimento de Método de Análise de Disponibilidade de Sistemas de Geração de Energia - Comparação entre Sistemas de Geração de Energia Baseados em Usinas Hidrelétricas e Termelétricas”. cujo objetivo foi desenvolver uma metodologia para avaliação da disponibilidade de sistemas de geração de energia elétrica, baseado em termelétricas e hidrelétricas, tomando por base a aplicação de técnicas de análise de confiabilidade e de seleção de políticas de manutenção baseada nos conceitos de Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM). A metodologia foi baseada na identificação dos componentes críticos deste sistema, como função da possibilidade da parada do mesmo em função da ocorrência de falha do componente.

Quando se executa a análise de confiabilidade, deve-se

levar em consideração o tipo de elemento que é objeto da avaliação. Uma vez que esta análise envolve diferentes abordagens para cada um dos casos, principalmente na análise de sistemas, onde a configuração dos componentes que o compõem, a maneira pela qual a informação é transmitida entre eles, bem como aos efeitos do operador sobre o sistema são importantes fatores a serem considerados na análise.

No caso de usinas termelétricas a ciclo combinado verifica-se que as turbinas a gás são equipamentos críticos, pois os gases de escape são empregados como fonte de calor para geração de vapor em uma caldeira de recuperação. Este vapor é empregado para “rodar” uma turbina a vapor, acoplada a um gerador. No caso de falha da turbina a gás, perde-se a geração de energia elétrica no gerador acoplado a turbina a gás e também paralisa-se o ciclo vapor, mesmo sem este apresentar falha, em função da falta de vapor gerado na caldeira de recuperação.

Este artigo técnico apresenta a metodologia de análise de confiabilidade empregada para descrição da confiabilidade de turbinas a gás, incluindo os conceitos básicos de confiabilidade e de manutenção, que serviram como base para o desenvolvimento da pesquisa. Adicionalmente apresenta-se a aplicação desta metodologia para a análise de confiabilidade das turbinas a gás instaladas na usina termelétrica de Uruguaiana, que foi utilizada como caso exemplo neste estudo. Nesta usina empregam-se duas turbinas a gás W501F fabricado pela Siemens - Westinghouse e uma turbina a vapor, caracterizando um ciclo combinado tipo 2 x 1, sendo que as falhas das turbinas a gás continuam sendo críticas, pois reduzem significativamente a potência gerada pela usina.

A análise de confiabilidade e manutenibilidade da turbina a gás é baseada na aplicação dos conceitos do RCM para definir quais os itens críticos da mesma sob o ponto de vista de manutenção. Tendo como objetivo a necessidade de atingir a disponibilidade operacional prevista para a turbina, minimizando as paradas para manutenção corretiva ou mesmo reduzindo os períodos de indisponibilidade associados com a manutenção preventiva.

Para atingir tal objetivo, executou-se a pesquisa em fases, sendo que inicialmente deve ser executada a árvore funcional do sistema básico de geração de energia elétrica com o emprego de usinas termelétricas a ciclo combinado, a qual tem por objetivo definir os principais equipamentos que o compõe, bem como a relação funcional entre os mesmos. Nesta pesquisa analisou-se em profundidade a turbina a gás, sistema vital para a obtenção de energia elétrica.

A partir da árvore funcional é possível a execução de uma análise do tipo FMEA de todos os sistemas que compõem a turbina a gás, buscando-se definir quais são os principais componentes das mesmas, seus modos de falha associados com condições operacionais específicas, bem como quais são as conseqüências destas falhas sobre a operação do equipamento. Adicionalmente, procura-se definir se a ocorrência de um dado modo de falha apresenta sintomas, os quais indicariam a sua ocorrência, permitindo a ação de manutenção antes da quebra definitiva do mesmo.

Para a seleção da política de manutenção mais adequada para um determinado equipamento ou sistema presente de

turbina a gás, deve-se formular um processo de decisão que permita definir quais as práticas mais adequadas para a mesma, tendo em vista as características de seus modos de falha e das próprias práticas de manutenção, empregadas em equipamentos mecânicos ou elétricos. As quais são: corretiva, preventiva e preditiva. Este procedimento de decisão é baseado na técnica do RCM.

Visando a definição da periodicidade das ações de manutenção associadas com as práticas selecionadas para um dado equipamento, caracterizando a política de manutenção, deve-se formular uma proposta de análise de confiabilidade do mesmo, baseando-se em dados do tempo de operação entre falhas. A partir destes tempos, pode-se definir a função de probabilidade que melhor expressa o comportamento do tempo entre falhas, caracterizando a confiabilidade do equipamento. A partir desta curva, podem-se definir os tempos recomendados para execução de práticas de manutenção preventivas, a fim de reduzir a ocorrência da falha, mantendo a confiabilidade do equipamento.

Finalmente, com o auxílio da árvore funcional e dos dados de falha dos equipamentos presentes nas turbinas a gás, executou-se a análise de confiabilidade e manutenibilidade das mesmas, possibilitando a verificação de executarem-se melhorias nos procedimentos de manutenção e operação a fim de aumentar a sua disponibilidade.

## II. ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DAS TURBINAS A GÁS INSTALADAS NA USINA TERMELÉTRICA DE URUGUAIANA

Embora as turbinas a gás empregadas em usinas termelétricas de energia elétrica apresentem alguns sistemas básicos, tais como mancais, sistemas de compressão e combustão, gerador e sistemas de controle, os mesmos podem apresentar algumas especificidades decorrentes do próprio projeto da turbina, principalmente em função de sua potência.

Visando a execução de um caso exemplo demonstrando a aplicabilidade da metodologia proposta no presente artigo, torna-se necessário a definição de uma usina termelétrica que será tomada como base de análise, visando a completa caracterização de suas turbinas a gás, permitindo a análise de modos e efeitos de falhas, a qual serve de base para uma futura implantação de políticas de manutenção centradas em confiabilidade, tendo em vista as sugestões de ações de manutenção propostas ao longo do trabalho.

De acordo com reuniões mantidas com a área técnica da AES Tietê, definiu-se que a Usina Termelétrica de Uruguaiana seria utilizada neste estudo.

### A. Árvore Funcional

Inicialmente, na Figura 1, tem-se o diagrama proposto para a usina. Propôs-se que a usina fosse subdividida em sistemas, os quais são: turbina a gás e a vapor, geradores, caldeira de recuperação, sistema de resfriamento de água (condensador, e torre de resfriamento), sistema de tratamento do gás, sistema de tratamento de água e efluentes e subestação.

Na Figura 2 apresenta-se o diagrama funcional de uma turbina a gás, baseando-se no manual descritivo da mesma,

[1]. De acordo com o diagrama o sistema turbina é composto por diversos componentes, os quais devem suportar a função primária do mesmo, que é transformar energia cinética do fluxo fluido em energia mecânica. Para tanto o sistema turbina deve possuir um sistema de controle, que mantenha a frequência de sua rotação, independentemente da magnitude de energia transformada, e deve possuir componentes que atuam diretamente na transformação e transmissão de energia para o gerador. Tais equipamentos como o rotor da turbina, o eixo, os mancais guia e de escora, o sistema de compressão, o sistema de combustão e o sistema de admissão de ar. Adicionalmente, este sistema apresenta componentes que suportam a sua operação, mas não atuam diretamente na função principal, tais como os equipamentos de sinalização e proteção, além do próprio sistema físico de instalação da turbina, que é a estrutura da turbina.

Além dos sistemas acima citados, a turbina a gás depende de alguns sistemas para monitoração e alimentação de sua operação, que incluem equipamentos de monitoração da potência ativa e reativa, tensão no gerador, e temperatura em alguns elementos da máquina. Finalmente, na saída da unidade geradora emprega-se uma subestação, que faz a ligação da unidade com a linha de transmissão, possuindo transformadores que adequam a tensão gerada com a exigida pela linha de transmissão, bem como possui um sistema de proteção que visa proteger a unidade geradora de algum problema que esteja ocorrendo na linha de transmissão.

### B. Análise de Modos e Efeitos de Falhas

A análise foi executada tomando como evento inicial um dado modo de falha de um componente da turbina a gás. A partir deste modo de falha apresenta-se a propagação dos efeitos (ou conseqüências) do mesmo sobre outros subsistemas da própria turbina a gás ou mesmo sobre a usina termelétrica. Considera-se a propagação em subsistemas com os quais o componente tem relação operacional, em conformidade com a árvore funcional. Ou seja, considera-se a propagação nos subsistemas posicionados em níveis superiores ao componente, com os quais este mantém alguma relação funcional.

Para execução na análise do tipo FMEA utilizou-se o formulário indicado na Tabela I, recomendado pela norma ISO 9000, emitida pela “International Organization for Standardization – ISO”.

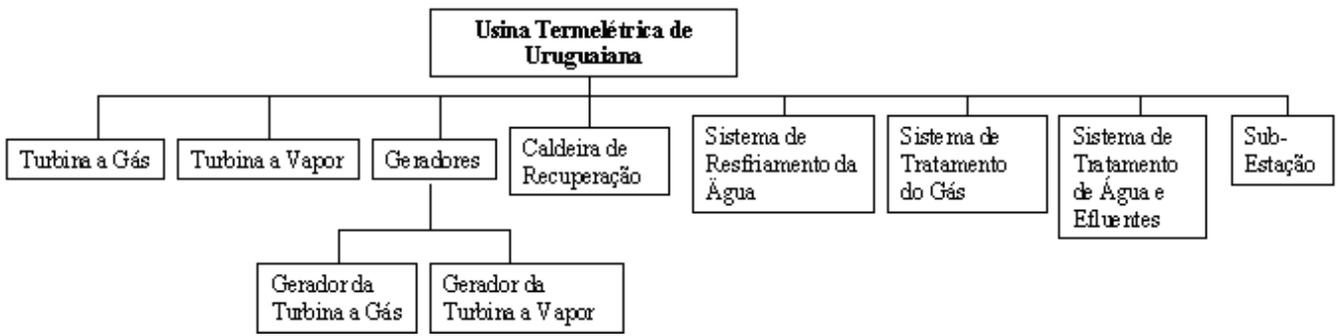


Figura 1. Diagrama funcional da Usina Termelétrica de Uruguiana.

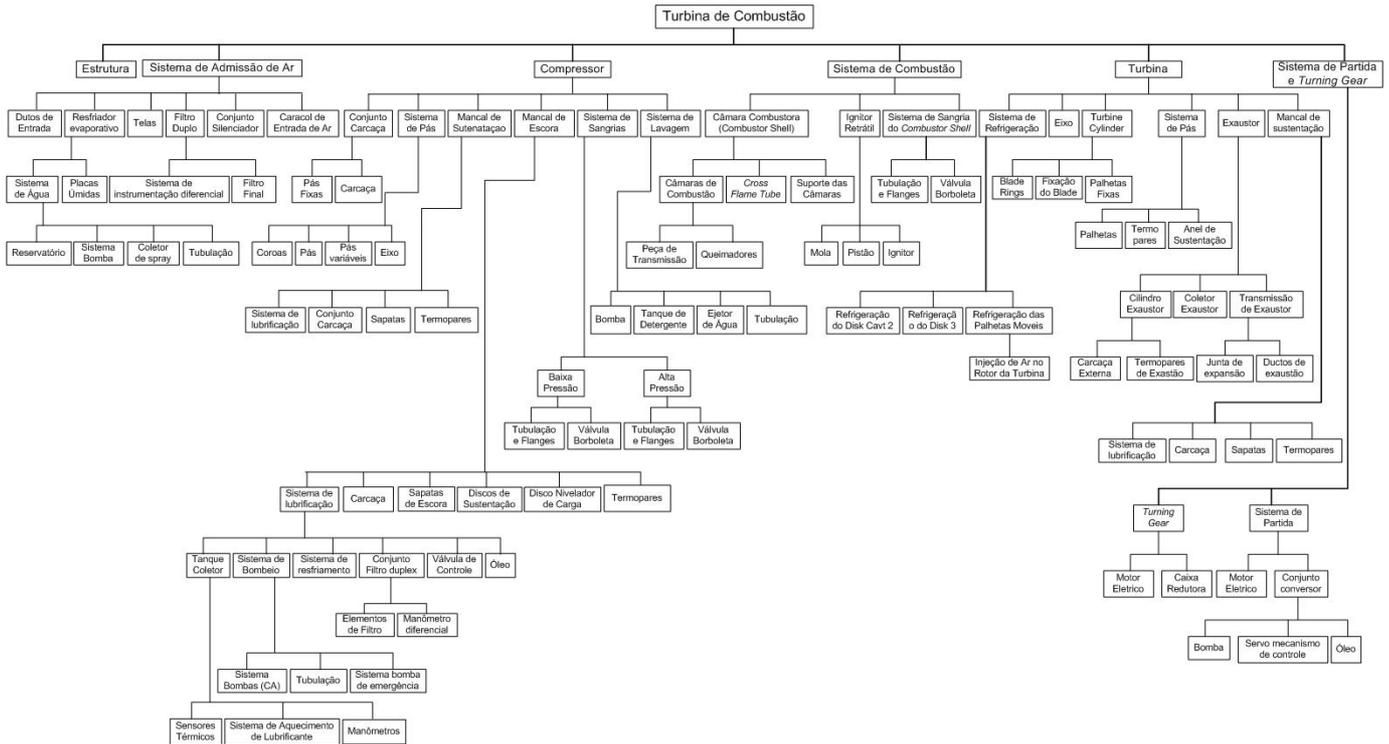


Figura 2. Árvore funcional da Turbina a Gás da Usina Termelétrica de Uruguiana.

TABELA I  
FORMULÁRIO EMPREGADO NA ANÁLISE FMEA.

Função	Modo de Falha Potencial	Efeito(s) Potencial(is) da Falha	SEVERIDADE	CLASSIFICAÇÃO	Causa(s) e Mecanismo(s) Potencial(is) de Falha	OCORRÊNCIA	Controles Atuais do Processo PREVENÇÃO	Controles Atuais do Processo DETECÇÃO	DETECÇÃO	NPR	Ações Recomendadas	Responsável e Prazo	Ações Tomadas	SEVERIDADE	OCORRÊNCIA	DETECÇÃO	NPR

A análise do tipo FMEA foi executada considerando apenas a severidade da falha, definida como o grau de comprometimento da capacidade de geração de energia elétrica da usina em função da falha do componente. Embora a planilha permita a análise da frequência da ocorrência da falha, de uma forma qualitativa, e mesmo da possibilidade de detecção desta nas fases iniciais de desenvolvimento da mesma, em função da aplicação de técnicas de monitoração, nesta fase do projeto esta parte da análise foi desconsiderada, pois nas fases seguintes do mesmo foi analisada a frequência da ocorrência dos modos de falha, visando à definição da confiabilidade do componente, bem como a possível política de

manutenção a ser empregada para o componente visando a minimização da possibilidade de haver falha do mesmo.

Portanto, a análise FMEA é a base para a análise de confiabilidade da turbina a gás, face à definição dos modos de falha dos componentes e seus efeitos sobre a máquina, permitindo a seleção de políticas de manutenção que possam minimizar a ocorrência destas falhas, tendo em vista a avaliação das causas das mesmas.

Para esta análise FMEA propôs-se a utilização de nove níveis de severidade, adaptados da classificação ISO e indicados na Tabela II, sendo definidos em função da degradação do desempenho da turbina, sob o ponto de vista de ma-

manutenção da capacidade de geração de energia elétrica em conformidade com as especificações de projeto da mesma.

As falhas mecânicas que causam a parada imediata da turbina a gás, causando a paralisação da usina, são:

i) Falha no eixo da turbina e do compressor, representada pela ruptura da secção transversal do mesmo ou pela presença de deformação permanente do mesmo, variando a sua retilidade;

ii) Falha na fixação das palhetas à coroa do compressor;

iii) Vazamento nos dutos de entrada do compressor;

iv) Falha nas pás da turbina, envolvendo a ruptura ou mesmo erosão das mesmas ou a própria ruptura dos elementos de fixação das pás nas coroas;

v) Falha nas “blade rings”, prejudicando o fluxo de ar para outras etapas do processo de expansão;

vi) Falha nos componentes mecânicos de mancais (radiais ou axiais), envolvendo a ruptura ou deformação permanente dos mesmos;

vii) Falha no sistema de parada e partida da mesma (“turning gear”), ressaltando a criticidade do sistema de acionamento hidráulico do mesmo.

As falhas acima citadas causam danos a outros componentes da turbina a gás, daí a sua ocorrência deve ser evitada, através de inspeções periódicas dos mesmos.

Além das falhas mecânicas acima citadas, as falhas nos diversos sistemas de refrigeração podem implicar em uma parada de máquina. No caso das turbinas a gás o resfriamento do óleo empregado nos mancais é executado através de radiadores com o emprego de fluxo forçado de ar sendo de fundamental importância para a operacionalidade deste sistema o perfeito funcionamento do sistema de acionamento dos ventiladores.

### C. Propostas de Políticas de Manutenção

Tomando-se por base os resultados da análise de modos e efeitos de falha, listados na secção B, apresentam-se sugestões para as práticas de manutenção dos equipamentos críticos da turbina a gás da usina termelétrica de Uruguaiana. A criticidade dos equipamentos foi definida em função das conseqüências das falhas dos mesmos sobre a condição operacional da turbina e da própria usina, em conformidade com o critério de severidade proposto quando da execução da análise de FMEA da usina termelétrica, conforme Souza [2].

Levantaram-se, em conformidade com os conceitos do RCM, as possíveis práticas de manutenção que podem ser aplicadas aos componentes cujos modos de falha geram conseqüências com severidade superior a 6, ou seja, aqueles que degradam demasiadamente o desempenho da turbina ou mesmo causam a parada da mesma e por tanto uma grave degradação na condição operacional da usina termelétrica.

Para cada um dos modos de falha dos componentes ditos crítico empregou-se o método de seleção de práticas de manutenção baseado na filosofia do RCM, [3], empregando-se os seus diagramas de decisão. Os resultados foram compilados em termos de tabelas, onde se classifica a falha como oculta (H), de segurança (S), operacional (E) e não-operacional (O).

A forma de preenchimento destas tabelas está relacionada com as respostas das perguntas constantes do diagrama de decisão do RCM, sendo o mecanismo de resposta a estas questões apresentado na referência supracitada.

Os resultados desta análise são:

TABELA II  
CLASSIFICAÇÃO DE SEVERIDADE EMPREGADA NA ANÁLISE DO TIPO FMEA DE UMA TURBINA A GÁS

<i>Grau de Severidade</i>	<i>Efeito sobre a Operacionalidade do Sistema de Geração de Energia</i>
1 (Sem Efeito)	- Falha de componentes que exigem reparo ou substituição, mas não imediata; - Não afeta o desempenho da máquina ou sistema ou sem efeito sobre o meio ambiente.
2 (Efeito Ligeiro)	- Falha de componentes que exigem reparo ou substituição, mas não imediata; - Desempenho da máquina ou sistema muito pouco degradado, sem efeito sobre o meio ambiente.
3 (Efeito Menor)	- Falha de componentes que exigem reparo ou substituição, mas não imediata; - Desempenho da máquina pouco degradada, sem efeito detrimental sobre o meio ambiente..
4 (Efeito Moderado)	- Falha de componentes, com necessidade de reparo ou substituição. - Desempenho do sistema de geração de energia pouco degradado, mas ainda permite operação, porém com potência gerada reduzida; - Perda de desempenho nos sistemas de controle das condições de operação, com pequenas dificuldades de manutenção das mesmas. - Possibilidade de efeito pouco detrimental sobre o meio ambiente.
5 (Efeito Significante)	- Falha de componentes, com necessidade de reparo ou substituição. - Desempenho do sistema de geração afetado, mas ainda permite operação, porém com potência gerada reduzida; - Perda de desempenho nos sistemas de controle das condições de operação, com dificuldade de manutenção das mesmas. - Possibilidade de algum efeito detrimental sobre o meio ambiente.
6 (Efeito Maior)	- Falha de componentes, com necessidade de reparo ou substituição. - Desempenho do sistema de geração afetado severamente, mas ainda permite operação, porém com potência gerada bastante reduzida; - Severa perda de desempenho nos sistemas de controle das condições de operação. - Possibilidade de efeito detrimental sobre o meio ambiente, chance de exceder alguma regulamentação ambiental.
7 (Efeito Extremo)	- Falha de componente, sem danos a outros componentes. Necessidade de substituição e/ou reparo do componente, com tempo de parada reduzido; - Falha que não afeta segurança do sistema de geração e dos operadores;

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falha causa parada de máquina, com não cumprimento de regulamentação governamental.</li> <li>- Efeito ambiental grave, possibilidade de multa.</li> </ul>
8 (Efeito Sério)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falha de componente que causa danos moderados ao sistema de geração de energia, sem danos a outros componentes. Necessidade de substituição e/ou reparo do componente;</li> <li>- Falha que não afeta segurança do sistema de geração e dos operadores;</li> <li>- Falha causa parada de máquina, com não cumprimento de regulamentação governamental.</li> <li>- Efeito ambiental muito grave, possibilidade de multa.</li> </ul>
9 (Efeito Perigoso)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falha de componente que causa danos severos ao sistema de geração, incluindo danos a outros componentes. Necessidade de substituição e/ou reparo de vários componentes;</li> <li>- Falha que afeta a segurança do sistema de geração e dos operadores;</li> <li>- Falha causa parada de máquina, com não cumprimento de regulamentação governamental.</li> <li>- Efeito ambiental perigoso, vazamento de substâncias perigosas, aplicação de multa.</li> </ul>

i) Dentre os sistemas instalados na usina em referência as turbinas a gás apresentam o sistema de monitoração mais complexo, permitindo que o mesmo seja empregado na monitoração de parâmetros que indiquem a condição operacional de componentes ou subsistemas da turbina. Uma vez definidos os valores limites destes parâmetros, aceitáveis para a condição de operação normal deste equipamento, a avaliação da evolução temporal dos mesmos pode ser utilizada para verificação da deterioração de algum componente da turbina, servindo de indicação para previsão de operações de manutenção da turbina, ou seja, servirá de base para aplicação da prática de manutenção preditiva, preferencialmente recomendada pela filosofia do RCM;

ii) Ressalta-se que a monitoração de pressão e temperatura da região das câmaras de combustão está muito bem elaborada, permitindo uma monitoração bastante detalhada da condição operacional deste subsistema da turbina a gás;

iii) Com relação aos subsistemas mancais, estes apresentam monitoração da temperatura do óleo e da pressão de óleo na entrada dos mancais. Embora estas variáveis indiquem a condição operacional do óleo, estas não indicam a ocorrência de falha nas partes metálicas dos mancais. Dessa forma indica-se que, além da monitoração das condições operacionais do óleo dos mancais, deve ser periodicamente executada uma análise de óleo, a fim de verificar a presença de partículas metálicas no mesmo ou a própria deterioração do óleo. A evolução temporal da condição do óleo pode indicar uma deterioração nos mancais da turbina, permitindo a previsão de uma parada para manutenção;

iv) Ainda com relação aos subsistemas mancais, tem-se que apenas o mancal de escora emprega-se a monitoração de vibração, especificamente a vibração axial. Embora a mudança de assinatura do padrão de vibração axial do eixo da turbina seja um indicativo de evolução de falha em algum de seus componentes, esta análise poderia ser complementada com o emprego de sensores de vibração nos mancais radiais. Os quais permitiriam a avaliação dos padrões de vibração radial do eixo, complementando as informações obtidas com a monitoração de vibração axial;

v) Com relação aos sistemas de filtragem empregados na turbina, para filtragem de ar (na entrada da turbina) e para filtragem de óleo (no sistema de circulação de óleo dos mancais), estes tem sua monitoração baseada na análise de pressão diferencial, sendo a variação desta grandeza indicativa da deterioração do elemento de filtro em função da retenção de material particulado. Recomenda-se a análise do material particulado retirado dos filtros (quando da limpeza ou substituição dos mesmos), pois a sua composição pode

indicar a evolução da deterioração de algum componente da turbina;

vi) Verifica-se que não existe um sistema de monitoração que indique a condição operacional das bombas presentes no sistema de circulação de óleo dos mancais. Como a redução da capacidade operacional das mesmas causa uma parada da turbina a gás, recomenda-se a monitoração periódica de perfil de temperatura do motor, com o emprego de inspeção termográfica, bem como a monitoração do padrão de vibração do sistema bomba. Estas inspeções periódicas poderão indicar a deterioração destes componentes, permitindo a programação de ações de manutenção sobre os mesmos.

vii) Adicionalmente recomenda-se a inspeção periódica de componentes do sistema de resfriamento de óleo, com o objetivo de verificar a sua deterioração. Recomenda-se o uso de inspeção termográfica para registrar o perfil de temperatura das bombas ou dos próprios trocadores de calor, indicando pontos onde pode estar ocorrendo uma deposição anormal de detritos. O próprio sistema de transmissão empregados nos ventiladores deve ser periodicamente inspecionado.

viii) A literatura referente à manutenção de turbinas a gás sugere o uso de boroscopia para avaliação da integridade estrutural das palhetas, fixa e móveis, que compõe os diversos estágios do compressor e da turbina. Com esta técnica pode-se identificar a evolução de defeitos, como trincas, perda de revestimento superficial ou mesmo deformação das palhetas, que podem provocar uma falha inesperada da turbina quando em operação normal. Esta inspeção deve ser executada em paradas periódicas da turbina, e a evolução de algum defeito pode ser registrada, permitindo a programação de uma manutenção ou substituição do mesmo.

Deve-se ressaltar que as técnicas de monitoração, que subsidiam decisões associadas com a aplicação da manutenção preditiva, são basicamente aplicadas à componentes mecânicos, para modos de falha cujo tempo de desenvolvimento é claramente definido. Entretanto, o comportamento do parâmetro analisado, selecionado como indicador da evolução de um modo de falha específico, quando a turbina opera em situação de operação normal, sem qualquer perda de desempenho, deve ser claramente definido, baseado em observações executadas com uma máquina específica. Isto significa que para cada turbina deve-se levantar o comportamento “normal” (associado com o desempenho ideal da máquina) dos parâmetros selecionados para monitoração do seu desempenho operacional. Adicionalmente deve-se avaliar a evolução temporal destes parâmetros em função do desenvolvimento de diversos modos de falha, a fim de ca-

racterizar o comportamento do mesmo em função da ocorrência de modos de falha específicos. Somente após este levantamento é que os resultados da monitoração poderão ser empregados como subsídios para tomada de decisão quanto a execução de uma intervenção para manutenção de algum componente crítico da turbina. Para cada parâmetro deve-se definir um nível de alarme, que indica a necessidade de parada imediata da máquina, a fim de evitar maiores danos a seus componentes.

#### D. Análise de Confiabilidade e Disponibilidade

Para cada uma das turbinas a gás, instaladas na usina termelétrica de Uruguaiana, executou-se a análise de confiabilidade e manutenibilidade empregando-se os dados de falha levantados para o período compreendido entre os anos de 2001 e 2004.

Conforme método descrito por Souza [4], a confiabilidade das turbinas pode ser descrita a partir da análise da distribuição dos tempos entre falhas. As duas turbinas têm a sua confiabilidade modelada por uma distribuição de Weibull, cujos parâmetros estão indicados na Tabela III. A distribuição de Weibull é expressa pela relação:

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

onde  $R(t)$  expressa a confiabilidade e  $\beta$  e  $\eta$  são parâmetros da distribuição.

TABELA III

PARÂMETROS DAS DISTRIBUIÇÕES DE CONFIABILIDADE DAS TURBINAS A GÁS USINA TERMELÉTRICA DE URUGUAIANA.

Sistema	Distribuição de Confiabilidade	Parâmetros
Turbina a Gás 1	Weibull 2 parâmetros	$\beta = 0,5778$ $\eta = 1014,5633$
Turbina a Gás 2	Weibull 2 parâmetros	$\beta = 0,4426$ $\eta = 497,2377$

Adicionalmente, a partir dos tempos de reparo observados para as turbinas, executou-se a análise da manutenibilidade das mesmas, sendo esta representada por uma distribuição Lognormal, cujos parâmetros são indicados na Tabela IV. A distribuição Lognormal é expressa pela relação:

$$M(\text{tempo reparo} \geq t^*) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln t^* - \mu}{\sigma}\right) \quad (2)$$

onde  $M(t)$  representa a manutenibilidade,  $\mu$  e  $\sigma$  são os parâmetros da distribuição e  $\Phi$  representa a função de probabilidade da distribuição normal reduzida.

TABELA IV

PARÂMETROS DAS DISTRIBUIÇÕES LOGNORMAL EMPREGADAS NA MODELAGEM DOS TEMPOS DE REPARO DAS TURBINAS A GÁS DA USINA TERMELÉTRICA DE URUGUAIANA.

Sistema	Parâmetros
Turbina a Gás 1	$\mu = 1,5230$ $\sigma = 1,1215$
Turbina a Gás 2	$\mu = 1,8831$ $\sigma = 1,9534$

Sob o ponto de vista de análise de confiabilidade, o parâmetro  $\beta$  da distribuição de Weibull é um indicativo da região da Curva da Taxa de Falha na qual o equipamento está operando. Como ambas as turbinas apresentam  $\beta < 1$ , tem-se que as mesmas estão na região de falhas precoces, ou

seja, há uma redução do número de falhas em função do aumento do tempo de operação. Este comportamento é típico de sistemas complexos quando no início de sua vida operacional, onde se verifica que, em função de ajustes dos sistemas de controle e/ou mesmo aprendizado da equipe de operação, há um maior número de falhas nos sistemas.

Tem-se também que a turbina a gás 1 apresenta  $\beta$  superior ao observado para a turbina a gás 2, indicando que a mesma está mais próxima de deixar a fase de mortalidade infantil e passar a apresentar taxa de falha constante, representada pelo parâmetro  $\beta$  igual a unidade.

Com relação à manutenibilidade, a turbina a gás, 1 que apresenta maior confiabilidade, também apresenta menor tempo médio de reparo, e por tanto possui maior disponibilidade.

Nas Figuras 3 e 4 apresentam-se as curvas de confiabilidade e manutenibilidade associadas à turbina a gás 1.

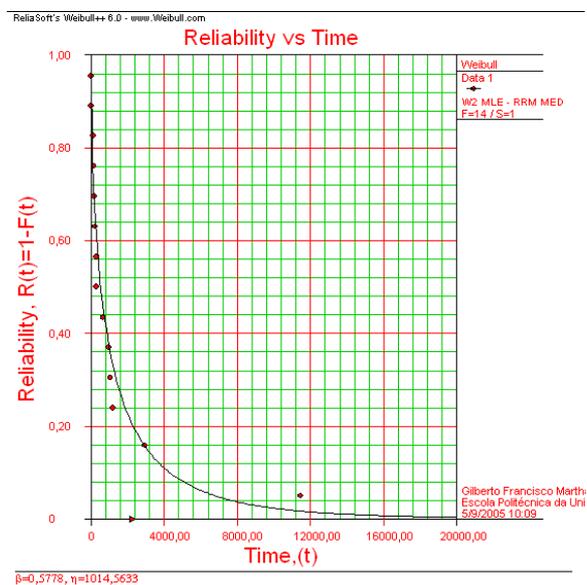


Figura 3. Distribuição de Confiabilidade da Turbina a Gás 1

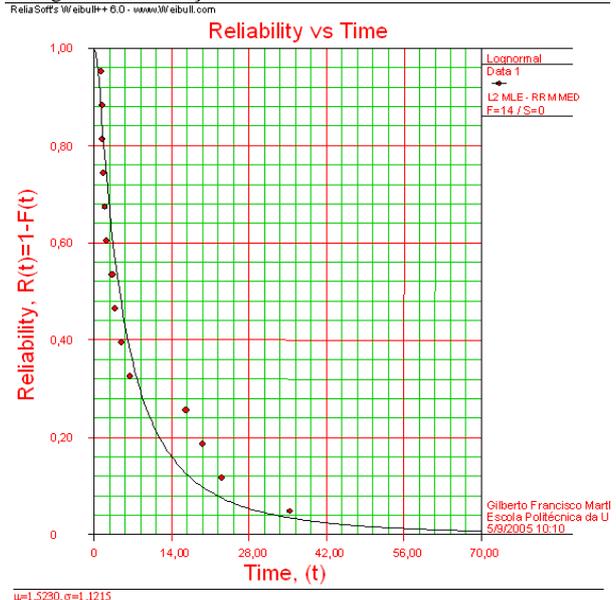


Figura 4. Distribuição de Manutenibilidade da Turbina a Gás 1

Considerando-se as distribuições de confiabilidade e

manutenibilidade para cada uma das turbinas e empregando-se o método de simulação de Monte Carlo define-se a disponibilidade média para cada um destes sistemas, cujos valores são 99,35% e 96%, respectivamente para as turbinas 1 e 2 se considero um período operacional de 8760 horas. A turbina a gás 1 tem maior disponibilidade, pois apresenta maior tempo médio até a falha e menor tempo médio para reparo.

### III. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Inicialmente pode-se concluir que a metodologia de execução da análise de confiabilidade mostrou-se bastante adequada ao propósito da pesquisa, podendo ser aplicada na análise de confiabilidade de qualquer outro sistema presente em usinas termelétricas a ciclo combinado.

Ressalta-se a grande importância da execução de uma análise funcional detalhada da turbina a gás como etapa inicial no desenvolvimento da análise de confiabilidade. Esta análise deve buscar a definição de todos os sistemas que compõe uma turbina a gás e a inter-relação entre os mesmos, descrevendo as suas funções. Da mesma forma, devem-se listar os componentes, e suas respectivas funções, que pertencem a cada um dos sistemas básicos. Com esta análise obtém-se a compreensão da função de cada sistema da turbina a gás e qual a inter-relação entre os seus componentes para garantir que esta função seja realizada em conformidade com um desempenho específico. A execução da análise funcional exige um grande esforço de uma equipe multidisciplinar (incluindo pessoas associadas com a operação e a manutenção das turbinas) visando uma precisa descrição do equipamento em análise.

A análise funcional serve como subsídio para a execução da Análise de Modos e Efeitos de Falha das turbinas, a qual tem como objetivo analisar os efeitos da falha de um componente desta turbina sobre o seu desempenho operacional e sobre o desempenho operacional da própria usina termelétrica a ciclo combinado. Esta análise também deve ser executada por uma equipe, que, preferencialmente, deve ser a mesma que executou a análise funcional. Esta fase da análise é bastante laboriosa, porém os seus resultados permitem a identificação dos componentes críticos da turbina, ou seja, aqueles cuja falha causa uma parada de máquina ou mesmo uma severa redução do desempenho operacional da mesma, prejudicando o desempenho do ciclo combinado. Para a execução desta análise foi proposta uma tabela de avaliação de criticidade que, embora baseada nas tabelas clássicas das normas ISO e SAE "Society of Automotive Engineers", reflete melhor a forma de mensurar a perda de desempenho operacional de uma usina termelétrica a ciclo combinado em função da falha de componentes da turbina a gás. Ao longo da execução desta análise fica claro que, independentemente do tipo de turbina a gás, existem alguns subsistemas críticos para a garantia da operacional das mesmas. Tais como o sistema de circulação e refrigeração de óleo dos mancais radiais e de escora, a fim de garantir que a temperatura de operação de óleo dos mancais (e consequentemente sua viscosidade) seja mantida em valores de projeto, os sistemas de parada e partida e os sistemas de admissão de ar. Estes subsistemas devem ser objeto de constante atenção das equipes de manutenção as quais, através de aplicação de práticas

preventivas ou preditivas, devem reduzir a probabilidade de ocorrência de falhas inesperadas dos mesmos.

As turbinas a gás apresentam um sistema de monitoração bastante complexo, permitindo que o mesmo seja empregado na monitoração de parâmetros que indiquem a condição operacional de componentes ou subsistemas da turbina. Uma vez definidos os valores limites destes parâmetros, aceitáveis para a condição de operação normal, a avaliação da evolução temporal dos mesmos pode ser utilizada para verificação da deterioração de algum componente da turbina. Servindo de indicação para previsão de operações de manutenção da turbina, ou seja, servirá de base para aplicação da prática de manutenção preditiva, preferencialmente recomendada pela filosofia do RCM.

Com relação aos subsistemas de mancais, estes apresentam monitoração da temperatura do óleo e da pressão de óleo na entrada. Embora estas variáveis indiquem a condição operacional do óleo, estas não indicam a ocorrência de falha nas partes metálicas dos mancais. Dessa forma indica-se que, além da monitoração das condições operacionais do óleo dos mancais, deve ser periodicamente executada uma análise de óleo, a fim de verificar a presença de partículas metálicas no mesmo ou a própria deterioração do óleo. A evolução temporal da condição do óleo pode indicar uma deterioração nos mancais da turbina, permitindo a previsão de uma parada para manutenção.

Verifica-se que não existe um sistema de monitoração que indique a condição operacional das bombas presentes no sistema de circulação de óleo dos mancais. Como a redução da capacidade operacional das mesmas causa uma parada da turbina a gás, recomenda-se a monitoração periódica de perfil de temperatura do motor, com o emprego de inspeção termográfica, bem como a monitoração do padrão de vibração do sistema motobomba. Estas inspeções periódicas poderão indicar a deterioração destes componentes, permitindo a programação de ações de manutenção sobre os mesmos.

A determinação da confiabilidade e da disponibilidade de uma turbina a gás deve ser baseada no desenvolvimento de um diagrama de blocos, que expressa o fluxo de informações entre os componentes presentes nos diversos subsistemas da mesma. Para a turbina a gás verifica-se que este é basicamente um sistema em série dado que durante a sua operação normal praticamente todos os seus subsistemas devem operar harmonicamente e processando informações de sua operação ou controle. Para o cálculo da confiabilidade e da disponibilidade da turbina a gás é necessário modelar o tempo entre falhas e o tempo para reparo da mesma. Para tanto se necessita de um banco de dados onde sejam registrados, de forma sistemática e uniforme, os tempos entre falha, os tempos de reparo e as causas da falha associadas a cada intervenção corretiva de um componente da turbina. Outrossim, se possível, deve-se registrar continuamente o regime de operação das turbinas, obtendo-se dados que permita correlacionar a ocorrência de algum modo de falha de componentes com o regime de operação das mesmas.

Para demonstrar a aplicação da metodologia ora proposta, executou-se a análise de confiabilidade e disponibilidade de das turbinas a gás da usina termelétrica de Uruguaiana. Esta análise foi realizada conforme as fases apresentadas no item

II deste artigo, obtendo-se as seguintes conclusões:

i) Verifica-se que as turbinas a gás estão na fase de falhas precoces (ou mortalidade infantil), ou seja, estão apresentando taxa de falha decrescente com o tempo;

ii) Os equipamentos complexos, quando submetidos a uma política de manutenção que tenha por objetivo minimizar a ocorrência de falhas de seus componentes associadas a mecanismos de dano cumulativo (como por exemplo: fadiga, corrosão e desgaste), tendem a apresentar uma taxa de falha constante. Uma vez que a ocorrência de falhas cumulativas é eliminada, as falhas que exigem reparo corretivo são tipicamente associadas à sobrecargas ou uso inadequado, causando a falha de componentes diversos, sem haver uma maior incidência de um mecanismo de falha específico ou mesmo da ocorrência de falhas de um componente específico;

iii) No caso dos sistemas turbinas a gás verifica-se que a sua confiabilidade é representada por uma distribuição de Weibull de dois parâmetros, com fator de forma ( $\beta$ ) menor que a unidade, indicando que estas apresentam taxa de falha decrescente com o tempo. O sistema turbina a gás 2 apresenta  $\beta = 0,45$ , inferior ao valor  $\beta = 0,58$  calculado para o sistema turbina a gás 1;

iv) Para um sistema complexo como uma turbina a gás de alta potência, justifica-se que, no início da sua vida operacional, esta apresente um maior número de falhas associado com a própria mitigação de falhas relacionadas com o ajuste do complexo sistema de controle, com a própria aprendizagem da operação da turbina, bem como a pequenas falhas de ajustes e montagens de alguns componentes. Corrigindo estas falhas, a tendência é que o equipamento passe a apresentar falhas aleatórias;

v) No caso do sistema turbina a gás 1 verifica-se que das nove falhas registradas, sete delas ocorreram no período compreendido entre os meses de dezembro/2000 e janeiro/2002, ou seja, durante os primeiros 13 meses de operação do equipamento, realmente caracterizando falhas iniciais de operação;

vi) Com relação ao sistema turbina a gás 2, embora este apresente um número de falhas sensivelmente maior que o do sistema turbina a gás 1, no caso 25 falhas, verifica-se que durante o primeiro ano de operação este apresentou uma incidência repetitiva de falhas para ajuste da pressão de exaustão e para limpeza nos filtros de combustível. Estas falhas, pela sua grande incidência, devem estar associadas a problemas nos sensores e sistemas de controle da operação da turbina. As falhas ocorridas ao longo dos anos de 2002 e 2003 estão basicamente associadas à falhas de componentes mecânicos. Esta grande ocorrência de falhas prolonga a fase de mortalidade infantil do equipamento;

vii) Para um período operacional de 8760 horas a disponibilidade da turbina a gás 1 é 99,35% e da turbina a gás 2 é 96%. A turbina 1 apresenta maior disponibilidade, pois possui maior tempo médio até a falha e menor tempo médio para reparo;

viii) A execução da avaliação de disponibilidade deve ser executada novamente em função da atualização do histórico de falhas das máquinas, mantendo as estimativas de disponibilidade das mesmas constantemente atualizadas;

ix) Com o aumento da eficácia das tarefas de manutenção, focando a sua atuação em atividades preditivas e preventivas associadas a itens considerados críticos para garantia do desempenho operacional das unidades geradoras, em conformidade com a filosofia da Manutenção Centrada em Confiabilidade, espera-se um aumento da disponibilidade das turbinas a gás, aumentando o desempenho operacional da usina termelétrica de Uruguaiana.

#### IV. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos Eng. Maury Rodriguez da AES Tietê e Alexandre Ferreira Silva da AES Uruguaiana pelas sugestões apresentadas ao longo da execução deste trabalho. Adicionalmente os autores agradecem a empresa ReliaSoft do Brasil pelo auxílio na utilização do programa Weibull++.

#### V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] AES Uruguaiana. "CTG W501F Capacitação de Pessoal de O&M para Sistemas Termelétricos," Siemens Westinghouse Power Corporation: Curso Usinas Termelétricas a Ciclo Combinado, Uruguaiana, RS, Relatório Técnico. 2000.

*Relatórios Técnicos:*

[2] G. F. M. Souza, F. J. Guevara, J. R. S. Moreira, C. C. Bueno, "Análise de Modos e Efeitos de Falhas de Componentes de Sistemas de Geração de Energia Elétrica," Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Relatório Técnico. Maio. 2005.

[3] G. F. M. Souza, F. J. Guevara, "Elaboração do Procedimento de Seleção de Políticas de Manutenção dos Equipamentos selecionados na Fase 4," Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Relatório Técnico. Jun. 2005.

[4] G. F. M. Souza, F. J. Guevara, "Análise de Confiabilidade e Disponibilidade dos Sistemas de Geração de Energia baseados em Usinas Hidrelétricas e Termelétricas," Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Relatório Técnico. Set. 2005.