

# Desenvolvimento de Políticas de Manutenção Centradas em Confiabilidade para Sistemas de Geração de Energia Elétrica Baseados em Hidrogeradores

G. F. M. de Souza, EPUSP, C. E. P. Rodriguez, EPUSP e J. N. Torres, AES Tietê

**Resumo**—Este trabalho apresenta a metodologia de análise de confiabilidade empregada para estimativa da confiabilidade de hidrogeradores, baseada nos conceitos básicos de confiabilidade e de manutenção. Adicionalmente apresenta-se a aplicação desta metodologia para a análise de confiabilidade de uma unidade geradora da usina hidrelétrica de Euclides da Cunha, 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 do hidrogerador instalado na usina de Euclides da Cunha, mas também associadas com a própria aplicação da metodologia ora proposta.

**Palavras-chave**—manutenção, confiabilidade, hidrogeradores, disponibilidade.

## I. INTRODUÇÃO

### A. Considerações Iniciais

Os diversos setores industriais que atuam junto à sociedade moderna tem 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 à 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 um 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, com a sua mantenedibilidade, que mede a rapidez com que o sistema é reparado quando da 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 influenciam o 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 a Análise de Modos e Efeitos de Falhas (do inglês "Failure Modes and Effects Analysis" - FMEA), pode-se definir quais são os modos de falha dos componentes do sistema cuja ocorrência implica em consequências deletérias para o mesmo, mais especificamente a perda de produção. Especificamente no caso de sistemas de geração de energia elétrica, a consequência de maior gravidade para o mesmo, em função da falha se seus componentes, é a não geração de energia.

Uma vez identificado os modos de falha de maior gravidade (ou severidade) para o sistema, pode-se estudar, em função da natureza da falha do componente, qual a prática

---

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)).

C. E. P. Rodriguez é mestre pela Escola Politécnica da USP (e-mail: [carmen.rodriguez@poli.usp.br](mailto:carmen.rodriguez@poli.usp.br)).

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

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 que causem parada total do sistema.

Uma vez identificados os componentes críticos e seus modos de falha, pode-se determinar, em função dos dados históricos dos instantes de falha, quais seriam os períodos mais indicados para a execução de uma intervenção preventiva no componente, a fim de evitar a falha em serviço. Adicionalmente, em função das características dos modos de falha destes componentes, pode-se, inclusive, indicar uma prática de manutenção preventiva ou preditiva.

### *B. Escopo do Artigo*

Considerando a necessidade de obter subsídios técnicos que possibilitem uma melhora nas ações de manutenção de hidrogeradores, tendo como objetivo aumentar a disponibilidade dos mesmos, a AES Tietê desenvolveu junto com a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo um projeto de pesquisa e desenvolvimento intitulado "Desenvolvimento de Políticas de Manutenção Centradas em Confiabilidade para Sistemas de Geração de Energia Elétrica Baseados em Hidrogeradores" que buscou aplicar a técnica da Manutenção Centrada em Confiabilidade (do inglês "Reliability Centered Maintenance" – RCM) para desenvolver uma política de manutenção de um sistema de geração de energia elétrica com o emprego de hidrogeradores, identificando quais são os componentes críticos deste sistema, como função da possibilidade da parada do mesmo em função da ocorrência de falha do componente.

Quando executa-se 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.

Este artigo técnico apresenta a metodologia de análise de confiabilidade empregada para descrição da confiabilidade de hidrogeradores, 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 de uma unidade geradora da usina hidrelétrica de Euclides da Cunha, que foi utilizada como caso exemplo neste estudo.

A análise de confiabilidade e mantabilidade de hidrogeradores é baseada na aplicação dos Conceitos de Manutenção Centrada em Confiabilidade para definir quais os itens críticos de um sistema de geração de energia hidrelétrica sob o ponto de vista de manutenção, tendo como objetivo a necessidade de atingir a disponibilidade operacional prevista

do sistema, 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 hidrelétrica, 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 o hidrogerador, 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 unidade geradora, buscando-se definir quais são os principais componentes dos mesmos, seus modos de falha, associados com condições operacionais específicas, bem como quais são as consequências 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.

Definidas as análises tipo FMEA dos equipamentos, pode-se executar a análise FMEA de todo o hidrogerador, visando a avaliação das consequências da falha de cada equipamento sobre a operação do sistema. Esta análise já permite a avaliação dos equipamentos considerados críticos para a interrupção de geração de energia, quer seja sob o ponto de vista do tempo excessivo para reparo da falha ou devido à elevada frequência da ocorrência de uma dada falha. Estes equipamentos considerados críticos devem ter sua manutenção priorizada.

Para seleção da política de manutenção mais adequada para um determinado equipamento ou sistema presente em um hidrogerador, deve-se formular um processo de decisão que permita definir quais as práticas de manutenção mais adequadas para o mesmo 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 (Reliability Centered Maintenance).

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 dos mesmos, 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, pode-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 da confiabilidade estimada para os diversos equipamentos, considerando o efeito da política de manutenção selecionada, pode-se caracterizar a confiabilidade do hidrogerador, através da construção de um diagrama de blocos, que expresse o fluxo de informações na unidade geradora.

## II. ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DOS HIDROGERADORES INSTALADOS NA USINA HIDRELÉTRICA DE EUCLIDES DA CUNHA

Embora as usinas geradoras de energia elétrica apresentem alguns sistemas básicos, tais como mancais, turbina, gerador e sistemas de controle os mesmos podem apresentar algumas especificidades decorrentes do próprio projeto da unidade geradora.

Visando a execução de um caso exemplo demonstrando a aplicabilidade da metodologia proposta no presente artigo, torna-se necessário a definição de uma usina hidrelétrica que será tomada como base de análise, visando a completa caracterização de seus sistemas, 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 de Euclides da Cunha será utilizada neste estudo.

### A. Árvore Funcional

Inicialmente, na Figura 1, tem-se o diagrama proposto para a usina. Propôs-se que a usina fosse sub-dividida em sistemas, os quais são: barragem, tomada d'água, serviços auxiliares de corrente alternada e corrente contínua, sistema de sincronismo, outros equipamentos auxiliares e unidades geradoras, de 1 a 4.

Na Figura 2 apresenta-se o diagrama funcional de uma unidade geradora. Esta foi dividida em seis subsistemas, os quais são: turbina, gerador, mancal de escora, adução e sucção, sub-estação, sistema de monitoração e alimentação, [1].

Ao longo do trabalho foram desenvolvidas as árvores funcionais de cada um destes subsistemas, sendo que na Figura 3 exemplifica-se a árvore funcional da turbina. De acordo com o diagrama apresentado no Figura 3 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 como

o rotor, o eixo, o mancal guia e o acoplamento rotor/eixo. Adicionalmente, este sistema apresenta componentes que suportam a sua operação, mas não atuam diretamente na função principal, tais como o conjunto de vedação do eixo, os sistema de aeração, os equipamentos de sinalização e proteção, além do próprio sistema físico de instalação da turbina, que é o poço da mesma.

Além dos sistemas acima citados, a unidade geradora 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. Dentre os sistemas de alimentação, destaca-se a importância do sistema de alimentação de corrente contínua, empregado na partida do gerador, e associado à excitatriz. Finalmente, na saída da unidade geradora emprega-se uma sub-estação, 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 do hidrogerador. A partir deste modo de falha apresenta-se a propagação dos efeitos (ou consequências) do mesmo sobre outros subsistemas ou sistemas do hidrogerador. 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. A estruturação da análise foi executada com o auxílio do programa XFMEA desenvolvido pela empresa ReliaSoft.

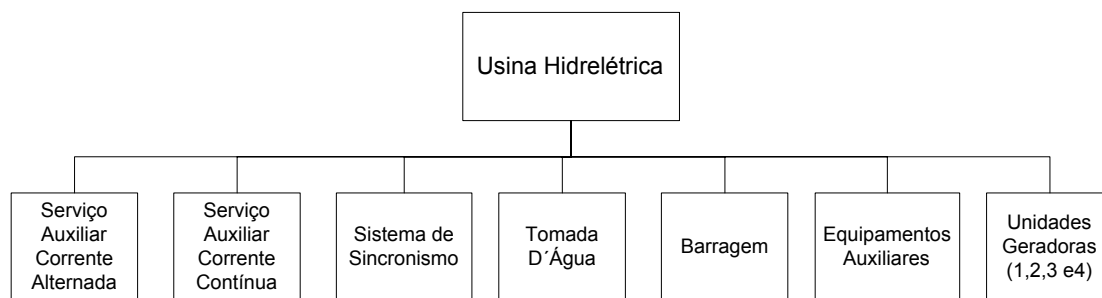


Figura 1. Diagrama funcional da Usina Hidrelétrica de Euclides da Cunha.



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 unidade geradora 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 foram analisadas a frequência da ocorrência dos modos de falha, visando a 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 do hidrogerador, 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 unidade geradora, sob o ponto de vista de manutenção da capacidade de geração de energia elétrica em conformidade com as especificações de projeto da mesma.

A partir da análise de modos e efeitos de falha pode-se concluir que as falhas mecânicas que causam a parada imediata do hidrogerador são:

- i) Falha no eixo da turbina, representada pela ruptura da secção transversal do mesmo ou pela presença de deformação permanente do mesmo, variando a sua retinidade;
- ii) Falha no rotor da turbina, envolvendo a ruptura da pá do rotor;
- iii) Falha no eixo do gerador, representada pela ruptura da secção transversal do mesmo ou pela presença de deformação permanente do mesmo, variando a sua retinidade;
- iv) Falha no bloco guia, bucha ou espelho de mancais, envolvendo a ruptura ou deformação permanente do mesmo.

Além das falhas mecânicas acima citadas, as falhas nos diversos sistemas de refrigeração podem implicar em uma parada de máquina.

Um outro tipo de falha que implica em parada de máquina

é a deterioração da isolação do enrolamento do rotor e do estator, devendo esta ser verificada ao longo do tempo.

Com relação ao sistema de adução e sucção, pode haver problemas na partida da máquina caso haja falha no sistema de acionamento da válvula borboleta ou mesmo nesta válvula, impedindo a abertura da mesma, mantendo bloqueada a entrada da turbina.

### 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 do hidrogerador da usina hidrelétrica de Euclides da Cunha. A criticidade dos equipamentos foi definida em função das consequências das falhas dos mesmos sobre a condição operacional do hidrogerador, em conformidade com o critério de severidade proposto quando da execução da análise de Modos e Efeitos de Falhas (FMEA) do hidrogerador, conforme Souza [2].

Levantou-se, em conformidade com os conceitos da Manutenção Centrada em Confiabilidade, as possíveis práticas de manutenção que podem ser aplicadas aos componentes cujos modos de falha geram consequências com severidade superior a 6, ou seja, aqueles que degradam demasiadamente o desempenho do hidrogerador ou mesmo causam a parada do mesmo.

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

TABELA II  
CLASSIFICAÇÃO DE SEVERIDADE EMPREGADA ANÁLISE DO TIPO FMEA DE UM HIDROGERADOR.

<i>Grau de Severidade</i>	<i>Efeito sobre a Operacionalidade do Hidrogerador</i>
1 (Sem Efeito)	- Falha de componentes que exigem reparo ou substituição, mas não imediata; - Não afeta o desempenho da máquina.
2 (Efeito Ligeiro)	- Falha de componentes que exigem reparo ou substituição, mas não imediata; - Desempenho da máquina muito pouco degradado.

3 (Efeito Menor)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falha de componentes que exigem reparo ou substituição, mas não imediata;</li> <li>- Desempenho da máquina pouco degradado.</li> </ul>
4 (Efeito Moderado)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falha de componentes, com necessidade de reparo ou substituição.</li> <li>- Desempenho da unidade geradora pouco degradado, mas ainda permite operação, porém com potência gerada reduzida;</li> <li>- Perda de desempenho nos sistemas de controle das condições de operação, com pequenas dificuldades de manutenção das mesmas.</li> </ul>
5 (Efeito Significante)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falha de componentes, com necessidade de reparo ou substituição.</li> <li>- Desempenho da unidade geradora afetado, mas ainda permite operação, porém com potência gerada reduzida;</li> <li>- Perda de desempenho nos sistemas de controle das condições de operação, com dificuldade de manutenção das mesmas.</li> </ul>
6 (Efeito Maior)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falha de componentes, com necessidade de reparo ou substituição.</li> <li>- Desempenho da unidade geradora afetado severamente, mas ainda permite operação, porém com potência gerada bastante reduzida;</li> <li>- Severa perda de desempenho nos sistemas de controle das condições de operação.</li> </ul>
7 (Efeito Extremo)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falha de componente, sem danos a outros componentes. Necessidade de substituição e/ou reparo do componente, com tempo de parada reduzido;</li> <li>- Falha que não afeta segurança da unidade geradora e dos operadores;</li> <li>- Falha causa parada de máquina, com não cumprimento de regulamentação governamental.</li> </ul>
8 (Efeito Sério)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falha de componente que causa danos moderados à unidade geradora, sem dano a outros componentes. Necessidade de substituição e/ou reparo do componente;</li> <li>- Falha que não afeta segurança da unidade geradora e dos operadores;</li> <li>- Falha causa parada de máquina, com não cumprimento de regulamentação governamental.</li> </ul>
9 (Efeito Perigoso)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falha de componente que causa danos severos à unidade geradora, incluindo dano a outros componentes. Necessidade de substituição e/ou reparo de vários componentes;</li> <li>- Falha que afeta segurança da unidade geradora e dos operadores;</li> <li>- Falha causa parada de máquina, com não cumprimento de regulamentação governamental.</li> </ul>

A forma de preenchimento destas tabelas está relacionada com as respostas das perguntas constantes do diagrama de decisão da Manutenção Centrada em Confiabilidade, sendo o mecanismo de resposta à estas questões apresentado na referência supra-citada.

Os resultados desta análise são:

i) É de fundamental importância a existência de um sistema de monitoração de temperatura do óleo utilizado como fluido lubrificante nos mancais da turbina e do gerador. O aumento da temperatura do óleo pode ser um indicador de falha no sistema de refrigeração do mesmo ou de falha no mancal, devido à contato entre o eixo e a bucha que compõe este último. Especificamente no caso do sistema de monitoração da temperatura do óleo dos mancais instalado na usina

de Euclides da Cunha, pode-se afirmar que, caso a temperatura do óleo aumente em todos os mancais simultaneamente, tem-se uma clara indicação de falha no sistema de refrigeração do óleo, composto pelo sistema de água bruta e pelo sistema de água pura. Caso a falha esteja associada com algum componente do sistema de água bruta pode-se verificar um aumento de temperatura do ar no interior do gerador, verificada pelos sensores de temperatura de ar quente e ar frio instalados próximos aos radiadores. Caso a falha esteja associada com o sistema de água pura, não será observada variação da temperatura do ar no interior do gerador;

ii) O aumento de temperatura do óleo em um único mancal é fato indicador de falha no sistema de refrigeração (serpentina ou tubulações) que serve especificamente este man-

cal. Caso a falha esteja associada com vazamento de água bruta, haverá um aumento do nível de óleo no sensor de pressão. Se a falha estiver associada com ausência de fluxo de água bruta, haverá indicação de ausência de fluxo fluido pela chave de fluxo. Dessa forma, a medição de temperatura do óleo é um importante parâmetro para determinar o desempenho do hidrogerador e pode indicar a ocorrência de falhas no sistema de refrigeração do hidrogerador;

iii) O aumento da temperatura da bucha dos mancais, indicada pelos sensores de temperatura da bucha, pode indicar aumento da temperatura de óleo (fato que também seria registrado pelo sensor de temperatura do óleo) ou aumento de temperatura da própria bucha dado a um contato indevido entre o eixo e a bucha, em função da vibração do primeiro. Esta indicação de temperatura serve como um possível sistema de monitoração de vibrações do eixo;

iv) A aplicação dos conceitos de análise de óleo pode auxiliar na predição da ocorrência de desgaste em componentes dos mancais, os quais podem estar associados a um possível contato eixo/bucha, causado pela vibração do eixo da turbina ou do gerador;

v) Tendo em vista a importância da central hidráulica para a manutenção do desempenho operacional do hidrogerador, sugere-se que além da existência de uma chave de fluxo para monitorar a presença de água pura no sistema de refrigeração do óleo hidráulico, sugere-se a monitoração da própria temperatura do fluido hidráulico. O aumento desta temperatura pode estar associado a uma falha no sistema de refrigeração ou mesmo a um aumento de pressão na linha, tendo em vista o aumento do esforço necessário para movimentar os elementos do distribuidor. Este monitoração de temperatura poderia, portanto, indicar possíveis anomalias no distribuidor ou mesmo no atuador (cilindro hidráulico). Adicionalmente a análise do fluido hidráulico pode indicar a presença de partículas associadas ao fenômeno de desgaste dos componentes das válvulas e da própria vedação do cilindro hidráulico.

vi) Sugere-se a instalação de sensores de proximidade no entreferro do gerador, para medição do “airgap”, ou mesmo em locais próximos aos mancais. Tais sensores de proximidade permitirão a avaliação da órbita do eixo do rotor do gerador ou mesmo do eixo da turbina, permitindo a avaliação de anomalias nesta órbita o que caracteriza a vibração

deste eixo. Dessa forma pode-se monitorar a evolução de um modo de falha cujo efeito é a vibração do eixo, possibilitando uma ação de manutenção antes de uma degradação mais acentuada do desempenho operacional do hidrogerador.

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 máquina 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 hidrogerador 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 caracterizar 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 do hidrogerador. 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 uma unidade geradora da usina hidrelétrica de Euclides da Cunha, executou-se a análise de disponibilidade empregando-se o diagrama de blocos apresentado na Figura 4. A partir dos dados de falha levantados para o ano de 2002 e 2003, foi possível caracterizar a confiabilidade dos subsistemas indicados na Figura em referência, conforme o

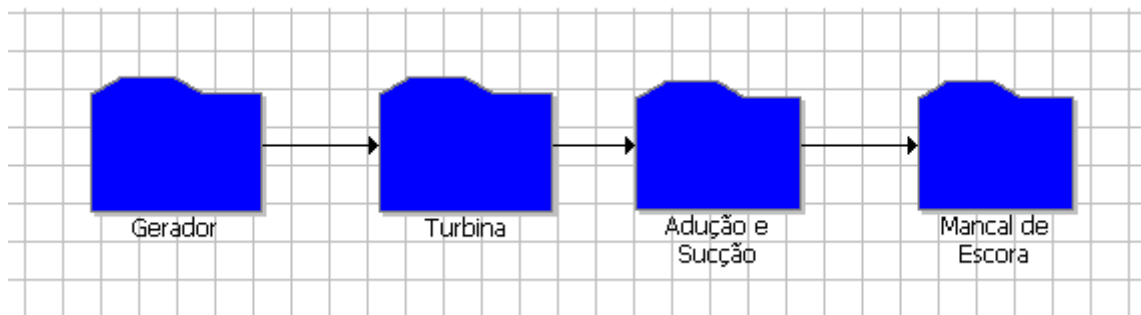


Figura 4. Diagrama de blocos simplificado do hidrogerador.

método descrito por Souza [4]. Os sistemas (turbina, gerador e adução e sucção) têm a confiabilidade modelada por

uma distribuição exponencial, com taxa de falha indicada na Tabela III. Os dados referentes a mantenedibilidade de cada um destes sistemas são apresentados no relatório em refe-

rência.

TABELA III

TAXA DE FALHA ASSOCIADA AOS AOS COMPONENTES DO HIDROGERADOR I

	Equipamento	Numero de falhas	HorasServiço	Tx de falha Geral
UG-01	Gerador	7	13.944,64	0,00050198
UG-01	Turbina Hidraulica	1	13.944,64	0,00007171
UG-01	Adução / Sucção	2	13.944,64	0,00014342

Inicialmente, sob o ponto de vista de confiabilidade, a taxa de falha de uma unidade geradora pode ser representada pela somatória da taxa de falha dos sistemas que a compõe, e a confiabilidade da mesma também é modelada por uma distribuição exponencial. No caso do hidrogerador analisado neste estudo, verificou-se que não foram observadas falhas no sistema mancal de escora, daí considera-se a confiabilidade do mesmo unitária ao longo do tempo, e a taxa de falha do hidrogerador é obtida pela soma das taxas de falha da turbina, do gerador e do sistema de adução e sucção, obtendo-se o valor  $\lambda = 0,00071689$  falhas/hora operacional.

Para a unidade geradora executou-se o cálculo de disponibilidade empregando-se o programa BLOCKSIM, desenvolvido pela empresa ReliaSoft, considerando-se um período operacional de 10 anos, ou seja, 87600 horas.

Obteve-se como resultado a disponibilidade média da unidade geradora no período considerado, bem como o tempo parado para ações corretivas e preventivas, tal como indicado na Tabela IV.

A disponibilidade da unidade geradora analisada é de 85%, sendo que a necessidade de ações de manutenção preventiva é a principal responsável pela redução da disponibilidade da máquina.

TABELA IV

RESULTADOS DA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DA UNIDADE GERADORA I

	<b>UG-01</b>
Disponibilidade Média	85,05%
Disponibilidade Média (sem Preventiva)	99,74%
Número de falhas esperadas	53
Tempo em funcionamento (horas)	74507,95
Tempo parado por Corretiva (horas)	225,71
Tempo parado por Preventiva (horas)	12866,34
Energia Gerada (MW)	2.026.616

A análise de disponibilidade do hidrogerador indica que as práticas de manutenção empregadas pela AES Tietê tem-se mostrado eficazes sob o ponto de vista de maximização da disponibilidade do mesmo. O emprego de políticas de manutenção selecionadas a partir da aplicação da filosofia da manutenção centrada em confiabilidade deverá aumentar

a disponibilidade das máquinas, minimizando as intervenções preventivas e corretivas.

### 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 tipo de sistema de geração de energia elétrica baseado no emprego de hidrogeradores.

Ressalta-se a grande importância da execução de uma análise funcional detalhada do hidrogerador como etapa inicial no desenvolvimento da análise de confiabilidade. Esta análise deve buscar a definição de todos os sistemas que compõe um hidrogerador e a inter-relação entre os mesmos, descrevendo as suas funções. Da mesma forma, deve-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 do gerador 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 dos hidrogeradores), visando uma precisa descrição da unidade geradora sob análise.

A análise funcional serve como subsídio para a execução da Análise de Modos e Efeitos de Falha dos hidrogeradores, a qual tem como objetivo analisar os efeitos da falha de um componente do hidrogerador sobre o seu desempenho operacional. 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 do hidrogerador, ou seja, aqueles cuja falha causa uma parada de máquina ou mesmo uma severa redução do desempenho operacional do hidrogerador. 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 um hidrogerador em função da falha de um componente. Ao longo da execução desta análise fica claro que, independentemente do tipo de hidrogerador analisado, existem alguns subsistemas críticos para a garantia da operacional do mesmos, tais como o sistema de regulação de velocidade, que depende fortemente da operação de uma central hidráulica, o sistema de refrigeração de óleo, a fim de garantir que a temperatura de operação de óleo dos mancais (e conseqüentemente sua viscosidade) seja mantida em valores de projeto, o sistema de excitação do rotor e o enrolamento do estator. 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.

A partir dos resultados da análise de modos e efeitos de falha, definem-se os componentes ou subsistemas críticos



que podem ser submetidos a programas de manutenção preditiva, que é o foco principal da filosofia da Manutenção Centrada em Confiabilidade. Algumas medidas simples já podem ser utilizadas como técnicas de monitoração da condição operacional de componentes críticos de um hidrogenador, tais como monitoração da temperatura do óleo no interior dos mancais e na central hidráulica, monitoração da temperatura dos condutores de cobre nas barras estatóricas, monitoração da temperatura do ar no núcleo do gerador, monitoração da temperatura das buchas de mancais, ou mesmo da presença de contaminates no óleo dos mancais e da central hidráulica. A monitoração destas grandezas já permite a verificação da ocorrência de anomalias na condição operacional do hidrogenador, e com o auxílio das tabelas da análise FMEA pode-se identificar possíveis causas destas anomalias, sendo possível prever a necessidade de execução de tarefas de manutenção antes que o desempenho da unidade geradora caia abaixo de um valor mínimo, exigindo a execução de manutenção corretiva.

Como uma sofisticação do sistema de monitoração da condição operacional de um hidrogenador, podem ser empregados proximetros, que são sensores que tem por objetivo medir o “gap” radial entre partes móveis e fixas do hidrogenador, possibilitando a detecção de anomalias no mesmo a partir da variação temporal do valor deste “gap”. Esta técnica é mais sofisticada que as propostas no parágrafo anterior, exigindo uma maior especialização da equipe técnica responsável pelo registro e interpretação dos sinais emitidos pelos proximetros, bem como os custos associados com o emprego desta técnica são mais elevados.

A determinação da confiabilidade e da disponibilidade de um hidrogenador deve ser baseada no desenvolvimento de um diagrama de blocos, que expressa o fluxo de informações entre os componentes presentes nos diversos subsistemas do hidrogenador. Para o hidrogenador 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 unidade geradora é necessário modelar a confiabilidade e a manutenibilidade dos seus diversos componentes. Para tanto necessita-se de um banco de dados onde sejam registrados, de forma sistemática e uniforme, os tempos entre falha, os tempo de reparo e as causas da falha associadas a cada intervenção corretiva de um componente. Outrossim, se possível, deve-se registrar continuamente o regime de operação dos hidrogenadores, obtendo-se dados que permitam correlacionar a ocorrência de algum modo de falha de componentes com o regime de operação do hidrogenador.

Para demonstrar a aplicação da metodologia ora proposta, executou-se a análise de confiabilidade e disponibilidade de um hidrogenador da usina hidrelétrica de Euclides da Cunha. Esta análise foi realizada conforme as fases apresentadas no item II deste artigo, obtendo-se as seguintes conclusões:

i) O sistema de monitoração da temperatura de operação de alguns componentes destes hidrogenadores foi muito bem projetado, permitindo a avaliação de anormalidades que são

indicativos do desenvolvimento de falha de algum componente, subsidiando a aplicação de técnicas de manutenção preditiva;

ii) A associação dos registros deste sistema de monitoração de temperatura com os efeitos das falhas de componentes para a operação do hidrogenador, apresentados na análise de modos e efeitos de falha, auxiliam no processo de definição da origem de alguma anomalia operacional do hidrogenador;

iii) Recomenda-se a instalação de proximetros nos hidrogenadores visando a monitoração do “gap” entre o rotor e o estator, facilitando a detecção de anomalias na operação da máquina;

iv) A unidade geradora 1 da usina hidrelétrica de Euclides da Cunha apresenta disponibilidade de 85%;

v) A unidade geradora 1 tem a sua disponibilidade bastante afetada pelo número de horas empregadas nas tarefas preventivas, sendo também a unidade que permanece maior tempo em serviço. Por permanecer maior tempo em operação, justifica-se a ocorrência de um número maior de falhas inesperadas, exigindo a execução da manutenção corretiva;

vi) A disponibilidade calculada para o hidrogenador, baseada em registros de falha referentes aos anos de 2002 e 2003, está próxima dos valores apresentados nos relatórios da Associação Brasileira das Grandes Empresas de Geração de Energia Elétrica, [5] e [6], para a disponibilidade de unidades geradoras (hidrelétricas e termelétricas) com faixa de potência entre 10MW e 30MW, os quais foram 89,86% em 2001 e 90,95% em 2003;

vii) 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;

viii) 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 unidades geradoras, aumentando o desempenho operacional da usina hidrelétrica de Euclides da Cunha.

#### IV. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos engs. Ítalo Freitas e Maury Rodriguez da AES Tietê pelas sugestões apresentadas ao longo da execução deste trabalho. Adicionalmente os autores agradecem a empresa ReliaSoft do Brasil pelo auxílio na utilização dos programas XFMEA e BLOCKSIM.

#### V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AES Tietê, “Manual de Operação da Usina de Euclides da Cunha,” AES Tietê, São José do Rio Pardo, SP, Relatório Técnico. 1988.
- [2] G. F. M. Souza, “Relatório 2: Construção da Análise do Tipo FMEA dos Componentes e do Sistema de Geração: Análise das Consequências das Falhas e Seleção dos Equipamentos Críticos,” Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Relatório Técnico. Fev. 2004.
- [3] G. F. M. Souza, “Relatório 3: Elaboração do Procedimento de Seleção de Políticas de Manutenção dos Equipamentos Seleccionados na Fase

- 3,” Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Relatório Técnico. Mai. 2004.
- [4] G. F. M. Souza, “Relatório 5: Análise de Confiabilidade dos Equipamentos citados na Fase 5 e Elaboração da Análise de Confiabilidade do Sistema de Geração,” Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Relatório Técnico. Ago. 2004.
- [5] ABRAGE, “Análise Estatística de Desempenho Unidades Geradoras Hidráulicas e Térmicas, e Equipamentos sob Responsabilidade da Geração,” Grupo Técnico de Manutenção, Associação Brasileira das Grandes Empresas de Geração de Energia Elétrica, Rio de Janeiro, RJ, Relatório Técnico. RT.ABRAGE.GTMN.CDE-GRE.003, 2001.
- [6] ABRAGE, “Análise Estatística de Desempenho Unidades Geradoras Hidráulicas e Térmicas, e Equipamentos sob Responsabilidade da Geração,” Grupo Técnico de Manutenção, Associação Brasileira das Grandes Empresas de Geração de Energia Elétrica, Rio de Janeiro, RJ, Relatório Técnico. RT.ABRAGE.GTMN.CDE-GRE.005, 2003.