



**XXII SNTPEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GMI/10
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO - XII

GRUPO DE ESTUDO DE ASPECTOS TÉCNICOS E GERENCIAIS DE MANUTENÇÃO - GMI

**A EXPERIÊNCIA DE FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A EM ESTUDOS DE CONFIABILIDADE,
DISPONIBILIDADE E MANTENABILIDADE – PROJETO PILOTO COMPENSADOR SÍNCRONO DE TIJUCO
PRETO**

**Alexandre Claro Ramis (*)
ELETROBRAS FURNAS**

**Frederico de Abreu Puglia
ELETROBRAS FURNAS**

**Cristiane Farias Camacho
ELETROBRAS FURNAS**

RESUMO

Neste artigo será mostrado um projeto piloto desenvolvido por FURNAS CENTRAIS ELÉTRICA S.A. e orientado por uma consultoria contratada pela empresa, a RELIASOFT BRASIL. Neste projeto foi avaliado durante cinco semanas a confiabilidade de um o compensador síncrono da subestação de Tijuco Preto. Foram simuladas as condições previstas de operação do equipamento para diversos horizontes de forma a permitir análises de confiabilidade, manutenibilidade e, principalmente, de disponibilidade dos blocos. Esta análise possibilitou identificar quais os maiores causadores de falhas e manutenções no equipamento. A partir dos resultados das simulações foram sugeridas ações para melhorar a disponibilidade do compensador síncrono.

PALAVRAS-CHAVE

Engenharia de Confiabilidade, Disponibilidade, Custo de Manutenção e Compensador Síncrono

1.0 - INTRODUÇÃO

Durante a década de 90 o setor elétrico brasileiro passou por profundas mudanças estruturais. A abertura do mercado começou com as privatizações e a criação de novos órgãos, tais como a ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, e o ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. Recentemente, houve mudanças na legislação de concessões de novos empreendimentos, que agora são leiloados e não concedidos, e foram criadas exigências de padrões de desempenho que, caso descumpridas pelos agentes, acarretam em perdas de receita de grande vulto e, no caso limite, perda das concessões.

Este novo ambiente do setor elétrico instituiu a competitividade, a busca por redução de custos e por excelência, sob pena de estagnação e perda de receita. Com o objetivo de manter-se entre as maiores e melhores empresas do país, FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. tem buscado novas metodologias para aumentar seus índices de desempenho, entre elas a aplicação de técnicas de engenharia da confiabilidade nos equipamentos de seu extenso parque gerador e sistema de transmissão. Este trabalho mostra o atual *status* da aplicação das técnicas de engenharia de confiabilidade em FURNAS e, baseado nos resultados já obtidos, o que se espera no futuro em termos de otimização da manutenção e aumento da receita da empresa.

O sistema de produção e transmissão de energia elétrica de FURNAS é composto por 8 (oito) usinas hidrelétricas de propriedade exclusiva, 2 (duas) em parceria com a iniciativa privada, com uma potência instalada de 8.662 MW, e 2 usinas termelétricas com 962 MW de capacidade, totalizando 9.624 MW. O sistema de transmissão é composto por 54 subestações; 19.420 km de linhas de transmissão; além da capacidade de transformação de 106.986,84 MVA. De toda energia consumida no Brasil, mais de 40% passam pelo Sistema Furnas. A empresa está presente em

(*) Rua Real Grandeza, 219 - Botafogo- Rio de Janeiro, RJ. CEP 22281-900, – Brasil. Tel: (+55 21) 2528-5533 – Fax: (+55 21) 2528-5858– Email: ramis@furnas.com.br.

quatro das cinco regiões do país: Sul, Sudeste, Norte e Centro-Oeste. O alto nível técnico adquirido em mais de meio século tem sido levado para países da América do Sul e Central, África e Ásia.

Por outro lado, em seus 56 anos de idade FURNAS tem em suas instalações uma vasta gama de equipamentos com idade avançada e tecnologias obsoletas operando conjuntamente com equipamentos modernos e de alta tecnologia. Porém, quando falamos do desempenho de um equipamento, sua idade ou o seu grau de avanço tecnológico são menos importantes que parâmetros como confiabilidade, manutenibilidade, disponibilidade e custo de manutenção. Para avaliar estes parâmetros em seus equipamentos FURNAS formou um grupo de estudos e investiu na sua capacitação.

Nesta artigo será mostrado um projeto piloto, orientado por uma consultoria contratada pela empresa, a RELIASOFT Brasil, em que foi avaliado durante cinco semanas a confiabilidade de um o compensador síncrono CS01 20kV +330/-220 MVar da subestação de Tijuco Preto. Para as análises foram utilizados os softwares *Weibull++ 7* e *Blocksim 7* da RELIASOFT. Foram simuladas as condições previstas de operação do equipamento para diversos horizontes (1, 2, 3, 4, 5 e 10 anos) de forma a permitir análises de confiabilidade, manutenibilidade e, principalmente, de disponibilidade dos blocos. Esta análise possibilitou identificar quais os maiores causadores de falhas e manutenções no equipamento.

2.0 - METODOLOGIA

2.1 Organização do Banco de Dados

Os dados dos sistemas de FURNAS foram analisados, filtrados e tratados para formarem um banco de dados de falhas e manutenções de equipamentos e sistemas que forneceu a base para os estudos. Como fontes de dados foram utilizados o SIAO - Sistema de Informações para Apoio à Operação, que fornece dados de intervenções em equipamentos (datas e horas de início e término dos serviços de manutenção) e o SIAM – Sistema de Informações para Administração da Manutenção, que fornece informações de serviços de manutenção executados. Os modos de falhas foram classificados ainda segundo sua natureza em elétricos, mecânicos, pneumáticos, entre outros.

2.2 Modelagem dos Equipamentos

Os equipamentos foram divididos em sistemas, subsistemas e componentes de forma que cada falha ou manutenção pudesse ser atribuída a uma parte distinta do equipamento. A partir desta modelagem foram construídos os diagramas de blocos no software *Blocksim 7* e utilizados os bancos de dados para traçar as curvas de confiabilidade de cada componente com o Software *Weibull++ 7*. Foram definidas ainda as políticas de manutenção preventiva, corretiva e inspeções por bloco, além de outras características dos equipamentos, de forma que a modelagem pudesse refletir o mais fielmente possível o comportamento dos equipamentos.

2.3 Simulações

Foram simuladas com o software *Blocksim 7* as condições previstas de operação dos equipamentos para diversos horizontes (1,2,3,4,5 e 10 anos) de forma a permitir análises de confiabilidade, manutenibilidade e, principalmente, de disponibilidade dos blocos. Esta análise possibilitou identificar quais os maiores causadores de falhas e manutenções em cada equipamento. A partir dos resultados das simulações foram sugeridas ações para aumento da disponibilidade dos equipamentos de forma a evitar perdas de receita devido a baixo desempenho.

2.4 Parcela Variável

A não disponibilidade plena dos ativos de transmissão pertencentes à rede básica do sistema elétrico interligado nacional (equipamentos e linhas de transmissão com tensão maior ou igual que 230 kV), de acordo com as regras da resolução normativa RN 270/2007 da ANEEL, causada principalmente por desligamentos programados (normalmente solicitados para execução de manutenções) ou outros desligamentos (normalmente causados por falhas com atuação da proteção) pode acarretar descontos na receita repassada pela ANEEL referente a cada função de transmissão (transformador, linha de transmissão, controle de reativos, entre outras) relativa ao mês de apuração. O desconto mensal mencionado, quando ocorrer, é definido como Parcela Variável (PV). Cada função de transmissão é composta por um ou mais equipamentos e, quando um destes equipamentos falha ou encontra-se em manutenção, toda a função de transmissão fica indisponível. As horas decorridas até o retorno do mesmo são contabilizadas pelo ONS. Há uma franquia anual para cada equipamento e, quando esta franquia é ultrapassada, ocorrem os descontos na receita. Ocorre que as franquias são estabelecidas pela ANEEL com base em índices de desempenho tão altos até mesmo equipamentos novos, tornando-se difícil para equipamentos com 15 ou 20 anos em operação alcançar estas metas de disponibilidade, exigindo um grande esforço técnico, logístico

e estratégico da manutenção. Os descontos podem chegar a 25% da receita mensal dos equipamentos e são cumulativos, de forma que um único evento pode acarretar descontos mensais por um período de vários anos. Neste contexto, a engenharia de confiabilidade aparece como ferramenta fundamental para minimizar desligamentos dos equipamentos, seja por falhas ou por manutenções, permitindo estabelecer ações que possibilitem alcançar os rígidos padrões de desempenho impostos pela legislação e evitando perdas consideráveis de receita, além de propiciar continuidade e qualidade do suprimento de energia para os consumidores.

3.0 - ANÁLISE DO COMPENSADOR SÍNCRONO

Um compensador síncrono funciona como um gerador elétrico sem máquina motriz. Opera sincronizado ao sistema sem fornecer potência ativa. Sua utilidade para o sistema elétrico é gerar ou absorver potência reativa, conforme a necessidade do sistema, fazendo um controle preciso da tensão e fornecendo respostas rápidas em perturbações onde há oscilações de tensão.

Para fins de estudo, o compensador síncrono SE Tijuco Preto foi subdividido em subsistemas da seguinte forma:

- COMPENSADOR SÍNCRONO (Principal): Rotor; Estator; Compartimento de Escovas; Mancais Dianteiro e Traseiro; Exaustor; Disjuntor Principal 20 kV; Secionador 20 kV; Cubículo de Neutro; Cubículo de Surto e PCS: Sensores de Velocidade, Vibração e Temperatura.
- SISTEMA DE PARTIDA E SINCRONISMO (Partida): Reator de Alisamento; Transformadores de Partida; Transformador Inversor; Disjuntor CC; Disjuntor CA; Secionador de Acionamento Pneumático; Secionador de Acionamento Elétrico; Painéis de Partida (Controle, Proteção e Supervisão).
- SISTEMA DE EXCITAÇÃO (Excitação): Transformador de Excitação; Relé 63GS (Buchholz); Relé de Temperatura de Enrolamento (49); Relé de Temperatura de Óleo (26); Relé de Nível de Óleo; Disjuntor de Campo; Ponte de Tiristores (positiva e negativa); Exaustores da Ponte de Tiristores; Exaustores da Sala de Excitação; Painéis do Sistema de Excitação; AVR-Regulador Automático de Tensão Principal e Reserva; FCR-Regulador de Corrente de Campo Durante a Partida; CPU-Unidade de Controle de Pulso; Unidade de Bloqueio; Fonte de Alimentação CA/CC do Controle e Proteção; Fluxômetros de Ar; LSVTU-Unidade de Disparo por Baixa Tensão de Alimentação; Relé 64R-Falha a Terra no Rotor; Relé GEX104-Falha a Terra no Estator; Proteção de Sobreensão no Rotor; Proteção de Sobrecorrente no Rotor. Proteção de Corrente Assimétrica nas Pontes de Tiristores; Proteção de Sobretemperatura no Rotor; Controle VA≠VB: Tensão do CS01 Diferente da Tensão do Sistema; Unidade de Sinal (Anunciador); Transdutores.
- SISTEMA DE PARADA (Parada): Programada com Frenagem Elétrica; Com Desligamento pela Proteção com Frenagem Elétrica; Com Desligamento pela Proteção com Bloqueio da Frenagem Elétrica; Parada de Emergência, Via Botoeira Vermelha.
- SISTEMA DE AR COMPRIMIDO (Ar Comprimido): Central de Ar Comprimido de 10 Bar e Central de Ar Comprimido de 300 Bar.
- SISTEMA DE RESFRIAMENTO (Resfriamento): Água e Sistema de gás (CO₂ e H₂);
- SISTEMA DE LUBRIFICAÇÃO (Lubrificação): Bomba Principal de Circulação de Óleo; Bomba Reserva de Circulação de Óleo; Bomba de Alta Pressão de Óleo; Bomba de Emergência CC; Filtros de Óleo e Trocador de Calor do Óleo.
- SISTEMA AUXILIAR (Auxiliares): Serviço Auxiliar de 480 V(CA) e Serviço Auxiliar de 125 V(CC).
- SISTEMA DE SUPERVISÃO, PROTEÇÃO, CONTROLE, MEDIÇÃO E MONITORAMENTO (Supervisão e Controle): Supervisão; Proteção; Circuito de Partida e Frenagem; Medição e Monitoramento.

As falhas e manutenções ocorridas foram associadas a estes subsistemas e, quando a análise de suas causas permitiu, aos equipamentos e componentes destes subsistemas.

Após o tratamento dos dados, modelagem e simulações, a disponibilidade média simulada para este equipamento em um ano foi de 93,9%.



FIGURA 1 – Simulação da Manutenibilidade/Disponibilidade

Este resultado mostra que o modelo construído representa de forma bastante satisfatória o comportamento real do compensador síncrono, pois no relatório de análise de desempenho do ONS – RAD, no ano de 2007, o desempenho médio dos 10 compensadores síncronos de Furnas foi de cerca de 94%, conforme a Figura 2. Destes 10 equipamentos, 7 são idênticos ao de Tijuco Preto.

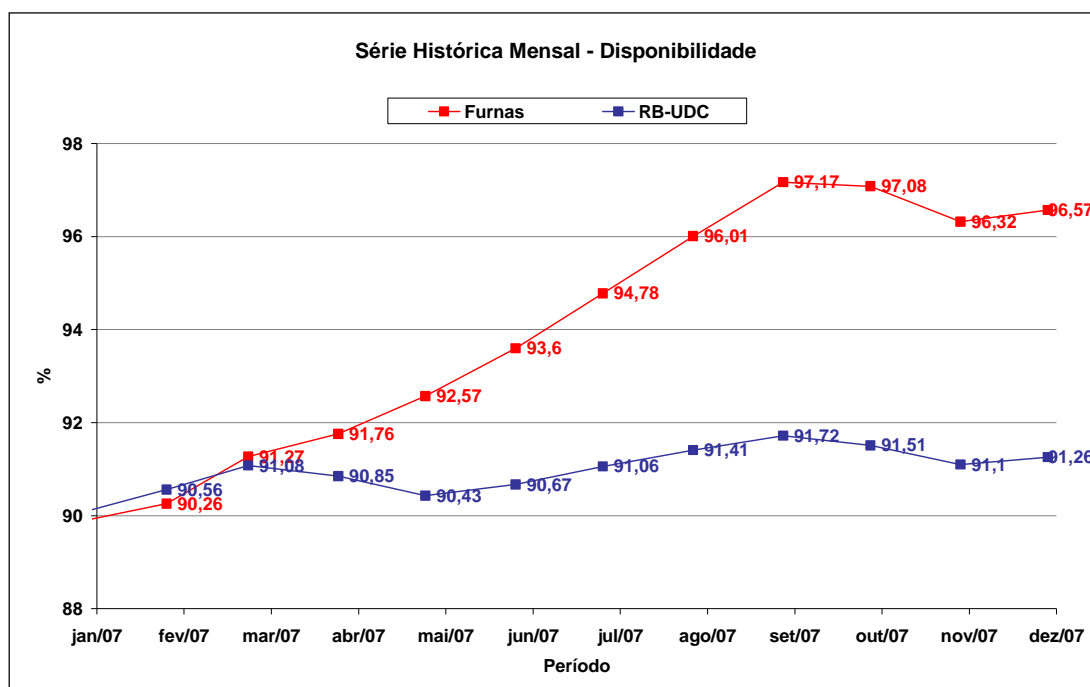


FIGURA 2 – Desempenho dos compensadores síncronos de Furnas no ano de 2007

Com relação à confiabilidade, as simulações mostraram que o compensador síncrono de Tijuco Preto também está dentro dos padrões do sistema, apresentando um número de falhas considerado normal para este tipo de

equipamento (5 falhas por ano). Estas falhas são de naturezas diversas, sendo que algumas são corrigidas de forma rápida e outras perduram por algum tempo.

De uma forma geral, a manutenibilidade do compensador síncrono é boa, o que resulta, como foi visto, em uma disponibilidade média dentro dos padrões de desempenho do sistema. Porém, no ambiente atual, para evitar descontos de PV, esta disponibilidade deve ser melhorada com o objetivo de não haver perdas consideráveis de receita.

A franquia para desligamentos não programados (falhas) estabelecida pela ANEEL é de 17 horas por ano, enquanto a franquia para desligamentos programados (manutenções) é de 666 horas por 2 anos. Em outras palavras, para não haver descontos de PV, a disponibilidade do síncrono considerando apenas eventos gerados por falhas deve ser de 99,8% e considerando apenas eventos programados, de 96,2%. Devido à franquia para desligamentos não programados ser muito pequena, conclui-se que, para melhorar a disponibilidade, deve-se concentrar esforços em diminuir as manutenções não programadas: Detecção e prevenção de falhas e, quando as mesmas não puderem ser evitadas, rápido restabelecimento do sistema.

Nas tarefas programadas sob condição, ou seja, manutenção preditiva, está embutido o conceito de que a maioria das falhas fornece algum tipo de aviso. Costuma-se chamar de avisos de falhas potenciais, as quais normalmente antecedem uma falha funcional. Como o desenvolvimento da falha pode ocorrer no período que varia desde microssegundos até anos, a frequência de acompanhamentos deve ser compatível, de modo a não haver desperdício de recursos. As tarefas de manutenção sob condição devem estar baseadas no desenvolvimento do período da falha, também conhecido como *lead time failure* ou intervalo P-F, conforme mostra a Figura 3 a seguir.

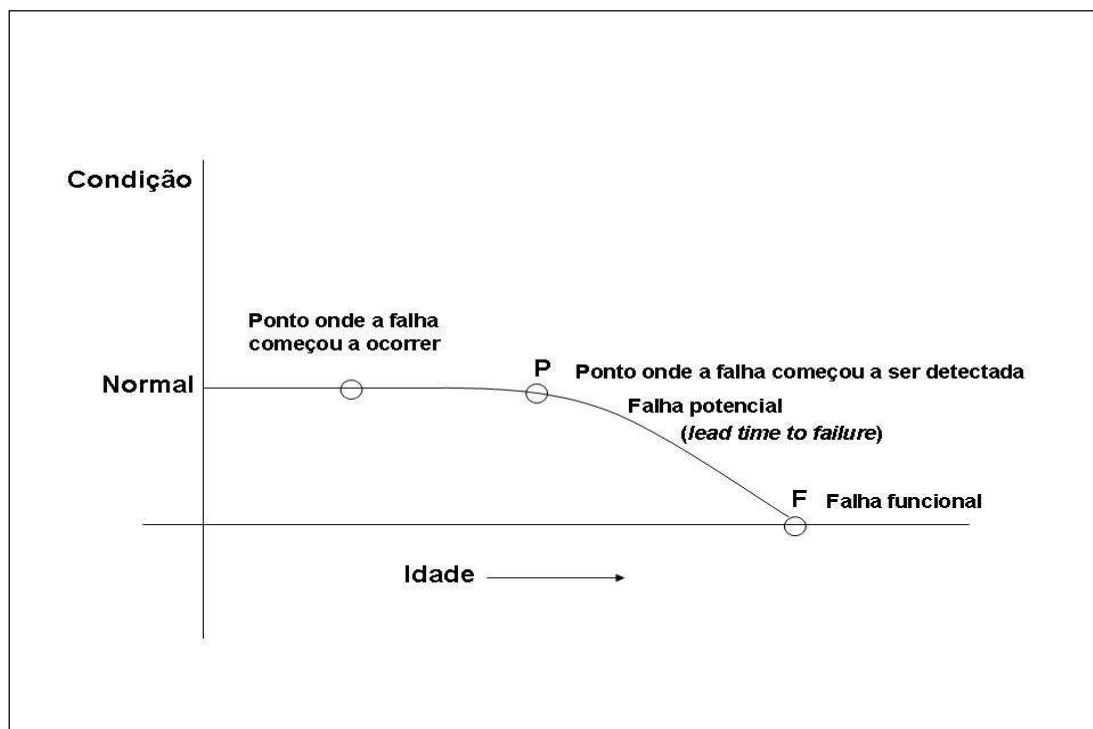


FIGURA 3 – Curva P-F (Pinto e Nascif, 2001 [4])

Desta forma, a manutenção baseada na condição depende da capacidade de detectar as falhas antes que elas aconteçam, para que uma manutenção preventiva possa ser iniciada.

Para as simulações foi escolhido um horizonte de 10 anos, pois esta é a periodicidade mais longa de manutenção preventiva dos subsistemas. A disponibilidade média simulada para este equipamento no período de 10 anos foi de 89,4%. Observa-se no gráfico abaixo o comportamento da disponibilidade do equipamento pelo período analisado.

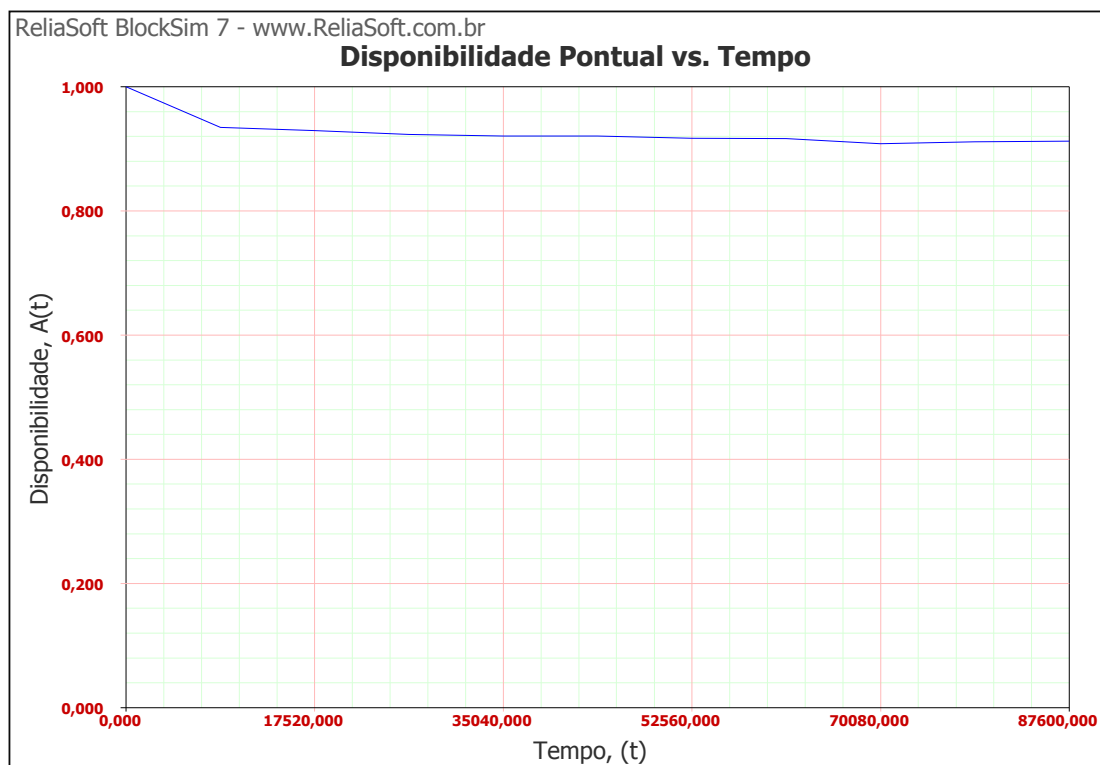


FIGURA 4 – Disponibilidade Pontual x Tempo

Quando se analisa a simulação do desempenho do compensador síncrono por subsistemas, conclui-se que, o subsistema principal (Síncrono) influi decisivamente para a disponibilidade da máquina como um todo, pois foi o subsistema que ficou mais tempo indisponível, conforme mostra a Figura 5, além do fato de ser um subsistema onde não há redundância, pois a máquina não pode ter dois rotores ou dois estatores, por exemplo.

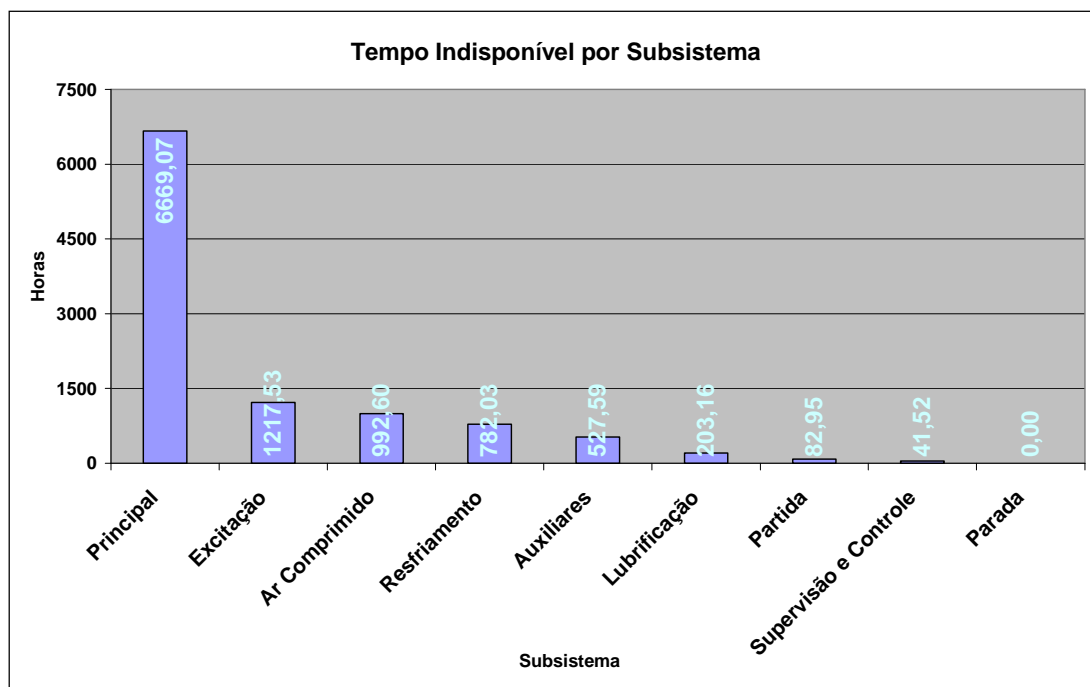


FIGURA 5 – Tempo Indisponível por Subsistema

Sendo assim, após os estudos realizados, foram sugeridas algumas ações para melhorar a disponibilidade do compensador síncrono, objetivando estar de acordo com os padrões de desempenho estabelecidos pela Agência Regulador de Energia Elétrica. Lista-se abaixo as principais ações e seu status de implementação:

- Revisão geral do disjuntor principal e da chave seccionadora: Contratada com início previsto para o segundo semestre de 2013;
- Aquisição de bobinas polares reservas para o rotor: Concluída;
- Modernização do sistema de excitação: Concluída;
- Aquisição de sistema de monitoramento de temperaturas e vibrações: Em processo de licitação.

Após estas medidas serem totalmente implementadas espera-se que a disponibilidade da máquina atinja o padrão de desempenho estabelecido pela ANEEL e não haja novos descontos de receita em função da Parcela Variável. A redução destes descontos irá compensar os investimentos.

4.0 - CONCLUSÃO

A partir dos resultados das simulações foram sugeridas ações para melhorar a disponibilidade do compensador síncrono da subestação de Tijuco Preto. As ações sugeridas foram a modernização dos sistemas de Excitação e Auxiliares, devido ao alto número de falhas e muitos componentes (principalmente eletrônicos) estarem obsoletos e com dificuldade de aquisição de sobressalentes e a revisão geral do disjuntor principal (20 kV) e da chave seccionadora, responsáveis por um percentual significativo das indisponibilidades. Com estas medidas espera-se elevar a disponibilidade da máquina em cerca de 2,5 %, de forma que esta esteja acima dos 96,2% que é o padrão de desempenho estabelecido pela ANEEL.

Apesar da aplicação da engenharia da confiabilidade em FURNAS estar em uma fase inicial, os trabalhos conduzidos durante o projeto piloto apontaram para bons resultados, especialmente na área de transmissão de energia elétrica, com altos ganhos de disponibilidade do equipamento, o que, no atual modelo do setor elétrico, significa evitar perda de receita e aumentar a competitividade da empresa.

O presente estudo pretende colaborar com a discussão sobre quais sistemas devem ser contemplados no escopo de uma futura modernização dos equipamentos da subestação, no entanto, há uma série de outros aspectos a serem abordados na definição deste escopo.

A pretensão deste artigo foi mostrar como as ferramentas de engenharia de confiabilidade podem contribuir, sendo uma fonte de informação para a tomada de decisão. Entretanto, vale lembrar que este debate envolve outras variáveis, que devem ser consideradas, a fim de reduzir a subjetividade na tomada de decisão sobre o escopo da modernização, indicando onde é necessário intervir para que a disponibilidade se mantenha acima dos valores de referência e não haja perda de energia assegurada.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) ANEEL - Resolução normativa nº 270 de 26 de junho de 2007.

(2) FURNAS S. A. - Estudos de Confiabilidade, Disponibilidade e Manutenibilidade das Unidades Geradoras da Usina de FUNIL, Relatório Técnico, 2011.

(3) FURNAS – Sistema FURNAS de Geração e Transmissão/Parque Gerador/Usina Hidrelétrica de Funil. Disponível em: www.furnas.com.br. Acesso em: 07/03/2013.

(4) PINTO, A. K., NASCIF, J. – Manutenção: Função Estratégica. Rio de Janeiro: Qualitymark Ed., 2001

(5) RAMIS, A. C. – Estudos de Confiabilidade, Disponibilidade e Manutenibilidade em Equipamentos de Grande Porte do Sistema Elétrico Nacional - A Experiência de Furnas Centrais Elétricas S.A. Simpósio Internacional de Confiabilidade. Curitiba, 2009.

(6) RAMIS, A. C., PUGLIA, F. A., CAMACHO, C. F. – Considerações sobre Modernizações de Usinas Hidráulicas – Estudo de Caso: Usina de Funil. XI Simpósio Internacional de Confiabilidade. Florianópolis, 2013.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Alexandre Claro Ramis

Nascido no Rio de Janeiro, RJ em 08 de julho 1974.

Graduação em Engenharia Elétrica pela UFF (1998);

Especialização em Engenharia de Manutenção pela UFRJ (2009);

Especialização em Gestão Empresarial pela Universidade Cândido Mendes (2012);

Empresa: Furnas Centrais Elétricas S. A., desde 2005.

Cargo: Gerente de Métodos e Programação de Manutenção

Empresas Anteriores: ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico e Eletronuclear.