



**GRUPO I
GRUPO DE ESTUDOS DE PRODUÇÃO HIDRÁULICA**

MANUTENABILIDADE E CONFIABILIDADE DE GERADOR – UM PROJETO FEITO À QUATRO MÃOS

Pedro Massanori Sakuma *

Edson Marconi

COPEL GERAÇÃO S.A.

ALSTOM POWER DO BRASIL

RESUMO

O trabalho apresenta, em dez tópicos, algumas melhorias e facilidades introduzidas durante a elaboração do projeto dos hidrogeradores de grande porte instalados em uma das plantas da Copel e que, após cinco anos de operação, já podem ser avaliados sob o ponto de vista da manutenibilidade e confiabilidade, sendo considerados hoje, os de melhor desempenho.

Serão apresentados, também, dados comprovando que, contemplar facilidades de manutenção, tem custo-benefício vantajoso, pois tal investimento se paga facilmente pelo aumento do índice de disponibilidade, pela redução da taxa de falha, pela minimização dos riscos de acidentes para os executantes de manutenções preventivas e corretivas, além de facilidades para ensaios especiais e de comissionamento.

O grupo gerador em questão faz parte do fornecimento de 4 unidades de 345 MVA; F.P. 0,9; 16 kV de tensão terminal; 80 pólos e 14,5 m de diâmetro interno.

PALAVRAS-CHAVE

Gerador, Manutenibilidade, Confiabilidade, Segurança, Transformadores de Corrente, Freio de dupla ação

1.0 - INTRODUÇÃO

Durante a fase de projeto dos geradores em questão, instalados na Usina Hidrelétrica de Salto Caxias de Propriedade da Copel Geração S.A. e fornecido pela Alstom Power do Brasil (à época consórcio ABB-COEMSA-Bardella), foram introduzidas ou já estavam contempladas no projeto, entre outras, as seguintes melhorias, em comum acordo com o fornecedor do equipamento e que serão mostradas durante a apresentação do trabalho:

- Projeto de sistema de freio cujos macacos possuem, para o seu acionamento, ação pneumática tanto na aplicação como no retorno do freio (freio de dupla ação), eliminando os problemas de emperramento dos sistemas convencionais de retorno por molas. A função de macaco para levantamento da máquina continua igual aos convencionais. Como melhoria, estamos ainda implementando um sistema de exaustão e filtragem do pó de freio para minimização da necessidade de limpeza dos geradores.
- Cuidado no projeto de instalação dos Transformadores de Corrente no gerador, que culminou na necessidade de um projeto especial para estes TC's com a utilização da técnica dos enrolamentos de compensação, para minimização dos erros, principalmente para os serviços de medição. Este item é de fundamental importância tendo em vista que a medição com erros no valor da corrente medida irá mascarar os valores das potências ativa e reativa geradas e em consequência o próprio faturamento da empresa (podendo causar prejuízos de grande relevância).
- Amplo compartimento para os anéis coletores, escovas e porta escovas. Este compartimento ainda aloja a válvula de aeração da turbina e o acesso superior à tampa do mancal de guia do gerador.

*COPEL-Rua José Izidoro Biazzetto, 158 - Bloco A sala 234- CEP 81200-240 - Curitiba - PR - BRASIL

Tel.: (0xx41) 331-3637 - Fax: (0xx41) 331-3666 - e-mail: pedro.sakuma@copel.com

ALSTOM – Avenida Charkes Schneider S/N. CEP –12040-001 –Taubaté –SP-BRASIL

Tel.(0xx12)3608 3590 – Fax .(0xx12 3608 3472 – e.mail : edson.marconi@power.alstom.com

- Alteração no desenho da cruzeta superior e guias de ar com a instalação de quatro portas de acesso para permitir inspeção rápida dos pólos, entreferro e cabeças de bobinas estatóricas da parte superior.
- Instalação de quatro portas de acesso para a inspeção rápida dos pólos, entreferro e cabeças de bobinas na parte inferior.
- Implantação de um sistema, pioneiro em geradores, de combate ao incêndio por CO₂ à baixa pressão, de alta confiabilidade, de fácil manutenção e recarga.
- Implantação de sistemas de resfriamento de mancais, com trocadores de calor, sistemas de bombas e filtros, duplos e externo às cubas de óleo.
- Desenho da entrada de ar de resfriamento do gerador na aranha do rotor facilitando a montagem de tampas de regulagem para a otimização dos ganhos de rendimento da unidade geradora.
- Implantação de um sistema de monitoramento de descargas parciais, entreferro dinâmico e de vibração permitindo uma rápida avaliação operacional da unidade, e um maior conhecimento dinâmico da máquina, tanto por parte do projetista quanto ao cliente.
- Outros pontos relevantes: -Concepção da plataforma superior modular, com grande facilidade de desmontagem para passagem de componentes, como por exemplo, trocadores de calor ar/água; - Posicionamento dos trocadores de calor ar/água de maneira a facilitar a limpeza e fixados ao chão para isolá-los das vibrações do estator, certamente aumentando sua durabilidade e; -Fixação das barras estatóricas na ranhura com papéis condutivos e pasta de silicone envelopando a barra e aperto das barras no interior da ranhura com a utilização de molas onduladas para evitar afrouxamento e vibração.

2.0 - DESCRIÇÃO DOS ITENS DE PROJETO E MELHORIAS ASSOCIADAS

2.1 Especificação de macacos de freio de dupla ação

Um dos problemas comuns, vivenciado em diversos geradores no Brasil, é o do sistemático emperramento das sapatas de freio por problemas de concepção de seu desacionamento por molas. Neste projeto foi proposto e o desafio aceito para que implantássemos um sistema de dupla ação (inédito em hidrogeradores nacionais), ou seja, tanto o acionamento quanto o desacionamento seriam realizados por ar comprimido, eliminando a necessidade das molas. Neste caso, temos uma câmara de acionamento na parte inferior do pistão e uma câmara de desacionamento na parte superior e um circuito pneumático adequado aos requisitos de segurança para que o freio não seja acionado intempetivamente. O macaqueamento hidráulico permanece como nos projetos antigos em que o mesmo utiliza um carrinho móvel específico para fazer esta operação de manutenção em qualquer uma das unidades geradoras. Até o presente não tivemos nenhuma ocorrência de emperramento dos freios destas máquinas.

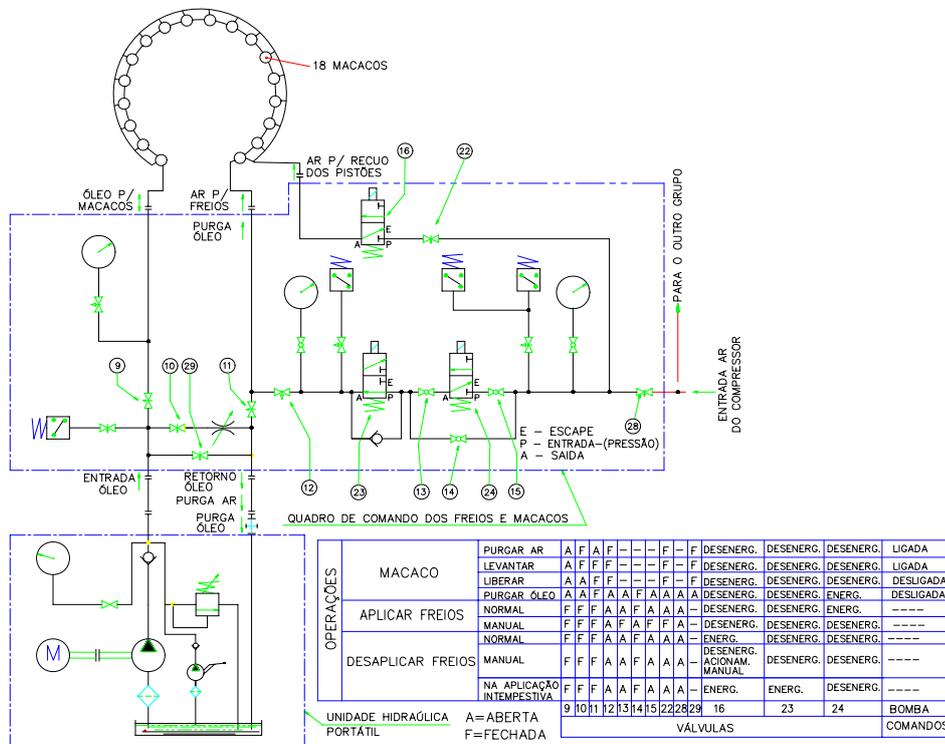


FIGURA 1 – Diagrama Pneumático/Hidráulico do Sistema Freio de Dupla Ação

2.2 Projeto com TC's especiais para medição

A análise das curvas das barras de saída de fase e de neutro do gerador, região onde são instalados os Transformadores de Corrente –TC's - tanto de Medição como para Proteção, indicaram durante o projeto, que poderíamos ter problemas com a alteração de suas precisões, o que foi confirmado através de um estudo mais aprofundado sobre o assunto e posterior ensaio na fábrica e em laboratório.

Este trabalho indicou que, devido à inviabilidade de se instalar tais TC's em outra região da máquina, deveríamos nos utilizar de uma técnica de fabricação e ligação de enrolamentos de tal forma que os fluxos magnéticos dispersos ou transversais ao enrolamento são compensados através de um arranjo de quatro enrolamentos, conectados dois a dois em sentidos contrários, anulando-se assim, o efeito dos fluxos indesejáveis. Erros previstos durante o projeto, de alguns porcentos, foram verificados na práticas tanto em ensaios na fábrica quanto em laboratório. As figuras abaixo mostram o esquema, bem como seu princípio de funcionamento.

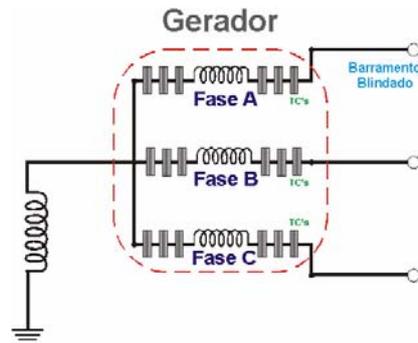


FIGURA 2 - Ligações no Gerador de SCX

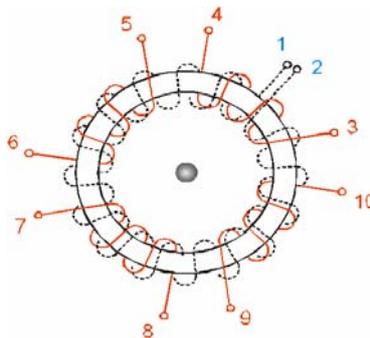


FIGURA 3 – Enrolamentos Superpostos

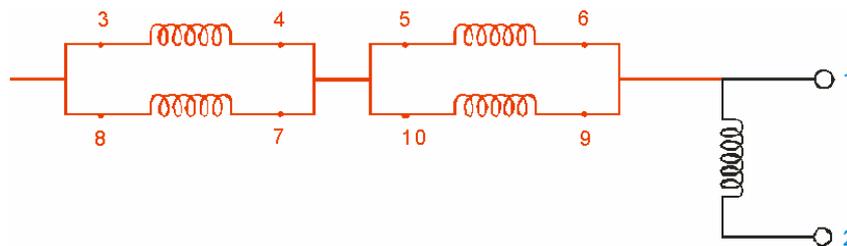


FIGURA 4 - Ligações dos TC's

2.3 Compartimento dos anéis coletores amplos

Pelo projeto, esta parte da máquina deveria comportar todo o sistema de anéis coletores, escovas e porta-escovas além de alojar a válvula de aeração da turbina para a redução da instabilidade durante a operação em regiões críticas da turbina.

É dado pela Copel uma importância muito grande para esta parte do equipamento, pois como sabemos é um ponto em que temos a necessidade de muita intervenção de manutenção, tais como limpeza frequente, inspeção segura da operação quanto à perfeita normalidade de deslizamento da escova sem faíscamento, necessidade de lixamento do anel quando da operação de troca de escova ou má formação de pátina e acesso ao anel para testes no rotor quando da atuação de alarme ou proteção. Com relação à válvula de aeração, estabeleceu-se como

requisito a possibilidade de verificar sua normalidade operacional com a unidade rodando sem nenhum risco para o operador. Além disso, outra necessidade apontada, dizia respeito à tampa superior do mancal de guia do gerador, para que pudesse ser aberta sem dificuldade de acesso para os trabalhos de manutenção. Finalmente, da interação do corpo técnico da Copel com o fabricante, estabeleceu-se que o espaço interno deste recinto, deveria permitir que, todo trabalho mencionado acima, pudesse ser realizado com uma pessoa em pé, com liberdade para dar um giro completo em volta do anel, com a máquina em operação inclusive e sem correr risco de acidente.

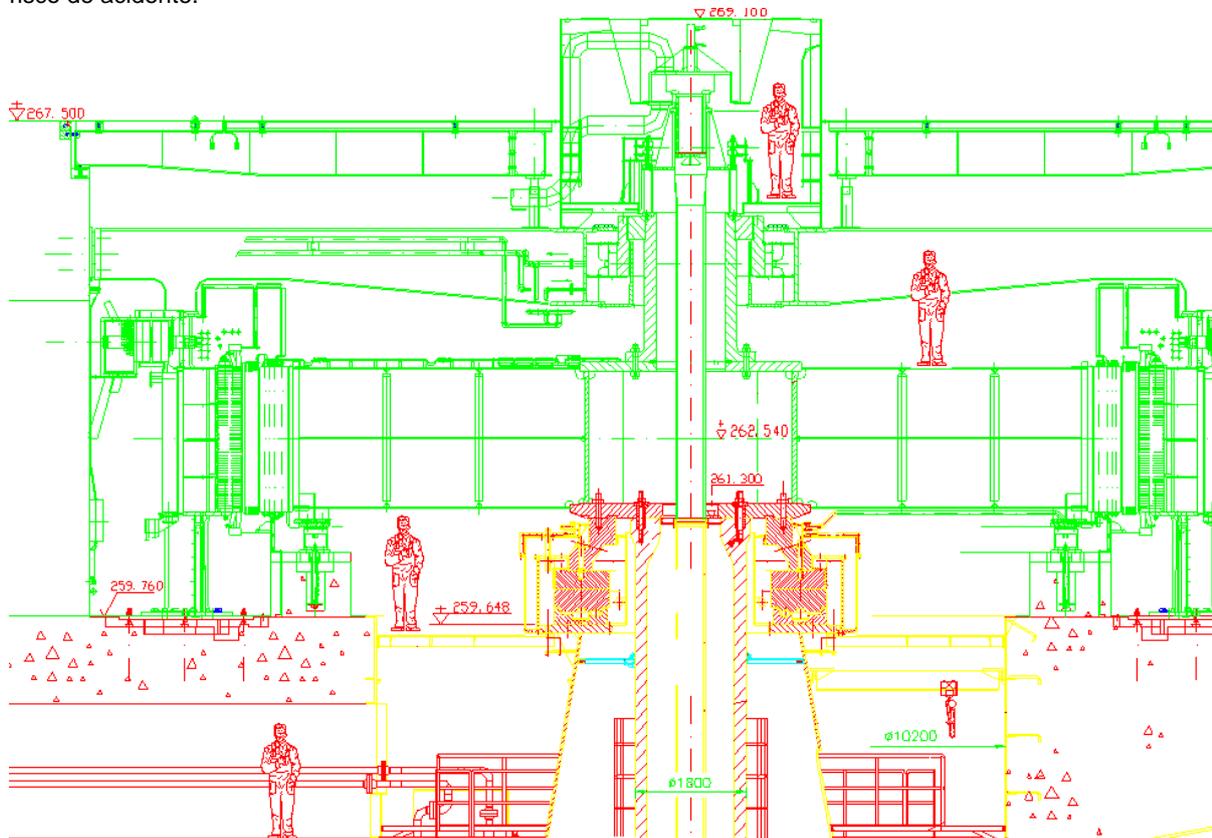


FIGURA 5 - Corte do Gerador Reduzido

2.4 Acesso às partes ativas nas partes superiores

Uma das preocupações com relação à esta parte da máquina, e que foi uma negociação à parte com o fornecedor, se refere aos acessos às cabeças de bobinas do estator, pólos e entreferro. Pelo projeto original, o apoio da cruzeta superior sobre a carcaça não permitia a circulação de um inspetor, por dentro do guia de ar ao redor de todo seu perímetro. Houve a necessidade de alterar a forma desta cruzeta nas pontas, elevando-se o nível de ancoragem dos braços, para aumentar o espaço de circulação; assim, foi necessário reavaliar as rotações críticas antes de liberar um amplo espaço na parte superior do rotor. Para acesso ao interior dos guias de ar, foram projetadas quatro portas à 90 graus, de forma que a inspeção interna poderia ser feita abrindo uma ou mais portas, sem necessidade de levantamento dos guias de ar.

Para a inspeção dos anéis paralelos das barras de saída para as fases e neutro o projeto já previa janelas de acesso ao redor de todos os segmentos da carcaça, na sua parte exterior.

2.5 Acesso às partes ativas nas partes inferiores

Na parte inferior do gerador era importante o rápido acesso às cabeças de bobinas, pólos e entreferro, além dos macacos de freio e cuba do mancal de escora.

Para tal, sob os trocadores de calor do gerador foram instaladas quatro portas de acesso às cabeças de bobinas inferiores e mais quatro portas deste compartimento à região dos freios e mancal. Foi previsto também um acesso à região dos freios pela tampa da turbina, facilitando em muito qualquer necessidade de manutenção.

2.6 Sistema de CO₂ à baixa pressão/baixa temperatura

Devido freqüentes problemas de funcionamento do automatismo dos sistemas à alta pressão instalados nas usinas, sendo seus acionamentos normalmente intempestivos ou acidentes de manobra, e considerando ainda, a

necessidade rigorosa de proteções em tais sistemas, a Copel resolveu investir, de forma também pioneira, em sistema de alto desempenho para a função de sistema anti-incêndio do gerador. Pesquisas de mercado indicaram ser aplicável um sistema de baixa pressão, com os quais se vislumbravam as seguintes vantagens: a - Tanque único para atender todas as unidades geradoras ou até dois sinistros simultâneos, b - Uma vez disparado, se por acidente, as válvulas poderiam ser fechadas, interrompendo a perda de gás, c - A reposição de gás não necessita desmontar os cilindros para enviá-los ao fornecedor, d - Menor risco de acidente na manipulação do sistema, e - Válvulas de menor pressão, por tanto de menor custo, f - Possibilidade de execução de testes reais, sem maiores riscos ou perda de gás.

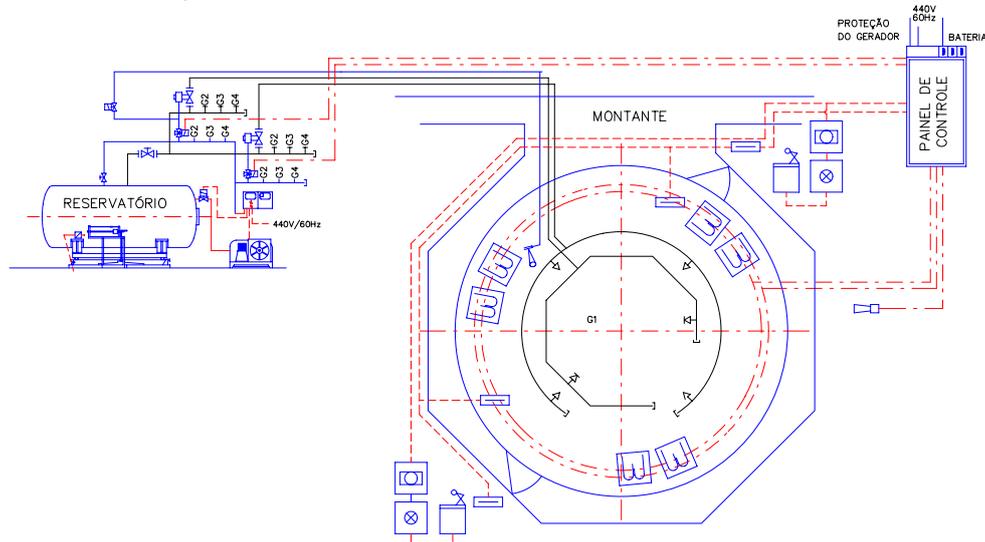


FIGURA 6 – Sistema Anti-Incêndio de CO2

2.7 Resfriamento de mancais fora da cuba

Devido ocorrências de vazamentos significativos em serpentinas de resfriamento de diversos equipamentos, contaminando o óleo lubrificante, a Copel utiliza hoje, em todos os novos projetos (incluindo os de modernização) sistema externo de trocadores de calor. Este sistema possui duas bombas, dois filtros, dois trocadores de calor tipo placas e dois sistemas de instrumentação, de tal sorte que sua manutenção possa ser feita com a unidade em operação sem necessidade de parada e sem riscos. Neste sistema adotado também não tivemos até o momento nenhuma ocorrência relevante que possa não recomendar tal sistema.

2.8 Facilidades para regulagem da vazão de ar de resfriamento do gerador

O projeto do gerador previu entrada de ar de refrigeração das partes ativas (coroa, pólos, núcleo e bobinado estático) num circuito fechado somente pela parte superior da aranha. Como, normalmente o cálculo desta grandeza envolve sobredimensionamento devido às variáveis de cada projeto e riscos do calculista, foi dada uma especial atenção no desenho da entrada de ar no rotor do gerador, para que, em caso de necessidade esta vazão pudesse ser regulada sem maiores problemas. Os ensaios de vazão de ar, aquecimento e rendimento do gerador indicaram a possibilidade de redução desta vazão sem comprometer a temperatura e com um ganho de rendimento da ordem de 200/250 kW (perdas por ventilação) por unidade geradora, simplesmente aplicando novas placas calibradas na boca de entrada de ar do rotor. Sem maiores investimentos, providências como esta podem elevar a potência assegurada da usina em 01 MW, sem maiores investimentos. (Atentar que o 01 MW é para todo o tempo de disponibilidade da máquina, uma vez que a perda evitada é de ventilação, portanto independente da situação de carga da máquina, bastando que a mesma esteja girando). Cabe ainda ressaltar que, viabilizar a abertura de ar, apenas na parte superior da aranha, traz como vantagem a eliminação de possível arraste de pó de lona dos freios, para dentro da máquina, mantendo-a mais limpa.

2.9 Implantação de um sistema de monitoração on line e contínuo

Em Salto Caxias, no âmbito da unidade geradora, foi instalado um sistema de monitoração on line e contínuo contemplando as seguintes grandezas: a - Descargas Parciais no enrolamento do estator, b - Medição de entreferro dinâmico, c - Vibração e oscilação de eixo nos mancais de guia do gerador, mancal de escora e de guia da turbina, nos sentidos radiais e axiais, d - Medição de vazão e cálculo de rendimento da turbina e e - Grandezas dinâmicas da turbina, tais como pressão do caracol, da sucção e medição de cavitação.

Especificamente no gerador, a medição de entreferro dinâmico se mostrou muito útil na fase de comissionamento, pois pudemos detectar uma ovalização de rotor na unidade 02 e que análises posteriores indicaram a

necessidade de um re-pretensionamento de todas as unidades geradoras (foram realizadas sem a retirada dos rotores dos geradores). Com o sistema instalado, houve uma grande facilidade para a realização de ensaios, pós-reparos e também um grande aprendizado relativo ao comportamento dinâmico da máquina, pois existindo grande variação do entreferro nas condições de rejeição à plena carga – (de um valor inicial de 19 mm, para um entreferro da ordem de 12.8 mm, na máxima rotação de rejeição), é necessário todo o cuidado, com relação aos riscos de um possível roçamento, notadamente nas partes salientes do enrolamento amortecedor e também nas posições onde os próprios sensores de medição estão instalados.

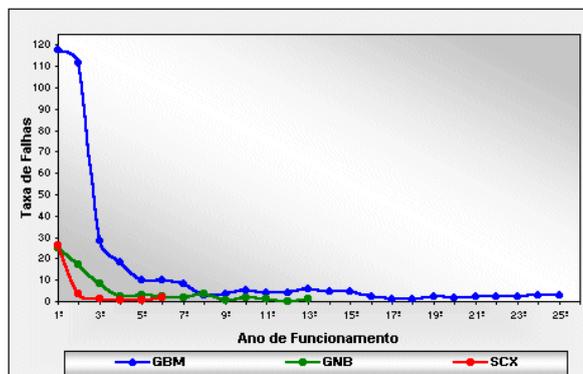
2.10 Outros pontos relevantes

- Plataforma superior modular: Quando se fala em manutenibilidade é essencial que o projeto preveja facilidades para a retirada rápida das tampas de acesso ao interior da máquina, pois o tempo, riscos de acidentes e qualidade do trabalho são a tônica dos trabalhos de manutenção. Para este projeto, foram utilizados módulos com pontos de pega rápido, de tal sorte que a operação de abertura da máquina pode ser facilmente feita em questão de minutos, simplesmente soltando alguns parafusos para levantar diretamente os módulos pela ponte rolante.
- Posição e fixação dos trocadores de calor: Estes trocadores foram instalados de tal sorte a contemplar a facilidade de limpeza lateral (instalação saliente), onde a simples desmontagem da tampa lateral permite o rápido envareamento dos tubos aletados dos trocadores. Para aumentar a vida útil dos trocadores, também foi previsto um sistema em que o trocador não é fixado na carcaça e sim sobre pés independentes, para que a vibração da carcaça não seja transmitida aos trocadores. Na transição entre a carcaça e os trocadores foram colocadas vedações com perfil de borracha flexível, que atenuam, praticamente eliminam, a transmissão de vibração.
- Fixação das barras estatóricas na ranhura: Aqui dois pontos podem ser salientados – o primeiro refere-se ao processo de fixação da barra na lateral da ranhura, em que a mesma é envelopada em um papel sintético condutivo dobrado duplamente com um composto de silicone em estado pastoso antes da inserção da barra na ranhura. Após a instalação, onde a massa ocupa todos os espaços vazios na lateral da barra, o silicone endurece, mantendo-se ainda bastante elástico. Para evitar o afrouxamento radial das barras, foi previsto um sistema de cunhagem em que foram utilizadas molas de efeito radial (Ripple Spring) sob as cunhas de aperto longitudinalmente na ranhura. Este sistema permite que pequenas acomodações de barra em operação possam ser absorvidas pela mola, mantendo o bobinado permanentemente apertado, evitando a necessidade das operações de recunhagem de alto custo que ocorrem em sistemas convencionais (de 5 a 6 anos após o início da operação comercial) e que acarretam grandes perdas de disponibilidades das unidades geradoras. Cabe ainda ressaltar que, para facilitar a inspeção da compactação, ou compressão das molas, foram colocadas ao longo da altura do núcleo, algumas cunhas com rasgo longitudinal, permitindo a inserção de um instrumento que em contacto direto com a mola ondulada, consegue medir sua flecha residual.

3.0 - GANHOS COM A INTRODUÇÃO DAS MELHORIAS

Quando se fala em “ganhos” numa otimização de projeto de um gerador, é difícil quantificar diretamente naquele projeto a não ser fazendo comparações com outras unidades geradoras, com projetos diferentes – daí ser questionável a comparação direta.

Entretanto, na própria Copel temos indicadores gráficos macro, que demonstram que equipamentos bem projetados levam a uma maior confiabilidade e portanto menores taxas de falha. Abaixo é mostrada um desses exemplos comparativos.



Gráficos 1 - Comparativo da Taxa de Falhas, entre GBM,GNB e SCX, desde o Início do Funcionamento

TABELA 1 - Comparativo da Taxa de Falhas, entre GBM,GNB e SCX, desde o Início do Funcionamento

	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991
GBM	118.00	111.99	28.37	18.26	9.85	10.36	8.38	3.24	3.32	5.50	4.09	4.38
GNB	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SCX	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004 (out)
GBM	6.11	4.86	4.91	2.33	1.43	0.89	2.67	1.84	2.21	2.16	2.29	2.84	2.97
GNB	25.28	17.30	8.47	2.36	3.23	2.45	1.81	3.45	0.53	1.82	1.05	0.26	0.94
SCX								26.14	3.57	1.34	0.53	0.79	1.59

Alguns outros custos comparativos podem ser levantados:

1- Erros nas medições de potência devido a deficiência de instalação ou especificação dos Transformadores de corrente dos geradores, que verificamos, podem facilmente atingir de 1 a 2 % (quando a classe de medição exige classe 0,3%), podem acarretar prejuízos incomensuráveis ao longo do tempo de operação da usina. Com os novos procedimentos de rede a medição líquida é realizada nas saídas das linhas, porém ainda resta a medição bruta, que é realizada à nível de máquina, sendo faturada diretamente a energia reativa, minimizando em parte o problema.

2- Na recunhagem, se formos nos ater à média, em 7 ou 8 anos, deveríamos fazer uma troca geral, com altos custos diretos em materiais e tempo de parada de 45 dias, envolvendo a retirada do rotor. Com o sistema acreditamos que poderemos ficar tranquilos por pelo menos 20 anos, resultando numa postergação de gastos e perda de geração avaliado em pelo menos US\$ 5 000 000,00/unidade.

3- Sistemas de freios convencionais podem, em muitas oportunidades atrasar a partida de uma máquina, exigindo que os operadores mantenham aquele famoso "pé-de-cabra", para o desemperramento dos freios, inviabilizando muitas vezes a operação remota com um único mantenedor na usina.

4- Com relação às indisponibilidades forçadas a ser creditada ao projeto, fizemos um levantamento desde o início de operação e constatamos: Em 1999- 3 ocorrências (01 sistema de pré-excitação, 01 no disjuntor de campo, 01 comando indevido CO2), totalizando 20,00 horas de indisponibilidade forçada. Em 2000, tivemos 0 ocorrências. Em 2001, 0 ocorrências. Em 2002, 01 ocorrência em cartões do sistema de excitação e 73,92 horas de indisponibilidade forçada. Em 2003, 01 ocorrência de emperramento de fim de curso de freio com indisponibilidade forçada de 0,53 horas e Em 2004, 02 ocorrências nos sistemas de ventilação dos tiristores com um total de 5,07 horas de indisponibilidade forçada. Total de indisponibilidade forçada para a usina igual a 99,52 horas em 5 anos de contabilização.

5- Com relação às indisponibilidades programadas sob condição e que podem ser creditados ao gerador foram obtidas os seguintes dados:- 1- Inspeção de cunhas e limpeza do estator - média de 600 horas/máquina – a ser repetido de 5-6 anos, 2- Recuperação da flutuação da coroa polar – média de 500 horas/máquina - atividade esta realizada uma única vez por máquina (atendimento contratual), 3- Ensaio de rendimento 100 horas em uma máquina 4- Melhorias para ganho de rendimento 100 horas/máquina – uma única vez (tamponamento da entrada de ar na aranha do rotor). Estas indisponibilidades foram para implantação de melhorias ou para aproveitamento de paradas por outros motivos na planta.

6- Atividades programadas sistemáticas-anualmente – Limpeza no compartimento das escovas – 16 horas/máquina/ano e Inspeções gerais estimados em 40 horas/máquina/ano realizadas em aproveitamento à outras manutenções (grades da tomada d'água, inspeções de turbina/folga das palhetas, gases no trafo elevador alterações de circuitos, etc.)

4.0 - CONCLUSÃO

Como resultado desse trabalho em parceria com o fabricante durante as fases de projeto, montagem e comissionamento, conseguimos uma máquina em que os engenheiros e técnicos de manutenção gostam de trabalhar devido as facilidades de acesso para todos os pontos críticos da máquina resultando em menores tempos para as inspeções de manutenção, menores riscos para o executante dos trabalhos e principalmente um menor stress dos responsáveis diretos pelas manutenções em poder ver com os próprios olhos se aquele “barulhinho” que sempre ocorrem nas máquinas pode ser ignorado e a unidade liberada. Com isto tivemos um aumento da confiabilidade dos sistemas do gerador com grandes ganhos nos custos para a realização das manutenções.

Do ponto de vista do fabricante, a experiência também foi bastante gratificante, pois ter de forma tão efetiva durante a fase de projeto, a visão extremamente experiente daqueles que são os responsáveis pela manutenção de diversas usinas de grande porte, certamente trouxe um aprendizado, que pode ser rapidamente transportada para novos projetos – como por exemplo, cito como importante, o sistema de freio de dupla ação e o sistema de CO2 à baixa pressão.

Do ponto de vista da manutenção houve uma redução em seus custos devido à diminuição do número de homens hora para realização de recunhagens, uma rápida avaliação do estado do equipamento através dos sistemas de monitoramento, menores riscos e custos na manutenção de sistemas como o de CO2 e outros.

Após a implantação com sucesso desse projeto, a COPEL, até onde é permitido, passou a requerer na construção de novas usinas ou nas ampliações ou retrofit, um padrão de qualidade dos projetos, que levem em conta aspectos de manutenibilidade das máquinas e equipamentos em geral, pois está convencida que pequenos custos adicionais (às vezes até absorvidos pelo próprio fornecedor – por se tratar de algo inovador) podem ser compensados com folga durante toda a vida operacional de uma usina hidrelétrica.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Manuais de Operação e Manutenção do Gerador da UHE Salto Caxias.
- (2) Especificações Técnicas COPEL , Contrato c 301 -para os Geradores e Pontes Rolantes da Casa de Força .
- (3) Desenhos de projeto do gerador , Sistemas de frenagem e de CO2 .
- (4) Resultados de Ensaios de Erros em TC's nas instalações do fabricante de TC's e no LACTEC .
- (5) Banco de dados do sistema OMNI (Sistema de Gestão da Operação e Manutenção Integrada da Copel).