



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GGH-14
19 a 24 Outubro de 2003
Uberlândia - Minas Gerais

**GRUPO I
GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH**

PRECAUÇÕES NA MODERNIZAÇÃO DE HIDROGERADORES - COMO ELIMINAR DEFICIÊNCIAS SEM INTRODUIR NOVOS PROBLEMAS

**Carlos Alberto Dias Costa*
Paulo Kazuo Suiama
Duke Energy International**

**Sidney Alvares
Carlos Haluska Jr.
Voith Siemens Hydro**

RESUMO

No presente artigo, são discutidos problemas que podem ocorrer durante o processo de reforma ou repotenciação de hidrogeradores, inexistentes no projeto original, que podem ser introduzidos tanto pelo novo projeto do enrolamento estatórico quanto pela nova concepção do núcleo. São problemas e questões que devem ser levados em consideração pois, ao contrário de um gerador novo, muitos dos projetos de repotenciação partem de parâmetros já definidos, que não podem ser alterados e variam de caso para caso: número de ranhuras do estator, diâmetro interno e externo do núcleo, entreferro, fundações, cruzetas, carcaça etc.

PALAVRAS-CHAVE

Hidrogeradores. Reformas e repotenciação. Problemas em novos projetos.

1.0 - INTRODUÇÃO

Algumas das principais usinas hidrelétricas do Brasil entraram em operação entre as décadas de 60 e 70 e, portanto, contam atualmente com 40 anos em média. Muitos destes hidrogeradores ainda foram fabricados com materiais de classe de isolamento B e outros, apesar de serem utilizados materiais termo rígidos, foram fabricados e montados sem os cuidados que mais tarde descobriu-se serem fundamentais para o bom funcionamento, principalmente quanto às questões de fixação das barras no interior das ranhuras. Da mesma forma, muitos projetos de núcleos bem como de suas fixações na carcaça, constituíram-se em problemas no futuro com o aparecimento de deformações e

vibrações generalizadas ou localizadas. Estas por sua vez levaram a outros problemas no enrolamento estatórico, quer seja pela perfuração da camada isolante devido à quebra de lâminas, quer seja pelo aparecimento de descargas de ranhura com o desgaste da pintura semicondutiva da parte reta decorrente da vibração das lâminas do núcleo. Devemos levar em conta que possivelmente o salto tecnológico quando foram projetados os primeiros hidrogeradores com centenas de MVA, foi muito maior do que o que tivemos quando os primeiros geradores de mais de 500MVA foram fabricados, tanto pelas ferramentas de cálculo disponíveis, quanto pelo melhor entendimento dos problemas que poderiam ocorrer com as melhorias nos projetos e materiais utilizados. Assim, tanto pelo tempo de operação quanto pela falta de experiência com as novas tecnologias que estavam sendo empregadas, grande parte destes geradores encontra-se atualmente no final da sua vida útil e, portanto, devem ser totalmente reformados para manter a sua confiabilidade operativa.

2.0 - PRINCIPAIS PROBLEMAS ENCONTRADOS

Os hidrogeradores quando bem projetados, montados e submetidos a um programa de manutenção preventiva adequado, tem demonstrado ser uma máquina de confiabilidade muito boa, podendo chegar a uma vida útil superior a 40 ou 50 anos. Normalmente a prática tem nos mostrado que o abreviamento desta vida útil ocorre quando surgem intercorrências durante a operação ou sérios problemas de projeto, sendo fundamental que estes sejam perfeitamente equacionados antes de se decidir por um processo de reforma geral ou repotenciação e para que possam ser definitivamente resolvidos com os novos projetos.

* Rod. Chavantes/Ribeirão Claro, km 10 - CEP 18970-000 - Chavantes - SP - BRASIL
Tel.: (014) 3342-9076 - Fax: (014) 3342-9098 - E-MAIL: cdcosta@duke-energy.com

2.1 Estator

Normalmente são os problemas no estator (núcleo ou enrolamento) que são os motivadores para uma intervenção. Para os enrolamentos os principais problemas são os seguintes:

- Descargas de ranhura de alta intensidade, principalmente nos primeiros enrolamentos com isolamento termo-rígida de classe F, cujas barras não eram convenientemente calçadas no interior das ranhuras. São diversos os exemplos que temos, inclusive com a criação na década de 70 de um Grupo Técnico no IEEE com especialistas para discutir estes problemas. Com as modernas técnicas de montagem e calçamentos radiais e laterais, este problema praticamente não existe mais com todos os fabricantes tradicionais;
- Curto-circuito entre espiras nos enrolamentos multi-espiras, pois a conseqüente troca das bobinas era um fator para o abreviamento da vida útil, uma vez que eram inevitáveis os esforços de torção nas cabeças de bobinas que deveriam ser movimentadas para a troca da bobina defeituosa;

Quanto aos núcleos estatóricos, os principais problemas são ligados ao projeto, como por exemplo:

- Deformação das emendas dos estatores seccionados, fazendo com que ocorra vibração acentuada ou aquecimento localizado nestes pontos;
- Sistemas de aperto das lâminas do núcleo com dimensionamento inadequado, fazendo com que o torque aplicado nos tirantes não fosse eficientemente transmitido para o pacote do estator, acarretando vibrações acentuadas das lâminas e conseqüentemente perfuração da isolamento;
- Travamento da carcaça do estator, impossibilitando uma adequada expansão radial que compensasse os esforços térmicos diferenciais e ocasionando flambagem (ondulação) do núcleo. Esta ondulação por sua vez poderia gerar pontos localizados de vibração conforme descrito no parágrafo anterior.

2.2 Rotor

Normalmente os rotores dos hidrogeradores não são os principais motivadores das reformas, a menos da ocorrência de algum acidente. Geradores que trabalham com sobreaquecimento moderado nos enrolamentos rotóricos muitas vezes trabalham por vários anos sem maiores problemas.

Do lado mecânico, o problema mais usual no rotor está ligado à deterioração do sistema de fixação ou guiamento da coroa, possibilitando, durante o funcionamento do gerador, deformações não simétricas na mesma e conseqüente vibrações que variam com as condições de carga e excitação, e nem

sempre podem ser reduzidas a níveis satisfatórios através de balanceamentos.

Do lado elétrico, durante as repotenciações, normalmente é feita uma adequação aos novos limites de temperatura ou à nova potência, com soluções variadas para cada caso, como por exemplo:

- Substituição apenas da isolamento principal e entre espiras alterando-se o material para classe F;
- Substituição do enrolamento de cobre para melhorar a dissipação térmica, com aumento da secção de cobre ou simplesmente com a adoção de espiras de ventilação.

Apesar da probabilidade de anormalidades ser bem menor, durante o planejamento dos processos de reforma, é uma boa oportunidade para se fazer uma verificação geral do dimensionamento do enrolamento amortecedor, não somente quanto aos esforços eletrodinâmicos transitórios, mas com relação ao passo das barras em função de eventualmente surgirem aquecimentos ou vibrações devido aos harmônicos de ranhura.

3.0 - CUIDADOS A SEREM TOMADOS

O primeiro passo para o correto redimensionamento do gerador é o perfeito conhecimento dos principais problemas do projeto original e que levaram ao eventual encurtamento da vida útil da máquina. Estas questões devem ser cuidadosamente equacionadas e normalmente existem diversas possibilidades de adaptação em que partes da máquina podem ser reaproveitadas.

Atualmente todos os aspectos básicos de dimensionamento são amplamente conhecidos e discutidos, possibilitando soluções para todos os problemas. No entanto, como se trata de uma adaptação de um projeto em que muitos parâmetros físicos já estão definidos e não podem ser alterados, o cuidado que deve ser tomado, e que é o propósito principal deste trabalho, não são as várias possibilidades de melhoria, mas problemas ou inconvenientes que podem ser acrescentados ao novo projeto caso não sejam tomadas as devidas precauções, como por exemplo:

- Vibrações decorrentes de harmônicos das forças eletromotrizes;
- Flambagem do núcleo considerando-se as forças atuantes, interações entre núcleo e carcaça, fatores de segurança etc.

No item seguinte serão discutidos alguns casos que mostram a importância deste tipo de análise e como uma primeira idéia de como poderia ser o novo projeto pode muitas vezes nos levar a situações de riscos que podem ser evitadas.

4.0 - CASOS PRÁTICOS

4.1 Modernização de Salto Grande

No caso a ser descrito mostra uma necessidade de alteração do projeto para evitar vibração do núcleo estático.

Neste projeto o escopo de modernização do gerador incluía a troca do núcleo e enrolamento estáticos, com alteração do sistema de fixação do núcleo à carcaça e re-isolação dos enrolamentos rotóricos. As características principais foram:

	Antes modern/o	Após modern/o
Potência nominal:	18 MVA	23.3 MVA
Tensão:	13800 V	13800 V
Diâmetro int. estator:	5740 mm	5736 mm
Altura do núcleo:	850 mm	852 mm
Entreferro:	10.16 mm	8.16 mm
Rotação:	128.6 rpm	128.6 rpm
Número de ranhuras:	312	312

Para a fixação do novo núcleo à carcaça foi feita a opção pelo sistema com duplo rabo de andorinha, o qual fornece um grau de liberdade para expansão radial do núcleo, sem no entanto fornecer folgas tangenciais (Figura 1).

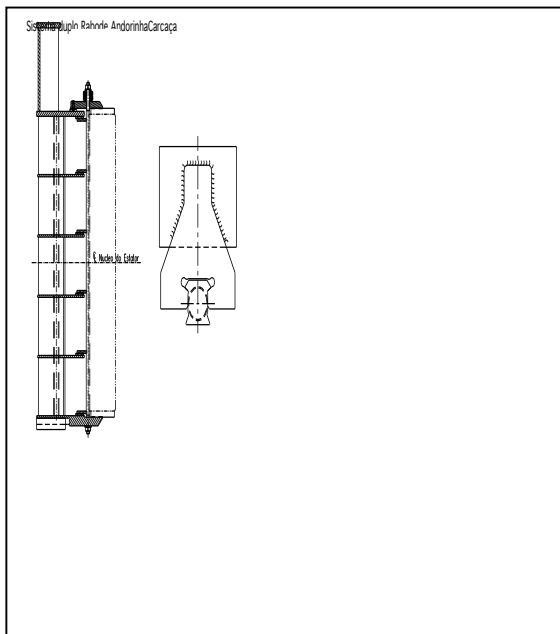


FIGURA 1

O diâmetro externo do estator foi definido em função das dimensões da carcaça e sistema de fixação do núcleo e do cálculo elétrico e mecânico do gerador.

A avaliação das vibrações do núcleo estático é feita considerando-se individualmente cada modo de vibrar, conforme Figura 2 na qual é mostrado o modo de vibrar com 16 ondas, as forças e frequências de excitação oriundas das da FMM (Figura 3) e as amplificações mecânicas oriundas das ressonâncias do núcleo estático (Figura 4).

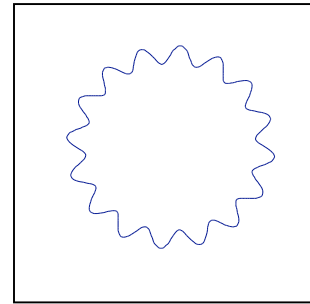


FIGURA 2

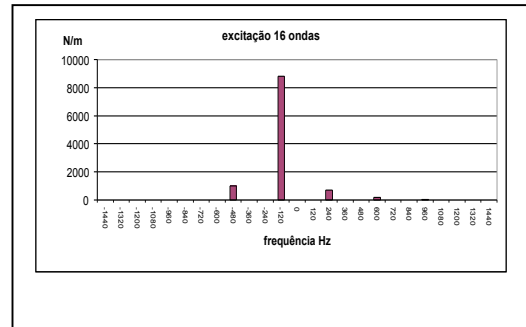


FIGURA 3

Frequência >0 => sentido direto
Frequência <0 => sentido retrógrado

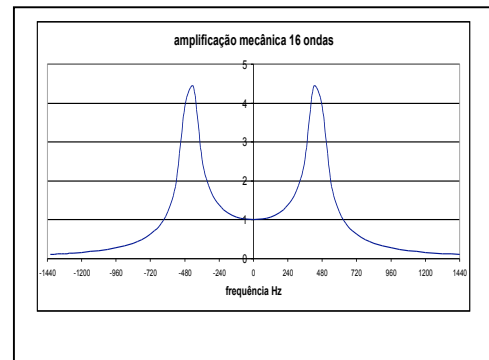


FIGURA 4

A vibração resultante estimada para o modo de vibração com 16 ondas é mostrada na Figura 5 abaixo.

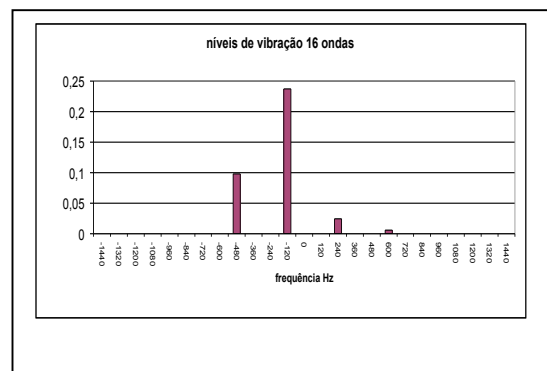


FIGURA 5

As respectivas análises completas considerando os principais modos de vibração estão indicadas nas Figuras 6 (forças de excitação), 7 (amplificação mecânica) e 8 (vibração resultante estimada).

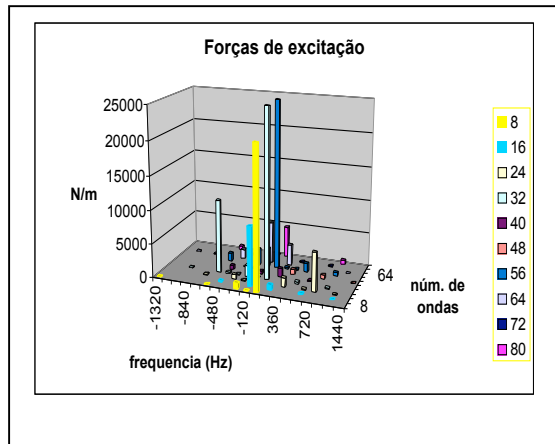


FIGURA 6

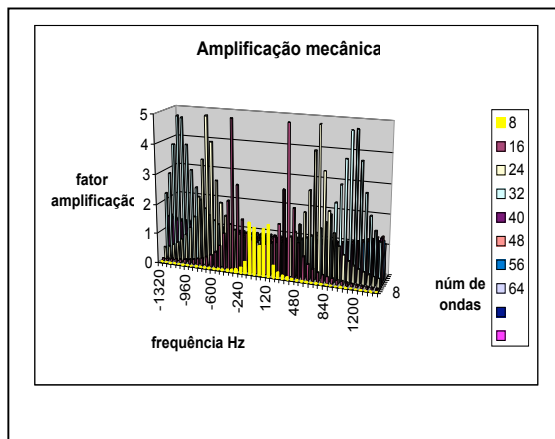


FIGURA 7

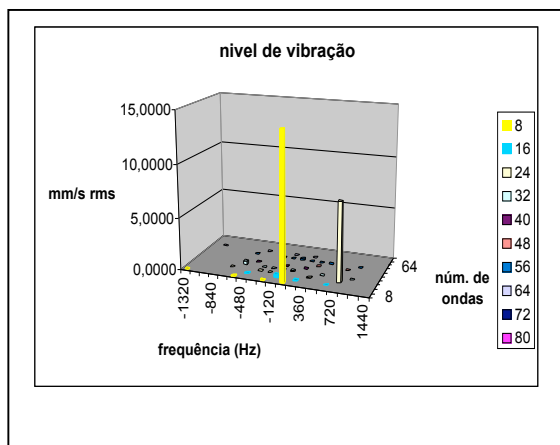


FIGURA 8

Os níveis de vibração estimados não são aceitáveis, com problemas para o modo de vibrar com 8 ondas em 120 Hz e 24 ondas 720 Hz.

Tendo em vista tal perspectiva optou-se por alterar a chapa estatórica, alterando-se as frequências de

ressonância e conseqüentemente as curvas de amplificação, conforme está indicado na Figura 9 a seguir.

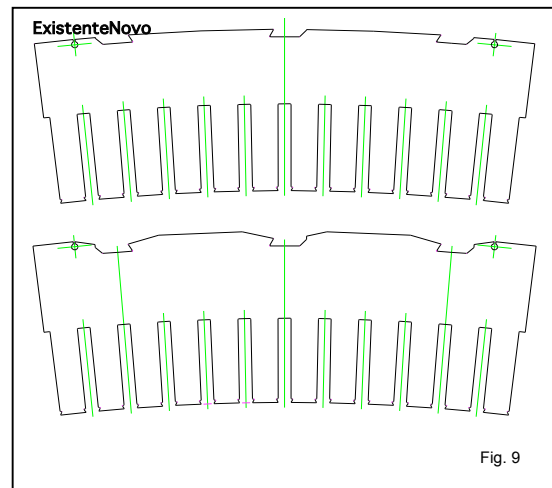


FIGURA 9

As alterações das chapas estatóricas permitiram a redução dos futuros níveis de vibração no núcleo estatórico de aproximadamente 16 mm/s rms para níveis menores que 4 mm/s rms.

4.2 Modernização de Jurumirim

Neste projeto, a análise da flambagem do núcleo permitiu a utilização do sistema original de fixação do núcleo e por conseqüência evitar maiores intervenções na carcaça.

O escopo de modernização do gerador foi a troca do núcleo e enrolamento estatóricos, com alteração do sistema de fixação do núcleo à carcaça e re-isolamento dos enrolamentos rotóricos. As características principais foram as seguintes:

	Antes modern/o	Após modern/o
Potência nominal:	50 MVA	53.7 MVA
Tensão:	13800 V	13800 V
Diâmetro int. estator:	7400 mm	7400 mm
Altura do núcleo:	1560 mm	1560 mm
Entreferro:	19 mm	19 mm
Rotação:	138.3 rpm	138.3 rpm
Número de ranhuras:	528	528

Neste caso, os estudos revelaram a incompatibilidade geométrica entre a carcaça existente e o sistema de duplo rabo de andorinha. As alterações necessárias à carcaça seriam tão grandes que implicariam em colocar em risco o prazo de máquina parada.

Tendo em vista tal fato, foi reavaliada a necessidade de implantação do sistema com duplo rabo de andorinha, através de uma análise detalhada da flambagem do núcleo.

O cálculo de flambagem considera que o núcleo do estator está sujeito simultaneamente aos seguintes carregamentos mecânicos que podem causar a flambagem do núcleo:

- Força devido à restrição à expansão térmica do núcleo;
- Forças devido ao Empuxo Magnético.

Ambos os esforços geram esforços de compressão tangenciais no núcleo que, atingindo determinado nível, podem causar a instabilidade do anel acarretando o fenômeno da flambagem, (Figura 10).

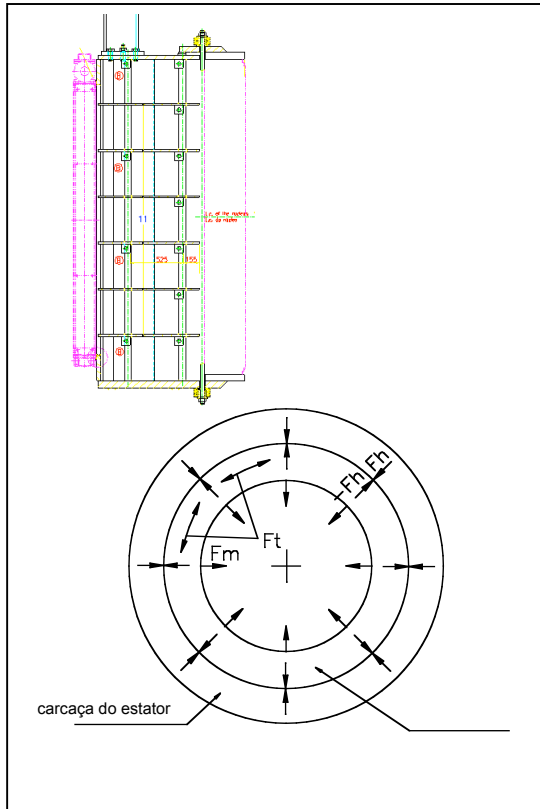


FIGURA 10

O comportamento do núcleo sujeito à compressão tangencial é da seguinte maneira. O núcleo é uma estrutura laminada e descontínua e o esforço de compressão tangencial é transferido de uma chapa para a outra através de esforços de atrito, que por sua vez são gerados pela prensagem. Os esforços de compressão tangencial no núcleo causam escorregamento nas regiões das extremidades das chapas, o que torna não linear o comportamento tensão x deformação.

A rigidez tangencial é determinada pela extensão e número das áreas de escorregamento, que por sua vez são influenciadas pela prensagem do núcleo e sobreposição do chapeamento, respectivamente. A Figura 11 a seguir ilustra a tensão de compressão na chapa do núcleo estático.

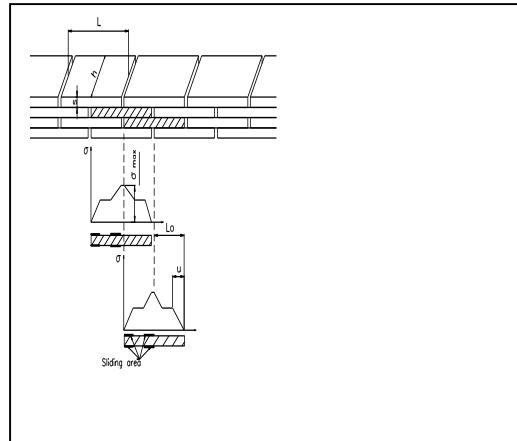


FIGURA 12

Para se fazer a avaliação da integridade do núcleo sujeito aos esforços de compressão, foram feitos os seguintes cálculos, cujos resultados nos absteremos de demonstrar:

- Determinação da deformação circunferencial do núcleo;
- Determinação da tensão máxima de compressão no chapeamento;
- Determinação da tensão crítica de flambagem;
- Avaliação da margem de segurança contra a flambagem, utilizando-se fatores de segurança com base no universo de máquinas colocadas em operação pela Voith Siemens ao longo das últimas décadas.

Assim sendo, foi possível ter certeza de que a flambagem não ocorrerá mesmo com a do sistema de fixação do núcleo existente, evitando-se maiores intervenções na carcaça que colocariam em risco o prazo de máquina parada.

5.0 - CONCLUSÃO

Fundamentado no exposto nos itens anteriores, as principais conclusões que podem ser tiradas são as seguintes:

- É fundamental que se tenha um bom conhecimento do comportamento do gerador original e, caso não sejam disponíveis registros, deverá ser feita uma completa investigação;
- Previamente deve-se ter um diagnóstico preciso das causas dos problemas que eventualmente tenham colaborado com o encurtamento da sua vida útil, se este for o caso da reforma;
- O projeto de modernização do gerador deve avaliar o comportamento do mesmo como um todo, não se limitando a análises parciais, ou seja, o desenvolvimento do projeto não deve simplesmente ficar focado nas questões do dimensionamento eletromagnético. As questões ligadas aos modos de vibração da máquina

também deverão ser avaliadas, inclusive com programas de simulação;

- Deve-se sempre ter em mente que muitas vezes pequenas alterações locais podem ter impacto no comportamento geral do equipamento e a parte mais crítica quanto a este aspecto é o estator do gerador, face às diversas interfaces envolvidas. Existem casos que até em novos projetos, podem surgir vibrações indesejadas, caso não sejam tomados os devidos cuidados.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Teufelsberger, V. - Analysis of the behaviour of the stacked stator cores during heat-up, E und M, vol. 13;
- (2) Szabo, I. - Buckling of a beam on a resilient base, Höhere Technische Mechanik, 5. Auflage, Springer Verlag;
- (3) Walker, J.H. - Large synchronous machines, Clarendon Press Oxford 1981;
- (4) Manual do programa DI3551 - Voith Siemens Hydro;
- (5) J. Den Hartog. - Vibrações nos sistemas mecânicos;
- (6) B. Wachta - Influence of Stator Slots on the Development of Noise-Generating Magnetic Force Waves – Siemens AG, Dynamowerk – Berlim;
- (7) Horst Kümmler - Optimization of mechanical behaviour of hydro generator stator cores due to buckling effects - Siemens AG, Dynamowerk – Berlim.