



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

GGH - 03  
16 a 21 Outubro de 2005  
Curitiba - Paraná

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

**REABILITAÇÃO, MODERNIZAÇÃO E FUTURA REPOTENCIAÇÃO DAS MÁQUINAS DE ILHA SOLTEIRA 1  
E 2**

<b>Mauro Ken Iti Uemori *</b>	<b>Paulo Roberto Dias Oda</b>	<b>José Roberto Beffa</b>	<b>Fábio Fernandes Salomão Sá</b>
<b>Alstom Brasil</b>	<b>CESP</b>	<b>Alstom Brasil</b>	<b>Alstom Brasil</b>

**RESUMO**

Desde a entrada em operação das unidades 1 e 2 da UHE Ilha Solteira foi constatado nos hidrogeradores elevado nível de vibração no núcleo estatórico. A raiz do fenômeno, logo se soube ser de origem eletromagnética, dada pela interação do campo magnético dos pólos com harmônicas do campo de reação da armadura, produzindo uma força que excitação em 120 Hz. Subjacente a isto, quando há uma correspondência do núcleo em apresentar modo de vibrar nesta frequência, especialmente quando certas particularidades durante a operação do hidrogerador levam à mudança no módulo de elasticidade do núcleo, poderá suceder uma falha. Foi exatamente isso o que ocorreu com as duas unidades: quebra de dentes de chapas de silício, trincas em soldas dos tirantes do núcleo, afrouxamento de cunhas de ranhura e desgaste da pintura contra corona na parte interna à ranhura da barra[5]. Esse quadro levou as barras a sofrerem danos progressivos, que com o passar do tempo evoluiu de descargas parciais para dano mais grave no enrolamento. Neste artigo apresentaremos como este problema foi solucionado após várias tentativas pouco eficazes em corrigir o aperto do núcleo durante as manutenções programadas da usina, bem como apresentar a metodologia da reforma como um todo. Com o plano de modernização da usina a CESP viabilizou a repotenciação dos hidrogeradores. Nesta oportunidade, onde havia de se substituir o núcleo e o enrolamento, o novo projeto levou em consideração as necessidades de correção de forma definitiva dos problemas existentes[7]. Adicionalmente a nova potência do hidrogerador foi concebida para poder absorver uma futura repotenciação da turbina.

**PALAVRAS-CHAVE**

Reforma, Modernização, Repotenciação, Vibração.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

As principais características construtivas do projeto original que são importantes nesta análise são::

- Estator construído em 4 seções unidas na obra através de parafusos;
- Existência de pinos radiais para dilatação do estator devidos a forças de origem térmica;
- Existência de tirantes de aperto do núcleo do estator redondo e soldados às prateleiras da carcaça;
- Projeto do núcleo sem escadinhas nas extremidades, mas com rasgos radiais nos dentes.

Estas unidades foram fabricadas nos anos de 1971 e 1972, entrando em operação comercial em 1973, e desde esta época nota-se alto nível de vibração no núcleo do estator e que foram se agravando com o tempo, sendo os hidrogeradores sujeitos a várias intervenções, na maioria das vezes com tentativas de reaperto do núcleo, sem sucesso, devido ao projeto do sistema de aperto utilizado[5].

Os tirantes soldados às prateleiras da carcaça não funcionam adequadamente, sendo o ideal que quando estes sejam tensionados, tenham um certo alongamento e que o efeito mola do tirante absorva eventuais acomodações e mantenha sempre o núcleo compactado. Conjugado com os tirantes, as placas de pressão não conseguiram transmitir a pressão adequada em toda a superfície do núcleo, o reaperto pelo lado inferior da máquina não foi possível, pois as porcas eram travadas por meio de soldas nas suas seis faces.

O aquecimento do núcleo provoca uma força radial que tende a expandir, mas quando o sistema de fixação núcleo/ carcaça/ pinos radiais não funcionam adequadamente e conjugadas com o núcleo frouxo, surgem inevitavelmente as ondulações das lâminas. Outro fator desfavorável em termos técnicos que normalmente causa ondulação é a construção do estator empilhadas e enroladas em fábrica em partes. Estatores deste tipo em máquinas de grande diâmetro tem as regiões das junções como forte potencial de ondulação de lâminas e problemas nas barras situadas nesta região.

Mas o maior problema destas duas máquinas é a vibração do núcleo causadas pelas forças parasitas de origem eletromagnético, resultantes da interação do campo magnético de excitação com o campo devido à reação da armadura, que sempre estão presentes durante a operação normal da máquina, coincidindo com um dos modos de vibrar do estator, o qual provoca uma situação de ressonância[2,4].

O modo de vibrar do estator é muito complexo de se calcular com a necessária precisão, pois depende de muitos fatores tais como: aperto do pacote, condição de operação, temperatura do núcleo, acoplamento do núcleo com a carcaça, etc... E que resumindo podemos dizer que depende do módulo de elasticidade do conjunto[3].

A vibração do núcleo teve várias conseqüências, tais como quebra de uma grande quantidade de lâminas do pacote inferior, na da metade direita dos dentes (rasgos nos dentes), trinca nas soldas dos tirantes, afrouxamento de uma grande quantidade de cunhas de fixação das barras na ranhura.

Estando as barras soltas dentro da ranhura, as barras sofrem uma força alternada com o dobro da freqüência da rede contra o fundo da ranhura e também contra as cunhas, causando vibração das barras, desgaste do sistema de proteção anticorona da barra na região interna à ranhura, causando descargas parciais provocando um fenômeno de eletroerosão que ataca o impregnante da isolação, reduzindo significativamente a vida remanescente das barras.

## 2.0 ANÁLISE DAS CAUSAS DA VIBRAÇÃO

Após a tentativa de reaperto do núcleo as vibrações tiveram uma pequena redução, e ainda nota-se que aumenta com a máquina fria e quando a máquina operando na região subexcitada.

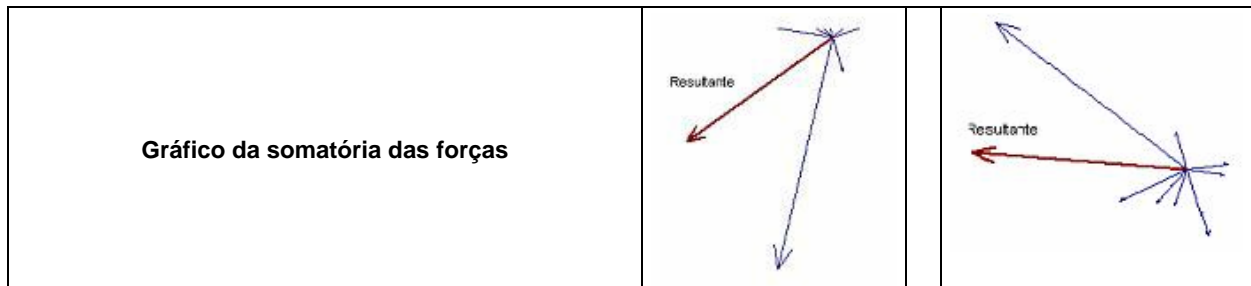
Abaixo segue os resumos dos cálculos das forças de origem eletromagnética em operação nominal e em operação na região sub-excitada.

### 2.1 Componentes vetoriais

Em carga nominal e em carga subexcitada (fator de potência unitário), no intuito de corroborar com os resultados obtidos pela CESP, onde nos relatórios cita que a máquina subexcitada a vibração é maior.

TABELA 1: Cálculo das forças de origem eletromagnética e gráfico da somatória de forças

	Campo 1	Campo 2	Carga Nominal, 170 MVA, 1.07 Un e p.f. 0.95		Carga Nominal, 160 MW e p.f. 1.00	
			Modulo	Angulo	Modulo	Angulo
1	Bh principal	5ª harm. Arm. reversa	2.972	-103	2682	-219
2	Bf campo, 3ª Harm.	19ª harm. Arm. direta	601	-208	508	-131
3	Bh principal	19ª harm. Arm. e $\lambda 4$ , direta	473	-225	427	-108
4	Bh principal	19ª harm. Arm. e $\lambda 2$ , direta	914	-190	825	-154
5	Bh principal	5ª harm. Arm. E $\lambda 2$ , direta	502	-318	453	-352
6	4ª harm. Arm. e $\lambda 4$	19ª harm. Arm. e $\lambda 2$ , reversa	409	-341	414	-9
7	4ª harm. Arm. e $\lambda 2$	19ª harm. Arm., direta	789	-254	800	-73
8	4ª harm. Arm. e $\lambda 2$	5ª harm. Arm. ,direta	434	-74	440	-253
	Força Resultante (N/m)		<b>2203</b>	<b>216</b>	<b>2336</b>	<b>175</b>



Adicionalmente ao fato de que a máquina sub-excitada opera com temperaturas mais baixas, pode-se verificar na tabela e nos gráficos que a máquina tem uma força magnética de excitação maior, o que foi constatado pela CESP e confirmado por estes cálculos[6].

## 2.2 Forças das barras nas ranhuras

Quando as máquinas estão sob carga, a corrente conduzida por uma barra interagindo com o campo magnético causado pela corrente de outra barra, causa forças de origem magnéticas com o dobro da frequência da rede, e que dependendo da fase das barras que estão dentro da ranhura, estas sofrem forças para o fundo ou para a cunha. Quando acontece o afrouxamento das cunhas, pode acontecer o movimento radial das barras.

O gráfico típico de forças agindo sobre as barras tem o seguinte comportamento (Força positiva, sentido radial para o fundo da ranhura e força negativa, radial contra cunha):

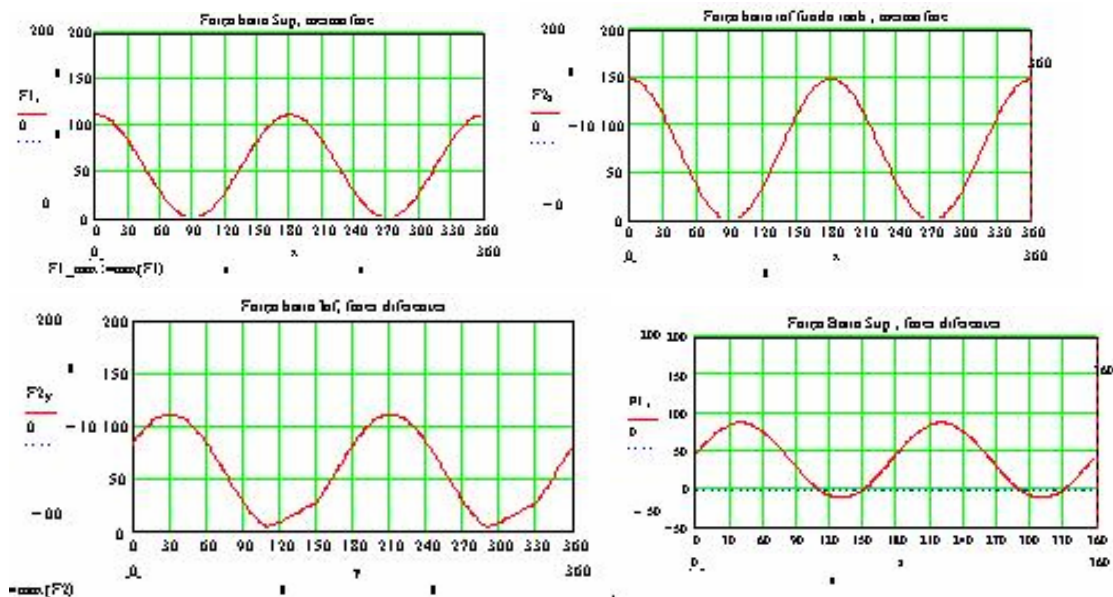


FIGURA 1 : Gráfico típico de forças agindo sobre as barras estáticas

## 3.0 DECISÃO DA REFORMA

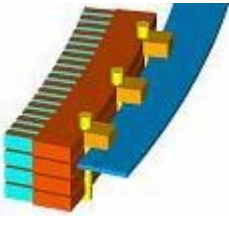
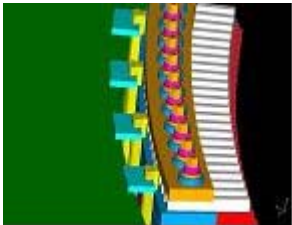
Devido a todos estes problemas de vibração, afrouxamento do núcleo, não eficácia de reapertos dos núcleos, ondulações no núcleo, afrouxamento da cunha, movimentos das barras, deterioração da proteção anticorona das barras na região interna à ranhura, descargas parciais, deterioração da isolação, curto circuito fase-terra de barras, a CESP optou pela reforma das máquinas 1 e 2 da Usina Ilha Solteira, considerando o núcleo e o enrolamento já dimensionado para uma futura reotenciação.

Basicamente foram substituídos: o enrolamento, núcleo do estator, sistema de aperto do núcleo, sistema de conexão entre núcleo e prateleiras da carcaça e reisolamento dos pólos.

## 4.0 REFORMA

### 4.1 A seguir apresentamos uma tabela comparativa entre a máquina original e a máquina reformada[8].

TABELA 2: Comparação entre parâmetros da máquina original e reformada

	Original	Máquina reformada	Unid.
Potência	170000	170000 (projetado p/ 205MVA)	kVA
Tensão	14400	14400	V
Fator de potência	0,95	0,95	-
Rotação nominal	85,7	85,7	rpm
Diâm. Externo do núcleo	13900	13890	
Diâm. Interno do núcleo	13250	13250	mm
Comprimento do Núcleo	1720	1720	mm
Número de dutos vent.	31 x 9,5	58 x 5	mm
Número de ranhuras	540	540	
Dimensão ranhura	22 x 143	20.8 x 145	mm
Tipo de Ch.siliciosa	JIS S01	M250-50	
$\Delta t$ enrol.estator Medido	70	48	°C
$\Delta t$ enrol.rotor Medido	72	56	°C
$\Delta t$ núcleo Medido	40	30	°C
Temp. ar frio	40	40	°C
Empilhamento núcleo	Em 4 partes	contínuo	
Fixação Núcleo/prateleira	Tirante soldado às prateleiras	Cunha rabo andorinha com liberdade de movimento axial	
Aperto do núcleo	Através dos tirantes soldados à carcaça 	Tirantes que passam no meio da coroa do estator 	
Enrolamento	Barras, Ondulado	Barras, Ondulado	

#### 4.2 Escopo de fornecimento e descritivo dos principais aspectos:

O escopo básico consiste no fornecimento de um núcleo do estator e enrolamento novos e reisolção dos pólos

##### 4.2.1 Núcleo do estator

O núcleo foi projetado com chapas de baixas perdas (2.5 W/kg a 50 Hz e 1.5 T) , empilhado de forma contínua com sobreposição entre lâminas até formar pacotes separadas com perfil em duplo T (ou perfil I) de material antimagnético, que formam canais radiais de ventilação, facilitando a passagem do ar refrigerante até os trocadores de calor ar-água.

A pressão média de prensagem do laminado é de 15 kg/cm<sup>2</sup>. Este valor é definido como regra para hidrogeradores e a prática tem mostrado que é muito adequado para garantir uma boa operação.

Nas extremidades do núcleo estático serão previstos rasgos e escadinhas especialmente dimensionadas para minimizar o efeito de aquecimento devido ao fluxo de dispersão dos pólos.

##### 4.2.2 Elementos de Prensagem

Os elementos de prensagem do núcleo são compostos de placas e dedos de pressão e tirantes de aperto, e foram projetados de maneira a manter o núcleo em estado compacto durante o funcionamento da máquina. Os tirantes passando pela coroa do núcleo estático localizados aproximadamente no centro de gravidade da chapa são projetados para providenciar o aperto através das placas e dedos de pressão a fim de garantir uma maior pressão de aperto assim como uma distribuição mais homogênea em toda a sua secção. Além disso, o sistema de molas instalado em uma das extremidades dos tirantes garante a manutenção da pressão média entre as chapas, eliminando a necessidade de reaperto dos tirantes do núcleo praticamente durante toda a vida útil da máquina, reduzindo significativamente os custos com manutenção.

##### 4.2.3 Flambagem do Núcleo

Os seguintes tópicos foram considerados durante o projeto para minimizar o efeito de flambagem.

- Mudança dos dutos de ventilação, dos originais 31 x 9,5 mm para 58 x 5 mm, aumentando em 87 % a área de contato entre o ar de refrigeração e o núcleo estatórico.
- Chapa siliciosa com baixas perdas, associado a um projeto otimizado do núcleo estatórico permitiu sensível redução nas perdas com relação ao projeto original, implicando em diminuição da temperatura deste componente em  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

#### 4.2.4 Elementos de Ligação da Carcaça ao Núcleo

O sistema de fixação do núcleo à carcaça é por meio de cunhas tipo rabo de andorinha e guias da cunha, os quais transmitem os esforços tangenciais e radiais do núcleo à carcaça do estator. O sistema empregado possibilita independência no sentido axial e, portanto permitirá novos reapertos caso os pacotes de chapas se afrouxem durante a operação da máquina

#### 4.3 Enrolamento do Estator

O enrolamento estatórico é composto por barras Roebel, Micadur, do tipo ondulado, composto de 1080 barras Roebel com transposição de 360 graus, adequadas para 540 ranhuras, ligadas em três circuitos paralelos, com passo de 1-8-14 ranhuras, idêntico a máquina original, e com o esquema de enrolamento otimizado para diminuir o empuxo magnético.

Para proteger a isolamento contra descargas superficiais, é aplicada uma proteção contra o efeito Corona que consiste em uma pintura semicondutiva a base de poliuretano classe F que são aplicadas na região que vai dentro da ranhura e na parte das cabeças das barras.

Para a instalação das barras dentro das ranhuras é empregado um sistema especial conhecido pelo nome de "round packing". Este sistema emprega um papel semicondutivo, próprio para este fim, e uma massa a base de silicone, aplicada no meio da fita de papel semicondutivo dobrada longitudinalmente. Em seguida, e imediatamente antes de introduzir as barras nas ranhuras, cada barra será envolvida pelo combinado massa - papel.

Devido à qualidade, espessura e elasticidade do composto massa-papel empregado, a barra se adapta facilmente à ranhura. A elasticidade dos materiais empregados, tanto na proteção como na isolamento das barras, permite acompanhar a dilatação natural do cobre, evitando o surgimento de fissuras no material isolante. Este sistema assegura um embutimento perfeito com folga tendendo a zero, mesmo considerando-se variações dimensionais da barra ou da ranhura. Isto aumenta o coeficiente de transmissão de calor, minimiza a criação de corona dentro da ranhura e a possibilidade de calços saindo da ranhura mesmo após anos de operação.

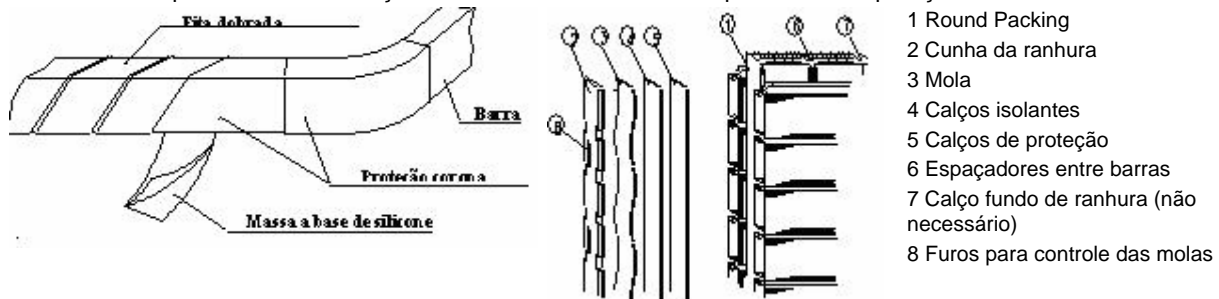


FIGURA 2: Sistema de fixação da barra estatórica na ranhura

O sistema de fixação consiste da cunha, molas e calços, que tem a função de manter as barras sempre pressionadas evitando movimentos indevidos e minimizando descargas parciais dentro da ranhura.

#### 4.4 Reisolação dos pólos

As bobinas polares foram reisoladas e substituídas às isolações contra o núcleo do pólo. Esta reforma foi realizada visando um aumento de confiabilidade dos geradores, uma vez que as máquinas repotenciadas estarão operando com temperaturas mais elevadas e assim elevando as tensões mecânicas, o que poderia danificar a isolamento original do pólo.

## 5.0 RESULTADOS

Como podemos ver pelos gráficos abaixo, as temperaturas foram significativamente reduzidas quando comparadas na mesma potência, e na potência solicitada de 205 MVA as mesmas se encontram dentro dos valores garantidos. A diminuição da temperatura do pólo teve dois fatores importantes: medição da resistência ôhmica do enrolamento mais precisa, e influencia das folgas das guias de ar, as quais foram otimizados durante a montagem dos geradores, fazendo com que o fluxo de ar tenha uma eficiência maior na dissipação de calor da

bobina polar. A vazão de ar total que passa através dos trocadores permanece praticamente a mesma, em torno de 97 m<sup>3</sup>/s.

Para resumir os resultados, apresentamos a tabela comparativa e curvas abaixo:

	Original	Reformado		Unidade
Potência	170	170	205	MVA
Tensão	14400	14400	14400	V
Fator de potência	0,95	0,95	0,95	-
Corrente da armadura	6816	6816	8219	A
Corrente de excitação	1269	1383	1535	A
Corrente exc. Entreferro	740	750	750	A
Corrente exc. Vazio	810	815	815	A
Corrente exc. Curto circ.	650	670	863	A
Elev.temp. enrol.estator	70	48	74	°C
Elev.temp.rotor	72	56	68	°C
Elev.temp.núcleo estator	40	30	40	°C
Xd	0,878	0,893	1,15	pu
RCC	1,246	1,216	0,94	pu

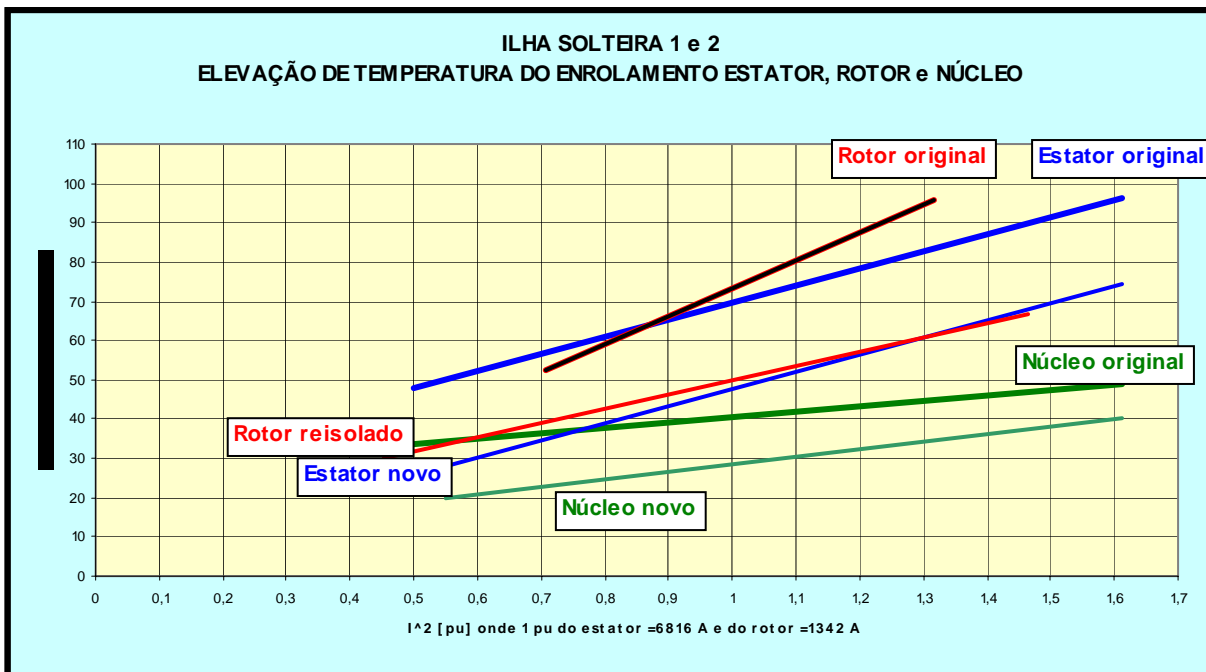


FIGURA 3: Gráfico das temperaturas da máquina antes e depois da reforma

Foi realizado um estudo da turbina com o propósito de se atingir a máxima potência possível e alto rendimento. Os resultados deste estudo constam do relatório de estudo de CFD [9], considerando reforma das palhetas diretrizes e mudança do rotor da turbina. A máxima potência da turbina atinge o valor de 210 MW, que significa um aumento de 27%.

Em termos de núcleo e enrolamento do estator e as bobinas polares, pode-se afirmar que estes componentes reformados estão em condições de operar nesta nova potência, pois a elevação de temperatura destes componentes serão:

Elevação de temperatura do estator = 85°C  
 Elevação de temperatura do rotor = 80°C  
 Elevação de temperatura do núcleo = 40°C

O novo sistema de sistema de excitação deverá ser capaz de fornecer 1600 A e 470 V.

Os cálculos mecânicos da turbina e gerador ainda não foram executados devido à falta de informações da qualidade dos materiais utilizados, principalmente dos núcleos polares, anel magnético, aranha, ventiladores e eixos. Estes cálculos poderão ser apresentados na data do seminário, caso estejam disponíveis.

## 6.0 CONCLUSÕES

Neste trabalho tivemos a oportunidade de apresentar como a repotenciação dos hidrogeradores da UHE Ilha Solteira citados, especialmente sobre as principais modificações em relação ao projeto original. O objetivo principal foi exatamente o de resolver os problemas crônicos existentes de forma definitiva, estender a vida útil dos hidrogeradores, bem como a sua disponibilidade para o sistema elétrico, com maior potência.

Os valores obtidos durante o comissionamento das unidades confirmam que a reforma foi realizada conforme previsto e que os componentes estão adequados a uma futura repotenciação.

Estudos de CFD confirmam que com a reforma das palhetas diretrizes e nova roda da turbina, a máxima potência poderá atingir valores na ordem de 210 MW na queda H=50 m.

É importante ressaltar que outros componentes deverão ser substituídos para a máxima potência, mas infelizmente até esta data não estavam disponíveis as qualidades dos materiais utilizados nos equipamentos originais.

Cabe aqui ressaltar que o bom relacionamento CESP/ALSTOM foi fundamental para o sucesso da reforma dos dois geradores, pois mesmo antes da concorrência a CESP disponibilizou um gerador para ensaios de aquecimento e disponibilizou estes resultados para todos os demais concorrentes, aumentando assim a confiabilidade da reforma. Todos tiveram livre acesso aos documentos e relatórios técnicos de manutenção, bem como do histórico desde a entrada em operação das unidades.

## 7.0 REFERÊNCIAS

- [1] Dias, Manoel: Vibração no núcleo estático do gerador da UG-05 da UHE Porto Primavera, XVI SNPTEE em Campinas em outubro de 2001.
- [2] Taraldsen, Björn, Statorschwingungen in synchronmaschinen mit bruchlochwicklungen. Tese de doutorado da " Die Universitat Trondheim – Norway.
- [3] Wiedmann, Eugen & Kellenberger, Walter. Konstruktion elektrischer Maschinen, Springer-Verlag. Berlin, 1967
- [4] Rocha E., J. Johnny: Una metodologia para la identificación de fuerzas parasitas de origen electromagnética actuantes en estatores de máquinas síncronas, X ERLAC de mayo de 2003.
- [5] Diversos Relatórios técnicos da CESP.
- [6] Parasitaere kraftwellen bei schenkelpolmaschinen (PROGRAMM HT 616 – Alstom Centro Tecnológico, Birr, Suíça)
- [7] Sá, Fábio "Inspeção de geradores visando futura repotenciação", apresentado na ABRAGE de 2004
- [8] Relatórios de ensaios e comissionamento da ALSTOM Brasil LTDA
- [9] Relatório de CFD EHCAL 02018 da Alstom