



GGH/007  
21 a 26 de Outubro de 2001  
Campinas - São Paulo - Brasil

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

**INTRODUÇÃO DE DIFUSORES DE AR NO ESPAÇO INTERPOLAR PARA AUMENTO DA EFICIÊNCIA DA VENTILAÇÃO RADIAL-RADIAL NOS GERADORES DA U.H.E XINGÓ**

\*THOMAS HILDINGER

JOÃO CARLOS BENEDETTI

VOITH SIEMENS HYDRO POWER GENERATION LTDA.

**RESUMO**

Inicialmente, este trabalho apresenta e discute os resultados originalmente esperados para o sistema de ventilação radial-radial ( "rim-ventilation" ) utilizado nos geradores da usina Hidrelétrica de Xingó.

A seguir, são apresentados e analisados os resultados obtidos durante os teste de comissionamento das primeiras unidades geradoras de Xingó, onde se verificou uma elevação excessiva da temperatura do enrolamento de excitação.

Na seqüência são apresentados os resultados referentes ao desempenho do sistema de ventilação bem como a metodologia empregada para identificar a causa da deficiência do sistema de ventilação no que se refere ao aquecimento do enrolamento de excitação, provocada basicamente pela baixa velocidade radial do ar de refrigeração no espaço interpolar.

Apresenta-se ainda a concepção de uma solução para o problema através da inserção de difusores de ar no espaço interpolar, com o objetivo básico de elevar a velocidade radial do ar e conseqüentemente reduzir a elevação de temperatura do enrolamento de excitação sem contudo provocar um aquecimento excessivo no enrolamento de armadura. Adicionalmente, são discutidos os aspectos construtivos do difusor de ar, incluindo os aspectos de montagem e manutenção .

Finalmente, são apresentados e discutidos os resultados dos testes referentes a solução proposta obtidos nos testes de comissionamento da penúltima unidade geradora da UHE Xingó, bem como uma versão otimizada da solução proposta.

**PALAVRA CHAVE:**

Hidrogeradores - Difusores de ar - Enrolamento de Excitação - Aquecimento

**1.0. INTRODUÇÃO**

A Usina Hidrelétrica de Xingó, localizada no Rio São Francisco na divisa entre os Estados de Alagoas e Sergipe, está prevista para dez unidades geradoras, quando totalmente concluída. Na primeira fase, estão sendo colocadas em operação as primeiras seis unidades, cujas características principais são:

Potência Nominal: Pn= 520.000 kVA  
Potência Máxima: Pm= 555.000 kVA  
Tensão Nominal: Un= 18000 V  
Tensão Operativa: U= 18000 V+5% -5%  
Corrente Nominal: In= 23639 A  
Fator de Potência: cosφ= 0,95  
Frequência Nominal: Fn= 60 Hz  
Rotação Nominal: Ns= 109,09 rpm  
Conjugado Base: Cn= 45522 kN.m  
Número de Pólos: 2p= 66

Classificação Térmica:

Enrolamento do Estator -F

Enrolamento do Rotor -F

Norma Elétrica Básica: IEC 34.1

Temperaturas em Carga Nominal:

Água de resfriamento ≤ 30 °C

Enrolamento do Estator ≤ 105 °C

Enrolamento do Rotor ≤ 120 °C

Temperaturas em Carga Máxima:

Água de resfriamento ≤ 30 °C

Enrolamento do Estator ≤ 120 °C

Enrolamento do Rotor ≤ 120 °C

Rotação de Disparo: Nd= 198 rpm

Momento de Inércia: J= 36000 t.m<sup>2</sup>

Constante de Energia:  $H= 4.5 \text{ kJ/kVA}$

Impedância de Base:  $Z_b= 0.623 \Omega$

Diâmetro Interno do Estator = 13,4 m

Altura do Núcleo do Estator = 3,198 m

Forma Construtiva: IM 8015 (W1)

## 2.0. ESCOLHA DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO

Face a grande altura do núcleo do estator e ao grande diâmetro interno do estator (e consequentemente grande diâmetro externo do rotor) optou-se pela utilização de sistema de ventilação radial-radial, conforme exposto no Informe Técnico RE/GMR/01 apresentado no XII-SNPTEE [1].

No sistema de ventilação radial-radial, o fluxo de ar é succionado para dentro do cubo do rotor do gerador, através de aberturas convenientemente dimensionadas, e em seguida é bombeado radialmente pela ação do rotor em movimento através de dutos radiais localizados na coroa do rotor, sendo por isso também chamado de “rim-ventilation”. Após emergir através dos canais radiais da coroa do rotor, o ar atravessa o espaço interpolar e o entreferro e em seguida os canais radiais do núcleo do estator. Finalmente o ar de resfriamento atravessa os trocadores de calor tipo ar-água e reinicia seu percurso.

O sistema de ventilação radial-radial é particularmente indicado para máquina que apresentam altura do núcleo superior a 2 m, pois este sistema apresenta excelente desempenho no que se refere a pressão aerodinâmica gerada pelo rotor em movimento e também proporciona uma distribuição bastante homogênea do ar de resfriamento ao longo da direção axial do núcleo do estator. Dessa forma, consegue-se com relativa facilidade um sistema de resfriamento mais eficiente e um perfil axial homogêneo de temperaturas no enrolamento de armadura.

Com o objetivo de reduzir a possibilidade de entrada de pó dos freios no interior do gerador, foi previsto que a entrada de ar resfriamento no cubo do rotor seja unilateral, apenas pela parte superior, evitando dessa forma o acúmulo de sujeira nos enrolamentos e nos dutos de ventilação. Contudo, o rotor dos geradores da UHE Xingó foi concebido de tal forma que seja também possível a admissão de ar simultaneamente pelos lados superior e inferior do cubo do rotor.

Originalmente, a vazão de ar de resfriamento especificada para os geradores de Xingó foi de  $215 \text{ m}^3/\text{s}$ . De acordo com os cálculos elaborados durante o projeto dos geradores com esta vazão de ar é suficiente para manter a temperatura do enrolamento de armadura dentro dos limites

especificados tanto para carga nominal quanto para carga máxima.

Em função do projeto do sistema de ventilação, a vazão de ar efetivamente esperada para os geradores na sua configuração original (isto é, entrada de ar no cubo do rotor apenas pelo lado superior) é de  $285 \text{ m}^3/\text{s}$ .

## 2.0. RESULTADOS DOS TESTES DE COMISSIONAMENTO

Nesta secção são apresentados os resultados dos teste de comissionamento das quatro primeiras unidades da UHE Xingó, ou seja, das unidades #6, #5, #4 e #3 (na seqüência de comissionamento). Os resultados dos testes de comissionamento da Unidade #2 encontram-se no item 3.2. que apresenta os resultados dos testes de comissionamento aoós a introdução dos difusores de ar no espaço interpolar.

A tabela 1, abaixo apresenta as vazões de ar medidas por ocasião dos testes de comissionamento de cada uma das unidades:

Tabela 1 - Vazão de Ar nos Geradores da UHE Xingó.

Unidade	Vazão [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]	Medição em
#6	277	Set. 94
#5	263	Fev. 95
#4	285	Out. 95
#3	273	Jul. 96
Média	274.5	-

Durante os ensaios de comissionamento das Unidades geradoras da UHE Xingó, também foram realizados ensaios de aquecimento para determinar as temperaturas dos enrolamentos de armadura e de excitação nas condições de carga indicadas em 1.0.. Estes ensaios de aquecimento indicaram elevações excessivas nas temperaturas do enrolamento de excitação nas quatro unidades comissionadas enquanto o enrolamento de armadura das quatro unidades apresentaram temperaturas significativamente inferiores aos valores contratuais.

A tabela 2, abaixo, apresenta os valores “medidos” dos coeficientes de dissipação de calor ( $\alpha_2$ ) do enrolamento de excitação das quatro primeiras unidades geradoras comissionadas na UHE Xingó:

Tabela 2 - Coeficientes de Dissipação de Calor do Enrolamento de Excitação dos Geradores da UHE Xingó.

Unidade	$\alpha_2$ [W/(m <sup>2</sup> .K)]	Vazão [m <sup>3</sup> /s]
#6	74,11	277
#5	76,15	263
#4	74,82	285
#3	76,19	273
Média	75,32	274.5

Na Tabela 2,  $\alpha_2$  representa o coeficiente de dissipação de calor do enrolamento de excitação, determinado a partir da temperatura medida deste enrolamento no ensaio de aquecimento por:

$$\alpha_2 = Uf \times If / ( OW_2 \times \Delta\vartheta_{2L} ), \text{ onde:}$$

$Uf$  = tensão de excitação [V],

$If$  = corrente de excitação [A],

$OW_2$  = superfície total de dissipação de calor do enrolamento de excitação [m<sup>2</sup>],

$\Delta\vartheta_{2L}$  = elevação de temperatura do enrolamento de excitação em relação a temperatura do ar na saída dos canais radiais da coroa do rotor.

## 2.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados apresentados na Tabela 1, mostram que os valores medidos de vazão de ar de resfriamento são homogêneos e cujo valor médio de 274,5 [m<sup>3</sup>/s] é bastante próximo do valor efetivamente esperado de acordo com os cálculos de dimensionamento do sistema de ventilação.

Muito embora os resultados apresentados na Tabela 2 também mostrem que os valores “medidos” do coeficiente de dissipação de calor dos enrolamentos de excitação sejam homogêneos, com valor médio de  $\alpha_2 = 75,32$  [W/(m<sup>2</sup>.K)], estes valores são insuficientes para assegurar que os limites contratuais da temperatura do enrolamento de excitação sejam atendidos em todas as condições fixadas, notadamente na operação com tensão operativa máxima (  $U_n + 5\%$  ) e fator de potência nominal. Para atender os limites contratuais em todas as condições de operação é necessário alcançar um coeficiente de dissipação de calor  $\alpha_2 = 110$  [W/(m<sup>2</sup>.K)]

## 3.0. A INTRODUÇÃO DOS DIFUSORES DE AR NO ESPAÇO INTERPOLAR NA UNIDADE #2

Em função da realidade acima descrita, imediatamente após os testes de

comissionamento da Unidade #6, foram iniciados estudos e análises com o objetivo de encontrar uma solução para o problema do aquecimento excessivo do enrolamento de excitação e esta unidade foi liberada para operação com sua corrente de excitação limitada para evitar que um aquecimento excessivo pudesse causar danos a isolamento do enrolamento ( também as Unidades #5, #4 e #3 operaram, nesta época, com corrente de excitação limitada).

Testes adicionais foram realizados na própria Unidade #6 após o comissionamento da Unidade #5, com o objetivo obter uma melhor compreensão das condições de contorno do problema. Estes testes, em conjunto com uma série de estudos realizados com o Software PHOENICS/PHOTON ( Modelagem pelo métodos dos elementos finitos de problemas envolvendo transmissão de calor e mecânica dos fluídos) indicaram, que ao contrário do que se supunha anteriormente, nas máquinas com sistema de ventilação radial-radial, a dissipação de calor do enrolamento de excitação é, essencialmente, determinada pela velocidade radial do ar de refrigeração no espaço interpolar e não pela velocidade tangencial do rotor em movimento.

Na sua configuração original, os geradores da UHE Xingó apresentam uma velocidade radial do ar de resfriamento na base do enrolamento de excitação de 12 m/s ( para uma vazão média de 274,5 [m<sup>3</sup>/s] ) e esta velocidade é claramente insuficiente para garantir, ao enrolamento de excitação, uma boa dissipação de calor, sendo assim responsável pela deficiência do sistema de ventilação no que se refere ao aquecimento do enrolamento de excitação.

Dessa constatação, torna-se evidente que a solução do problema consiste em elevar substancialmente a velocidade radial do ar de resfriamento no espaço interpolar de forma a intensificar a dissipação de calor, ou em outras palavras, aumentar significativamente o valor do coeficiente de dissipação de calor do enrolamento de excitação.

Uma vez que seria impossível aumentar a vazão total de ar de resfriamento até o valor necessário para alcançar, através do aumento da velocidade radial do ar de resfriamento no espaço interpolar e considerando que as temperaturas do enrolamento de armadura são significativamente inferiores aos valores especificados, a única solução viável para alcançar uma redução significativa na temperatura do enrolamento de excitação, face ao grande aumento necessário no fator de dissipação de calor do enrolamento de excitação, passa por “estrangular” o fluxo de ar de

resfriamento no espaço interpolar aumentando dessa forma sua velocidade radial.

Naturalmente, qualquer estrangulamento no espaço interpolar implica, automaticamente, em uma redução na vazão total de ar de resfriamento e, portanto, torna-se necessário otimizar este estrangulamento, de tal forma a alcançar um equilíbrio aceitável entre a necessidade de aumentar a velocidade radial do ar no espaço interpolar, a conseqüente redução na vazão total de ar de resfriamento e o aumento da temperatura do enrolamento de armadura em conseqüência desta redução na vazão total de ar.

Nos geradores da UHE Xingó, o estrangulamento do fluxo de ar de refrigeração será obtido através da instalação de difusores de ar no espaço interpolar, conforme mostrado na Figura 1 e descrito em 3.1.. As análises efetuadas, indicaram que o canal de passagem de ar formado pelas espiras do enrolamento de excitação e a parede lateral do difusor de ar deve ter uma largura entre 6,0 [mm] e 8,0 [mm]. Os difusores de ar foram introduzidos inicialmente na Unidade #2 e de acordo com os cálculos a introdução dos difusores de ar provocaria uma redução na vazão de ar para 169 [m<sup>3</sup>/s].

Sob o aspecto de eficiência do sistema de ventilação seria desejável que a altura radial dos difusores permitisse que todo o enrolamento de excitação estivesse radialmente "coberto" pelos difusores de forma o obter uma velocidade radial de ar elevada e uniforme em toda a extensão radial do enrolamento. No entanto, tal condição implicaria em severas restrições no que refere a manutenção, pois não seria possível montar e desmontar os difusores sem remover todo o rotor. Assim, optou-se por uma execução dos difusores com altura radial reduzida de tal forma que seja possível montar e desmontar os difusores e os pólos sem necessidade de remoção do rotor, mesmo com a conseqüente redução na eficiência térmica da solução.

### 3.1. DESCRIÇÃO DOS DIFUSORES DE AR

Os difusores de ar instalados no espaço interpolar são peças com geometria trapezoidal, feitas de material composto de resina epoxi com manta de fibra de vidro, curados em dispositivo apropriado, conforme mostrado de forma esquemática na Figura 1. Em cada espaço interpolar são montadas, 3 peças separadas, na direção axial pelos 2 suportes laterais das bobinas polares existentes entre 2 pólos vizinhos.

Por se tratar de peça de grande responsabilidade, os difusores de ar foram projetados e calculados, na sua geometria e também no seu processo, de forma a poder permitir o menor desvio possível

durante a fabricação e montagem. Seu posicionamento no espaço interpolar é fator primordial para um bom desempenho do sistema de ventilação do gerador.

Para a fixação dos difusores e poder permitir seu manuseio durante a sua montagem e desmontagem durante a substituição eventual de algum pólo, foram utilizadas réguas na forma de pente, com recessos para a localização das cabeças dos parafusos de fixação dos mesmos. As réguas tipo pente, são fixadas basicamente utilizando o mesmo processo de fixação dos suportes laterais da bobina polar, isto é, através de tirantes inseridos nos canais de ventilação da coroa do gerador e presos por porcas em seu diâmetro interno.

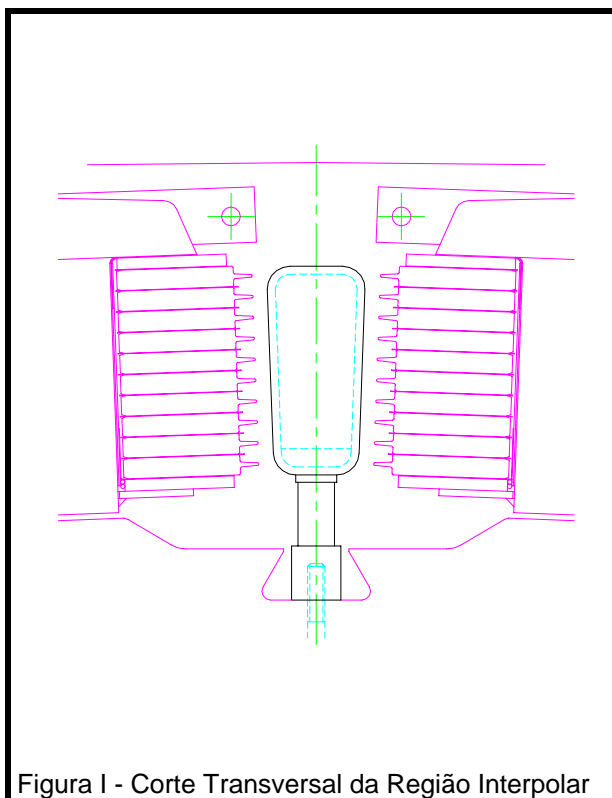


Figura 1 - Corte Transversal da Região Interpolar

### 3.2. RESULTADOS DOS TESTES DE COMISSIONAMENTO DA UNIDADE #2

Os testes de comissionamento da Unidade #2, mostraram claramente que os difusores de ar instalados no espaço interpolar representam uma solução eficaz para intensificar a dissipação de calor do enrolamento de excitação e produziram um considerável aumento no coeficiente de

dissipação de calor deste enrolamento. Os valores encontrados foram:

- Vazão de ar - 181[m<sup>3</sup>/s]
- Coeficiente de dissipação de calor do enrolamento de excitação - 98 [W/(m<sup>2</sup>.K)]

Com o significativo aumento verificado no coeficiente de dissipação de calor do enrolamento de excitação, a Unidade #2 foi liberada para operação sem qualquer limitação na corrente de excitação, embora a temperatura na operação com potência máxima e tensão operativa máxima ainda seja superior ao valor especificado de 120 °C. Naturalmente, observou-se o esperado aumento nas temperaturas do enrolamento de armadura, porém os valores medidos ainda se encontram abaixo dos valores especificados.

#### 4.0. OTIMIZAÇÃO DA SOLUÇÃO PROPOSTA

Uma análise detalhada dos resultados dos testes de comissionamento da Unidade #2 e sua comparação com o modelo numérico utilizado para a análise do problema, permitiu descobrir uma possibilidade relativamente simples para otimizar a solução proposta (instalação dos difusores no espaço interpolar), de forma a produzir um ganho adicional na dissipação de calor do enrolamento de excitação.

Os geradores da UHE Xingo possuem, em cada espaço interpolar, 2 suportes laterais para as bobinas polares. Por razões construtivas, não é possível montar os difusores de ar apoiados diretamente sobre os calços laterais das bobinas polares e entre cada peça do difusor e o calço laterais vizinho existe, na direção axial, um espaço de 17,5 [mm], formando assim um canal de razoável seção transversal que funciona com uma espécie de “by-pass” para o ar de resfriamento. Naturalmente, a contribuição do ar que passa por este canal para a refrigeração do enrolamento de excitação é modesta e além disso, o fato de que uma parte considerável da vazão total de ar flui por este “by-pass” (já que se trata de uma região com baixa resistência aerodinâmica) contribuiu para que o aumento efetivo do coeficiente de dissipação de calor do enrolamento de campo tenha sido inferior ao esperado.

Dessa constatação surgiu a possibilidade de otimizar a solução proposta através do fechamento deste “by-pass” utilizando vedações de borracha instaladas nos suportes laterais das bobinas polares com o objetivo de conseguir que a maior parte possível de ar (bombeado pela ação coroa e do cubo do rotor pelo sistema de ventilação radial-radial com o rotor em movimento) passe no espaço interpolar e assim

possa obter maior rendimento na refrigeração do enrolamento de excitação.

Essas borrachas são feitas de material especialmente desenvolvido para as condições de funcionamento do gerador, com densidade e flexibilidade suficientes para não impedir a montagem e desmontagem dos difusores. As borrachas de vedação são fixadas por cola em dois canais frezados nos suportes e quando montadas, ficam prensadas axialmente pelos difusores.

Inicialmente, esta solução otimizada foi instalada na unidade #6, por ocasião dos trabalhos de montagem dos difusores atualmente (Abr. 97) em execução. O re-comissionamento da Unidade #6 ocorreu em Mai. 97.

As Figuras II e III permitem visualizar como ficaram os suportes laterais com as borrachas coladas.

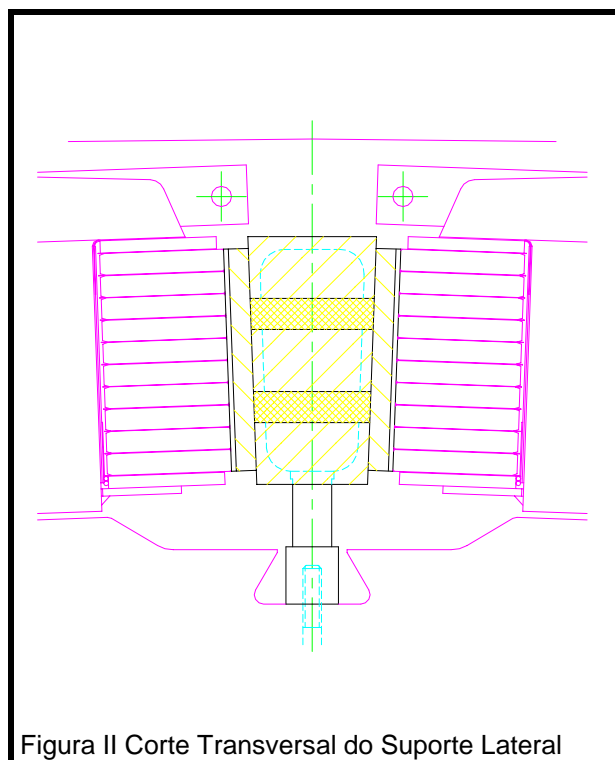


Figura II Corte Transversal do Suporte Lateral

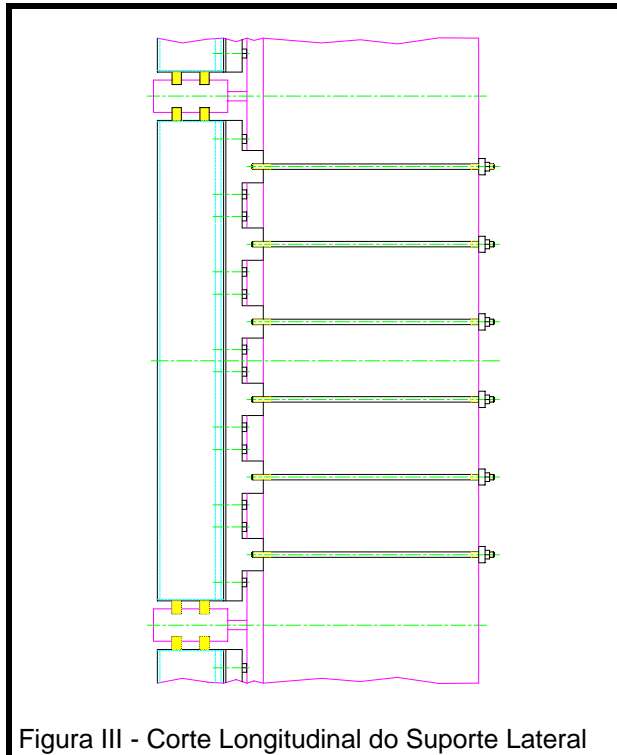


Figura III - Corte Longitudinal do Suporte Lateral

Para finalizar, é importante ressaltar que a introdução das vedações do “by-pass” provocou uma pequena diminuição adicional na vazão total de ar de resfriamento devido ao aumento da resistência aerodinâmica representado por este fechamento. Apesar disto, tornou-se possível alcançar uma intensificação na dissipação de calor do enrolamento de excitação provocada pelo aumento da velocidade do ar nos canais formados pelas espiras deste enrolamento e as paredes dos difusores, já que a possibilidade de que uma parcela significativa do ar de resfriamento possa fluir pelo “by-pass” foi eliminada. Naturalmente a redução na vazão total de ar de resfriamento tem como consequência uma pequena elevação nas temperaturas do enrolamento de armadura, o que é perfeitamente aceitável, já que estas ainda estão abaixo dos valores especificados. Com a introdução das vedações, inicialmente na unidade #6 e, posteriormente, nas demais unidades, todas os geradores de Xingo operam dentro das condições contratuais.

## 5.0. CONCLUSÕES

O sistema de ventilação radial-radial apresenta excelente desempenho no que se refere a pressão aerodinâmica gerada pelo rotor em movimento e também proporciona uma distribuição bastante homogênea do ar de resfriamento ao longo da direção axial do núcleo do estator. Dessa forma, consegue-se com relativa facilidade um sistema de resfriamento

mais eficiente e um perfil axial homogêneo de temperaturas no enrolamento de armadura.

Nas máquinas com sistema de ventilação radial-radial, a dissipação de calor do enrolamento de excitação é, essencialmente, determinada pela velocidade radial do ar de refrigeração no espaço interpolar e não pela velocidade tangencial do rotor em movimento.

Difusores de ar convenientemente dimensionados e corretamente instalados no espaço interpolar representam uma solução eficaz para intensificar a dissipação de calor do enrolamento de excitação e produzem um considerável aumento no coeficiente de dissipação de calor deste enrolamento. Para a fixação dos difusores e poder permitir seu manuseio durante a sua montagem e desmontagem durante a substituição eventual de algum pólo, podem ser utilizadas réguas na forma de pente, com recessos para a localização das cabeças dos parafusos de fixação dos mesmos. Dessa forma garante-se boas condições de manutenção das unidades geradoras, mesmo com os difusores instalados no espaço interpolar.

Existe a possibilidade de otimizar o desempenho dos difusores de ar através do fechamento do “by-pass” existente entre os difusores e os suportes laterais das bobinas polares utilizando vedações de borracha instaladas neste suportes com o objetivo de conseguir que a maior parte possível de ar (bombeado pela ação coroa e do cubo do rotor pelo sistema de ventilação radial-radial com o rotor em movimento) passe no espaço interpolar e assim possa obter maior rendimento na refrigeração do enrolamento de excitação.

## 6.0. BIBLIOGRAFIA

- [1] Santos, C.M.P.; Moraes, S.; Maia, R.D.; Romanini, R. - Sistema de Resfriamento dos Geradores da UHE Xingó - RE/GMR/01 - XII SNPTEE - 1993.
- [2] Zwarg, G. - Rim Ventilation for Large Air-Cooled Salient-Pole Machines - Siemens Power Engineering - Vol. VI Nº 2 march/April 1984.
- [3] HILDINGER, T.; - UHE Xingó - Análise do Aquecimento do Enrolamento de Excitação - Relatório Interno R1101110- 0 - Fev. 97.