



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

GGH.YY
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO I

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA – GGH

**REDUÇÃO DO “EMPUXO MAGNÉTICO” DESBALANCEADO DO ROTOR DA
UNIDADE GERADORA 11 DA UHE ILHA SOLTEIRA**

**Paulo Roberto Dias Oda
Cesar Augusto Sabino Mariano
Edson Morales Leal**

**Wiliam Carlos de Oliveira
Mauro Ken Iti Uemori
Fábio Salomão Fernandes Sá**

COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO – CESP

ALSTOM HYDRO ENERGIA BRASIL LTDA

RESUMO

O desbalanceamento magnético de forças na circunferência do rotor de um gerador síncrono, ocasionado, por exemplo, por uma excentricidade estática, é conhecido como Empuxo Magnético Desbalanceado. O objetivo é demonstrar a redução deste fenômeno com a inclusão de conexões equipotenciais entre os caminhos paralelos do enrolamento estatórico, agindo nas correntes de circulação, na força magnetomotriz de reação de armadura e na indução magnética resultante no entreferro. Como as forças de atração magnética são diretamente proporcionais ao quadrado da indução magnética, alterações em seus valores, com o auxílio de conexões equipotenciais, mitigam o Empuxo Magnético.

PALAVRAS-CHAVE

Empuxo Magnético Desbalanceado, UMP, Conexões Equipotenciais, Correntes de Circulação, Excentricidade.

1.0 - INTRODUÇÃO

Este trabalho é parte do programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) entre a Companhia Energética de São Paulo (CESP) e a ALSTOM Hydro Energia Brasil Ltda para estudar um problema de oscilação do rotor da Unidade Geradora 11 da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira da ordem de 600 μ m, conforme ensaios realizados em janeiro de 2008. Tais oscilações provocavam limitações de desempenho em determinadas faixas de operação.

O desequilíbrio magnético de forças leva a um desbalanceamento do rotor, principalmente vinculada à não uniformidade do entreferro, caracterizada por uma excentricidade ou ovalização do rotor em relação ao estator. Este fenômeno é conhecido como “Empuxo Magnético” Desbalanceado (UMP – Unbalanced Magnetic Pull). Todavia, o estudo de um procedimento para mitigar esse efeito, com a inclusão de conexões equipotenciais, tem sido pouco explorado. A adição de tais conexões conduz a um aumento e redistribuição das correntes de circulação entre os circuitos paralelos do enrolamento estatórico, alterando desta maneira a força magnetomotriz de reação da armadura (FMRA), a distribuição de densidade de fluxo magnético no entreferro e o UMP.

O intuito do trabalho é reduzir os níveis de oscilação do gerador para valores aceitáveis sem grandes interferências mecânicas, permitindo assim sua operação em maiores faixas. Para o problema da UG-11 citada, a solução clássica seria corrigir a circularidade do gerador usinando e calçando os pólos na periferia do rotor, buscando um entreferro mais constante. Todavia esta solução, pelo tempo de parada para sua confecção se torna economicamente onerosa. A correção e equilíbrio eletromagnético das forças de atração entre estator e rotor utilizando conexões equipotenciais para criar “novos caminhos paralelos” e aumentar a circulação de corrente se torna vantajosa economicamente e reduz o tempo de parada da máquina.

Seguem dados gerais do gerador da unidade 11 da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira (ILS).
- Potência.....: 170 MVA;

Av. Nossa Sra. do Sabará, 5.312 CEP 04447-011 - Vila Emir – São Paulo – SP F: (11)5613-3769 cel: (11)7496-8547

- Tensão de linha.....: 14400 V;
- Frequência.....: 60 Hz;
- Fator de potência.....: 0,95;
- Número de pólos (2p).....: 84;
- Tipo de enrolamento.....: Ondulado;
- Número de ranhuras (Z).....: 540;
- Número de caminhos paralelos.....: 3;
- Número de ranhuras/pólo/fase (q)....: $2\frac{1}{7}$
- Diâmetro interno estator.....: 13250 mm
- Comprimento estator.....: 1720 mm;
- Entreferro médio.....: 17 mm;
- Arranjo de mancais.....: IM 8205 (W-8)

2.0 - CAMPOS MAGNÉTICOS NO ENTREFERRO.

A tensão induzida nos terminais de um gerador síncrono está diretamente relacionada com a magnitude e conteúdo harmônico da densidade de fluxo magnético presente sobre a linha do entreferro.

O campo magnético sobre a linha do entreferro é resultado da interação do campo magnético produzido pelos pólos do rotor e pelo campo magnético produzido pelas correntes que circulam nos enrolamentos do estator, o que chamamos de campo de reação de armadura.

2.1 Campo Magnético dos Pólos

Para obtenção da forma de onda da indução magnética produzida pelos pólos iremos fazer uso da “função *trassínio*”, definida em [1], que considera a sapata polar com raio único.

A indução magnética vista pelo estator é uma onda viajante em função do tempo e da posição, desta forma seguindo a formulação elaborada por [1] e considerando um instante de tempo fixo, tem-se para o intuito de nosso trabalho a equação mostrada em (1).

$$Bf(x) = B0(x) \cdot \sum_k \left[A_k \cdot \cos \left(k \cdot \frac{2 \cdot p}{D_s} \cdot x \right) \right] \quad k = 1, 3, 5, \dots \quad (1)$$

onde A_k é a amplitude segundo [1], k harmônicos de ordem ímpar, p os pares de pólos, x o deslocamento espacial (em mm), $B0(x)$ é a amplitude da indução, função do entreferro e excentricidade e D_s o diâmetro médio do entreferro

A figura 1 mostra a indução produzida por três pólos do gerador de Ilha Solteira, com a máquina em vazio.

Na maioria dos esquemas de enrolamento a distribuição dos grupos de bobinas se repete na circunferência do estator. Esta repetição está associada ao número de ranhuras por pólo e por fase da máquina (q), podendo ser verificados através de dois fatores, definidos como D_p e C_p , resultado da fração irredutível da equação (3).

$$q = \frac{Z}{m \cdot 2p} = a + \frac{b}{c} = \frac{a \cdot c + b}{c} = \frac{d}{c} \quad (2)$$

$$2 \cdot m \cdot q = 2 \cdot m \cdot \frac{d}{c} = \frac{D_p}{C_p} \quad (3)$$

O fator D_p representa o número de ranhuras em uma repetição e o fator C_p o número de pares de pólos [2]. O gerador de ILS possui $Z = 540$ ranhuras e $2p = 84$ pólos, na equação (3) encontra-se $D_p = 90$ ranhuras e $C_p = 7$ pares de pólos, já que se trata de um enrolamento trifásico, com $m = 3$.

Desta maneira, calcula-se a indução dos pólos para cada intervalo. Como temos C_p pares de pólos por intervalo, com cada pólo tendo o passo polar τ_p , os intervalos terão $2 \cdot C_p \cdot \tau_p$ cada.

Para melhor visualizar e calcular os campos magnéticos no entreferro dividiu-se o gerador em seis partes iguais, ou seja, estudam-se os fenômenos a cada 60° , ver Figura 2. Esta divisão em seis partes é feita de forma proposital, levando-se em conta o número de vezes que o enrolamento se repete.

Nestes intervalos, estando o rotor do gerador excêntrico em relação ao estator, varia-se o entreferro conforme a posição angular e faz com que se varie também a magnitude da indução magnética. Daí cada pólo terá seu valor de entreferro e magnitude de indução.

Os gráficos da Figura 2 mostram a variação do entreferro, em m, e da indução, em Tesla, para cada intervalo. Considera-se uma excentricidade ϵ de 10%.

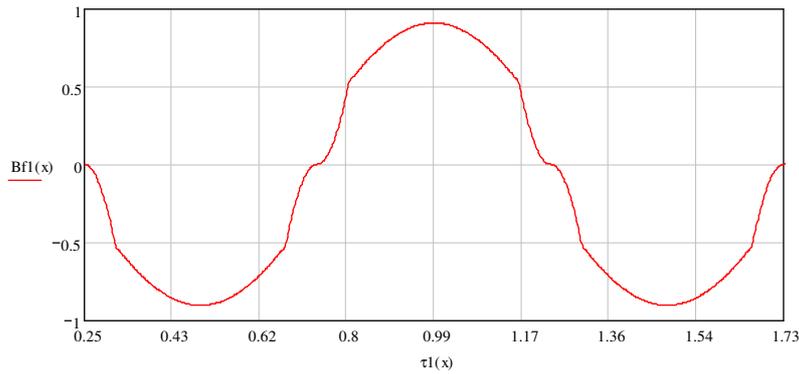
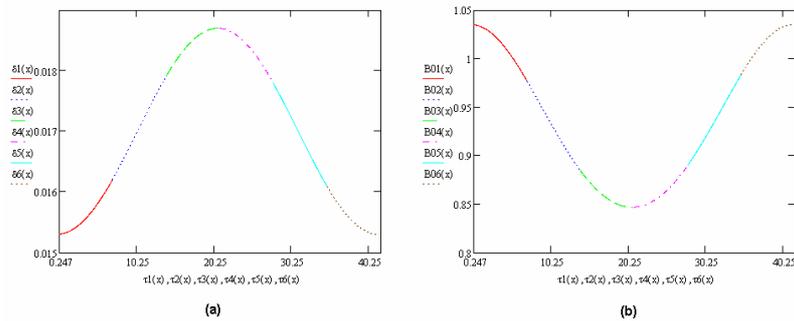
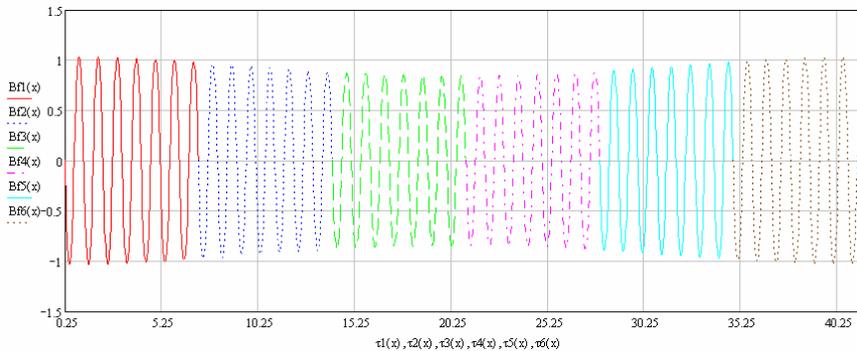


Figura 1 – Densidade de Fluxo Magnético dos Pólos – Gerador em Vazio

Figura 2 – (a) Entreferro Variável para cada Intervalo (b) Magnitude de Indução B_0 para cada Intervalo

A figura 3 mostra a distribuição de fluxo magnético produzida pelos pólos ao redor de todo entreferro. É evidente uma maior indução na região de menor entreferro (intervalos 1 e 6) e um valor menor na região de maior entreferro (intervalos 3 e 4). Os intervalos 2 e 5 apresentam valores intermediários.

Figura 3 – Distribuição da Densidade de Fluxo Magnético no Entreferro devido aos Pólos com $\epsilon = 10\%$

2.2 Campo Magnético de Reação de Armadura

Estando a máquina em carga, circulará pelo enrolamento do estator corrente alternada para alimentar esta carga. Sobre a barra que está circulando esta corrente dentro da ranhura, como em qualquer condutor, surgirá um campo magnético ao redor. Este campo magnético dá origem no entreferro a uma distribuição de fluxo, que chamamos de reação da armadura.

Para o cálculo do campo magnético de reação de armadura se define que a indução magnética B é o produto da permeância do entreferro \wp pela força magnetomotriz \mathfrak{S} , que para nosso caso é a de reação da armadura FMRA.

$$B = \wp \cdot \mathfrak{S} \quad (4)$$

O cálculo da permeância específica do entreferro é obtido conforme [1] e tem a formulação abaixo.

$$\wp(x) = \wp_0(x) \cdot \left(PF_0 + \sum_v PF_v \cdot \cos\left(v \cdot \frac{\pi}{\tau_p} \cdot x\right) \right) \quad v = 1, 3, 5, \dots \quad (5)$$

Os fatores PF_0 e PF_v são definidos em [1] e para cada intervalo n teremos a permeância ideal $\wp_0(x)$.

$$\phi_{0n}(x) = \frac{\mu_0}{2 \cdot \delta_n} \quad n = 1..6 \quad (6)$$

O cálculo da força magnetomotriz de reação de armadura (FMRA) será analisado levando-se em conta a FMM produzida a partir de uma semi-espira engastada em uma ranhura, o que leva a formação de uma onda dente de serra. Para formar uma onda quadrada, que é comumente a representação que se dá para a FMM de uma espira, soma-se o complemento da semi-espira a Y ranhuras a frente, adotando sinal contrário ao da circulação de corrente da barra na ranhura anterior, abordagem discutida em [2] e [3], visualizada na Figura 5.

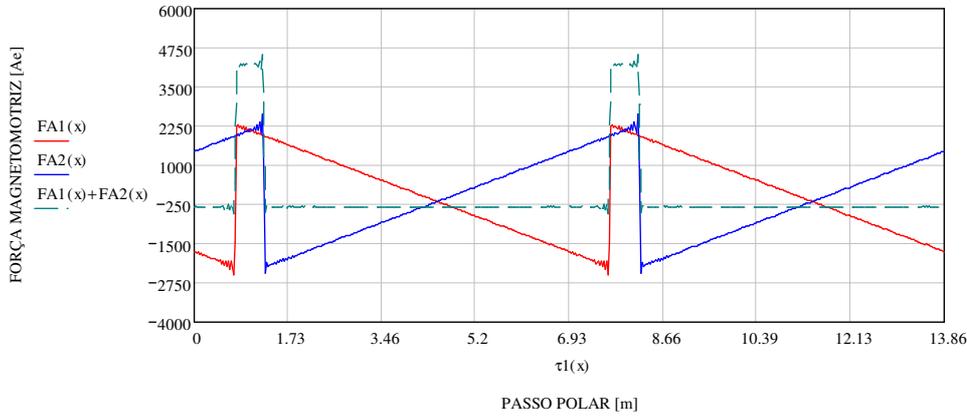


Figura 5 – Força magneto motriz de uma espira

A soma das ondas dente de serra resulta na equação genérica da FMRA para uma espira em um enrolamento estático genérico.

$$FA(x) = \frac{4}{\pi} \cdot A_j \cdot \sum_k \frac{1}{k} \cdot \text{sen} \left(k \cdot \frac{p}{Cp \cdot D_\delta} \cdot \tau_r \cdot Y \right) \cdot \cos \left(k \cdot \frac{2p}{Cp \cdot D_\delta} \cdot \left(x - \tau_r \cdot \left(j + \frac{Y}{2} \right) \right) \right) \quad (7)$$

$$A_j = s_j \cdot Z \cdot I_p \quad (8)$$

A_j – Ampère-espira na ranhura j , $Z = 1$ para barras Roebel, s_j é o sinal instantâneo da corrente, I_p é a corrente de cada barra (em A), τ_r é o passo de ranhura (em m), Y – passo de bobina (em ranhuras).

Nota-se pela Figura 5 que cada espira do enrolamento terá uma onda retangular, representando sua FMRA a cada período fundamental (D_p ranhuras). A soma dos efeitos para todas as espiras neste período forma a onda de força magneto motriz no enrolamento estático.

Efetando o produto de (5) com (7), tem-se a forma de onda da densidade de fluxo magnético de reação de armadura no entreferro. Verifica-se na Figura 6 que a indução magnética oriunda da reação da armadura ($B1A$) é defasada de 180° da indução magnética do campo de excitação do rotor ($Bf1$). O fenômeno de reação da armadura age no sentido de desmagnetizar o entreferro e, estando a máquina em carga, é necessário aumentar a corrente de excitação.

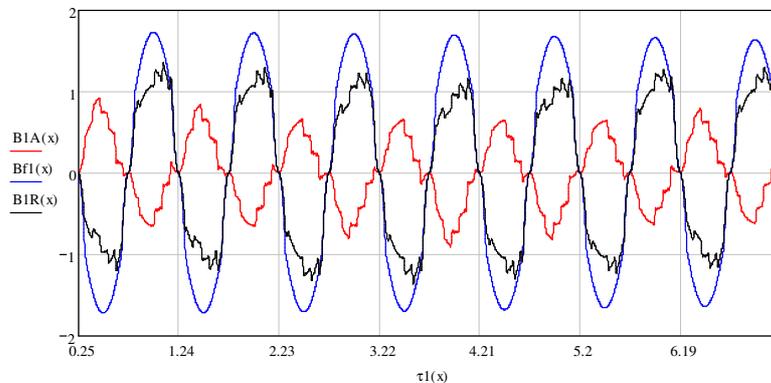


Figura 6 – Distribuição de Densidades de Fluxos Magnéticos – Excitação do Campo $Bf1$, Reação da Armadura $B1A$ ($I_{nom.}$) e Resultante $B1R$ – gerador em carga

3.0 - CORRENTES DE CIRCULAÇÃO

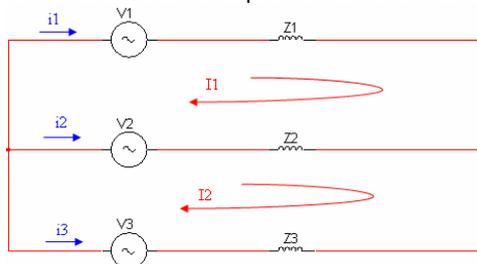
Estando cada barra estática à frente de diferentes entreferros, as tensões geradas nestas barras serão também diferentes, fazendo com que as tensões resultantes nos fechamentos, do neutro e da fase, não sejam mais iguais. Assim entre os caminhos paralelos haverá uma diferença de potencial, surgindo uma circulação de correntes entre estes caminhos. Essas correntes modificam a amplitude da força magnetomotriz de reação de armadura, que por sua vez alteram a indução magnética no entreferro. Como elas agem diretamente na indução, são importantes ferramentas para mitigar o empuxo magnético desbalanceado.

Ir-se-á verificar a amplitude destas correntes em duas situações: com o enrolamento do estator com três caminhos paralelos, da forma como foi concebido originalmente; e com o enrolamento com a inserção das conexões equipotenciais para criar novos caminhos para a circulação de corrente.

3.1 Enrolamento Estático Original

O enrolamento foi concebido de forma que os três caminhos paralelos se sobrepõem ao redor de todo estator, fazendo com que a diferença de tensão entre os caminhos não seja tão significativa e há baixos valores de correntes de circulação. Neste caso a solução do uso das conexões equipotenciais se torna efetiva.

A Figura 7 ilustra o circuito paralelo de uma fase e suas correntes de circulação. São mostradas no circuito da figura as correntes de malha e de ramo. Nosso interesse está nas correntes de ramo, que são as correntes que efetivamente circulam pelas barras e alteram a FMRA.



I_1, I_2 – correntes de malha;
 i_1, i_2, i_3 – correntes de ramo;
 V_1, V_2, V_3 – tensão resultante por caminho paralelo;
 Z_1, Z_2, Z_3 – impedância do circuito paralelo.

Figura 7 – Circuito Equivalente - Correntes de Malha e de Ramo de um Circuito Paralelo de uma Fase Utilizando a 2ª Lei de Kirchoff, lei das malhas, têm-se os resultados apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros do Circuito Equivalente - Enrolamento Original

	FASE A	FASE B	FASE C
V1 [V]	8422	8209	8201
V2 [V]	8230	8330	8374
V3 [V]	8291	8207	8368
I1 [A]	151	-56	-159
I2 [A]	33	58	-75
i1 [A]	151	-56	-159
i2 [A]	-118	114	84
i3 [A]	-33	-58	75

O sinal negativo nas correntes de ramo indica que elas estão no sentido oposto ao representado na Figura 7, mostrando que as correntes vão do maior para o menor potencial.

O sentido da corrente é muito importante para o cálculo da FMRA, pois faz com que a indução resultado da reação da armadura seja subtraída ou adicionado à indução do campo dos pólos para a formação da indução resultante no entreferro.

3.2 Enrolamento Estático com Conexões Equipotenciais

A inserção das novas conexões entre circuitos paralelos da mesma fase faz com que surjam novos “caminhos paralelos” para a circulação de corrente.

Estas conexões devem ser feitas levando-se em conta a amplitude e o ângulo de fase de cada fasor unitário de tensão da composição da tensão terminal do gerador. Cada barra do enrolamento estático, alojada em sua respectiva ranhura irá ter uma amplitude de tensão e um ângulo de fase, definindo um fasor.

Fazendo a varredura de todo enrolamento estático, verificam-se quais barras da mesma fase possuem o mesmo fasor nos diferentes circuitos paralelos. Para nosso estudo foram 4 pontos de conexão por fase, criando outras malhas no circuito da Figura 7. Apresenta-se na Figura 8 o circuito de uma das fases com estas conexões.

As novas conexões criaram 6 malhas, originando novas correntes de malha e de ramos. Para cada malha, tem-se um número definido de barras estatóricas e a soma fasorial destas tensões estabelece as tensões de malha. De posse de todas as correntes que efetivamente circulam pelas barras estatóricas, com o uso da equação da FMRA, calcula-se a campo magnético produzido por estas correntes.

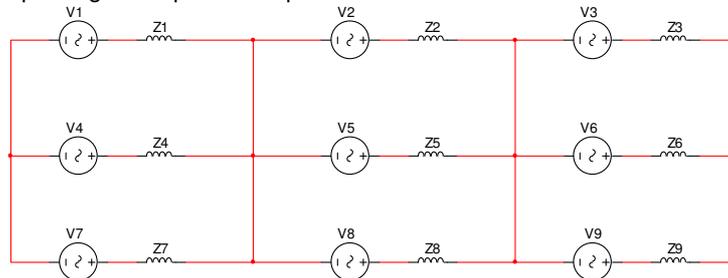


Figura 8 – Circuito Equivalente com Conexões Equipotenciais de uma Fase

4.0 - EMPUXO MAGNÉTICO DESBALANCEADO

As forças de atração magnéticas são definidas pelo Tensor de Maxwell [4], sendo diretamente proporcionais à indução resultante no entreferro. A resultante destas forças possui uma amplitude e uma direção, que normalmente é à frente do menor entreferro.

$$F(x) = \frac{1}{2 \cdot \mu_0} \cdot B(x)^2 \cdot Ap \quad (9)$$

onde $B(x)$ – indução magnética resultante no entreferro (em T), Ap é a seção superficial do pólo (em m^2) e μ_0 é a permeabilidade magnética do ar ($4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ H/m).

Fazendo-se a soma vetorial das forças em cada intervalo, obtém-se a força resultante por intervalo e somando novamente estas resultantes, obtém-se o Empuxo Magnético Desbalanceado, com seu módulo e ângulo para a condição do enrolamento original. No intervalo 1, onde há um menor entreferro, as forças são maiores, enquanto que no intervalo 3, com maior entreferro, as forças são menores. Para o enrolamento original, o valor do UMP encontrado é de 859 kN, com ângulo de $0,19^\circ$.

Como a força de atração magnética entre estator e rotor é diretamente proporcional ao quadrado da indução, a diminuição da indução resultante com a inserção das conexões equipotenciais no intervalo 1 terá maior impacto na magnitude da força, sendo esta reduzida quando comparada com a antes da inserção de tais conexões, ver Figura 9. Em contrapartida no intervalo 3, haverá um aumento da força nesta região devido ao maior valor da indução magnética, ver Figura 10.

O efeito em toda máquina é de se reduzir as forças onde antes eram grandes e aumentar onde eram menores, equilibrando a distribuição destas forças no entreferro, mitigando assim o UMP.

Com o enrolamento estatórico com as conexões equipotenciais o UMP calculado é de 484 kN, com ângulo de $15,2^\circ$, o que representa uma redução superior a 40%, redução que irá contribuir para os níveis de oscilação.

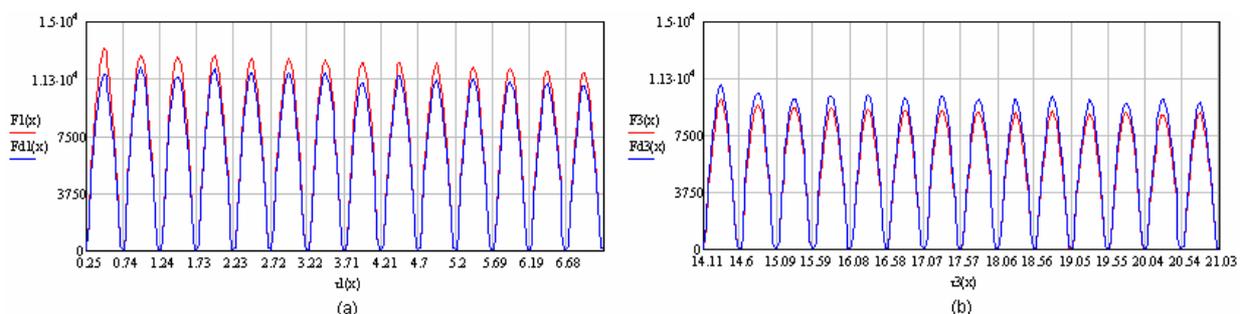


Figura 9 – Forças antes (F1, F3) e depois (Fd1, Fd3) das conexões equipotenciais
(a) intervalo 1 – diminuição das forças; (b) intervalo 3 – aumento das forças

Tabela 2 – Força Magnética por Intervalo e UMP Resultante

	Int. 1 [kN]	Int. 2 [kN]	Int. 3 [kN]	Int. 4 [kN]	Int. 5 [kN]	Int. 6 [kN]
Original	1698	1450	1255	1257	1464	1719
C/ Equipotenciais	1574	1473	1360	1286	1385	1574

5.0 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Antes da adição das conexões equipotenciais, o gerador quando acoplado ao sistema era levado rapidamente à carga total ou próxima a ela para evitar possíveis danos aos suportes do mancal guia do gerador, já que com potência nominal a oscilação se mostrava reduzida.

Com a inclusão das conexões equipotenciais os níveis de oscilação foram reduzidos abaixo da folga do mancal em todos os patamares de carga, permitindo uma operação do gerador em faixas anteriormente proibidas. Além da redução na oscilação, houve impacto na vibração do núcleo estatórico.

As tabelas 3 e 4 mostram os valores de vibração no mancal guia do gerador e nas costas do núcleo estatórico, sensores à montante (MO), e a 90° lado do vertedouro (VS). Verificam-se a influência nos valores com a máquina em giro mecânico e excitada, mostrando o desbalanceamento do rotor decorrente do campo magnético no entreferro. Com a inclusão das conexões equipotenciais este desbalanceamento é mitigado.

Tabela 3 – Vibração no mancal guia do gerador – gerador a vazio

	Sem Equipotenciais		Com Equipotenciais	
	Sem Excitação	Com Excitação	Sem Excitação	Com Excitação
MGG-MO [μm]	321,35	736,20	166,79	253,60
MGG-VS [μm]	195,14	494,19	234,25	304,24

Tabela 4 – Vibração nas costas do núcleo estatórico do gerador – gerador a vazio

	Sem Equipotenciais		Com Equipotenciais	
	Sem Excitação	Com Excitação	Sem Excitação	Com Excitação
VEL-MO [mm/s]	5,72	10,06	4,20	5,52
VEL-JU [mm/s]	5,58	11,26	5,18	6,10

A inclusão das conexões equipotenciais torna a distribuição de forças ao redor da circunferência do rotor mais uniforme, conseqüentemente os níveis de oscilação dos dois sensores apresentam valores mais equilibrados.

Esta característica é demonstrada nas órbitas da figura 10(a), em que além da redução na amplitude da oscilação, verifica-se a influência das conexões equipotenciais, de diminuir a força quando está crescendo e aumentar quando está decrescendo.

O gráfico da figura 10(b) ratifica a redução da oscilação, permitindo que o gerador opere em todos os patamares de carga sem danos aos suportes dos mancais, como ocorria anteriormente.

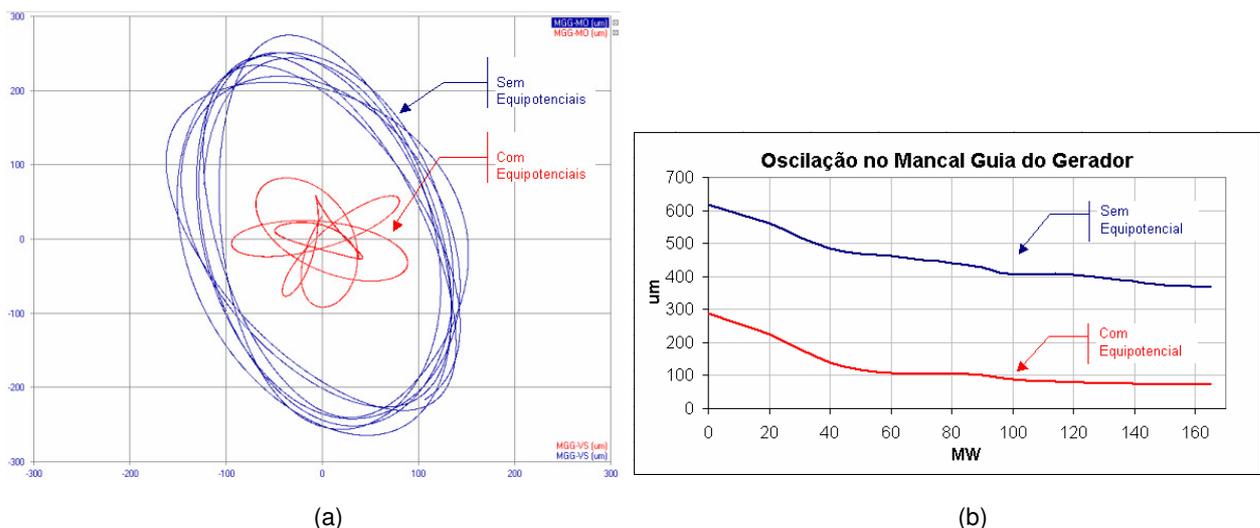


Figura 10 – (a) Órbitas com e sem conexões equipotenciais. (b) Vibração no mancal guia do gerador x carga

6.0 - CONCLUSÃO

O trabalho teve como intuito mostrar a mitigação do Empuxo Magnético Desbalanceado com a adição de conexões equipotenciais, sendo aplicado de forma prática a um gerador da usina hidrelétrica de Ilha Solteira. A importância da formulação da FMRA em uma equação que relaciona a corrente em cada barra ao longo do estator é a chave para se calcular o efeito da distribuição de densidade de fluxo de reação de armadura.

A inserção das conexões equipotenciais faz com que se aumente a circulação de corrente entre os caminhos paralelos. Estas correntes têm seu sentido definido em função da tensão em cada ramo. Onde há um maior entreferro a tensão induzida nas barras e a indução magnética no entreferro são menores; desta forma com a inserção das conexões equipotenciais impõe-se correntes que circulem no intuito de aumentar esta indução resultante. Para tanto é necessário que a indução magnética de reação de armadura se some à indução magnética de excitação dos pólos. Como a tensão nesta região é menor, a corrente passa a circular no sentido contrário, o que provoca a inversão da FMRA, que outrora era contrária à excitação.

Para a região de menor entreferro, haverá maiores tensões induzidas nas barras e indução magnética no entreferro. Assim, as correntes têm por objetivo reduzir os níveis de densidade de fluxo magnético e como as tensões nestas regiões são superiores, as correntes mantêm seu sentido, que faz com que a reação de armadura se mantenha contrária ao campo de excitação dos pólos. Como há um aumento na amplitude das correntes de circulação, há maior reação da armadura, o que faz reduzir a densidade de fluxo resultante no entreferro.

Desta maneira, onde haviam altos valores de densidades de fluxo magnético estas são reduzidas e, onde outrora haviam menores valores dessas densidades, elas são aumentadas. Com isto há um maior equilíbrio de indução magnética no entreferro e conseqüentemente um maior equilíbrio entre as forças de atração magnética entre os pólos do rotor e o diâmetro interno do estator, reduzindo-se assim o Empuxo Magnético Desbalanceado.

Os resultados experimentais demonstram que as conexões equipotenciais são realmente uma solução efetiva para redução do Empuxo Magnético Desbalanceado e conseqüentemente dos níveis de oscilação.

Para a UG11 de Ilha Solteira a oscilação em algumas situações foi reduzida a $\frac{1}{4}$, estabilizando em carga total com valores inferiores a 90 μm . A vibração do núcleo estatórico também apresenta valores reduzidos, não havendo diferença significativa entre a máquina em giro mecânico e com tensão nominal.

O gerador retornou ao sistema sem a necessidade de balanceamento mecânico, sem correção de circularidade do estator e rotor, permitindo ainda sua operação sem limitações de carga. A solução possui um alto valor tecnológico agregado com fácil implementação e baixo custo, podendo ser usado em novos geradores, reformas e serviços para reduzir o UMP e oscilação sem maiores intervenções na máquina.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ROCHA E., J. Johnny. *Uma Análise dos Efeitos do Enrolamento Amortecedor sobre a Força Eletromotriz de Geradores Síncronos de Pólos Salientes*. São Paulo, 1996. Tese – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

[2] ROCHA E., J. Johnny; 'Una Metodología para la identificación y análisis de fuerzas parásitas de origen electromagnética actuantes en estatores de máquinas sincrónicas'. X Erlac, Cigré, Puerto Iguazú, Argentina, 2003.

[3] OLIVEIRA, W.; Redução do "Empuxo Magnético" Desbalanceado em Geradores Síncronos. Florianópolis, 2008. Dissertação – Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.

[4] BASTOS, J.P.A. Eletromagnetismo para Engenharia: Estática e Quase-estática. Florianópolis, Ed UFSC, 2004.

[5] ROSEMBERG, E. Magnetic Pull in Electrical Machines. Trans. A.I.E.E., 1918, vol.37, pt 2, p. 1425-1469.

[6] BERMAN M.; ERLICK M.S. Behavior of an Induction Motor with Equalizing Connections in the Stator Winding. In: ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS IN ISRAEL. Proceedings. p. 324-327, Israel, 1991.