



GRUPO -1

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA- GGH

**FORÇAS ELETROMAGNÉTICAS PRECURSORAS DE VIBRAÇÃO DO NÚCLEO DO ESTATOR DE
HIDROGERADORES**

Allan de Barros(*)
VOITH HYDRO

Dirk Emmrich
VOITH HYDRO

Silvio I. Nabeta
EPUSP

Fernando H. Hamaji
EDP

RESUMO

O campo magnético estabelecido no entreferro das máquinas síncronas é responsável pela transmissão do torque e potência desejados, porém é também precursor de forças radiais inerentes. Tais forças combinadas à resposta dinâmica do sistema mecânico podem resultar em vibração excessiva do núcleo do estator, o que em geral é indesejável devido a eventuais danos e redução de vida útil decorrentes.

Este artigo tem como objetivo desenvolver modelos e simulações focados nas forças eletromagnéticas atuantes no núcleo do estator de tal forma que estes possam contribuir para compreensão global dos fenômenos envolvidos bem como para refinamento de resultados já conhecidos.

PALAVRAS-CHAVE

Máquina Síncrona, Forças Eletromagnéticas, Vibração, Harmônicas de Campo, Hidrogeradores

1.0 - INTRODUÇÃO

Para geração de energia hidroelétrica as máquinas síncronas de elevada polaridade são amplamente empregadas, adequando-se bem às turbinas hidráulicas de baixa rotação. Em grande parte dos casos, por questões de projeto, estas máquinas são concebidas com enrolamento estatórico fracionário, o que traz particularidades sobre a distribuição de campo magnético no entreferro. Neste tipo de configuração o padrão de repetibilidade do enrolamento do estator acontece em um período angular maior que aquele correspondente à componente fundamental de campo (dois polos) e como consequência surgem sub-harmônicas de campo, isto é, harmônicas cujos períodos angulares são superiores ao da própria componente principal.

Assumindo-se como primeira simplificação que a distribuição de campo no entreferro $B_r(\theta, t)$ possui apenas componente radial e que os materiais ferromagnéticos têm permeabilidade infinita, a distribuição de pressão magnética radial atuante no núcleo do estator pode ser deduzida a partir do tensor de Maxwell [12] como:

$$\rho(\theta, t) = \frac{B_r^2(\theta, t)}{2\mu_0} \quad (1)$$

Onde θ e t representam uma determinada posição angular e um instante de tempo, respectivamente.

Portanto, a existência de sub-harmônicas de campo influi diretamente no padrão de harmônicas de pressão radial presentes. É sabido que grande parte dos problemas de vibração em hidrogeradores está relacionada às harmônicas de pressão radial oriundas de sub-harmônicas de campo, e este fato se evidencia quando a resposta mecânica do núcleo é levada em conta, como será abordado na seção seguinte.

Diversos trabalhos sobre o tema foram desenvolvidos levando-se em conta os efeitos do enrolamento fracionário. Walker et Kerruish [1] e Wachta [2] calculam analiticamente as forças através de um modelo de ondas de força magneto motriz e permeância incluindo os efeitos das ranhuras do estator. Knight *et al* [3] e Traxler-Samek *et al* [4] tratam da influência dos enrolamentos amortecedores também através do método analítico de campos rotativos. Traxler-Samek *et al* [5] mostram resultados obtidos por modelos analíticos comparados a medições práticas. Ranlöf et Lundin [6] tratam da saturação magnética de forma equivalente sobre as ondas de permeância no modelo analítico de campos rotativos. Garvey et LeFlem [7] e Roivainen [8] mostram que as forças tangenciais nos dentes podem também ter algum impacto sobre a vibração do núcleo.

Este trabalho busca, através da análise de simulações via MEF (método dos elementos finitos), corroborar com resultados analíticos já conhecidos sobre as forças eletromagnéticas atuantes no núcleo do estator bem como refiná-los, agregando resultados mais fidedignos dada a capacidade do MEF de produzir grandezas locais sobre todo o domínio em estudo. De maneira mais concreta, como refinamento de resultados pode-se citar o exemplo de que os modelos analíticos existentes na literatura sobre o tema [1]-[6] em geral assumem simplificações tais como a de circuito magnético linear (desprezando-se efeitos de saturação magnética ou apenas tratando-os por aproximações lineares) e avaliação apenas da contribuição da componente radial de força.

A estratégia para obtenção dos resultados neste trabalho será, portanto, a construção de um modelo eletromagnético em elementos finitos para uma máquina exemplo, e sobre este modelo a realização de simulações comparativas tais como:

- Cálculo das forças para máquina em vazio e em carga
- Cálculo de forças para circuito magnético linear e saturável
- Cálculo de forças com e sem efeito do enrolamento amortecedor
- Consideração do efeito indireto de forças tangenciais nos dentes
- Cálculo das forças considerando excentricidade estatórica ou rotórica

Alguns conceitos fundamentais são apresentados a seguir para melhor exploração dos resultados.

2.0 - CONCEITOS FUNDAMENTAIS

2.1 Problema Mecânico

Do ponto de vista mecânico e vibracional, o núcleo do estator pode ser avaliado em primeira aproximação como um tubo cilíndrico formado por sua coroa. Esta concepção se justifica pois para as vibrações radiais geradas pelas forças eletromagnéticas ocorrem predominantemente os fenômenos de flexão e/ou alongamento do núcleo, fenômenos para os quais a energia elástica do sistema tem pouca contribuição dos dentes ou das barras inseridas nas ranhuras do estator. Estes dois últimos elementos podem ser vistos então, neste contexto, apenas como massas adicionais ao sistema.

Para esta aproximação demonstra-se que em um núcleo livre no espaço os modos de vibração radial (autovetores do sistema de equações dinâmicas) têm a forma de cossenoides de diversas ordens, ou com diferentes números de nós, como ilustrado a seguir onde m é a ordem do modo [10], [11]. Além de nós na circunferência existem modos também com nós ao longo da direção axial do cilindro, porém nesta hipótese de núcleo livre apenas aqueles axialmente uniformes são importantes para o problema dado que as forças eletromagnéticas são praticamente constantes nesta direção.

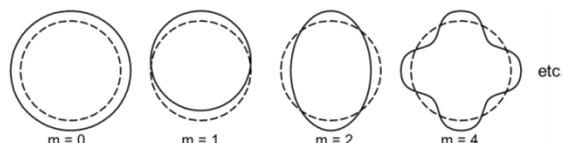


Figura 1 – Modos Naturais de Vibração

Para cada modo associa-se uma frequência natural em geral tanto maior quanto maior for a ordem do modo. Pelo princípio da superposição modal assume-se que as forças de excitação sobre o sistema podem ser decompostas nas formas dos diferentes modos naturais encontrados e a vibração total é dada pela superposição dos efeitos de cada componente de força encontrada atuando unicamente sobre seu modo correspondente.

Desta forma, as avaliações das forças eletromagnéticas ao longo deste trabalho serão sempre feitas em termos de suas contribuições para cada modo supracitado.

2.2 Problema Eletromagnético

De forma simplificada, os modelos analíticos amplamente discutidos na literatura para avaliação das forças radiais atuantes no núcleo do estator utilizam-se da expressão (1) a partir da distribuição de campo magnético obtida via ondas de permeância e força magneto motriz. Nesta abordagem o campo magnético é representado pela multiplicação de uma função de força magneto motriz (FMM) por uma função de permeância magnética (λ):

$$B_r(\theta, t) = FMM(\theta, t) \cdot \lambda(\theta, t) \quad (2)$$

O campo pode ainda ser representado por sua série de Fourier equivalente. Vale destacar que, devido ao fato de $B_r(\theta, t)$ ser uma função de duas variáveis, sua representação em série também se dá em duas dimensões sob os índices k e l . A equação (3) abaixo permite a interpretação do campo magnético como um conjunto de ondas que trafegam pelo entreferro com velocidades $v_{k,l} = \frac{2\pi}{k} \cdot l \cdot f_n$ (onde f_n é a frequência nominal da rede) e comprimento de onda de $\frac{2\pi}{k}$ (ou k repetições do período angular ao longo de toda a circunferência da máquina):

$$B_r(\theta, t) = \sum_{k,l} B_{k,l} \cdot \cos(k \cdot \theta + l \cdot 2\pi \cdot f_n + \varphi_{B_{k,l}}) \quad (3)$$

Onde $B_{k,l}$ e $\varphi_{B_{k,l}}$ são, respectivamente, a amplitude e a fase das harmônicas de ordens espacial k e temporal l .

Pode-se ainda interpretar FMM como a superposição das contribuições das correntes do enrolamento do estator (FMM^e), enrolamento de campo (FMM^c) e enrolamento amortecedor (FMM^a). As duas primeiras têm equacionamento imediato uma vez que as correntes nestes circuitos são conhecidas. Todavia, as correntes que circulam nos amortecedores são induzidas por efeitos internos da máquina e precisam ser calculadas no próprio modelo. Uma possível estratégia é a formulação de uma matriz de impedâncias próprias e mútuas entre todas as barras amortecedoras e os circuitos que se fizerem necessários, acoplado-se então as tensões e correntes de interesse e as resolvendo na forma de um sistema linear [3],[4].

$$FMM(\theta, t) = FMM^e(\theta, t) + FMM^c(\theta, t) + FMM^a(\theta, t) \quad (4)$$

De forma geral, o que se pode esperar é que a contribuição do enrolamento amortecedor tende a atenuar as harmônicas de campo que não são estacionárias em relação a ele, porém harmônicas adicionais também podem surgir.

Por fim, a partir de (1) e (3) e recordando-se da relação trigonométrica expressa a seguir em (6), pode-se chegar a uma representação da distribuição de pressão magnética radial também na forma de ondas trafegantes:

$$\rho_r(\theta, t) = \frac{1}{2\mu_0} \cdot \left(\sum_{k,l} B_{k,l} \cdot \cos(k \cdot \theta + l \cdot 2\pi \cdot f_n + \varphi_{B_{k,l}}) \right) \cdot \left(\sum_{k,l} B_{k,l} \cdot \cos(k \cdot \theta + l \cdot 2\pi \cdot f_n + \varphi_{B_{k,l}}) \right) \quad (5)$$

$$\cos(a) \cos(b) = \frac{1}{2} \cos(a + b) + \frac{1}{2} \cos(a - b) \quad (6)$$

$$\rho_r(\theta, t) = \sum_{k,l} \rho_{k,l} \cdot \cos(k \cdot \theta + l \cdot 2\pi \cdot f_n + \varphi_{\rho_{k,l}}) \quad (7)$$

Cada multiplicação cruzada entre duas harmônicas de campo produz duas harmônicas de pressão conforme (6), compondo o espectro total de ρ_r . Em termos de amplitude, as maiores harmônicas de pressão serão aquelas produzidas pela componente fundamental de campo, em seguida virão aquelas provenientes da combinação entre componente fundamental e outras harmônicas de campo e por fim aquelas provenientes da combinação das harmônicas não fundamentais de campo entre si. Note que nesta representação dada por (7) as formas das harmônicas de pressão magnética coincidem com os modos naturais do núcleo descritos em 2.1, permitindo então a análise por superposição modal.

A partir do equacionamento proposto fica então evidenciada a influência de um enrolamento estatórico fracionário sobre as harmônicas existentes no espectro de ρ_r . Como regra básica pode-se dizer que, para um enrolamento com número de ranhuras por polo e por fase $q = N/D$ (onde N e D são numerador e denominador da fração irredutível que representa q), este espectro é formado por harmônicas de ordens temporais múltiplas do dobro da frequência f_n e de ordens espaciais múltiplas de $2p/D$, sendo $2p$ o número de polos da máquina:

$$l = 0, \quad 2, \quad 4 \quad \dots \quad (8)$$

$$k = 0, \quad 2p/D, \quad 2 \cdot 2p/D, \quad 3 \cdot 2p/D \quad \dots$$

Para uma máquina com enrolamento não fracionário, D é igual a 1 e portanto os modos excitados pelas forças eletromagnéticas são apenas aqueles múltiplos de $2p$. Como hidrogeradores costumam ter elevado número de polos, sabe-se por experiência que as frequências naturais dos modos excitados neste caso costumam ser muito superiores aos típicos $2f_n$ das ondas de pressão com maiores amplitudes, de tal forma que a vibração resultante tende a ter valores não preocupantes. Para uma máquina com enrolamento fracionário, entretanto, modos de ordens mais baixas passam a ser excitados uma vez que $D > 1$ (oriundos das sub-harmônicas de campo magnético), os quais tendem a ter frequências naturais mais baixas e que podem se aproximar das frequências de excitação. Este fato justifica as particularidades mencionadas na seção 1.0 - INTRODUÇÃO sobre as máquinas com enrolamento fracionário no que tange a vibração radial do núcleo.

3.0 - MODELO EM ELEMENTOS FINITOS

Os dados principais do hidrogerador a ser simulado pelo método dos elementos finitos encontram-se na Tabela 1. O software utilizado é o Ansys 16.2 EMAG utilizando elementos 2D de segunda ordem.

Tabela 1 - Dados Principais do Hidrogerador Simulado

Potência nominal do gerador	190 MVA
Tensão nominal	13.8 kV
Fator de potência nominal (sobre-excitado)	0.95
Frequência da rede	60 Hz
Rotação nominal	100 RPM
Número de polos	72
Diâmetro externo do núcleo do gerador	11000 mm
Entreferro	17.5 mm
Número de ranhuras	405
Nº de ranhuras por polo e por fase	1 7/8

No modelo foi representado apenas um setor angular correspondente a 8 dos 72 polos e aplicada condição de contorno de simetria par às extremidades laterais deste setor, devido ao padrão de repetibilidade do enrolamento fracionário após o mínimo de 8 passos polares. As figuras a seguir ilustram o modelo obtido.

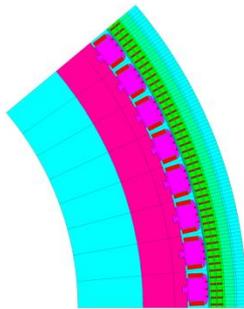


Figura 2 - Setor Angular Representado

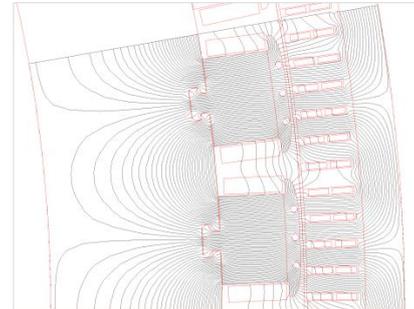


Figura 3 - Linhas de Campo para Condições Nominais

Antes das análises sobre as forças propriamente ditas, alguns cálculos estáticos preliminares foram realizados a fim de se obter o ponto de operação para as condições nominais. Para tanto, iterativas simulações foram realizadas alterando-se corrente de excitação e ângulo de carga até que potência e tensão no estator convergissem para valores próximos dos nominais. Isso foi realizado para que o campo fundamental do entreferro estivesse consistente com o modelo e com as condições de operação desejadas, tornado assim os resultados para as forças mais acurados já que estas dependem diretamente do campo como visto em (1) e discutido na seção 2.2.

Após isso, simulações passo a passo no tempo foram realizadas considerando-se o movimento do rotor e as forças magnéticas atuantes sobre cada dente do estator foram computadas através do método do trabalho virtual [12]. Posteriormente estes resultados serão pós-processados para decomposição em série de ondas de pressão atuantes sobre o diâmetro interno da coroa do estator, que do ponto de vista mecânico representa a estrutura fundamental de resistência à flexão provocada pelas forças radiais.

Para as análises que buscam levar em consideração o efeito das barras amortecedoras, estas são acopladas a um circuito externo de impedâncias que representam suas conexões e as simulações são levadas até que as componentes CC das correntes induzidas tenham descaído suficientemente. Quando se busca suprimir o efeito do amortecedor o material das barras é simplesmente substituído por ar. A comparação entre circuito magnético ideal ou saturável é feita considerando-se um valor de permeabilidade muito alto ou a curva BH conhecida do material.

Para os estudos sobre excentricidade dois casos serão levados em conta. No primeiro será imposta uma excentricidade ao estator (muitas vezes chamada de excentricidade estática) equivalente a 10% do entreferro da máquina, fazendo com que o rotor gire sempre mais próximo de uma determinada região do estator. No segundo caso será imposta uma excentricidade também equivalente a 10% do entreferro, porém desta vez ao rotor (muitas vezes chamada de excentricidade dinâmica), fazendo com que este gire mais próximo do estator em regiões que se alternam durante uma rotação completa. A figura a seguir mostra estes conceitos ilustrando o estator como o círculo azul externo, o rotor como o círculo vermelho interno e o centro de rotação como o ponto preto.



Figura 4 - a) Excentricidade do Estator b) Excentricidade do Rotor

Em ambos os casos foi necessário se obter um modelo completo com todos os 72 polos da máquina, e tratando as conexões dos circuitos paralelos do estator da mesma forma feita para o enrolamento amortecedor, já que correntes circulantes devem surgir em função das excentricidades.

4.0 - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Para as simulações a seguir, seções 4.1 e 4.2, as ondas de pressão foram obtidas através de decomposição de Fourier numérica em duas dimensões (θ e t) considerando-se apenas a componente de força radial em cada dente e assumindo que esta seja distribuída como uma pressão constante sobre a superfície interna da coroa dentro do intervalo angular representado por este dente. Na seção 4.3 a influência da componente tangencial de força é discutida. Na seção 4.4 o efeito da excentricidade no estator ou rotor é discutido.

4.1 Influência das Correntes de Campo e de Armadura

Nesta análise serão suprimidos os efeitos dos enrolamentos amortecedores e considerados materiais ferromagnéticos ideais. As tabelas 2 e 3 mostram as amplitudes das ondas de pressão obtidas em N/m^2 considerando a máquina operando em vazio e em carga nominal. Cada linha corresponde a uma ordem espacial k e cada coluna a uma frequência temporal (em Hz), sendo que frequências negativas indicam ondas que giram no mesmo sentido de rotação da máquina enquanto que frequências positivas indicam sentido oposto. Estão destacadas em verde apenas as harmônicas com amplitudes superiores a $600N/m^2$.

Tabela 2 - Amplitudes das Harmônicas de Pressão (N/m^2) para Máquina em Vazio

k \ freq.(Hz)	-840	-720	-600	-480	-360	-240	-120	0	120	240	360	480	600	720	840
0	0	0	0	0	0	0	0	236434	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	113	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	587	0	0
54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
63	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
72	0	0	0	0	0	0	165036	0	0	0	0	0	0	0	0
81	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
99	104	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
108	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
117	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	419	0	0	0
126	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
135	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
144	0	0	0	0	0	39733	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 3 - Amplitudes das Harmônicas de Pressão (N/m^2) para Máquina em Carga Nominal

k \ freq.(Hz)	-840	-720	-600	-480	-360	-240	-120	0	120	240	360	480	600	720	840
0	0	33	0	0	389	0	0	295635	0	0	389	0	0	33	0
9	0	0	36	0	0	693	0	0	10321	1	8	25	0	0	0
18	1	0	0	12	0	2	21703	0	5	872	0	0	56	0	0
27	0	551	0	0	275	0	0	48321	1	0	343	2	0	29	0
36	0	0	18	0	0	289	0	0	1988	0	0	36	0	0	1
45	2	0	1	70	0	1	44025	0	0	288	0	0	1024	0	0
54	0	25	0	0	415	1	0	20535	0	1	119	0	0	13	0
63	0	0	7	4	0	1054	0	1	3398	0	0	15	0	0	3
72	12	0	0	182	0	1	262908	0	0	2213	0	0	24	0	0
81	0	8	0	0	230	0	0	8977	0	7	98	0	0	3	1
90	0	0	7	0	1	2947	0	15	5968	0	0	116	0	0	3
99	319	0	0	81	0	0	16228	1	0	601	9	0	20	0	0
108	0	9	0	0	179	0	0	1936	1	1	117	0	0	4	0
117	0	1	17	0	0	7287	0	1	3680	0	0	2361	0	0	4
126	11	0	0	100	0	0	1385	0	0	159	0	0	13	0	0
135	0	4	1	0	666	0	2	3246	0	0	176	0	0	9	0
144	0	0	24	0	0	86084	0	0	12125	1	0	455	0	0	1

Pode-se notar que:

- As harmônicas de pressão para máquina em vazio (sob influência apenas do enrolamento de campo) têm ordens espaciais k múltiplas do número de polos
- Com a máquina em carga (com corrente no estator) novas harmônicas de pressão aparecem, com ordens espaciais múltiplas de $72/8=9$ conforme equação (8)
- Embora sejam mais relevantes para o problema de vibração (conforme discutido na seção 2.2), as novas harmônicas que aparecem com a máquina em carga têm amplitudes consideravelmente menores que aquelas que já apareciam com a máquina em vazio. A exemplo disso pode-se constatar que a harmônica com $k = 45$ e freq.=120Hz, que é a maior harmônica dentre aquelas que só aparecem em carga, tem amplitude equivalente a $44025/262908=17\%$ da harmônica com $k = 72$ e freq.=120Hz. Este fato apresenta-se então como um fator limitante para a acurácia das amplitudes destas novas harmônicas, obtidas por decomposição numérica em série de Fourier

4.2 Influência do Enrolamento Amortecedor e Saturação Magnética

Nesta análise a máquina encontra-se em carga nominal e os efeitos dos enrolamentos amortecedores estão contemplados. A Tabela 4 a seguir apresenta amplitudes relativas aos valores da Tabela 3 para duas condições: considerando-se circuito magnético ideal e saturado. Foram apresentados valores apenas para casos com amplitudes absolutas maiores que 600N/m^2 em pelo menos uma das condições comparadas, limitando-se à frequência de 360Hz e ordem $k \leq 72$ (casos mais relevantes para o problema de vibração).

Tabela 4 - Amplitudes Relativas (p.u.) das Harmônicas de Pressão com Efeito Amortecedor

k	freq.(Hz)	Circuito Magnético Ideal						Circuito Magnético Saturado							
		-360	-240	-120	0	120	240	360	-360	-240	-120	0	120	240	360
0	-	-	-	-	0.994	-	-	-	-	-	0.971	-	-	-	-
9	-	-	1.689	-	-	0.648	-	-	0.617	-	-	0.348	-	-	-
18	-	-	-	0.280	-	-	1.350	-	-	0.114	-	-	0.827	-	-
27	-	-	-	-	0.230	-	-	-	-	-	0.121	-	-	-	-
36	-	-	2.239	-	-	0.609	-	-	-	-	-	0.610	-	-	-
45	-	-	-	0.109	-	-	-	-	-	0.034	-	-	-	-	-
54	-	-	-	-	0.085	-	-	-	-	-	0.092	-	-	-	-
63	-	-	1.342	-	-	0.748	-	-	0.520	-	-	0.507	-	-	-
72	-	-	-	0.996	-	-	1.004	-	-	0.838	-	-	1.045	-	-

Pode-se notar que:

- O enrolamento amortecedor apresenta uma tendência a reduzir a amplitude das harmônicas de pressão, porém existem casos em que seu efeito pode ser amplificador (i.e. $k = 9$ e freq.=240Hz para circuito magnético ideal, onde a harmônica em questão tem amplitude 69% maior que no caso sem efeito amortecedor)
- O efeito da saturação magnética tende a reduzir a amplitude das harmônicas de pressão. A título de exemplo, para $k = 9$ e freq.=120Hz esta redução chega a $1-0.348/0.648=46\%$, evidenciando a importância da saturação magnética para o problema

4.3 Influência das Forças Tangenciais nos Dentes do Estator

As forças magnéticas tangenciais atuantes nos dentes do estator e responsáveis pela transmissão de torque podem influenciar a vibração radial do núcleo uma vez produzem reações com componente radial na coroa do estator. Isso pode ser ilustrado na figura a seguir que representa o equilíbrio de forças em um dente:

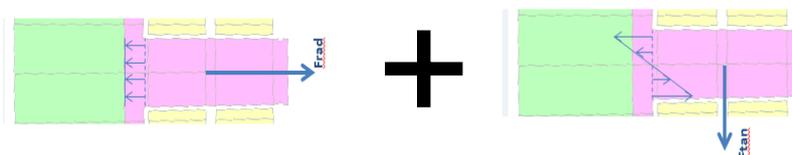


Figura 5 - Influência das Forças Tangenciais nos Dentes

Devido ao fato de o enrolamento estatórico ser fracionário, as reações radiais provocadas pelas forças tangenciais formam um padrão com repetição apenas a cada 8 polos, e com isso podem contribuir para as harmônicas de ordens espaciais mais baixas.

Na Tabela 5 a seguir encontram-se as amplitudes relativas das harmônicas de pressão comparando-se os valores do caso anterior para carga nominal, circuito magnético saturado, e com efeito amortecedor contemplado, com os valores para as mesmas condições, porém incluindo as reações das forças tangenciais. Foram apresentados

valores apenas para casos com amplitudes absolutas maiores que 600N/m² em pelo menos uma das condições comparadas, limitando-se à frequência de 360Hz e ordem $k \leq 72$. Tais reações das forças tangenciais foram calculadas com base nos torques magnéticos em cada dente com relação a sua base (obtidos via trabalho virtual) e assumindo-se as hipóteses de que:

- A rigidez do dente é suficientemente alta para impedir qualquer deformação elástica
- O dente movimenta-se apenas na direção radial, portanto com aceleração angular nula em relação a sua base
- A presença do enrolamento estatórico é desprezada

Nestas hipóteses, o torque eletromagnético T_{dente} obtido no modelo 2D (portanto referente a 1m de comprimento axial da máquina) deve ser completamente equilibrado pelas forças radiais de reação. Roivainen [8] apresenta em seu trabalho uma formulação que aproxima as forças de reação na coroa por um binário de forças radiais equivalentes. Neste trabalho, porém, será assumindo que estas reações se dão na forma de distribuição de pressão que varia linearmente de $-\rho_{max}^t$ a $+\rho_{max}^t$ ao longo da base do dente, sendo:

$$\rho_{max}^t = \frac{6 \cdot T_{dente}}{b^2} \quad (9)$$

Onde b representa a largura do dente.

Para uma consideração precisa deste padrão linear assumido para a pressão ao longo da base do dente, foi empregada integração analítica durante a decomposição em série de Fourier 2D para a dimensão θ (para a dimensão t continuou-se empregando integração numérica).

Tabela 5 - Amplitudes Relativas (p.u.) das Harmônicas de Pressão com Efeito das Forças Tangenciais

k	freq.(Hz)	freq.(Hz)						
		-360	-240	-120	0	120	240	360
0	-	-	-	-	0.942	-	-	-
9	-	-	-	-	-	1.169	-	-
18	-	-	-	0.798	-	-	1.132	-
27	-	-	-	-	1.124	-	-	-
36	-	-	-	-	-	1.697	-	-
45	-	-	-	0.956	-	-	1.498	-
54	-	-	-	-	0.975	-	-	-
63	-	-	-	-	-	2.129	-	-
72	-	-	-	0.608	-	-	2.545	-

Pode-se observar que o efeito das forças tangenciais podem tanto amplificar quanto atenuar uma harmônica de pressão radial. A exemplo disso verifica-se que para a harmônica $k = 9$ e freq.=120Hz há um aumento de 17% enquanto que para $k = 18$ e freq.=-120Hz há uma redução de 20% nas amplitudes.

4.4 Efeito da Excentricidade

As simulações para os dois tipos de excentricidade considerados foram tomadas assumindo-se circuito magnético saturável e sob influência de correntes circulantes tanto no enrolamento amortecedor quanto nos circuitos paralelos do estator. Primeiramente, são apresentados na Tabela 6 valores relativos para as amplitudes das harmônicas de pressão comparadas às do caso anterior semelhante com condições ideais de concentricidade. Para uma análise mais global, a influência das forças tangenciais nos dentes não é levada em conta neste primeiro momento. Como feito anteriormente, foram apresentados valores apenas para casos com amplitudes maiores que 600N/m².

Tabela 6 - Amplitudes Relativas (p.u.) das Harmônicas de Pressão com Efeito da Excentricidade

k	freq.(Hz)	Excentricidade no Estator							Excentricidade no Rotor						
		-360	-240	-120	0	120	240	360	-360	-240	-120	0	120	240	360
0	-	-	-	-	0.999	-	-	-	-	-	-	1.000	-	-	-
9	-	-	-	-	-	0.990	-	-	-	-	-	-	0.991	-	-
18	-	-	-	0.961	-	-	1.131	-	-	-	0.962	-	-	1.134	-
27	-	-	-	-	0.998	-	-	-	-	-	-	0.997	-	-	-
36	-	-	-	-	-	0.996	-	-	-	-	-	-	0.997	-	-
45	-	-	-	0.873	-	-	1.130	-	-	-	0.875	-	-	1.138	-
54	-	-	-	-	1.109	-	-	-	-	-	-	1.110	-	-	-
63	-	-	-	-	-	1.023	-	-	-	-	-	-	1.023	-	-
72	-	-	-	0.994	-	-	0.897	-	-	-	0.994	-	-	0.900	-

A seguir são apresentadas na Tabela 7 novas harmônicas de pressão, com ordens espaciais e temporais que só são possíveis devido à excentricidade. Os valores apresentados estão em N/m² ainda sem levar em consideração a influência das forças tangenciais nos dentes e uma coluna com variação percentual representa o efeito destas forças.

Tabela 7 - Novas Harmônicas de Pressão Provenientes de Excentricidade

Excentricidade no Estator				Excentricidade no Rotor			
k	Freq. (Hz)	Amplitude (N/m ²)	Variação com forças tangenciais (%)	k	Freq. (Hz)	Amplitude (N/m ²)	Variação com forças tangenciais (%)
1	0	11725	-8.6	1	-1.667	12461	-8.4
2	0	2925	6.3	2	1.667	3034	7.2
4	0	1490	6.4	4	-1.667	1685	6.5
5	0	980	5.5	5	1.667	1042	6.8
7	0	752	9.6	7	-1.667	817	10.0
67	-120	667	30.3	67	-121.667	670	36.6
68	-120	543	16.1	68	-118.333	674	23.3
70	-120	2405	11.5	70	-121.667	2218	22.0
71	-120	2732	-13.5	71	-118.333	2852	-41.0

A partir destas duas tabelas pode-se notar que:

- A presença de excentricidade no rotor ou estator afeta apenas marginalmente as amplitudes das forças que já se observavam em condições ideais de concentricidade (as variações são menores que 5% na maioria dos casos e não ultrapassam 15% em nenhum caso)

- Para ambos os casos de excentricidade as novas harmônicas que surgem têm mesmas ordens espaciais, porém diferentes frequências. No caso de excentricidade no estator as frequências são nulas para os k 's mais baixos (próximos a 1) e -120Hz para os k 's mais altos (próximos a 72). No caso de excentricidade no rotor estas mesmas frequências aparecem afetadas por adicionais ± 1.667 Hz. Vale notar que 1.667Hz corresponde à frequência de rotação da máquina (100 RPM)

- Como já discutido anteriormente, apenas harmônicas com ordens k baixas apresentam maiores riscos de problemas de vibração nesta faixa de frequências observadas. Como consequência, conclui-se que apenas o caso de excentricidade no rotor apresenta potenciais riscos de problema de vibração, já que as frequências no caso de excentricidade no estator são nulas para tais ordens espaciais

Estes resultados poderiam já ser previstos analiticamente através da equação (1) considerando-se a simplificação de que as excentricidades afetam a distribuição de campo como uma modulação da forma representada em (10).

$$B_r'(\theta, t) = B_r(\theta, t) \cdot [1 + e \cdot \cos(\theta - K \cdot 2\pi f_{rot} \cdot t)] \quad (10)$$

$$\rho_r'(\theta, t) \approx \rho_r(\theta, t) \cdot [1 + 2 \cdot e \cdot \cos(\theta - K \cdot 2\pi f_{rot} \cdot t)] \quad (11)$$

Onde $B_r'(\theta, t)$ e $\rho_r'(\theta, t)$ são as novas distribuições de campo e pressão, e é a excentricidade percentual e f_{rot} a frequência de rotação. K é uma constante binária que representa o tipo de excentricidade, assumindo valor 0 para excentricidade estatórica e 1 para rotórica. Da relação trigonométrica vista em (6) chega-se que o novo espectro de pressão terá as mesmas harmônicas que no caso sem excentricidade, mas com harmônicas adicionais de ordens k afetadas por ± 1 e frequências afetadas por $\pm K \cdot f_{rot}$. Como as harmônicas de maior amplitude ocorrem para $k = 0$ / freq.=0Hz e $k = 72$ / freq.=-120Hz, é de se esperar que as novas harmônicas de pressão oriundas da excentricidade sejam predominantemente aquelas com $k = \pm 1$ / freq.= $\pm K \cdot f_{rot}$ e $k = 72 \pm 1$ / freq.= $-120 \pm K \cdot f_{rot}$. Contudo, vale lembrar que o modelo via MEF considera efeitos de saturação e amortecimento das correntes induzidas, o que justifica o aparecimento de novas harmônicas e divergências nas amplitudes que seriam previstas por (11).

5.0 - CONCLUSÃO

Este artigo apresentou resultados de simulações via método dos elementos finitos para as forças eletromagnéticas precursoras de vibração radial do núcleo do estator. Foi possível identificar a influência dos campos gerados pelos enrolamentos de campo e do estator no espectro de pressões radiais durante operação da máquina, com ênfase dada às harmônicas decorrentes do enrolamento estatórico fracionário.

A participação do enrolamento amortecedor na atenuação ou amplificação das harmônicas de pressão também foi explorada, bem como a relevância da saturação magnética para o problema, que chegou a alterar em 46% os resultados de alguns casos. Um método para consideração da influência das forças tangenciais nos dentes sobre a vibração radial do estator foi proposto e, por este método, as amplitudes de algumas harmônicas de pressão chegaram a se alterar consideravelmente, evidenciando a importância de tal consideração.

Por fim, simulações considerando excentricidades do estator ou rotor foram tomadas evidenciando que apenas esta última pode contribuir consideravelmente para a vibração do núcleo em hidrogeradores de alta polaridade, gerando novas harmônicas com baixas frequências.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] WALKER, J. H.; KERRUISH, N. Open-circuit noise in synchronous machines. **Proceedings of the IEE-Part A: Power Engineering**, v. 107, n. 36, p. 505-512, 1960.
- [2] WACHTA, B. Influence of stator slots on the development of noise-generating magnetic force waves. **Siemens Forschungs und Entwicklungsberichte**, v. 10, p. 289-298, 1981.
- [3] KNIGHT, A. M.; KARMAKER, H.; WEEBER, K. Use of a permeance model to predict force harmonic components and damper winding effects in salient-pole synchronous machines. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 17, n. 4, p. 478-484, 2002.
- [4] TRAXLER-SAMEK, G.; SCHWERY, A.; SCHMIDT, E. Analytic calculation of the voltage shape of salient pole synchronous generators including damper winding and saturation effects. **COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering**, v. 22, n. 4, p. 1126-1141, 2003.
- [5] TRAXLER-SAMEK, G.; LUGAND, T.; UEMORI, M. Parasitic forces in large synchronous machines considering tooth ripple effects. In: **Electrical Machines (ICEM), 2010 XIX International Conference on**. IEEE. p. 1-6, 2010.
- [6] RANLÖF, M.; LUNDIN, U. The rotating field method applied to damper loss calculation in large hydrogenerators. In: **Electrical Machines (ICEM), 2010 XIX International Conference on**. IEEE. p. 1-6, 2010.
- [7] GARVEY, S. D.; LE FLEM, G. D. Tangential forces matter. **Proceedings of Ninth International Conference on Electrical Machines and Drives**, Publ. No. 468, p. 174-178, 1999.
- [8] ROIVAINEN, J. Unit-wave response-bases modeling of electromechanical noise and vibration of electrical machines, Ph.D Dissertation, Helsinki University of Technology, 2009.
- [9] VERMA, S. P.; BALAN, A. Determination of radial-forces in relation to noise and vibration problems of squirrel-cage induction motors. **IEEE transactions on energy conversion**, v. 9, n. 2, p. 404-412, 1994.
- [10] ARNOLD, R. N.; WARBURTON, G. B. Flexural vibrations of the walls of thin cylindrical shells having freely supported ends. In: **Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**. The Royal Society. p. 238-256, 1949.
- [11] WHITE, J. C. The flexural vibrations of thin laminated cylinders. **Journal of Engineering for Industry**, v. 83, n. 4, p. 397-402, 1961.
- [12] LOWTHER, D. A.; SILVESTER, P. P. **Computer-aided design in magnetics**. Springer Science & Business Media, 1986.
- [13] BASTOS, J. P. A. **Eletromagnetismo e cálculo de campos**. Ed. da UFSC, 1989.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



(1) **Eng. Allan de Barros**, nascido em Osasco - SP em 1992. Graduado em Engenharia Elétrica pela Escola Politécnica da USP – SP em 2015. Atualmente trabalha no departamento de projeto eletromagnético de hidrogeradores na Voith Hydro.

(2) **Eng. Dirk Emmrich**, nascido em Halle/Saale, Alemanha, em 1983. Graduado como Dipl.-Ing. em mecânica pela Technische Universität Dresden, Alemanha, em 2009. Atualmente trabalha no departamento de métodos e ciência de hidrogeradores na Voith Hydro com foco em simulações de campos eletromagnéticos.

(3) **Prof. Dr. Silvio Ikuyo Nabeta**, nascido em São Paulo, SP, em 1960. Graduação e Mestrado pela Escola Politécnica da USP (EPUSP) em 1983 e 1990, respectivamente, e Doutorado pelo INPG-Institut National Polytechnique de Grenoble em 1994. Atuou como engenheiro de projetos de máquinas elétricas nas empresas Bardella- Borriello Eletromecânica, Engesa Elétrica, Emhart do Brasil e como pesquisador no IPT-Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Atualmente é Professor Titular do PEA-Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da EPUSP.

(4) **Eng. Fernando Hiroyuki Hamaji**, nascido em São Paulo - SP em 1984. Graduado em Engenharia Mecânica pela FMU-SP e Faculdade de Tecnologia de São Paulo – SP em 2007. Atualmente trabalha no departamento de planejamento de O&M da EDP - Energias do Brasil.