



V SBQEE

Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica

17 a 20 de Agosto de 2003

Aracaju – Sergipe – Brasil



Código: AJU 03 091

Tópico: Modelagens e Simulações

COMPORTAMENTO DE GERADORES SÍNCRONOS TRIFÁSICOS ALIMENTANDO CARGAS NÃO LINEARES E DESEQUILIBRADAS. UMA ABORDAGEM ANALÍTICA E EXPERIMENTAL

Antônio Carlos Delaiba *

Rogério Rodrigues de Oliveira

Charles A. Lenza Rocha

Universidade Federal de Uberlândia - UFU

RESUMO

Este artigo tem por objetivo apresentar e discutir os resultados elétricos e mecânicos obtidos a partir da modelagem de geradores síncronos de pólos salientes, suprimindo cargas desequilibradas e não lineares. A técnica empregada é no domínio do tempo. As equações eletromagnéticas e mecânicas do gerador e o circuito equivalente externo são resolvidos simultaneamente, tomando-se como base o pacote computacional conhecido como "SABER". As formas de onda para as diferentes correntes e tensões nas diversas partes da máquina e os aspectos mecânicos, são apresentadas e discutidas. Os resultados obtidos na simulação computacional são comparados com aqueles oriundos dos ensaios experimentais.

PALAVRAS-CHAVE

Geradores Síncronos, Desequilíbrios, Harmônicos, Modelagem, Qualidade de Energia.

1.0 - INTRODUÇÃO

A qualidade do produto energia elétrica, como o seu consumo, tem sido foco de preocupações freqüentes frente aos fenômenos de qualidade que comprometem a eficiência do processo.

Desta maneira vários estudos, pesquisas e desenvolvimentos têm sido realizados através de grupos de trabalho na busca contínua para o

entendimento e a proposição de soluções para os problemas associados à Qualidade da Energia Elétrica.

Neste contexto e como parte integrante deste universo de problemas, encontram-se as cargas não lineares e os desequilíbrios de tensão, os quais merecem especial atenção na medida em que estão presentes em todos os níveis do sistema elétrico.

Em relação à operação de geradores síncronos sob condições não senoidais ou desequilibradas pode-se citar, com maior relevância, as referências [1]-[3].

Desta forma podem ser encontrados alguns trabalhos a respeito de geradores síncronos alimentando cargas não lineares ou desequilibradas, devido à relevância do tema no cenário atual. O que acontece, no entanto, é que na prática encontramos situações em que estes dois tipos de cargas se encontram simultaneamente no sistema, necessitando de um estudo onde ambas sejam alimentadas pelo mesmo gerador.

Finalmente, cabe destacar que o avanço da cogeração, especialmente em setores de pequeno e médio porte, está se tornando uma realidade cada vez mais comum, o que aumentará o número de geradores, os quais estarão mais próximos das fontes de desequilíbrios e de harmônicos e portanto, podem sofrer esses efeitos de uma forma mais acentuada.

Dentro deste contexto, este trabalho tem por objetivo apresentar e discutir os resultados elétricos e mecânicos obtidos a partir da modelagem de geradores síncronos trifásicos de pólos salientes, suprimindo um sistema elétrico contendo cargas não lineares e desequilibradas. A técnica empregada é no domínio do tempo. As equações eletromagnéticas e mecânicas do gerador e o circuito equivalente externo são resolvidas simultaneamente, tomando-se como base o pacote computacional conhecido como SABER. As formas de onda para as diferentes correntes e tensões nas diversas partes da máquina e os aspectos mecânicos são apresentados e discutidos.

Desta forma, buscando uma validação da metodologia utilizada serão apresentados e discutidos resultados práticos, utilizando um protótipo de 2 kVA alimentando cargas não lineares ou desequilibradas. Esta pequena potência justifica-se pela possibilidade de uma comparação entre os resultados simulados e aqueles obtidos experimentalmente. Complementando essas discussões, será simulado um gerador de 25MVA sendo possível a apresentação de uma comparação qualitativa e quantitativa das características elétricas e mecânicas do gerador síncrono, tomando-se como base, as distorções harmônicas e os desequilíbrios presentes no interior da máquina.

2.0 - MODELO MATEMÁTICO

De acordo com procedimentos clássicos, a modelagem de um gerador obedece à seguinte formulação [4]:

$$[V] = -[R][I] - \frac{d[\lambda]}{dt} \quad (1)$$

$$[\lambda] = [L][I] \quad (2)$$

onde:

$[V]$, $[I]$, $[\lambda]$: matrizes coluna das tensões, correntes e fluxos concatenados das fases "a, b, c" do estator, da excitação "R" do rotor e das componentes "D e Q" do enrolamento amortecedor, respectivamente. $[R]$: é a matriz diagonal das resistências dos enrolamentos "a, b, c, R, D, Q".

Detalhes sobre a matriz $[L]$ podem ser encontrados em [4]

O conjugado eletromagnético é obtido por [4]:

$$T = \frac{p}{2} \sum_i \sum_j i_i i_j \frac{dL_{ij}}{d\theta} \quad (3)$$

onde i_i e i_j são as correntes nos enrolamentos i e j , respectivamente, e i e j assumem os índices a, b, c, R, D, Q.

A equação diferencial mecânica pode ser escrita como:

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} = T_T - T \quad (4)$$

onde T_T é o conjugado do acionamento primário. Um estudo detalhado sobre esta modelagem encontra-se em [1] e [4].

3.0 - VALIDAÇÃO DO PROGRAMA

Com o objetivo de validar o modelo proposto, será apresentada uma análise comparativa, entre os resultados obtidos experimentalmente e através das simulações computacionais. A investigação experimental utiliza um protótipo de 2 kVA, cujas características nominais estão apresentadas na segunda coluna da Tabela 1, onde indica-se também os dados de uma máquina de grande porte de 25 MVA..

Tabela 1. Parâmetros nominais dos geradores

Parâmetros	Valores – 2 kVA	Valores – 25 MVA
S_{nom} (MVA)	0,002	25
V_{nom} (kV)	0,230	13.8
I_r (A)	0,346	110
f (Hz)	60	60
p	4	2
X_d (pu)	1,225	1,13239
X_q (pu)	1,133	1,11239
X'_d (pu)	0,248	0,2159
X''_d (pu)	0,184	0,1833
X''_q (pu)	0,243	0,18
X_l (pu)	0.15	0,1727
τ'_{d0} (s)	0,186	6,48
τ''_d (s)	0.044	0,00001
τ''_{q0} (s)	0,017	0,00003
R_s (pu)	0.0631	$1,4 \times 10^{-3}$

3.1 Gerador Alimentando uma Carga Desequilibrada

A Figura 1 mostra o sistema elétrico utilizado tanto para as simulações quanto para as análises experimentais. No caso empregou-se um gerador alimentando um carga linear desequilibrada. O desequilíbrio provocado pela carga foi de 2%.

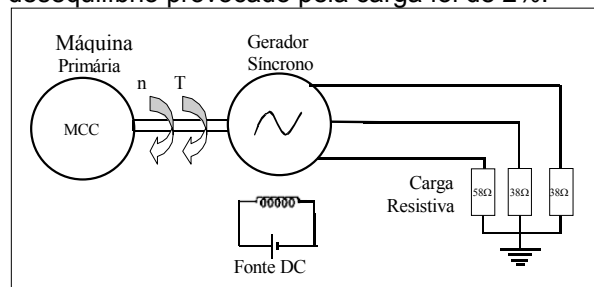


Figura 1 – Arranjo físico utilizado

Uma vez realizadas as montagens experimentais, várias medições em regime permanente foram processadas. As variáveis observadas e descritas foram as formas de onda da tensão e da corrente nos enrolamentos de armadura. Estes resultados estão ilustrados nas figuras 2 a 5. A escala de tempo utilizada para as formas de onda experimentais é de 5 ms/div.

Verifica-se que as formas de onda da tensão e/ou corrente de linha nos terminais do gerador são compatíveis com as previsões teóricas e com as medições realizadas. A título de comparação, a escala de tensão é de 100V/div, enquanto que a de corrente é de 2 A/div. Nessas condições, observa-se uma boa similaridade entre os valores encontrados.

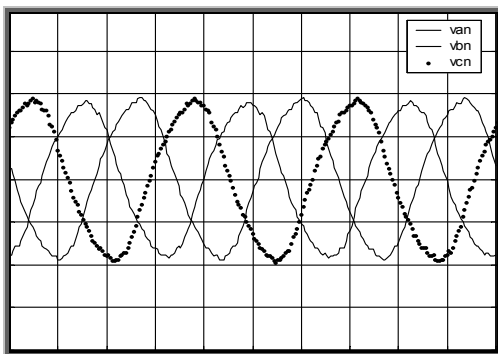


Figura 2 – Forma de onda da tensão de fase na armadura – experimental

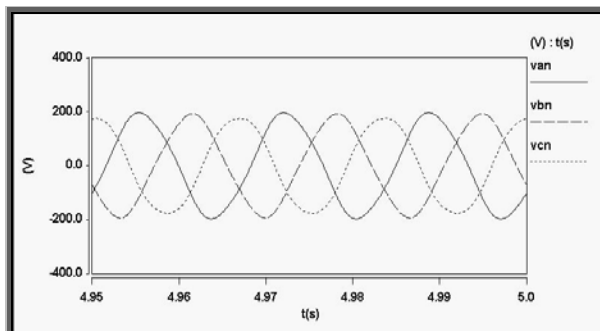


Figura 3– Forma de onda da tensão de fase na armadura – simulação

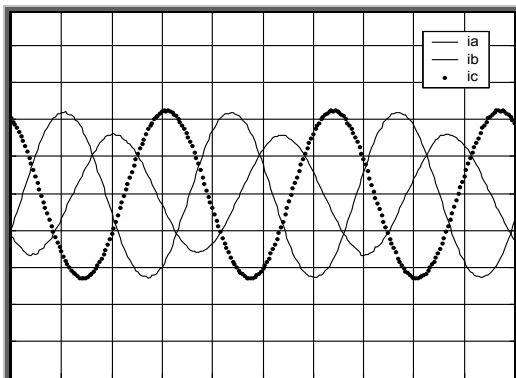


Figura 4– Forma de onda da corrente de linha na armadura – experimental

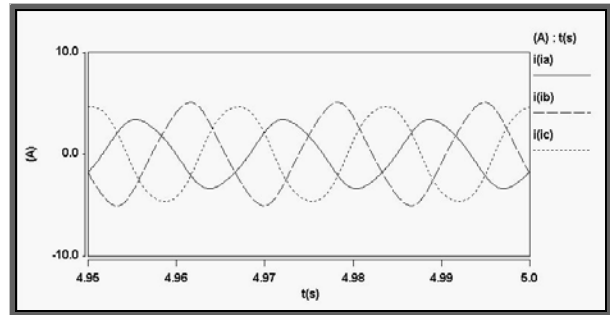


Figura 5– Forma de onda da corrente de linha na armadura – simulação

Neste sentido, observou-se através das formas de onda apresentadas, que há uma boa correlação entre os mesmos. Desta forma, pode-se afirmar que, para esta condição, a análise experimental comprovou que a modelagem matemática adotada atende aos propósitos do estudo que se pretendeu desenvolver.

3.2 Gerador Alimentando uma Carga Não Linear

A Figura 6 mostra o sistema elétrico utilizado para as simulações e as análises experimentais. A carga não linear considerada foi um retificador de seis pulsos não controlado. Nestas condições, o gerador estava operando com aproximadamente metade de sua condição nominal.

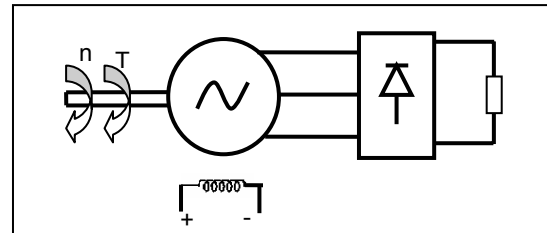


Figura 6– Arranjo físico utilizado

De forma semelhante ao item 3.1, os resultados estão ilustrados nas figuras 7 a 10. Observa-se também que, nessas condições, há uma boa similaridade entre as formas de onda e os valores obtidos pela simulação com aqueles encontrados experimentalmente. As escalas utilizadas nos resultados experimentais são as mesmas do caso anterior.

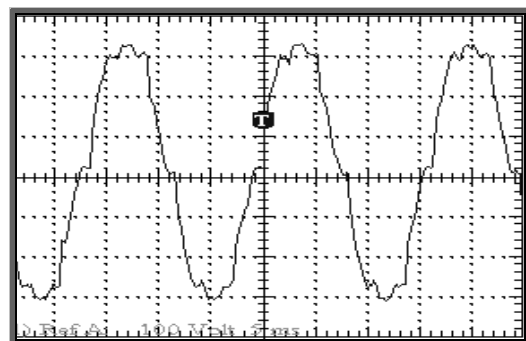


Figura 7– Forma de onda da tensão de linha na armadura – experimental

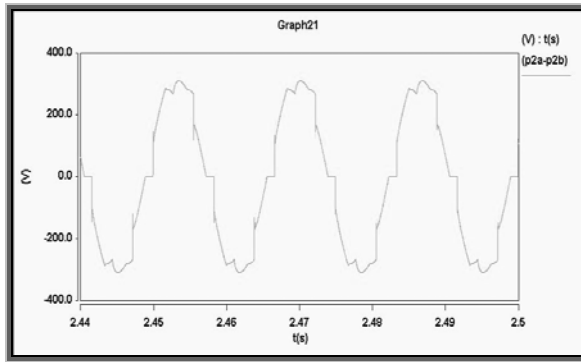


Figura 8– Forma de onda da tensão de linha na armadura – simulação

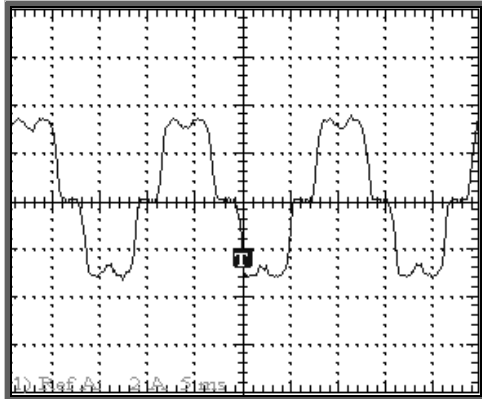


Figura 9– Forma de onda da corrente de linha na armadura- experimental

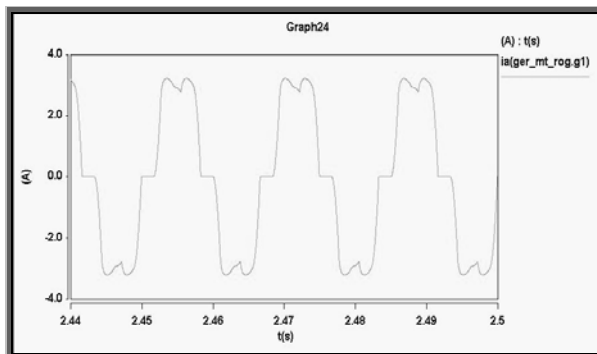


Figura 10– Forma de onda da corrente de linha na armadura- simulação

4.0 - ANÁLISE COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO DE UM ALTERNADOR DE GRANDE PORTE

As análises precedentes fundamentaram-se em estudo comparativo entre os aspectos computacionais e experimentais sobre o comportamento elétrico do gerador. Todavia, devido a limitações de laboratório, não foi possível discutir a influência dos efeitos integrados nos enrolamentos amortecedores e no conjugado mecânico. Neste sentido, este item tem por objetivo complementar as discussões anteriores utilizando um gerador de 25 MVA.

Assim, montou-se o diagrama unifilar típico de um sistema elétrico, representado pela figura 11.

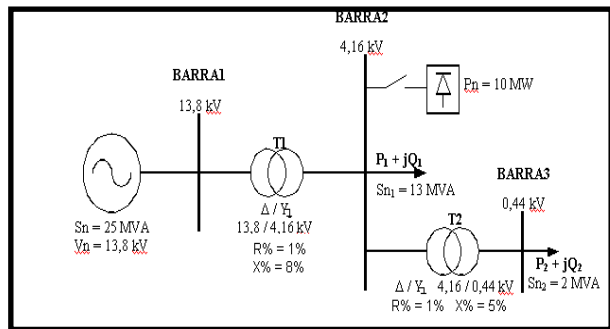


Figura 11– Diagrama unifilar para os estudos computacionais

Deve-se salientar que para os casos de desequilíbrio processados a carga de maior potência aparente (13 MVA) foi arbitrariamente escolhida como fonte dos distúrbios de desequilíbrios. Para esta simulação o fator de desequilíbrio de tensão considerado é de 5%..

Para o carregamento do sistema, colocou-se duas cargas do tipo P + jQ (indutivas) com potências de 13 MVA e 2 MVA..

Com o objetivo de verificar a superposição dos efeitos de desequilíbrios e harmônicos, tem-se uma ponte retificadora de 6 pulsos não controlada, cuja potência é de 10 MW. Desta forma, o gerador opera com sua condição de plena carga.

4.1 Aspectos elétricos

4.1.1 Resultados obtidos na armadura

Nas figuras 12 e 13 encontram-se as formas de ondas das tensões de linha e os respectivos espectros harmônicos. Devido à presença simultânea de carga desequilibrada e não linear as tensões de encontram desequilibradas e bastante distorcidas

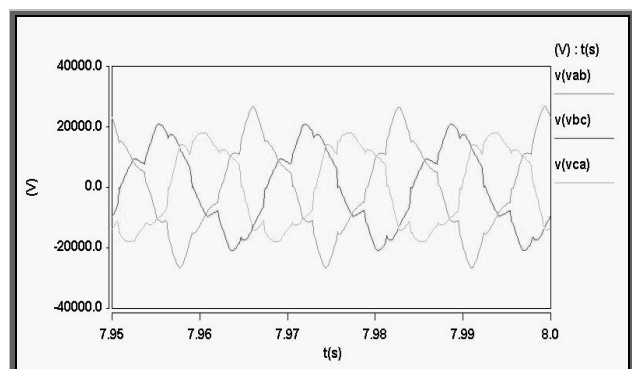


Figura 12 – Tensões de linha na armadura

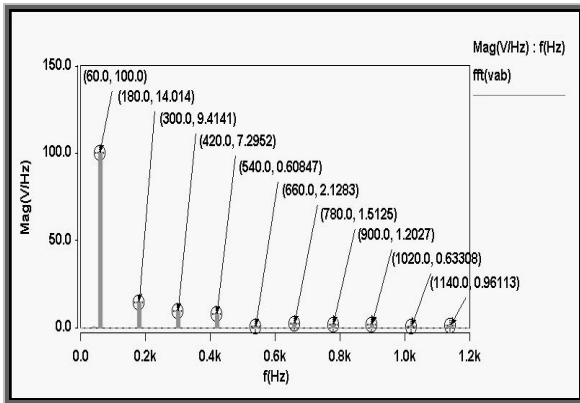


Figura 13 – Espectro harmônico da tensão de linha (vab) na armadura

A figura 14 traz a forma de onda das correntes na armadura, apresentando-se as mesmas desequilibradas e distorcidas. A figura 15 mostra o espectro harmônico característico dos efeitos provocados pela ação em conjunto de cargas desequilibradas e cargas não lineares, onde observa-se além dos harmônicos característicos, a presença de harmônicos não característicos. A distorção harmônica total de corrente (THD_i) é de 10,34%.

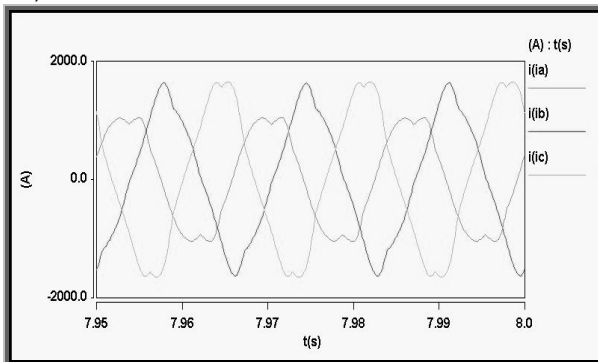


Figura 14 – Correntes de linha (ia) na armadura

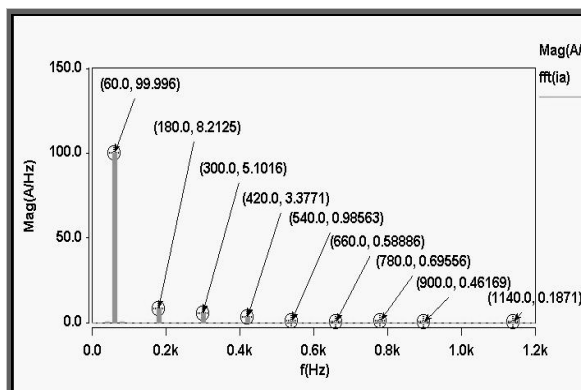


Figura 15 – Espectro harmônico da corrente de linha na armadura

4.1.2 Resultados obtidos na excitação

As figuras 16 e 17 mostram a forma de onda da corrente de campo e seu respectivo espectro harmônico.

Devido ao desequilíbrio surge uma componente de segunda harmônica que, embora de pequena magnitude para o desequilíbrio provocado, faz com que o valor contínuo da corrente de excitação seja acrescido de uma oscilação. Nesta situação, surge uma componente de seqüência negativa provocada pela existência de um campo magnético girante com velocidade igual à do rotor, mas em sentido contrário ao de rotação definido pela seqüência positiva. Sua freqüência será igual a duas vezes à da rede, ou seja, de 120 Hz para o nosso caso, que corresponde à harmônica de segunda ordem.

Devido à carga não linear, observou-se que a presença de distorções harmônicas nos terminais da máquina, em particular, as ordens 5^a (de seqüência positiva) e 7^a (de seqüência negativa), induzem uma componente de sexta ordem. Cabe destacar que a operação com carga não linear desequilibrada, provoca o aparecimento de harmônicas pares no rotor do gerador síncrono.

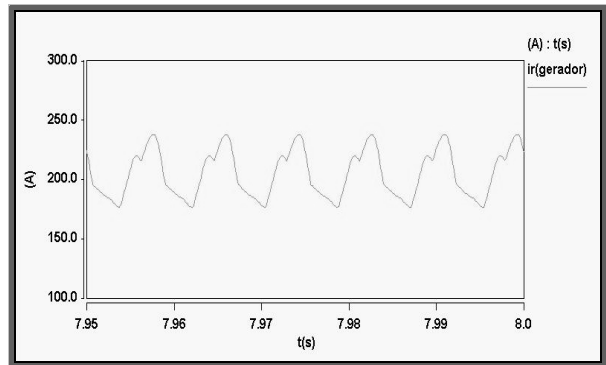


Figura 16 – Corrente no enrolamento de campo

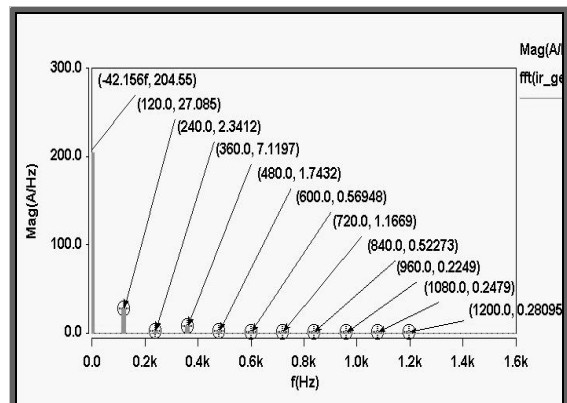


Figura 17 – Espectro harmônico da corrente no enrolamento de campo

4.1.3 Resultados obtidos nos enrolamentos amortecedores

Na figura 18 é apresentada a forma de onda da corrente no enrolamento amortecedor de eixo d. A figura 19 mostra o espectro harmônico para essa onda. A justificativa das distorções é a

mesma apresentada para a corrente de excitação. Isto sem dúvida caracteriza problemas, uma vez que os enrolamentos amortecedores foram projetados para suportar corrente somente na partida. Em regime permanente poderá ocorrer um aquecimento excessivo nas sapatas polares e uma conseqüente redução na vida útil da máquina. Por uma questão de similaridade, os aspectos referentes a corrente no enrolamento de eixo q não serão apresentados

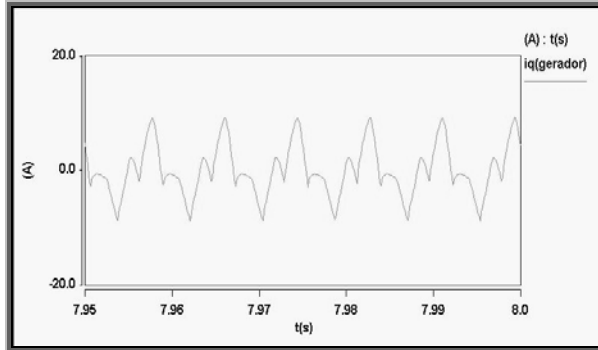


Figura 18 – Corrente no enrolamento amortecedor de eixo d

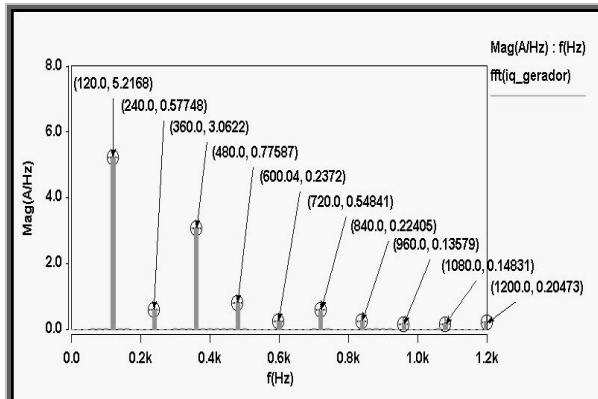


Figura 19 – Espectro harmônico da corrente no enrolamento amortecedor de eixo d

5.0 - ASPECTOS MECÂNICOS

A figura 20 mostra que surgem oscilações na velocidade do gerador. Para a operação integrada provocam outras frequências além das de 60hz, ou seja harmônicas de 120 Hz, 360 Hz, 720 Hz etc.

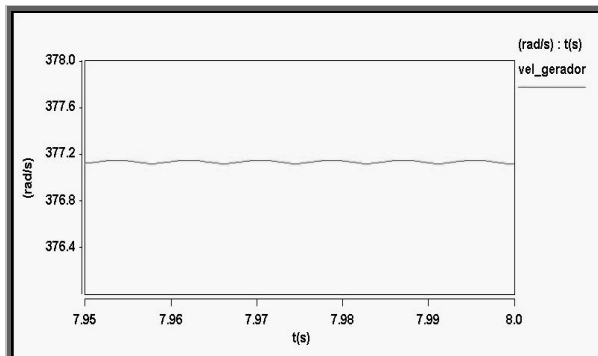


Figura 20 – Velocidade mecânica do gerador

6.0 - CONCLUSÕES

Este artigo teve por objetivo estudar o comportamento elétrico e mecânico de geradores síncronos quando submetidos a situações em que cargas desequilibradas e não lineares estão presentes nos sistemas elétricos. Vale destacar, que os dados utilizados para suprir o modelo implementado, necessitam, basicamente de informações classicamente disponíveis. O modelo proposto é baseado em equações no domínio do tempo e implementadas no simulador "SABER". As investigações compreenderam análises elétricas e mecânicas objetivando conhecer o desempenho do alternador síncrono. Os resultados obtidos evidenciaram os efeitos das distorções e de desequilíbrios sobre o gerador. Deve-se destacar que os enrolamentos de armadura e amortecedores, sobre tudo, estes últimos foram os mais afetados. Isto sem dúvida caracteriza problemas, uma vez que os enrolamentos amortecedores foram projetados para suportar corrente somente na partida. Em regime permanente poderá ocorrer um aquecimento excessivo nas sapatas polares e uma conseqüente redução da vida útil da máquina.

As formas de onda, os espectros harmônicos e os correspondentes valores numéricos obtidos computacionalmente puderam ser confrontados com os resultados experimentais, sendo que ambos mostraram grande concordância sob todos os aspectos.

Quanto aos aspectos mecânicos, o conjugado e a velocidade também sofrem os efeitos simultâneos das cargas, possuindo oscilações em sua forma de onda. Este torque de oscilação pode estimular o conjunto turbina-gerador, causando vibrações e outros efeitos mecânicos

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] OLIVEIRA, R.R.. Comportamento de Geradores Síncronos Trifásicos Alimentando Cargas Não Lineares. Uma Abordagem Analítica e Experimental; Dissertação de Mestrado, UFU, Abril – 2001.
- [2] ROCCO, A.. Máquinas Síncronas e Cargas Não Lineares, Efeitos da Distorção Harmônica, Uma Análise Numérico-Experimental; Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
- [3] ROCHA, C.A.L. Comportamento de Geradores Síncronos Trifásicos Alimentando Cargas Desequilibradas. Uma Abordagem Analítica e Experimental; Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2002.
- [4] ANDERSON, P.M. & FOUAD, A.A.. Power System Control And Stability; The Iowa State University Press, Ames, Iowa, 1977.