

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA - UFU
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS - GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MANOEL BERTO ALVES



ANÁLISE TEORICA E EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DO GERADOR
SÍNCRONO DE POLOS SALIENTES EM REGIME PERMANENTE NÃO
SENOIDAL

UBERLÂNDIA
2011

MANOEL BERTO ALVES

ANÁLISE TEORICA E EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DO GERADOR
SÍNCRONO DE POLOS SALIENTES EM REGIME PERMANENTE NÃO
SENOIDAL.

Tese apresentada por Manoel Berto Alves ao Departamento de Pós-Graduação da Universidade Federal de Uberlândia - UFU na Faculdade de Engenharia Elétrica, como Parte dos Requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica na Área de Sistema Elétrico de Potência com o tema: Análise teórica e experimental do comportamento do gerador síncrono de polos salientes em regime permanente não senoidal. Aprovado em 31/11/2011 pela banca examinadora.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luciano Martins Neto - UFU - Orientador;

Prof. PhD. Geraldo Caixeta Guimarães - UFU;

Prof. Dr. Carlos Henrique Salerno - UFU;

Prof. Dr. Ernesto Ruppert Filho - UNICAMP;

Prof. Dr. Bernardo Pinheiro de Alvarenga - UFG.

UBERLÂNDIA

2011

A474 Alves, Manoel Berto, 1958;

Análise teórica e experimental do comportamento do gerador síncrono de polos salientes em regime permanente não senoidal. / Manoel Berto Alves. – 2011

- [Uberlândia - Minas Gerais - Brasil]: [UFU/FEELT],

- 2011. 180 f. : il.

Orientador: Luciano Martins Neto – UFU

Tese de Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia - UFU,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica – Teses;
2. Sistemas de Energia Elétrica – Controle de Qualidade – Teses;
3. Máquinas Elétricas Síncronas – Teses;
4. Dínamos – Corrente alternada – Teses;

I. Martins Neto, Luciano, 1948;

II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

III. Título.

CDU 621.3

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA - UFU
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS - GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

MANOEL BERTO ALVES

ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DO GERADOR
SÍNCRONO DE POLOS SALIENTES EM REGIME PERMANENTE NÃO
SENOIDAL.

Tese apresentada por Manoel Berto Alves ao Departamento de Pós-Graduação da Universidade Federal de Uberlândia - UFU na Faculdade de Engenharia Elétrica, como Parte dos Requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica na Área de Sistema Elétrico de Potência com o tema: Análise teórica e experimental do comportamento do gerador síncrono de polos salientes em regime permanente não senoidal. Aprovado em 31/11/2011 pela banca examinadora.

Prof. Dr. Luciano Martins Neto
Orientador

Prof. Dr. Alexandre Cardoso
Coordenador do Curso de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica

OUTUBRO
2011

Dedicatória

*Dedico este trabalho à minha família pela compreensão
e ausência que lhes fiz nos finais de semanas para
realização desse trabalho, Lídia, minha esposa,
Rafael e Rodrigo, meus filhos, e em especial pela criação
e educação de seus filhos, a minha irmã M^a Aparecida.
Que sempre, de uma maneira ou de outra, estiveram
aliados aos meus propósitos.*

Agradecimentos

A Deus, pela vida, saúde, paz, coragem, por todas as oportunidades, guiando-me por caminhos de muita lutas. Caminhos esses que me ajudaram a crescer como pessoa e alcançar os meus objetivos de vida. Pelas intuições recebidas, vitais para a criação e desenvolvimento deste e de outros trabalhos.

Aos professores e amigos do curso de doutoramento, por suas disciplinas e disponibilidades, colaboração e orientação, em especial ao Professor Dr. Luciano Martins Neto, pela orientação acadêmica, apoio, incentivo, confiança e amizade, que foram fundamentais, para a realização desse trabalho.

À empresa na qual trabalho, há trinta e quatro anos, pelo grande laboratório e confiança que é depositada em mim.

Epígrafes

*"Comece fazendo o que é necessário, depois o que é possível,
e de repente você estará fazendo o impossível" (São Francisco de
Assis);*

*"Não só isto, mas nos gloriamos até das tribulações, pois sabemos
que a tribulação produz a paciência, a paciência prova a fidelidade e a
fidelidade, comprovada, produz a esperança. E a esperança não engana".
(Paulo, em carta aos romanos 5, 3-5);*

*"Nunca queiras subir sozinho, lá em cima faz muito frio e não terás
ninguém que te aqueça, então saberás que o saber é uma procura e nunca
uma posse, pois a riqueza do ser humano está na terceira pessoa". (Manoel
Berto Alves).*

ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DO GERADOR SÍNCRONO DE POLOS SALIENTES EM REGIME PERMANENTE NÃO SENOIDAL

Resumo

Neste estudo buscou-se a identificação e tratamento das interferências das harmônicas no funcionamento das Máquinas Síncronas de Polos Salientes, com a finalidade de alertar a comunidade técnica-científica acerca destes acontecimentos.

Foram desenvolvidas modelagens matemáticas, simulações computacionais, ensaios em laboratório e medições em campo, bem como a criação e simulação de uma nova forma de onda para a tensão do sistema de excitação da máquina, que resultou na atenuação das oscilações de torque eletromagnético ainda que, esta máquina esteja operando em regime não senoidal.

Para permitir a precisão e entendimento da máquina elétrica rotativa submetida a regime de alimentação de cargas de correntes não senoidais, estão verificadas nas modelagens e simulações, as componentes harmônicas das distribuições espaciais da densidade de fluxo magnético produzidos pelos seus enrolamentos, e as componentes harmônicas temporais produzidas pelas cargas não lineares.

Nas análises foram executadas as comparações das diferenças entre o funcionamento da máquina síncrona, nos regimes permanentes, senoidais e não senoidais, a fim de dar credibilidades às modelagens matemáticas desenvolvidas.

Palavras chaves: Máquina Síncrona; modelagem; Sistema de Energia Elétrico; distorções harmônicas de tensão e corrente; qualidade da energia elétrica; simulações computacionais.

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF SALIENT POLE SYNCHRONOUS GENERATOR BEHAVIOR UNDER NON- SINUSOIDAL STEADY-STATE

ABSTRACT

This study aimed at the identification and treatment of harmonic interference in the functioning of Salient Pole Synchronous Machines in order to make the techno-scientific community aware of such events.

Mathematical models, computer simulations, laboratory tests and field measurements were developed as well as the creation and simulation of a new voltage waveform for the machine excitation system, which resulted in attenuation of electromagnetic torque oscillations even though this machine is operating under non-sinusoidal condition.

To enable the precision and understanding of the rotating electric machine under non-sinusoidal load currents, the modeling and simulations took into account the harmonic components of the spatial distribution of magnetic flux density produced by machine windings, and the temporal harmonic components produced by non-linear loads.

Comparisons were made between sinusoidal and non-sinusoidal steady-state synchronous machine operations, in order to give credibility for the developed mathematical models.

Keywords: Synchronous machine; modeling; electric power system; harmonic distortion of voltage and current; power quality; computer simulations.

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURAS DO CAPÍTULO II

Figura - 2.1	Componente da fmm;	Pg.: 40
Figura - 2.2	Apresentação do Ângulo do Rotor;	Pg.: 41
Figura - 2.3	Representação dos campos pulsantes;	Pg.: 41
Figura - 2.4	Representações das Frequências.	Pg.: 42

FIGURAS DO CAPÍTULO III

Figura - 3.1	Corte esquemático de uma máquina elétrica;	Pg.: 50
Figura - 3.2	Esquemático de linearização da figura 2.1;	Pg.: 50
Figura - 3.3	Apresentações das “ f_{mm_1} ”, “ f_{mm_5} ”, e eixos “j”, “d” e “q”;	Pg.: 52
Figura - 3.4	Indicação dos Eixos.	Pg.: 59

FIGURAS DO CAPÍTULO IV

Figura - 4.2.1	Circuito dos Ramos;	Pg.: 70
Figura - 4.2.2	Velocidade do Rotor;	Pg.: 72
Figura - 4.2.3	Correntes do Estator Sem Harmônicos Espaciais. Nos intervalos de 2,5 a 3 segundos regime senoidal e de 4,5 a 5 segundos regime não senoidal;	Pg.: 73
Figura - 4.2.4	Zoom da fig. 4.2.3 - Correntes do Estator Sem Harmônicos Espaciais;	Pg.: 73
Figura - 4.2.5	Zoom da fig. 4.2.3 - Correntes do Estator Sem Harmônicos Espaciais regime não senoidal;	Pg.: 73
Figura - 4.2.6	Correntes do Estator Com Harmônicos Espaciais. Nos intervalos de 2,5 a 3 segundos, regime senoidal e de 4,5 a 5 segundos, regime não senoidal;	Pg.: 74
Figura - 4.2.7	Zoom da fig. 4.2.6 - Correntes do Estator Com Harmônicos Espaciais regime senoidal;	Pg.: 74
Figura - 4.2.8	Zoom da fig. 4.2.6 - Correntes do Estator Com Harmônicos Espaciais regime não senoidal;	Pg.: 74

Figura - 4.2.9	Correntes do Rotor: Excitação e Enrolamento Amortecedor "D" e "Q" - Sem Harmônicos Espaciais. Nos intervalos de 2,5 a 3 segundos regime senoidal e de 4,5 a 5 segundos regime não senoidal;	Pg.: 75
Figura - 4.2.10	Zoom da fig. 4.2.9 - Correntes do Rotor: Excitação e Enrolamento Amortecedor "D" e "Q" - Sem Harmônicos Espaciais regime senoidal;	Pg.: 75
Figura - 4.2.11	Zoom da fig. 4.2.9 - Correntes do Rotor: Excitação e Enrolamento Amortecedor "D" e "Q" - Sem harmônicos Espaciais regime não senoidal;	Pg.: 75
Figura - 4.2.12	Correntes do Rotor: Excitação e Enrolamento Amortecedor "D" e "Q" - Com Harmônicos Espaciais. Nos intervalos de 2,5 a 3 segundos regime senoidal e de 4,5 a 5 segundos regime não senoidal;	Pg.: 76
Figura - 4.2.13	Zoom da fig. 4.2.12 - Correntes do Rotor: Excitação e Enrolamento Amortecedor "D" e "Q" - Com Harmônicos Espaciais regime senoidal;	Pg.: 76
Figura - 4.2.14	Zoom da fig. 4.2.12 - Correntes do Rotor: Excitação e Enrolamento Amortecedor "D" e "Q" - Com Harmônicos Espaciais regime não senoidal;	Pg.: 76
Figura - 4.2.15	Torque Eletromagnético Sem Harmônicos Espaciais. Nos intervalos de 2,5 a 3 segundos regime senoidal e de 4,5 a 5 segundos regime não senoidal;	Pg.: 77
Figura - 4.2.16	Torque Eletromagnético Sem Harmônicos Espaciais - Zoom da fig. 4.2.15 regime senoidal;	Pg.: 77
Figura - 4.2.17	Torque Eletromagnético Sem Harmônicos Espaciais - Zoom da fig. 4.2.15 regime não senoidal;	Pg.: 77
Figura - 4.2.18	Torque Eletromagnético Com Harmônicos Espaciais. Nos intervalos de 2,5 a 3 segundos regime senoidal e de 4,5 a 5 segundos regime não senoidal;	Pg.: 78
Figura - 4.2.19	Torque Eletromagnético Com harmônicos Espaciais - Zoom da fig. 4.2.18 regime senoidal;	Pg.: 78

Figura - 4.2.20	Torque Eletromagnético Com harmônicos Espaciais - Zoom da fig. 4.2.18 regime não senoidal;	Pg.: 78
Figura - 4.3.1	Cargas dentro da usina;	Pg.: 81
Figura - 4.3.2	Cargas fora da usina;	Pg.: 82
Figura - 4.3.3	Modelo de máquina síncrona de polos salientes 30MVA;	Pg.: 83
Figura - 4.3.4a	Torque Eletromagnético do instante zero a 170 segundos;	Pg.: 85
Figura - 4.3.4b	Torque Eletromagnético a partir do instante 90 segundos. - Continuação da figura 4.3.4a;	Pg.: 85
Figura - 4.3.5	Torque Eletromagnético de 4 a 8 segundos. Máquina com excitação alimentada em corrente continua - Bateria. Zoom 1º da figura 4.3.4a;	Pg.: 86
Figura - 4.3.6	Torque Eletromagnético de 12.5 a 17 segundos. Máquina com excitação alimentada com Eletrônica de Potência. Zoom 2º da figura 4.3.4a;	Pg.: 86
Figura - 4.3.6a	Torque Eletromagnético de 14 a 14.6 segundos. Máquina com excitação alimentada com Eletrônica de Potência. Zoom da figura 4.3.6;	Pg.: 87
Figura - 4.3.7	Torque Eletromagnético de 33 a 38 segundos. Máquina alimentando Transformador Elevador. Zoom 3º da figura 4.3.4a;	Pg.: 87
Figura - 4.3.7a	Torque Eletromagnético de 35 a 35.5 segundos. Máquina alimentando Transformador Elevador. Zoom da figura 4.3.7;	Pg.: 88
Figura - 4.3.8	Torque Eletromagnético de 62 a 68 segundos. Máquina alimentando Transformador Elevador e Carga Linear. Zoom 4º da figura 4.3.4a;	Pg.: 88
Figura - 4.3.8a	Torque Eletromagnético de 64 a 64.99 segundos. Máquina alimentando Transformador Elevador e Carga Linear. Zoom da figura 4.3.8;	Pg.: 89

Figura - 4.3.9	Torque Eletromagnético de 93 a 98 segundos. Máquina alimentando Transformador Elevador, Cargas Linear e não Linear. Zoom 5º da figura 4.3.4a;	Pg.: 89
Figura - 4.3.9a	Torque Eletromagnético de 93 a 94 segundos. Máquina alimentando Transformador Elevador, Cargas Linear e não Linear. Zoom da figura 4.3.9;	Pg.: 90
Figura - 4.3.10	Torque Eletromagnético de 122.5 a 127.5 segundos. Máquina alimentando Carga não Linear. Zoom 6º da figura 4.3.4a;	Pg.: 90
Figura - 4.3.10a	Torque Eletromagnético de 125 a 126 segundos. Máquina alimentando Carga não Linear. Zoom da figura 4.3.10;	Pg.: 90
Figura - 4.3.11	Forma de Onda da Tensão da Máquina Síncrona;	Pg.: 91
Figura - 4.3.12	Espectro da Forma de Onda da Tensão da Máquina Síncrona;	Pg.: 92
Figura - 4.3.13	Percentuais de harmônicas da forma de onda da tensão da máquina;	Pg.: 92
Figura - 4.3.14	Forma de Onda da Tensão da Máquina Síncrona;	Pg.: 93
Figura - 4.3.15	Espectro da Forma de Onda da Tensão da Máquina Síncrona;	Pg.: 93
Figura - 4.3.16	Tabela apresenta quantidades de harmônicas em percentual entre os instantes 219 a 220 segundos da forma de onda da Tensão da Máquina;	Pg.: 94
Figura - 4.3.17	Forma de Onda da Corrente de Armadura;	Pg.: 94
Figura - 4.3.18	Forma de Onda da Corrente de Armadura - Zoom da figura 4.3.17 de 60.72 a 60.756 segundos, com Carga Linear;	Pg.: 95
Figura - 4.3.19	Forma de Onda da Corrente de Armadura - Zoom da figura 4.3.17 de 116.86 a 116.9 segundos, com Carga Não Linear;	Pg.: 95
Figura - 4.3.20	Forma de Onda da Corrente de Excitação If;	Pg.: 96

Figura - 4.3.21	Forma de Onda da Corrente de Excitação If - Zoom da figura 4.3.20 de 5 a 15 segundos. No instante 10 segundos o sistema de excitação passa de bateria para eletrônica da potência;	Pg.: 96
Figura - 4.3.22	Forma de Onda da Corrente de Excitação If - Zoom da figura 4.3.20 de 17 a 33 segundos. No instante 20 segundos ocorre o chaveamento do Transformador;	Pg.: 97
Figura - 4.3.23	Forma de Onda da Corrente de Excitação If - Zoom da figura 4.3.20 de 33 a 54 segundos. No instante 40 segundos, ocorre o chaveamento da Carga Linear;	Pg.: 97
Figura - 4.3.24	Forma de Onda da Corrente de Excitação If - Zoom da figura 4.3.20 de 67 a 72 segundos. No instante 70 segundos, ocorre o chaveamento da Carga Não Linear;	Pg.: 98
Figura - 4.3.25	Forma de Onda da Corrente de Excitação If - Zoom da figura 4.3.20 de 98 a 102 segundos. No instante 100 segundos, ocorre o chaveamento da Retirada da Carga Linear;	Pg.: 98
Figura - 4.3.26	Forma de Onda da Corrente de Excitação If - Zoom da figura 4.3.20 de 128 a 140 segundos. No instante 130 segundos, ocorre o chaveamento de retirada da Carga Não Linear;	Pg.: 99
Figura - 4.3.27	Forma de Onda da Corrente de Excitação If - Zoom da figura 4.3.20 de 155 a 173 segundos. No instante 160 segundos, ocorre novamente o chaveamento da Carga Linear;	Pg.: 99
Figura - 4.3.28	Forma de Onda da Corrente de Excitação If - Zoom da figura 4.3.20 de 176 a 189 segundos. No instante 180 segundos, ocorre o chaveamento de retirada da Carga Linear;	Pg.:100

Figura - 4.3.29	Forma de Onda da Corrente de Excitação If - Zoom da figura 4.3.20 de 198 a 212 segundos. No instante 200 segundos, ocorre novamente o chaveamento da Carga Não Linear;	Pg.: 100
-----------------	--	----------

FIGURAS DO CAPÍTULO V

Figura – 5.2.1	Bancada de Ensaio;	Pg.: 102
Figura – 5.2.2	Torquímetro;	Pg.: 102
Figura – 5.2.3	Carga Não Linear;	Pg.: 102
Figura – 5.2.4	Carga Linear;	Pg.: 102
Figura – 5.2.5	Forma de Onda da Corrente de Excitação com a Máquina em vazio;	Pg.: 103
Figura – 5.2.6	Forma de Onda da Tensão do Estator com a Máquina em vazio;	Pg.: 103
Figura – 5.2.7	Forma de Onda do Torque com a Máquina em vazio;	Pg.: 104
Figura – 5.2.8	Forma de Onda da Tensão do Estator com a Máquina em Carga;	Pg.: 104
Figura – 5.2.9	Forma de Onda da Tensão do Estator com a Máquina em Carga - Zoom da figura 5.2.8;	Pg.: 105
Figura – 5.2.10	Forma de Onda da Corrente do Estator com a Máquina em Carga;	Pg.: 105
Figura – 5.2.11	Forma de Onda da Corrente do Estator com a Máquina em Carga. - Zoom da figura 5.2.10;	Pg.: 106
Figura – 5.2.12	Forma de Onda da Corrente de Excitação com a Máquina em Carga;	Pg.: 106
Figura – 5.2.13	Forma de Onda do Torque com a Máquina em Carga;	Pg.: 107
Figura – 5.2.14	Forma de Onda do Torque com a Máquina em Carga - Zoom da figura 5.2.13;	Pg.: 107
Figura – 5.3.1	Unidade de geração com eletrônica de excitação;	Pg.: 108
Figura – 5.3.2	Gerador desconectado do sistema elétrico;	Pg.: 108
Figura – 5.3.3	Gerador conectado ao sistema elétrico.	Pg.: 109

FIGURAS DO CAPÍTULO VI

Figura – 6.2.1	Forma de onda do Torque Eletromagnético para $V_f = 14V$;	Pg.: 113
Figura – 6.2.2	Forma de onda do Torque Eletromagnético $V_f = 14V$ - Zoom da figura 6.2.1 de 4,5 a 5,7 segundos;	Pg.: 113
Figura – 6.2.3	Forma de onda da Corrente de Excitação $V_f = 14V$;	Pg.: 113
Figura – 6.2.4	Forma de onda da Corrente de Excitação $V_f = 14V$ - Zoom da figura 6.2.3 de 4,9 a 5,015 segundos;	Pg.: 114
Figura – 6.2.5	Forma de onda da Corrente do Estator para $V_f = 14V$;	Pg.: 114
Figura – 6.2.6	Forma de onda da Corrente do Estator $V_f = 14V$ - Zoom da figura 6.2.5 de 4,9 a 5,06 segundos;	Pg.: 114
Figura – 6.2.7	Forma de onda do Torque Eletromagnético $V_f = (14 - 600 \cdot \text{sen}(6\omega t + 1,2))$;	Pg.: 115
Figura – 6.2.8	Forma de onda do Torque Eletromagnético $V_f = (14 - 600 \cdot \text{sen}(6\omega t + 1,2))$ - Zoom da figura 6.2.7 de 4,7 a 5,9 segundos;	Pg.: 115
Figura – 6.2.9	Forma de onda da Corrente de Excitação $V_f = (14 - 600 \cdot \text{sen}(6\omega t + 1,2))$;	Pg.: 116
Figura – 6.2.10	Forma de onda da Corrente de Excitação $V_f = (14 - 600 \cdot \text{sen}(6\omega t + 1,2))$ - Zoom da figura 6.2.9 de 4,9 a 6,5 segundos;	Pg.: 116
Figura – 6.2.11	Forma de onda da Corrente do Estator $V_f = (14 - 600 \cdot \text{sen}(6\omega t + 1,2))$;	Pg.: 116
Figura – 6.2.12	Forma de onda da Corrente do Estator $V_f = (14 - 600 \cdot \text{sen}(6\omega t + 1,2))$ - Zoom da figura 6.2.11 de 4,84 a 5,3 segundos;	Pg.: 117
Figura – 6.2.13	Forma de onda do Torque Eletromagnético $V_f = (14 - 3000 \cdot \text{sen}(6\omega t + 1,52))$;	Pg.: 117

Figura – 6.2.14	Forma de onda do Torque Eletromagnético - $V_f = (14 - 3000 \cdot \text{sen}(6\omega t + 1,52))$ - Zoom da figura 6.2.13 de 4,93 a 5,07 segundos;	Pg.: 118
Figura – 6.2.15	Forma de onda do Torque Eletromagnético $V_f = (14 - 3000 \cdot \text{sen}(6\omega t + 1,52))$ - Zoom da figura 6.2.14 de 4,98 a 5,017 segundos;	Pg.: 118
Figura – 6.2.16	Forma de onda da Corrente de Excitação $V_f = (14 - 3000 \cdot \text{sen}(6\omega t + 1,52))$;	Pg.: 118
Figura – 6.2.17	Forma de onda da Corrente de Excitação - $V_f = (14 - 3000 \cdot \text{sen}(6\omega t + 1,52))$ - Zoom da figura 6.2.16 de 4,8 a 5,02 segundos;	Pg.: 119
Figura – 6.2.18	Forma de onda da Corrente do Estator - $V_f = (14 - 3000 \cdot \text{sen}(6\omega t + 1,52))$;	Pg.: 119
Figura – 6.2.19	Forma de onda da Corrente do Estator - $V_f = (14 - 3000 \cdot \text{sen}(6\omega t + 1,52))$ - Zoom da figura 6.2.18 de 4,80 a 5,15 segundos.	Pg.: 119

FIGURAS DO APÊNDICE A

HARMÔNICOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA.

Figura - A.2.1	Decomposição de onda distorcida em sua série.	Pg.: 129
----------------	---	----------

FIGURAS DO APÊNDICE C

TEORIA DOS GRAFOS.

Figura - C. 1	A cidade de Königsberg nos tempos de Euler;	Pg.: 136
Figura - C. 2	Grafo associado ao Problema das sete pontes de Königsberg;	Pg.: 136
Figura - C.3	Definição dos bipolos e termos;	Pg.: 137
Figura - C.4	Configuração da rede;	Pg.: 138
Figura - C.5	Rede Original, Nó e Ramos Fictício;	Pg.: 139
Figura - C.6	Representação Geradora Síncrona, barramento infinito e cargas.	Pg.: 146

ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E ACRÔNIMOS

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO
I_F	– Corrente de Excitação;
P	– Potência Ativa;
Q	– Potência Reativa;
X_d	– Reatância Síncrona de Eixo Direto;
X_q	– Reatância Síncrona de Eixo em Quadratura;
f	– Frequência da Tensão Gerada;
p	– Número de Polos;
n	– Rotação;
E_F	– Tensão Interna;
N	– Número de Espiras por Fase;
Φ	– Fluxo de Entreferro por Pólo;
ω	– Velocidade de Rotação em Radianos por Segundos;
E_m	– Tensão Interna Máxima;
δ	– Ângulo de Carga;
V_T	– Tensão Terminal;
δ_m	Deslocamento Angular Mecânico do Rotor em Relação ao Eixo do Estator;
X_s	– Reatância Síncrona;
d	– Eixo Direto;
q	– Eixo em Quadratura;

β	– Ângulo entre o Rotor e o Campo de Reação da Armadura;
I_a	– Corrente de Armadura;
I_d	– Corrente de Eixo Direto;
I_q	– Corrente de Eixo em Quadratura;
I_h	– Valor Máximo da Componente “h” da Corrente do Estator;
R_a	– Resistência do Enrolamento de Armadura;
Δ	– Variação Incremental;
$\delta_{\text{máx}}$	– Ângulo Máximo;
P_e	– Potência Elétrica Fornecida pelo Entreferro;
R_f	– Resistência do Enrolamento de Campo;
P_g	– Potência Elétrica Gerada;
P_d	– Potência Elétrica Demandada;
θ_R	– Ângulo do Rotor;
θ_m	Deslocamento Angular Mecânico do Rotor em Relação ao Eixo Magnético do Rotor;
ω_m	– Velocidade Angular do Rotor;
K	Constante Relacionada com o Projeto do Enrolamento, ou Constante de Boltzmann Igual a $0,8617 \times 10^{-4}$ [eV];
J	– Momento de Inércia;
t	– Tempo ou Tempo de Vida em Anos;
T_a	– Torque Acelerante;
ω_s	– Velocidade Angular Síncrona;
P_m	– Potência Mecânica de Entrada;

M	– Coeficiente de Inércia;
H	– Constante de Inércia;
C_a	– Conjugado Amortecedor;
A	– Coeficiente de Amortecimento ou Constante do Material;
E_c	– Energia Cinética;
ω_n	– Frequência Natural de Oscilação;
ω_d	– Frequência de Amortecimento;
t_a	– Tempo de Acomodação;
f_{mm}	– Força Magnética Motriz;
f_{mnh}	– Força Magnética Motriz de Ordem “h”;
DHT	– Distorção Harmônica Total;
j	– Enrolamento Genérico “j”;
i	– Enrolamento Genérico “i”;
a	– Eixo “a” de Origem em “ θ ”;
δ	– Densidade de Fluxo;
B	– Distribuição de Fluxo Magnético “B”;
F_d	– Componente de Eixo Direto da “ f_{mm} ”;
F_q	– Componente de Eixo em Quadratura da “ f_{mm} ”;
N_j	– Número de Espiras por Bobina do Enrolamento “j”;
q_j	– Número de Ranhuras por Polo do Enrolamento “j”;
h	– Índice da Harmônica do Enrolamento “j”;

$h=1$	– Componente Fundamental;
β_j	– Passo da Bobina do Enrolamento “j”;
α_{rj}	– Ângulo Entre duas Ranhuras Adjacentes do Enrolamento “j”;
K_{pjh}	– Fator de Passo da Harmônica “h” do Enrolamento “j”;
K_{djh}	– Fator de Distribuição da Harmônica “h” do Enrolamento “j”;
	Ângulo Espacial ao Longo da Linha Média do Entreferro; Ou
	Ângulo Espacial com Origem em uma das Fases do Estator;
	Ou Temperatura Absoluta do Ponto Mais Quente em Graus
θ	– Kelvin;
	Ângulo Espacial que Localiza o Eixo do Enrolamento “j” ao
θ_j	– Longo da Linha Média do Entreferro;
N_i	– Número de Espiras por Bobina do Enrolamento “i”;
L	– Comprimento Magnético Axial da Máquina;
R	– Raio da Circunferência Média do Entreferro;
β_i	– Fator de Passo de Bobina do Enrolamento “i”;
v_i	– Tensão;
r_i	– Resistência;
L_i	– Indutância de Dispersão;
ℓ	– Indutância Harmônica;
λ_i	– Concatenamento Total de Fluxo;
X	– Reatância Interna;
X_d	– Reatância de Eixo Direto “Xd”;
X_q	– Reatância de Eixo em Quadratura “Xq”;

X_{disp}	– Reatância de “ D ispersão”;
T_t	– Torque da Turbina;
T_e	– Torque Eletromagnético;
J	– Momento de Inércia;
ω_R	– Velocidade Angular Mecânica do Rotor;
K_A	– Coeficiente de Rigidez do Acoplamento;
C_A	– Coeficiente de Amortecimento Viscoso do Acoplamento;
pu	– Por Unidade;
$R.I^2$	Perdas no Cobre;
DHT_V	– Distorção Harmônica Total de TENSÃO;
DHT_I	– Distorção Harmônica Total de CORRENTE;
EVu	– Vida Útil do Isolamento do ENROLAMENTO;
$\frac{dEVu}{dt}$	– Taxa de Redução de Vida Útil em Relação ao TEMPO;
E	– Energia de Ativação da Reação de Envelhecimento [eV];
EVu_1	– Tempo de Vida Útil do Isolamento Gerador para $\theta = \theta_{nom} + \Delta\theta$;
EVu_{nom}	– Tempo de Vida Útil Nominal do Gerador $\theta = \theta_{nom}$;
$\Delta\theta$	– Acréscimo de Temperatura em Relação à θ_{nom} em graus $^{\circ}\text{C}$;
θ_{nom}	– Temperatura Nominal do Gerador em Graus Kelvin;
ANEEL	– AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA;
ONS	– OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA;
PRODIST	– PROCEDIMENTO DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.

SUMÁRIO

RESUMO.	PG: 07
ABSTRACT.	PG: 08
ÍNDICE DE FIGURAS.	PG: 09
ABREVIATURA SÍMBOLOS E ACRÔNIMOS.	PG: 17
SUMÁRIO.	PG: 22

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL

1.1)	INTRODUÇÃO;	PG: 25
1.2)	VOLTANDO NA HISTÓRIA;	PG: 27
1.3)	GENERALIDADES;	PG: 31
1.4)	OBJETIVO;	PG: 33
1.5)	O ESTADO DA ARTE;	PG: 34
1.6)	ORGANIZAÇÃO DA Tese.	PG: 37

CAPÍTULO II

ANÁLISE DE MÁQUINA SÍNCRONA OPERANDO EM REGIME PERMANENTE E NÃO SENOIDAL

2.1)	INTRODUÇÃO;	PG: 38
2.2)	ANÁLISE FÍSICA E OSCILAÇÕES DE CONJUGADOS;	PG: 38
2.3)	PERDAS E REDUÇÃO DE RENDIMENTO;	PG: 43
2.3.1)	PERDAS NO COBRE;	PG: 43
2.3.2)	PERDAS NO FERRO;	PG: 45
2.3.3)	PERDAS MECÂNICAS;	PG: 46
2.4)	VIDA ÚTIL.	PG: 46

CAPÍTULO III

MODELAGEM DE MÁQUINA SÍNCRONA DE POLOS SALIENTES CONSIDERANDO OS CONTEÚDOS HARMÔNICOS

3.1)	INTRODUÇÃO;	PG: 49
3.2)	DESENVOLVIMENTO;	PG: 49
3.2.1)	EQUAÇÕES ELÉTRICAS;	PG: 49
3.2.2)	EQUAÇÕES MECÂNICAS;	PG: 66
3.2.2.1)	DINÂMICA DO ACOPLAMENTO;	PG: 69

CAPÍTULO IV

SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

4.1)	INTRODUÇÃO;	PG: 70
4.2)	SIMULAÇÕES EM MATLAB EM EXTENSÃO EM PONTO M;	PG: 70
4.3)	SIMULAÇÕES EM SIMULINK;	PG: 80

CAPÍTULO V

ENSAIOS EXPERIMENTAIS

5.1)	INTRODUÇÃO;	PG: 102
5.2)	ENSAIO EM LABORATÓRIO;	PG: 102
5.3)	MEDIÇÕES EM CAMPO;	PG: 107
5.4)	CONCLUSÃO.	PG: 109

CAPÍTULO VI

ATENUAÇÃO DAS OSCILAÇÕES DE TORQUE ELETROMAGNÉTICO

6.1)	INTRODUÇÃO;	PG: 111
6.2)	ATENUAÇÃO;	PG: 112
6.3)	CONCLUSÃO.	PG: 120

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1)	CONCLUSÃO;	PG: 121
7.3)	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS;	PG: 123

APÊNDICE A

HARMÔNICOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

A.1)	INTRODUÇÃO;	PG: 128
A.2)	DISTORÇÕES HARMÔNICAS; DISTORÇÕES HARMÔNICA INDIVIDUAL, TOTAL E VALOR	PG: 128
A.3)	EFICAZ;	PG: 129
A.4)	HARMÔNICOS EM MÁQUINAS SÍNCRONAS.	PG: 130

APÊNDICE B

PROCEDIMENTOS DE REDE

B.1)	CONSIDERAÇÕES INICIAIS;	PG: 132
B.2)	DEFINIÇÃO DO INDICADOR;	PG: 133
B.3)	AValiação DE DESEMPENHO.	PG: 133

APÊNDICE C

TEORIA DOS GRAFOS

C.1)	INTRODUÇÃO;	PG: 135
C.2)	TEORIA DOS GRAFOS.	PG: 135

APÊNDICE D

SOFTWARE APLICATIVO EM MATLAB

D.1)	INTRODUÇÃO;	PG: 149
D.2)	APLICATIVO.	PG: 149

1.1 Introdução

O sistema de energia elétrica mundial vem apresentando grandes preocupações com o uso da energia elétrica de uma forma cada vez mais racional e otimizada, com qualidade na geração, transmissão, distribuição e utilização. Tendo em vista as dificuldades de expandir a oferta de energia, por falta de recursos tecnológicos, financeiros e até políticos, cabendo aos setores de estudos, projetos e fabricação em geral, buscarem ganhos de energia elétrica nas eficiências e produtividades. Neste quesito, a eletrônica de potência vem satisfazer com vantagens as condições de eficiência e produtividade na concepção, projeto e fabricação das cargas consumidoras. Estas condições são alcançadas através dos chaveamentos eletrônicos efetuados em frequências bem maior que a industrial, possibilitando com isto moldar o funcionamento das cargas consumidoras, satisfazendo as condições de eficiência e produtividade. Se de um lado os chaveamentos eletrônicos propiciam as condições favoráveis para as cargas consumidoras, por outro lado provocam no sistema alimentador um regime não senoidal, a princípio de corrente, e, por consequência, de tensão. Exatamente por esta condição, as cargas consumidoras são ditas como não lineares.

As distorções de tensão criam problemas de alimentação para as concessionárias de energia. A tensão que foi distorcida por uma dada carga não linear, pode estar alimentando uma carga linear, provocando nesta, correntes não senoidais, que neste caso são indesejáveis. Este efeito degrada o fator conhecido como "qualidade de energia" tornando-se uma questão complexa para análise das concessionárias de energia.

Muitas medidas de conservação de energia, apesar de serem atrativas, se não forem estudadas e implementadas de forma conveniente, resultam em vários aspectos relacionados ao padrão de qualidade de energia elétrica.

A presença de harmônicas na tensão, ou na corrente pode ocasionar danos aos componentes e equipamentos da rede elétrica, bem como aos próprios equipamentos geradores desses harmônicos. Atualmente os projetos para fabricação e operação de dispositivos e sistemas, contemplam apenas a existência da frequência fundamental. Faz-se necessário, então, estudos quando os equipamentos atuam em sistemas elétricos com conteúdos harmônicos de tensão ou corrente.

A inovação tecnológica surge, muitas vezes, em função de uma necessidade prática. É esta uma das razões pela qual a eletrônica de potência tornou-se, nas últimas décadas, uma das áreas mais ativas da engenharia elétrica, encontrando-se atualmente nas mais variadas atividades do campo tecnológico e científico, seja na conversão pura e simples de energia elétrica, ou no comando e controle de sistemas eletrônicos. A miniaturização de componentes e a expansão de memórias em microprocessadores, também facilitaram a proliferação dessas tecnologias, por tornar os sistemas eletrônicos industriais mais simples, eficientes e de custos mais acessíveis. Portanto, observando o cenário energético nacional atual, fica inevitável à aplicação da engenharia para desenvolvimentos e aplicação de equipamentos econômicos, de alta eficiência. E em função de estudos e pesquisas, os equipamentos projetados para possuir elevado fator de potência, baixa distorção harmônica, e que possibilitem a recuperação ou regeneração de energia, vêm ganhando o mercado.

O grau com que os harmônicos podem ser tolerados em um sistema de alimentação depende da susceptibilidade da carga ou da fonte de potência. Os equipamentos menos sensíveis, geralmente, são os destinados ao aquecimento, isto é aqueles com cargas resistivas, para os quais a forma de onda não é relevante. Os mais sensíveis são aqueles que, em seu projeto, assumem a existência de uma alimentação senoidal. Como por exemplo, equipamentos de comunicação e processamento de dados, os de geração de tensão, ou seja, as máquinas síncronas. No entanto, mesmo para as cargas de baixa sensibilidade, a presença de conteúdos harmônicos de tensão ou de corrente pode ser prejudicial, produzindo perdas em geral e maiores esforços nos componentes e nos seus materiais isolantes.

Em máquinas elétricas rotativas um dos efeitos dos harmônicos é o aumento do aquecimento em função **elevação** das perdas no ferro e no cobre, afetando-se daí a sua eficiência e o torque disponível. **Na literatura [1 e 2] relata-se elevações** do ruído audível, quando comparado a uma alimentação senoidal. Outro fenômeno de suma importância é a presença de harmônicas no fluxo magnético, produzindo alterações no acionamento, tais como nas componentes de torques **eletromagnéticos** que atuam no sentido oposto ao da componente fundamental. **Isso** ocorre quando estiverem apresentados no sistema **elétrico**, os conteúdos harmônicos **de** 5^a, 11^a e 17^a, entre outros. Significando que a 5^a componentes harmônica, combinada com as 7^a componente harmônica, induzem uma 6^a componente harmônica no rotor ou **na** parte girante da máquina elétrica rotativa. Ocorrendo o mesmo efeito com outros pares de componentes harmônicas. Essas combinações estimulam oscilações mecânicas nos sistemas, tais como: “turbina-gerador” **e** “motor-carga” em função do aparecimento de excitação de ressonâncias mecânicas nesses sistemas. O sobreaquecimento que pode ser tolerado dependendo **das características construtivas** do rotor utilizado. Como por exemplo: os rotores bobinados são mais seriamente afetados **do** que os de gaiolas. Os de gaiolas profundas também são influenciados pelo sobreaquecimento em função do “efeito pelicular”, que produz o surgimento de corrente na superfície do condutor em frequências elevadas.

O efeito cumulativo de aumento das perdas provoca uma diminuição da eficiência e da vida útil da máquina elétrica rotativa. A redução na eficiência é indicada na literatura como de 5 a 10% dos valores obtidos com uma alimentação senoidal. Esse fato não se aplica a máquinas projetadas para alimentação a partir de inversores, mas apenas, àquelas de uso em alimentação direta da rede, pois nesse caso essas máquinas já foram projetadas para suprimentos de tais perdas.

1.2 Voltando na História

Apesar da máquina elétrica rotativa pode ser considerada originada em 1886, **Thomas Edison em 1882, constituiu o primeiro sistema elétrico completo inclusive com gerador de corrente contínua, na cidade de Nova Iorque.** Pois foi nessa data de 1886 que o cientista alemão “Werner Von Siemens” **divulgou o seu**

invento, como "primeiro gerador de corrente contínua auto induzido". Entretanto esta máquina que revolucionou o mundo em poucos anos, foi o último estágio de estudos, pesquisas e invenções de muitos outros cientistas, durante quase três séculos [18].

As máquinas elétricas representam uma parte importante dos sistemas eletromecânicos de conversão de energia, tanto no aspecto tecnológico como pela sua influência na economia. Como gerador, a mais importante máquina elétrica rotativa é a Síncrona.

No **ano de 641 antes de Cristo**, o grego “Tales de Mileto”, que foi matemático e filósofo, verificou o fenômeno da eletricidade estática ao atritar uma peça de âmbar com pano, observando que esta adquiria a propriedade de atrair corpos leves, como: pêlos, penas, e cinzas, etc. [18].

No **ano de 1600 depois de Cristo**, o cientista inglês “William Gilbert”, formado em medicina, publicou em Londres a obra intitulada “Magnet”, descrevendo a força de atração magnética. Portanto fora atribuído a “Gilbert” o uso pela primeira vez da palavra eletricidade, derivada da palavra grega “*elektron*”, pois era esse o nome que os gregos davam ao “âmbar” [18].

A primeira máquina eletrostática foi construída em 1663 pelo alemão “Otto von Guericke”, sendo essa máquina aperfeiçoada em 1775 pelo suíço “Martin Planta” [18].

No **ano de 1800**, “Alessandro Volta”, divulga uma fonte em corrente contínua de energia elétrica, como resultado dos seus trabalhos, sendo denominado de “a pilha de Volta”. Essa pilha tem como composição, discos empilhados em série, seguindo uma ordem: um disco de cobre, outro de zinco, um de pano úmido, assim sucessivamente. Daí o nome de pilha [18].

No **ano de 1820**, o físico dinamarquês “Hans Christian Oersted”, verificou que uma corrente ao passar por um fio criava em torno deste um campo magnético capaz de influenciar o meio ao seu redor. Isto sugeriu aos cientistas da época a construção do galvanômetro. Foi a partir dessa experiência que se reconheceu à relação entre o magnetismo e a eletricidade, dando assim, o primeiro passo em direção ao desenvolvimento do motor elétrico. Nesta época, o matemático francês “André Marie Ampère” escreveu a Lei de Ampère [18].

No **ano de 1825**, foi inventado o “eletroímã”, que seria de fundamental importância na construção de máquinas elétricas girantes. O sapateiro inglês “William Sturgeon”, que estudava eletricidade nas horas de folga, baseando-se na descoberta de “Oersted” constatou que um núcleo de ferro envolto por um fio condutor elétrico transformava-se em um ímã quando se aplicava uma tensão para circular uma corrente elétrica. Observou também que a força do ímã cessava tão logo a corrente fosse interrompida ou a tensão aplicada fosse cessada [18].

No **ano de 1831**, “Faraday”, físico e químico britânico, demonstrou a indução eletromagnética em duas de suas experiências, que foram de enorme importância para o mundo atual. Uma delas em agosto de 1831, “Faraday” enrolou dois pedaços diferentes de fio em volta de um núcleo de ferro; um dos fios foi passado perto de uma bússola magnética, e quando ligou a outra ponta do fio a uma bateria, apareceu uma deflexão da agulha da bússola, e como ele escreveu, “continuou, por somente um instante”. Nesse experimento “Faraday” havia descoberto o princípio do transformador. Para que uma corrente elétrica de forma continuada pudesse existir, na sua segunda experiência, “Faraday” reconheceu a necessidade do movimento num campo magnético, constituído de “tubos de força”, como ele descreveu, conseguindo logo depois desenvolver um gerador de disco. Para tanto, ligou um fio fixo no centro de um disco de cobre e outro, deslizando ao longo da beirada. Ligando os fios a uma pilha e colocando o disco entre as pernas de um ímã de formato ferradura, conseguiu gerar uma tensão constante. Da mesma forma, como em 1821, mostrou que era possível transformar energia elétrica em energia mecânica, e demonstrou então, em 1831, o inverso. Foi a primeira demonstração de um gerador, que cerca de meio século depois seria o principal meio para a geração de energia elétrica, hoje fornecida ao mundo moderno. Também existem registros que “J. Henry” nos Estados Unidos da América desenvolveu em 1831 um motor elétrico formado por três camadas de fio horizontal [18].

No **ano de 1832**, o cientista italiano “S. Dal Negro” construiu a primeira máquina de corrente alternada com movimento de vaivém. Neste mesmo ano, o mecânico parisiense “Hippolyte Pixii” construiu um gerador na qual a corrente fluía numa direção e depois na oposta [18].

No **ano de 1833**, o inglês “W. Ritchie” inventou o “*comutador*” construindo um pequeno motor elétrico onde o núcleo de ferro enrolado girava em torno de um ímã permanente. Para dar uma volta completa a polaridade do eletroímã era alternada a cada meia volta através do comutador. A corrente alternada era transformada em corrente contínua pulsante [18].

No **ano de 1834**, “Thomas Davenport”, USA, projetou um motor potente o suficiente para girar uma pequena máquina de impressão. Ele patenteou este motor em 1837, sendo o mesmo alimentado por bateria [18].

No **ano de 1838**, o arquiteto e professor de física “Moritz Hermann Von Jacobi” desenvolveu um motor elétrico e o usou em uma embarcação. Esse motor era alimentado por células de baterias, sendo transportado nesse dia cerca de 14 passageiros e navegando a uma velocidade de 4,8km/h [18].

No **ano de 1850**, o belga “Floris Nollet” efetua alterações no gerador do mecânico parisiense “Hippolyte Pixii”, conseguindo produzir cerca de 50V. O gerador “Nollet” foi o primeiro a ser produzido em série [18].

No **ano de 1879**, a empresa “Siemens & Halske” apresentou, na feira industrial de Berlim, a primeira locomotiva elétrica com uma potência de 2kW. A nova máquina de corrente contínua apresentava vantagens em relação à máquina a vapor, a roda d’água e à força animal. Entretanto, havia o alto custo de fabricação e a sua vulnerabilidade em serviço devido ao desgaste prematuro do comutador. Com isso muitos cientistas dirigiram sua atenção para o desenvolvimento de um motor elétrico mais barato, robusto e de menor custo de manutenção. Entre os pesquisadores preocupados, destacam-se o Yugoslavo “Nikola Tesla”, o italiano “Galileu Ferraris” e o russo “Michael von Dolivo Dobrovolski”. Os esforços não se restringiram somente ao aperfeiçoamento do motor de corrente contínua, mas também a um novo motor para sistemas em corrente alternada, cujas vantagens **passou a ser** conhecidas antes de 1881 [18].

No **ano de 1866**, o alemão “Siemens” construiu um gerador de corrente contínua autoinduzido. O gerador de “Werner Siemens” possuía uma potência de aproximadamente 30watts e uma rotação de 1200rpm. A máquina de “Siemens” funcionava tanto como gerador, bem como motor [18].

Na **década de 80 do século dezoito**, começaram os experimentos com motores elétricos para tração de pequenos carros, bem como as companhias elétricas começaram a pensar em trocar o sistema de distribuição de potência elétrica de corrente contínua para alternada. O feito de Edson, a lâmpada funcionava bem, e a corrente alternada era melhor para a distribuição em grandes distâncias, **porém** era necessário o desenvolvimento de um motor de corrente alternada [18].

No **ano de 1885**, foi descoberto o **campo girante** pelo engenheiro eletricitista italiano “Galileu Ferraris” que construiu um motor de corrente alternada de duas fases. Ferraris, apesar de ter inventado o motor de campo girante, concluiu erroneamente que os motores construídos segundo este princípio poderiam, no máximo, obter um rendimento de 50% em relação à potência consumida [18].

No **ano de 1888**, o yugoslavo “Nikola Tesla”, nascido onde hoje é a Croácia, apresentou um pequeno protótipo de motor de indução bifásico com rotor em curto-circuito. Mais tarde, a empresa norte-americana “Westinghouse” comprou a patente do motor de Tesla. Essa lhe pagou um milhão de dólares pelo privilégio da patente, além de se comprometer ao pagamento de um dólar para cada HP que viesse a produzir no futuro. O baixo rendimento desse motor inviabilizou economicamente sua produção e três anos mais tarde as pesquisas foram abandonadas [18].

No **ano de 1889**, o engenheiro eletricitista russo “Michail O. Doliwo Dobrowolsky”, da empresa “AEG”, em Berlim, entrou com um pedido de patente de um motor trifásico com rotor de gaiola. O motor apresentado tinha uma potência de 80watts, um rendimento aproximado de 80% e um excelente conjugado de partida. As vantagens do motor de corrente alternada para o motor de corrente contínua eram marcantes: construção mais simples, silencioso, menos manutenção e alta segurança em operação. Em 1891 “Dobrowolsky” desenvolveu a primeira fabricação em série de motores assíncronos, nas potências de 0,4 a 7,5kW [18].

1.3 Generalidades

A presença de harmônicos em sistema de energia elétrica já era conhecida desde o início do século passado, aproximadamente depois de 1920, sendo essas ocorrências devidas principalmente à corrente de magnetização dos transformadores e características construtivas dos geradores da época. Porém, como no início do século passado a grande maioria das cargas alimentadas pelo sistema elétrico apresentava comportamento linear, a corrente e tensão da rede elétrica eram quase senóides perfeitas, mesmo com a existência destas pequenas correntes harmônicas. Isto levou aos engenheiros e cientistas da época a não considerar os harmônicos como uma prioridade e a partir das aplicações de normas na década de noventa começa a preocupações [1 e 2].

No Brasil, além do motivo apresentado acima, dois outros fatores eram determinantes para que a qualidade de energia não fosse considerada uma preocupação. O primeiro fator consistia no fato de que a maioria dos consumidores, até meados da década de 70, não necessitava de um fornecimento de energia de alta qualidade, uma vez que os processos e equipamentos da época não eram tão sensíveis aos distúrbios relacionados com a qualidade de energia do ponto de vista dos conteúdos harmônicos, bem como da falta de estudo sobre o equipamento principal do setor de geração, no caso a “Máquina Síncrona”. O segundo fator está ligado ao fato de que, naquela época, as concessionárias de energia operavam dentro de um regime de monopólio de tarifas com base no custo de serviço. Como o aumento dos lucros das empresas não estava diretamente ligado à redução dos custos, os recursos para aquisição de equipamentos mais robustos e mais caros eram constantes, o que minimizavam os efeitos dos harmônicos no sistema elétrico, além de não haver uma regulamentação para todos os fenômenos relacionados à qualidade de energia, principalmente aos relacionados com os conteúdos harmônicos.

A partir da década de 70, com o desenvolvimento mundial da eletrônica de potência, que possibilitou a criação de conversores utilizando chaveamentos eletrônicos nas alimentações das cargas em geral, a presença de componentes harmônicos de tensão e de corrente na rede aumentou demasiadamente. Como esses conversores se limitavam ao uso industrial, as preocupações com os

harmônicos ficaram restritas a este setor, sendo o mesmo obrigado pelas concessionárias a manter a tensão e a corrente na sua barra de conexão com o sistema de distribuição dentro de determinados padrões de qualidade. Nos setores residencial e comercial, com a crescente popularização de equipamentos eletrônicos como fornos microondas, computadores e demais eletrônicos, além do aumento do número de televisores, aparelhos de som e outros, a geração de harmônicos, que era quase exclusividade das indústrias, também passou a ser percebida. Além disso, a constante preocupação com conservação de energia, após a criação do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica - PROCEL em 1985, e consolidado no Brasil durante e após o racionamento de energia elétrica ocorrido nos anos 2001 e 2002, que incentivou a substituição de cargas dadas como não eficientes (na sua maioria cargas de característica linear), por cargas de menor consumo com grande utilização, por exemplo, das lâmpadas eletrônicas e inversores de frequência melhora a eficiência das cargas, porém aumenta a injeção de harmônicos na rede. Nas últimas décadas, os conteúdos harmônicos têm causado grandes transtornos às concessionárias de energia, como explosões de bancos de capacitores e redução da vida útil de transformadores. Esses tendem a aumentar com o crescimento do uso dos equipamentos eletrônicos em geral, pois existe a constante popularização desses equipamentos nos setores residências e comerciais.

1.4 Objetivo

Este estudo objetivou realização da identificação e tratamentos das interferências de harmônicas no funcionamento das máquinas síncronas de polos salientes. Para tanto foram desenvolvidas modelagens matemáticas, análises físicas, simulações computacionais, ensaios em laboratório e medições em campo, divididas em etapas, com os desenvolvimentos das equações elétricas e mecânicas. Para permitir a análise e entendimento da máquina elétrica, submetida a regime para alimentação de cargas não lineares, foram consideradas as componentes harmônicas das distribuições espaciais da densidade de fluxo magnético produzidas pelos seus enrolamentos, assim como as componentes harmônicas temporais produzidas pelas cargas não lineares.

Nestas comparações entre os funcionamentos da máquina síncrona nos regimes permanentes senoidais e não senoidais, **considerando** as oscilações de torque eletromagnético provenientes da interação entre as componentes harmônicas das correntes de estator e rotor. **Bem como da busca por uma forma de onda da tensão de excitação que atenuasse as** oscilações de torque eletromagnético **e, contudo a redução das perdas provenientes dos conteúdos harmônicos espaciais e temporais.**

1.5 O estado da Arte

Entre os diversos estudos, pesquisando as condições elétricas, térmicas, rendimentos e a vida útil de geradores síncronos, foram verificados outros equipamentos, tais como: transformadores, motores, cabos em operação de sistema elétricos de potência senoidais e não senoidais. Destaca-se a norma ANSI/IEEE C57. 110/D7 de 1982 [3], nas suas respectivas atualizações, em 1986 e 1998. Essa Norma está designada por ANSI/IEEE C 57.110 “Recommended Practice for Establishing Transformer Capability when Supplying Non-Sinusoidal Load Currents”, IEEE, NY/febr. 1998 [4]. Nessa referência está destacada a importância da estimativa das perdas joule e adicionais “eddy current loss”, quando os transformadores estão operando em condições não senoidais. Porém essa não trata propriamente da máquina síncrona, mas é importante a este estudo com argumentos referentes às perdas joule e adicionais, onde se observou que os transformadores a seco apresentam nas propriedades construtivas do dielétrico o mesmo tratamento do dielétrico da Máquina Síncrona. Portanto, buscou-se suprir justamente por essa ausência de tratamento em normas a respeito de todas às perdas das máquinas síncronas, àquelas conhecidas, ou não e as verificadas neste estudo, como a identificação do descompasso e tempo de atuação entre o torque da turbina e o torque do gerador. Em verificação aos aspectos dessa norma, observou-se a metodologia de cálculo “derating” para que a vida útil do equipamento seja preservada. Os padrões do IEEE exigem medidas de verificação de temperatura nos pontos mais quentes do enrolamento, como teste de qualidade e dos modelos matemáticos de fabricação. Como isto é especial e importante para transformadores a seco, ventilados e projetados para alimentação de cargas não

senoidais, também é de suma importância a verificação dessa norma na aplicação para máquina síncrona.

De acordo com “Emanuel A. E., S.N. Makarov, *“Corrected Harmonic Loss Factor for Transformers Supplying Nonsinusoidal Load Currents”*, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, MA 01609, USA, 2000/IEEE” [5], a suposição de que as perdas adicionais “eddy current loss” nos transformadores em condições de operação com correntes distorcidas são proporcionais ao quadrado da frequência e da corrente, quando os condutores dos enrolamentos possuem uma seção menor que 3mm. Para condutores com dimensões maiores, esta suposição conduz a resultados conservadores. Este artigo calcula um fator de perda harmônico corrigido que conduz a uma estimativa mais precisa da capacidade do transformador para a sua operação com carregamento não senoidal. Neste estudo sobre Máquina Síncrona, foram aplicados os efeitos “skin” para determinação das perdas no núcleo em função da proximidade dentro do enrolamento e apresentam a dependência do “derating” da máquina.

Considerações sobre a vida útil de materiais isolantes empregados em transformadores, e metodologias utilizadas para se avaliar a degradação destes materiais, são encontradas em “Bishop, M. T.; Gilker, C. - *“Portable harmonics meter evaluates transformer heating”* Computer Applications in Power System, pp. 41-44, October 1992” [6]. Para o qual foi efetuado paralelo desta consideração, adequando-a a máquina síncrona.

A Norma IEEE – std – 519-1992 – “Recommended Practices and Requirements For Harmonic Control in Electrical Power Systems” [7] – é essencial para a realização das comparações dos limites de distorções harmônicas estabelecidos. Esta apontou que os limites estabelecidos estão muito aquém do limite que começa a colocar a Máquina Síncrona em processo de degradação da sua vida útil e do seu rendimento.

A referência [8] é a que mais enfoca o assunto proposto neste trabalho, pois apresenta uma modelagem onde são considerados os harmônicos temporais e espaciais na máquina síncrona. O objetivo principal do artigo é verificar a influência da poluição harmônica de tensão e de corrente no ângulo de carga (potência) do gerador. Porém o desenvolvimento do trabalho permitiu que os

autores obtivessem outras conclusões, não apenas sobre o referido ângulo. Ao desenvolver a modelagem, termos não tradicionais aparece nas equações de fluxo e de corrente da máquina, apresentando alguns efeitos adicionais, tais como: alteração na componente fundamental do fluxo, correntes harmônicas no enrolamento amortecedor. A presença de harmônicos temporais e espaciais influi no valor de regime permanente do ângulo de carga do gerador, os defasamentos angulares dos harmônicos influem de um modo geral no desempenho do gerador. As conclusões deste artigo foram importantes para o desenvolvimento deste trabalho.

A referência [9] apresenta uma modelagem do gerador de polos salientes utilizando a técnica tradicional das impedâncias harmônicas devido aos efeitos temporais da corrente, não incluindo efeitos dos harmônicos espaciais do fluxo magnético. As conclusões principais são: coerência de resultados teóricos experimentais, efeito significativo nos níveis harmônicos em função da posição angular do rotor devido à saliência dos polos. Não se discute questões relacionadas com perdas e desempenho da máquina.

As referências [10] e [11] tratam da máquina em operação isolada e verifica a modelagem matemática do gerador, quando este alimenta uma carga não linear, no caso um retificador. Porém não apresentou novidades das modelagens referentes à máquina síncrona.

A referência [12] apresenta seus estudos para máquina síncrona alimentando uma ponte conversora de seis pulsos totalmente controlada, com uma modelagem através dos elementos finitos bidimensional.

A escassez de artigos e as conclusões nos poucos encontrados demonstram claramente a necessidade da investigação técnico-científica em foco neste trabalho.

Desta forma, observa-se que o tema tem sido pouco explorado, embora a sua complexidade dificulte a necessidade por investigações. Neste sentido, dentro do enfoque maior deste estudo, deve seguir na direção de exploração com a realização de estudos complementares ou até inéditos, estudos que inter-relacionam o comportamento elétrico, térmico, vida útil e rendimento de Máquinas

Síncronas na presença de sistemas elétricos de potência com regimes não senoidais.

1.6 Organização da Tese

Para alcançar os objetivos, os estudos estão descritos em etapas e organizados em sete capítulos e quatro apêndices.

No capítulo II, a análise de máquina síncrona operando em regime permanente não senoidal, onde estão apresentada uma análise físicas e comparações das oscilações de torque eletromagnético. No capítulo III, a modelagem da máquina síncrona de polos salientes considerando os conteúdos harmônicos espaciais e temporais. No capítulo IV, as simulações computacionais para verificações deste estudo, onde foram apresentados dois programas computacionais, sendo um deles, além da programação foi utilizada para auxílio a programação a teoria dos grafos. No capítulo V, descritos e apresentados os ensaios experimentais efetuados em laboratórios para verificação deste estudo de forma prática. No capítulo VI, apresentação da forma de atenuação das oscilações de torque eletromagnéticos. No capítulo VII, as conclusões e sugestões para trabalhos futuros. No apêndice A, abordagens sobre harmônicos em sistemas de energia elétrica. No apêndice B, abordagens sobre procedimentos de redes. No apêndice C, abordagens sucintas sobre teoria dos grafos. No apêndice D, o software aplicativo desenvolvido em "Matlab".

2.1 Introdução

Este capítulo se destina a fazer uma análise dos principais pontos que apresentam diferenças entre o funcionamento da máquina síncrona nos regimes permanentes senoidais e não senoidais. Para tanto são analisados as oscilações de torques eletromagnéticos provenientes da interação entre as componentes harmônicas das correntes de estator e rotor, bem como os aumentos das perdas e consequente diminuição da vida útil da máquina síncrona.

2.2 Análises Física Oscilações de Conjugados

Esta análise tem como objetivo compreender fisicamente a origem das oscilações de conjugado eletromagnético, importando-se apenas com os aspectos qualitativos, uma vez que os quantitativos vêm dos resultados das simulações computacionais. O resultado desta análise é de grande auxílio para verificar “como” promover possíveis atenuações das oscilações de conjugado.

Como o interesse é apenas o exame qualitativo, a título de se fazer uma análise simples, porém esclarecedora, pode-se então, admitir a distribuição senoidal de “fmm” produzida em cada enrolamento, ou seja, não considerar os efeitos dos harmônicos espaciais. Estes serão contemplados na análise quantitativa a ser feita com base nos resultados obtidos nas simulações computacionais.

A componente fundamental espacial de “fmm” produzida pelo enrolamento trifásico do estator de um gerador síncrono, quando neste circulam correntes não senoidais, pode ser escrita como (2.1).

$$f_{mm} = \sum f_{mmh} \quad (2.1)$$

Onde:

$$f_{mmh} = KI_h \left[\cos(\theta) \cos(h\omega t) + \cos(\theta - 120) \cos[h(\omega t - 120)] \right. \\ \left. + \cos(\theta + 120) \cos[h(\omega t + 120)] \right] \quad (2.2)$$

Resolvendo a expressão (2.2), para os valores ímpares de “h”, tem-se:

$$h = 1 \longrightarrow f_{mm1} = \frac{3}{2} KI_1 \cos(\theta - \omega t) \quad (2.3)$$

$$h = 3 \longrightarrow \text{zero} \quad (2.4)$$

$$h = 5 \longrightarrow f_{mm5} = \frac{3}{2} KI_5 \cos(\theta + 5\omega t) \quad (2.5)$$

$$h = 7 \longrightarrow f_{mm7} = \frac{3}{2} KI_7 \cos(\theta - 7\omega t) \quad (2.6)$$

Observa-se nas expressões de (2.3) a (2.6) uma lei de formação a partir de (2.6). A expressão (2.6) tem o mesmo tipo que (2.4), bastando mudar apenas o índice “h” de 1 para 7. Assim, a próxima expressão que será para h=9 tem o mesmo valor que (2.4), ou seja, zero. Para h=11, a analogia vem de (2.5), basta trocar 5 por 11. De mesmo modo, h=13 é do mesmo tipo que (2.3), e assim por diante, tem-se uma sequência de formação.

As expressões (2.3), (2.4), (2.5) e (2.6) representam fisicamente as “fmms” girantes com velocidades angulares constantes, e em relação ao estator. Assim, podem-se expressar estes movimentos através da equação horária do movimento circular uniforme, (2.7) a (2.9).

$$\theta = \omega t \quad (2.7)$$

$$\theta = -5\omega t \quad (2.8)$$

$$\theta = 7\omega t \quad (2.9)$$

Desta forma conclui-se que:

- A componente fundamental da “fmm” tem velocidade angular “ ω ”;
- A componente de quinto harmônico de “fmm” tem velocidade angular “ 5ω ”, no sentido oposto à componente fundamental;
- A componente de sétimo harmônico de “fmm” tem velocidade angular “ 7ω ”, no mesmo sentido que a componente fundamental.

É importante observar que todas as velocidades mencionadas são em relação ao estator, como apresentado na figura 2.1.

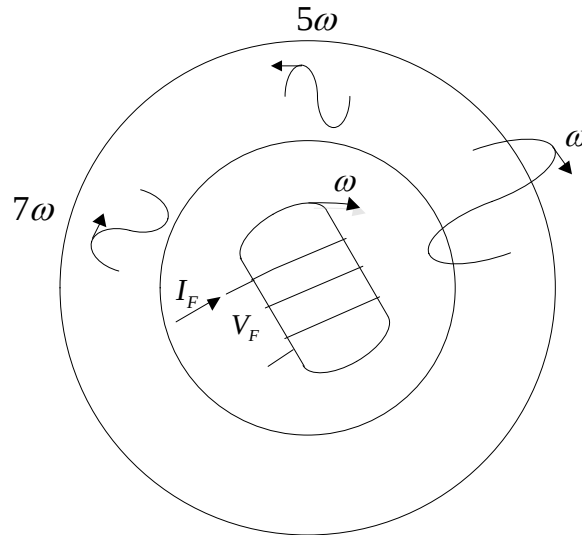


Figura 2.1 - Componente da fmm.

Colocando o rotor na velocidade “ ω ” e no sentido indicado na figura 2.1, o que corresponde ao funcionamento em regime permanente da máquina síncrona, observa-se que o campo magnético produzido pela “fmm” de quinto harmônico do estator, induz no enrolamento do campo do rotor uma tensão de frequência “ 6ω ” ($5\omega + \omega$). O campo magnético produzido pela “fmm” de sétimo harmônico do estator induz no enrolamento do campo do rotor, também uma tensão de frequência “ 6ω ” ($7\omega - \omega$). As tensões induzidas na frequência “ 6ω ” produzem uma corrente de excitação na mesma frequência. Esta corrente produz, por sua vez, um campo magnético pulsante de frequência “ 6ω ”. A equação característica de um campo magnético pulsante é dada pelo produto de duas funções cos-senoidais, uma em função do tempo, e outra em função do espaço na máquina. No caso a função do tempo está relacionada com a frequência da corrente, ou seja, “ 6ω ”, expressão (2.10).

$$\cos(\alpha) \cos(6\omega t) \quad (2.10)$$

O ângulo “ α ” é o espacial na máquina, com origem, por exemplo, no centro do pólo positivo magnético do rotor, figura 2.2.

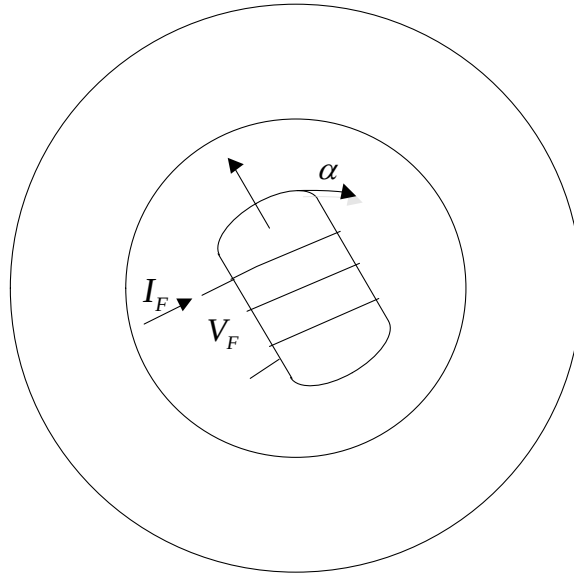


Figura 2.2 - Apresentação do Ângulo do Rotor

O produto da expressão (2.10) pode ser decomposto na expressão (2.11).

$$\cos(\alpha) \cos(6\omega t) = \frac{1}{2} \cos(\alpha - 6\omega t) + \frac{1}{2} \cos(\alpha + 6\omega t) \quad (2.11)$$

Assim o campo magnético pulsante pode ser decomposto em 2 girantes, ambos na mesma velocidade, em relação ao rotor, porém em sentidos opostos, figura 2.3.

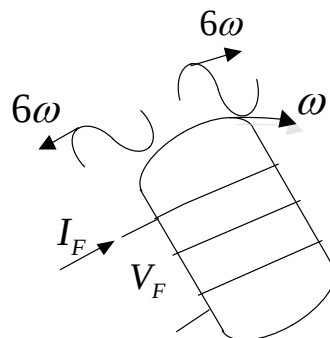


Figura 2.3 - Representação dos campos pulsantes.

Pela figura 2.3 deduz-se que os dois campos girantes produzidos pela corrente de excitação de frequência “ 6ω ” têm velocidades “ 5ω ” e “ 7ω ” em relação ao estator, figura 2. 4.

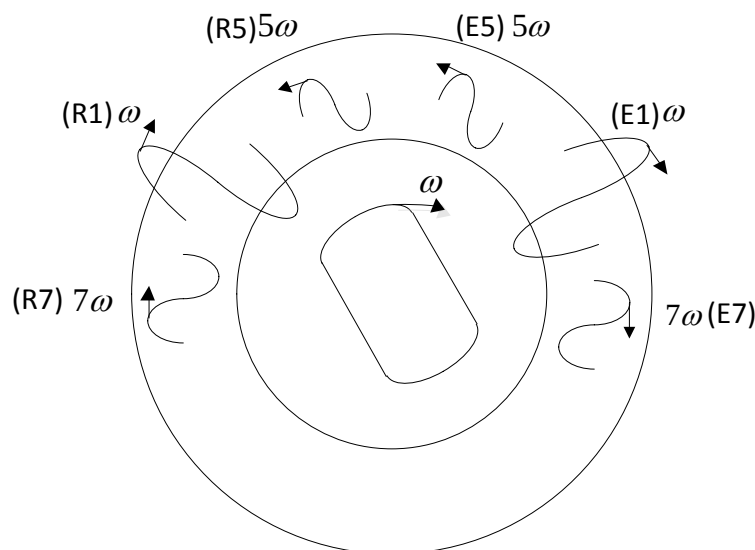


Figura 2.4 - Representações das Frequências.

A figura 2.4 apresenta todas as “fmms” responsáveis pela produção de campo magnético, tanto no estator como no rotor. Todas as velocidades são com relação ao estator. Os campos magnéticos, um no estator e outro no rotor, que parados entre si, produzem conjugados constantes, com valores positivos ou negativos. Porém, aqueles campos magnéticos, um de estator e outro de rotor, que não estejam parados entre si, produzem conjugados oscilantes, cuja média é nula. Até o sétimo harmônico, as possíveis combinações de dois campos magnéticos, um de estator e outro de rotor, cujas velocidades são diferentes, produzem oscilações de conjugado na frequência “ 6ω ”, quando um dos campos é o fundamental. Caso contrário esta frequência é “ 12ω ”.

Quando se introduz harmônicas de enrolamento, outras oscilações vão ocorrer, porém superpostas a estas aqui encontradas.

Desta análise física, pode-se, nortear um primeiro rumo na atenuação das oscilações de conjugado. Por exemplo, a diminuição ou chaveamentos dos valores da tensão de excitação na frequência de “ 6ω ”, reduz os valores dos conjugados oscilantes. É perfeitamente possível inclusive na prática, provocar externamente a diminuição ou chaveamento desta tensão de excitação, e

consequentemente atingir o objetivo de se reduzir os valores do conjugado oscilante. Resta apenas verificar se a parcela de conjugado oscilante produzida pela aplicação da tensão de excitação tem um valor suficientemente significativo no seu valor total. Esta resposta vem dos resultados das simulações computacionais a serem futuramente efetuados.

2.3 Perdas e Redução de Rendimento

Nas máquinas elétricas, as perdas podem ser divididas, fundamentalmente em três grandes grupos:

- Cobre;
- Ferro;
- Mecânicas.

2.3.1 Perdas no Cobre

São perdas provocadas pelo efeito Joule, dada pela expressão (2.12). A resistência R , de cada enrolamento, deve estar na temperatura da máquina, e a corrente " I " e o seu valor eficaz. No caso dos enrolamentos das máquinas percorridos por correntes alternadas, o valor da resistência destes deve ainda levar em conta o efeito pelicular imposto.

$$P_{cu} = R.I^2 \quad (2.12)$$

Se a corrente elétrica que circula nos enrolamentos da máquina for não senoidal, o seu valor eficaz será dado pela raiz quadrada da soma dos quadrados dos valores eficazes dos respectivos termos harmônicos, incluindo o fundamental e do termo contínuo, ou seja, a aplicação da expressão (2.13).

$$I = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (2.13)$$

Assim se conclui da expressão (2.13), que sendo a corrente não senoidal, o seu valor eficaz será superior ao que seria se fosse senoidal, representado pelo termo fundamental. Em consequência desse acréscimo na corrente se tem um acréscimo nas perdas.

Como já mencionado, a resistência “R” contempla o efeito pelicular. Este, no caso em questão, ou seja, correntes não senoidais estão diretamente relacionados com a forma de onda da corrente, que representa um efeito não muito distante do mesmo para o caso da componente fundamental. Não deve considerar o efeito pelicular individual de cada frequência harmônica, pois isto seria admitir a superposição de efeitos para a grandeza “perda”. O teorema da superposição de efeitos somente é válido para grandezas lineares, e como no caso a “perda” é grandeza de potência, consequentemente é não linear. Satisfazendo a condição de o efeito pelicular ser considerado igual ao do regime senoidal fundamental, pode-se relacionar a perda no cobre com o “THD” de corrente.

Considerando a corrente não senoidal, porém sem a componente de corrente contínua, tem-se de (2.12) e (2.13) a expressão (2.14).

$$P_{CU} = R \cdot I^2 = R \cdot \sum_{h>1} I_h^2 \quad (2.14)$$

Pela definição de THD tem-se (2.15).

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h>1} I_h^2}}{I_1} \quad (2.15)$$

De (2.14) e (2.15) tem-se (2.16).

$$R \cdot I^2 = R \cdot I_1^2 + THD_i^2 \cdot R I_1^2 \quad (2.16)$$

Para análise de uma ordem de grandeza, faz-se uma aplicação numérica em (2.16). Considerando “THD_i”, igual a 30%, de (2.16) tem (2.17).

$$R \cdot I^2 = R \cdot I_1^2 + 0,09 \cdot R \cdot I_1^2 \quad (2.17)$$

De (2.17) conclui-se que para "THD_i", igual a 30%, o acréscimo da perda Joule em relação ao regime senoidal fundamental é da ordem de 9%.

2.3.2 Perdas no Ferro

As perdas no ferro são: por histerese e por correntes de Foucault, funções da variação da densidade de fluxo magnético no núcleo ferromagnético das máquinas.

Para um determinado núcleo de material ferromagnético existe uma relação peculiar entre o fluxo magnético e a "fmm" que o produz, que se dá o nome de "ciclo histerético", quando este fluxo tem uma variação temporal tanto mocional, como variacional. A área deste ciclo representa a energia gasta durante o processo de magnetização do núcleo ferromagnético. Esta energia gasta corresponde à "Perda por Histerese".

No caso da máquina síncrona tem-se preferencialmente uma variação mocional do fluxo magnético, em relação ao estator, produzido pela composição das "fmms" originadas das correntes de, estator e de rotor. Neste último as correntes são: excitação e de enrolamento amortecedor.

A variação temporal do concatenamento deste fluxo com as fases do enrolamento de estator resulta nas tensões de fase, a menos da queda resistiva de cada uma. Como esta queda é bem pequena, pode-se afirmar com precisão, que a tensão de fase da máquina síncrona está relacionada com o "ciclo histerético". Se esta tensão é senoidal, o "ciclo histerético" tem o formato de um laço, o tradicional laço de histerese. Para uma tensão de fase não senoidal o "ciclo histerético" tem um formato diferente de um simples laço, definido pela forma de onda da tensão.

Para se ter qualidade de energia, o "THD" da tensão é controlado dentro de limites, bem limitados, regidos por Norma. Por exemplo: a IEEE-Std-519-1992 [7], onde o valor de "THD_v" estar na faixa de 1 a 5%. Para estes valores, as perdas por histerese não devem ter um aumento significativo em relação à mesma para a tensão senoidal.

2.3.3 Perdas Mecânicas

As perdas mecânicas são perdas por atritos e por arrastamentos. Sendo as perdas por atritos aquelas ocasionadas nos "apoios deslizantes" e rolamentos. Já as perdas por arrastamentos, são as partes moveis em rotação que provocam um arrastamento do meio envolvente, por exemplo, o ar, produzindo um binário resistente.

Como o torque resistente ao movimento em máquinas rotativas está associado ao atrito do tipo Coulomb, referente ao atrito seco, aos mancais ou rolamentos com lubrificação conhecido como atrito viscoso e às hélices de ventilação do rotor atitam com o ar, estes são, portanto, designados perdas mecânicas. É importante nestas perdas estudos e a identificação destas em função do peso girante da máquina, bem como o seu designer de construção.

3.4 Vidas Úteis

Normalmente o estudo da vida útil de enrolamento de máquinas elétricas rotativas se relaciona com uma dada temperatura máxima de operação, para a qual a máquina foi projetada e construída. Por exemplo, nos dielétricos para enrolamentos classe "F" e com isolamento seca, a temperatura limite operacional é "155⁰C", sem redução da sua vida útil. Quando os isolamentos são de materiais à base de: mica, amianto e fibra de vidro aglutinado com outros materiais sintéticos, silicones, poliésteres, epóxi, etc., ou seja, matérias desta cadeia; os dielétricos tem uma longa durabilidade, quando seus limites de temperatura são mantidos abaixo dos limites construtivos. Tendo como referencia ao ponto mais quente da isolamento.

A durabilidade de um dielétrico depende, entre outros fatores principalmente da temperatura e do tempo ao qual o mesmo está exposto. A relação entre tempo e temperatura e seus efeitos na isolamento tem sido objeto de estudo por vários anos. Em 1930, "Montsinger" [15] introduziu o conceito da regra dos 10⁰C, ou seja, a vida útil do dielétrico é reduzida à metade para cada aumento de 10⁰C da temperatura da isolamento. Este modelo, parte do pressuposto que, se todas as outras influenciam puder ser desprezado, o isolamento irá sofrer um

processo de deterioração de natureza química. Este processo é irreversível e leva o isolamento a um estado em que este reduz as suas capacidades dielétricas.

A teoria clássica de "Arrhenius" e "Darkin" [16] e [17] estabelece que a vida útil da isolação esteja intimamente associada à temperatura de operação, bem como ao tempo de exposição da mesma. O processo de deterioração do isolante consiste em um fenômeno químico, onde uma oxidação lenta e gradual leva ao endurecimento do verniz isolante. Consequentemente, o mesmo torna-se quebradiço, levando à perda da flexibilidade mecânica e da rigidez dielétrica. Em outras palavras, trata-se do envelhecimento gradual do isolante ao longo do tempo, que vai perdendo suas propriedades isolantes até que não mais suporta a tensão aplicada e ocasiona um curto-circuito entre as partes energizadas. A degradação térmica de materiais orgânicos e inorgânicos de um equipamento elétrico pode ser estimada pela equação da taxa de reação conhecida como a expressão de "Arrhenius" (2.18).

$$\frac{dEVu}{dt} = \left(Ae^{\frac{-E}{k\theta}} \right) \quad (2.18)$$

Na verificação da equação apresentam valores absolutos da vida útil de um determinado dielétrico, onde se reconhece que o cálculo da mesma a partir da temperatura de operação da isolação é difícil. Portanto há necessidade de se esperar um longo período de tempo até que a isolação sofra a primeira deterioração, para avaliar o seu tempo de vida. Para contemplar o que foi anteriormente exposto, faz-se necessário modificar a equação (2.18), de onde surge a expressão matemática que dá origem à conhecida curva de "Arrhenius". Para tanto, integrando-se (2.18) e aplicando o logaritmo neperiano nos seus dois lados em (2.18), obtêm-se (2.19).

$$(\ln .EVu) = \left(\frac{E}{k} \right) \cdot \frac{1}{\theta} + A \quad (2.19)$$

A expressão (2.19) indica que o tempo de vida da isolação é função da energia de ativação específica do material e da temperatura da isolação, considerada constante ao longo de toda sua vida útil. As curvas de "Arrhenius" são obtidas traçando-se "ln.EVu" versus $\frac{1}{\theta}$, cuja inclinação é, $\frac{E}{k}$. Conhecendo-se

dois pontos quaisquer, “ EVu_1 ” e “ EVu_2 ”, pertencentes à curva de “Arrhenius”, com suas respectivas temperaturas, “ θ_1 ” e “ θ_2 ”, e utilizando a expressão (2.19), obtêm-se (2.20).

$$(\ln .EVu_1 - \ln .EVu_2) = \left(\frac{E}{k} \right) \left(\frac{1}{\theta_1} - \frac{1}{\theta_2} \right) \quad (2.20)$$

A equação (2.16) apresenta a redução da vida útil do material isolante em uma determinada condição operacional em função de valores conhecidos. Portanto, considerando-se que o tempo de vida útil nominal da isolação seja igual a “ EVu_2 ”, a uma temperatura nominal “ θ_2 ”, quando a temperatura de operação sofre um acréscimo “ $\Delta\theta$ ”, ou seja, quando “ θ_1 ” é igual a “ $\theta_2 + \Delta\theta$ ” e substituindo o valor de “ θ_1 ” em (2.20) e transformando-se essa expressão, pode-se escrever (2.21).

$$(EVu_1) = EVu_{nom} e^{-\left(\frac{E}{k} \right) \left(\frac{\Delta\theta}{\theta_{nom}(\theta_{nom} + \Delta\theta)} \right)} \quad (2.21)$$

Para aplicação da expressão (2.21) há necessidade do conhecimento da vida útil nominal e da classe de isolamento do gerador, e fundamentalmente da temperatura da isolação do enrolamento do gerador na condição operacional que se deseja verificar. Para a verificação da vida útil é de fundamental relevância o conhecimento dos aspectos relativos à elevação da temperatura em áreas estratégicas localizadas no interior dos geradores. Para a determinação das elevações da temperatura que o mesmo está sujeito ou vem apresentando, geralmente recorre-se às medições “*in loco*” ou estimativas via modelos térmicos do gerador. Adicionalmente, devem-se estabelecer valores nominais para a vida útil do isolante, bem como sua respectiva temperatura de referência. Um fator importante é a medição do conteúdo harmônicos na região onde estar localizado o gerador, pois como são sabidos, conteúdos harmônicos eleva a temperatura em função da elevação de corrente.

3.1 Introdução

Quando se pretende analisar com precisão o funcionamento de uma máquina elétrica, submetida a regime para alimentação de correntes não senoidais, se faz necessário considerar os componentes harmônicos das distribuições espaciais da densidade de fluxo magnético produzidos pelos seus enrolamentos. O motivo vem do fato de existir dois tipos de componentes harmônicas: os temporais produzidos pelas cargas não lineares e quaisquer chaveamentos na tensão de alimentação, e os espaciais caracterizados pelos enrolamentos da máquina. A interação entre estas componentes harmônicas, inclusive com as componentes fundamentais, gera novas componentes de conjugado eletromagnético. Para tanto, é importante o desenvolvimento de um modelo matemático que contempla estas componentes harmônicas.

3.2 Desenvolvimento

O desenvolvimento deste estudo foi dividido em etapas, a primeira com a modelagem das equações elétricas e a segunda com as equações mecânicas.

3.2.1 Equações Elétricas

A figura 3.1 apresenta esquematicamente um sistema de referencia angular " θ ", através do qual se pode localizar qualquer ponto na circunferência media do entreferro de uma máquina elétrica. O angulo " θ_j " indica a posição do eixo de um enrolamento genérico "j".

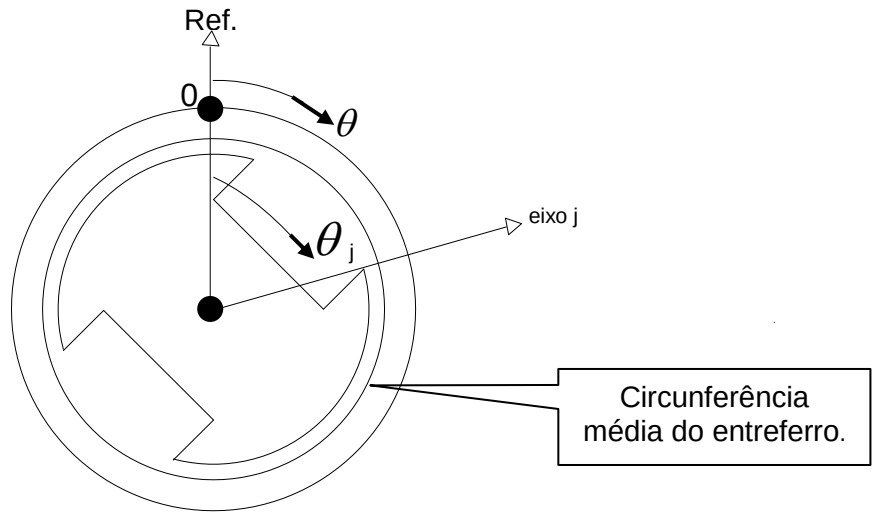


Figura 3.1 - Corte esquemático de uma máquina elétrica.

Linearizando a circunferência média do entreferro, tem-se a figura 3.2.

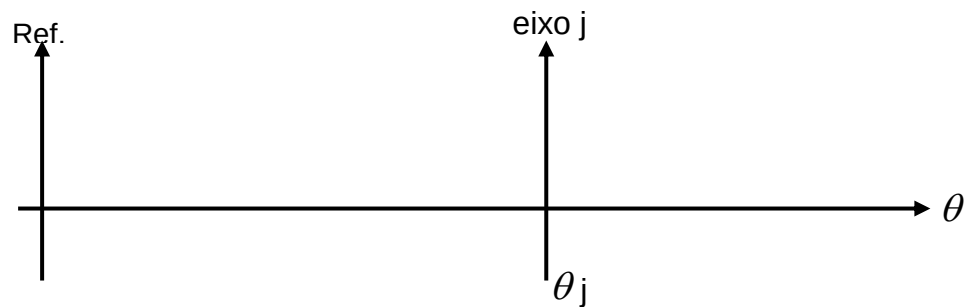


Figura 3.2 - Esquemático de linearização da figura 3.1.

Segundo a referência [13] e [14] expressão (3.1) resulta na componente de harmônica espacial "h" da "fmm" produzida pela corrente " i_j ", que circula no enrolamento de eixo "j".

$$f_{mm_h} = \frac{2}{\pi} N_j q_j K_{wj_h} i_h \frac{1}{h} \cos[h(\theta - \theta_j)] \quad (3.1)$$

$$K_{wj_h} = K_{pj_h} K_{dj_h} \quad (3.2)$$

$$K_{pj_h} = \text{sen}\left(h\beta_j \frac{\pi}{2}\right) \quad (3.3)$$

$$K_{dw_h} = \frac{\text{sen}\left(hq_j \frac{\alpha_{rj}}{2}\right)}{q_j \text{sen}\left(h \frac{\alpha_{rj}}{2}\right)} \quad (3.4)$$

Reunindo certos termos da expressão (3.1) em um único termo tem-se a (3.5).

$$K_{j_h} = \frac{2}{\pi} N_j q_j K_{wj_h} \quad (3.5)$$

Substituindo a (3.5) na (3.1), tem-se a (3.6).

$$f_{mm_h} = K_{j_h} i_h \frac{1}{h} \cos[h(\theta - \theta_j)] \quad (3.6)$$

Para que esta modelagem possa ser aplicada às máquinas síncronas de polos salientes, a " f_{mm_h} " da expressão (3.6), deve ser decomposta nos eixos "d" e "q", fixos ao rotor, sendo "d" alinhado com o eixo do enrolamento de campo do rotor. A "figura 3.3" apresenta como exemplo as componentes fundamentais, e quinta harmônica de " f_{mm} ", juntamente com os eixos: "a" da fase "a" do estator adotado na origem de " θ ", eixo "j" do enrolamento "j", eixos "d" e "q", e valores de " f_{mm} " a serem utilizados nas próximas decomposições.

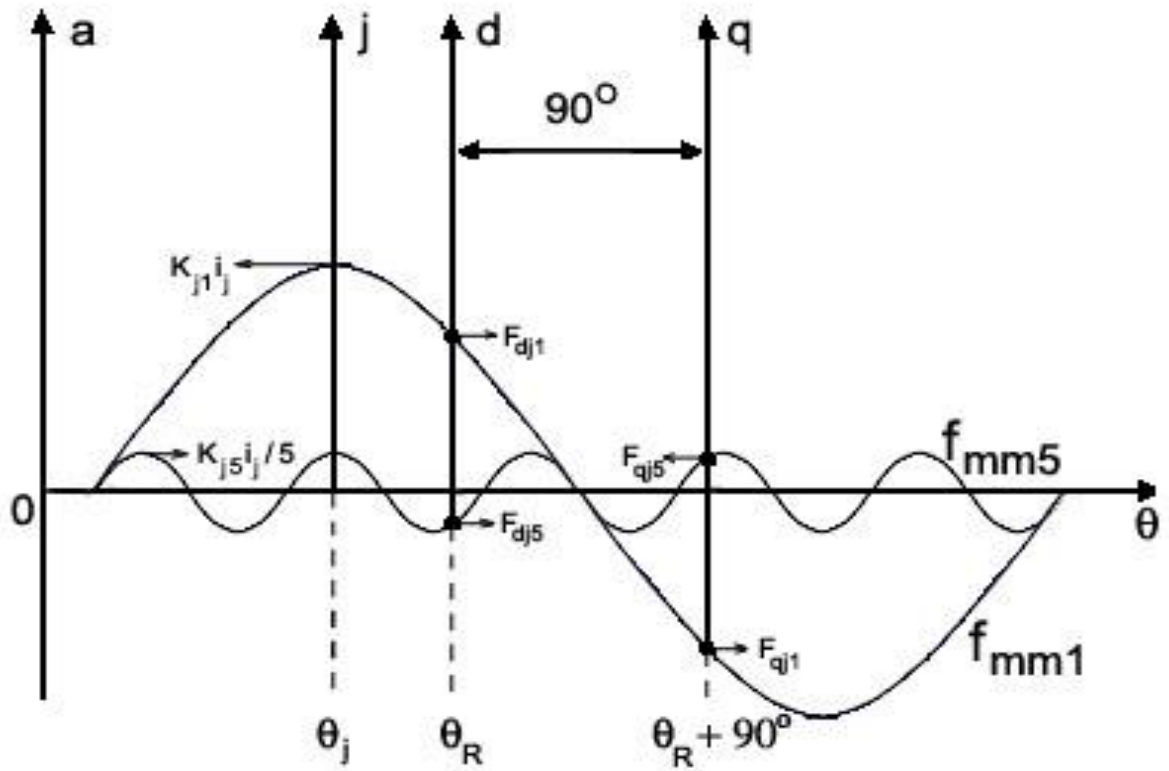


Figura 3.3 - Apresentações das “ f_{mm_1} ”, “ f_{mm_5} ”, e eixos “j”, “d” e “q”.

Com base nos dados apresentados na figura 3.3 efetuam-se as decomposições de (3.7) a (3.18).

$$f_{mmdj_1} = F_{dj_1} \cos[h(\theta - \theta_R)] \quad (3.7)$$

$$f_{mmdj_5} = F_{dj_5} \cos[5(\theta - \theta_R)] \quad (3.8)$$

$$f_{mmdj_h} = F_{dj_h} \cos[h(\theta - \theta_R)] \quad (3.9)$$

$$F_{dj_1} = K_{j1} i_j \cos[(\theta_R - \theta_j)] \quad (3.10)$$

$$F_{dj_5} = \frac{K_{j5}}{5} i_j \cos[5(\theta_R - \theta_j)] \quad (3.11)$$

$$F_{dj_h} = \frac{K_{jh}}{h} i_j \cos[h(\theta_R - \theta_j)] \quad (3.12)$$

$$f_{mmqj_1} = F_{qj_1} \cos[(\theta - \theta_R - 90)] \quad (3.13)$$

$$f_{mmqj_5} = F_{qj_5} \cos[5(\theta - \theta_R - 90)] \quad (3.14)$$

$$f_{mmqj_h} = F_{qj_h} \cos[h(\theta - \theta_R - 90)] \quad (3.15)$$

$$F_{qj_1} = K_{j1} i_j \cos[(\theta_R + 90 - \theta_j)] \quad (3.16)$$

$$F_{qj_5} = \frac{K_{j5}}{5} i_j \cos[5(\theta_R + 90 - \theta_j)] \quad (3.17)$$

$$F_{qj_h} = \frac{K_{jh}}{h} i_j \cos[h(\theta_R + 90 - \theta_j)] \quad (3.18)$$

Considerando genericamente as expressões de índice "h", substituindo (3.9) em (3.12), e (3.15) em (3.18), resultam em (3.19) e (3.20) respectivamente.

$$f_{mmqj_h} = \frac{K_{jh}}{h} i_j \cos[h(\theta_R - \theta_j)] \cos[h(\theta - \theta_R)] \quad (3.19)$$

$$f_{mmqj_h} = \frac{K_{jh}}{h} i_j \cos[h(\theta_R + 90 - \theta_j)] \cos[h(\theta - \theta_R - 90)] \quad (3.20)$$

Aplicando-se a propriedade trigonométrica a seguir em (3.19) e (3.20), têm-se as (3.21) e (3.22).

$$\cos(a) \cos(b) = \frac{1}{2} [\cos(a+b) + \cos(a-b)]$$

$$f_{mmdj_h} = \frac{K_{jh}}{2h} i_j \cdot \cos[h(\theta - \theta_j)] + \cos[h(\theta - 2\theta_R + \theta_j)] \quad (3.21)$$

$$f_{mmqj_h} = \frac{K_{jh}}{2h} i_j \cdot \cos[h(\theta - \theta_j)] + \cos[h(\theta - 2(\theta_R + 90) + \theta_j)] \quad (3.22)$$

As expressões (3.21) e (3.22) representam as componentes nos eixos “d” e “q” da componente harmônica “h” de força magneto motriz produzida pela corrente que circula no enrolamento “j”. Estas componentes produzem uma distribuição de densidade de fluxo magnético. Considerando “ δ_d ” como sendo o entreferro de eixo “d” e “ δ_q ” de “q”, as “ f_{mm_s} ” de eixos “d” e “q” aplicadas nos respectivos entreferros produzem as distribuições de densidade de fluxo magnético de eixos “d” e “q”, respectivamente apresentados em (3.23) e (3.24).

$$B_{djh} = \frac{\mu_0}{\delta_d} f_{mmdjh} \quad (3.23)$$

$$B_{qjh} = \frac{\mu_0}{\delta_q} f_{mmqjh} \quad (3.24)$$

De (2.21) a (2.24), tem-se (2.25) e (2.26).

$$B_{djh} = \frac{\mu_0 K_{jh}}{2\delta_d h} i_j \cos[h(\theta - \theta_j)] + \cos[h(\theta - 2\theta_R + \theta_j)] \quad (3.25)$$

$$B_{qjh} = \frac{\mu_0 K_{jh}}{2\delta_q h} i_j \cos[h(\theta - \theta_j)] + \cos[h(\theta - 2(\theta_R + 90) + \theta_j)] \quad (3.26)$$

A componente harmônica “h” da distribuição de densidade de fluxo magnético é dada pela superposição das componentes expressas em (3.25) e (3.26), resultando em (3.27).

$$B_{jh} = B_{djh} + B_{qjh} \quad (3.27)$$

Considerando agora um segundo enrolamento “i”, a componente da harmônica “h” do concatenamento de fluxo magnético produzido pela distribuição “ B_{jh} ” em uma bobina “b” deste enrolamento é dada pela expressão (3.28).

$$\lambda_{bjh} = 2PN_i \int_{\theta_b'}^{\theta_b''} B_{jh} LR \, d\theta \quad (3.28)$$

Onde:

$$\theta_b' = \theta_b - \beta_i \frac{\pi}{2} \quad (3.28a)$$

$$\theta_b'' = \theta_b + \beta_i \frac{\pi}{2} \quad (2.28b)$$

Como "b" representa genericamente uma bobina pertencente ao enrolamento "i", fazendo-o variar desde a primeira bobina até a última, ou seja, variação de um a " i_i ", tem-se (3.28) a componente harmônica "h" do concatenamento de fluxo magnético produzido pelo enrolamento "j", para cada bobina. Fazendo a somatória de todos estes concatenamentos tem-se a componente harmônica "h" do concatenamento de fluxo magnético no enrolamento "i", produzido pelo enrolamento "j", apresentado em (3.29).

$$\lambda_{ijh} = \sum_{b=1}^{q_i} \lambda_{bjh} \quad (3.29)$$

Substituindo (3.28) em (3.29), tem-se (3.30).

$$\lambda_{ijh} = 2PN_i \sum_{b=1}^{q_i} \int_{\theta_b'}^{\theta_b''} B_{jh} LR \, d\theta \quad (3.30)$$

Substituindo (3.27) em (3.30), tem-se (3.31).

$$\lambda_{ijh} = 2PN_i \left\{ \sum_{b=1}^{q_i} \int_{\theta_b'}^{\theta_b''} B_{djh} LR \, d\theta + \sum_{b=1}^{q_i} \int_{\theta_b'}^{\theta_b''} B_{qjh} LR \, d\theta \right\} \quad (3.31)$$

Substituindo (3.25) e (3.26) em (3.31) e resolvendo suas integrais, tem-se (3.32).

$$\lambda_{ijh} = K_{ij} \frac{k_{wih} K_{wjh}}{2h^2} i_j \left\{ \left(\frac{1}{\delta_d} + \frac{1}{\delta_q} \right) \cos[h(\theta_i - \theta_j)] + \left(\frac{1}{\delta_d} - \frac{1}{\delta_q} \right) \cos[h(\theta_i - \theta_j - 2\theta_R)] \right\} \quad (3.32)$$

$$K_{ij} = \frac{8}{\pi} PLR \mu_0 q_i q_j N_i N_j \quad (3.33)$$

Reunindo certos termos de (2.32) em (3.34) e (3.35) tem-se (3.36).

$$L_{dijh} = K_{ij} \frac{K_{wih} K_{wjh}}{2h^2 \delta_d} \quad (3.34)$$

$$L_{qijh} = K_{ij} \frac{K_{wih} K_{wjh}}{2h^2 \delta_q} \quad (3.35)$$

$$\lambda_{ijh} = \left\{ (L_{dijh} + L_{qijh}) \cos[h(\theta_i - \theta_j)] + (L_{dijh} - L_{qijh}) \cos[h(\theta_i - \theta_j - 2\theta_R)] \right\} i_j \quad (3.36)$$

Da definição de indutância tem-se (2.37).

$$\ell_{ijh} = \frac{\lambda_{ijh}}{i_j} \quad (3.37)$$

De (3.36) e (3.37), tem-se (3.38).

$$\ell_{ijh} = (L_{dijh} + L_{qijh}) \cos[h(\theta_i - \theta_j)] + (L_{dijh} - L_{qijh}) \cos[h(\theta_i - \theta_j - 2\theta_R)] \quad (3.38)$$

Para “h=1” aplica as expressões (3.34) e (3.35), tornam-se (3.39) e (3.40).

$$L_{dij1} = K_{ij} \frac{K_{wi1} K_{wj1}}{2\delta_d} \quad (3.39)$$

$$L_{qij1} = K_{ij} \frac{K_{wi1} K_{wj1}}{2\delta_q} \quad (3.40)$$

De (3.34), (3.35), (3.39) e (3.40), tem-se (3.41) e (3.42).

$$L_{dijh} = K_{ijh} L_{dij1} \quad (3.41)$$

$$L_{qijh} = K_{ijh} L_{qij1} \quad (3.42)$$

Onde:

$$K_{ijh} = \frac{K_{wih} K_{wjh}}{h^2 K_{wi1} K_{wj1}} \quad (3.43)$$

Substituindo (3.41) e (3.42) em (3.38), tem-se (3.44).

$$\ell_{ijh} = K_{ijh} \left\{ (L_{dij1} + L_{qij1}) \cos[h(\theta_i - \theta_j)] + (L_{dij1} - L_{qij1}) \cos[h(\theta_i - \theta_j - 2\theta_R)] \right\} \quad (3.44)$$

A expressão (3.44) representa a indutância harmônica mútua entre os enrolamentos nos eixos “i” e “j”.

Conhecendo-se a indutância “ ℓ_{ijh} ” é possível estabelecer a tensão em um enrolamento em função das correntes, no mesmo, e em outros enrolamentos, (3.45).

$$v_i = r_i i_i + L_i \frac{di_i}{dt} + \frac{\partial \lambda_i}{\partial t} \quad (3.45)$$

A grandeza “ λ_i ” é obtida pela composição dos concatenamentos de todos os enrolamentos com o enrolamento “i”, dada por (3.46).

$$\lambda_i = \sum_j \lambda_{ij} \quad (3.46)$$

Em (3.46) “j” representa todos os enrolamentos, inclusive “i”. O concatenamento “ λ_{ij} ” é composto das componentes “h”, e desta forma pode-se escrever (3.47).

$$\lambda_{ij} = \sum_h \lambda_{ijh} \quad (3.47)$$

Da definição de indutância, apresentado em (3.37), tem-se (3.48).

$$\lambda_{ijh} = \ell_{ijh} i_j \quad (3.48)$$

(3.49)

A expressão (3.45) juntamente com as (3.44) e (3.49) modela a máquina síncrona de polos salientes. Para tanto faz-se variar “i” e “j” nas 3 fases, “a”, “b”, “c”, do enrolamento da armadura, nas duas fases, “D” e “Q”, do enrolamento amortecedor, e no enrolamento de campo ou excitação “F”, figura 3.4.

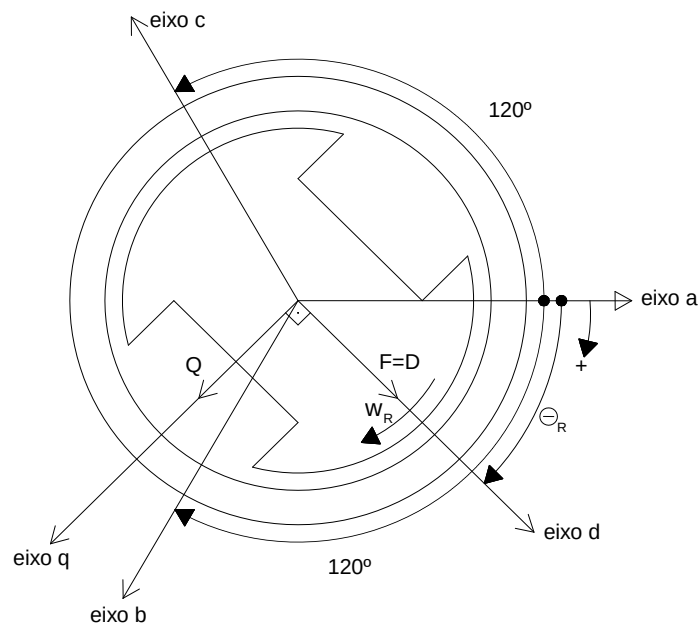


Figura 3.4 - Indicação dos Eixos.

Da figura 3.4 tem-se a (3.50).

(3.50)

Fazendo as variações de “i” e “j” apresentados e utilizando a expressão (3.50), em (3.44) obtem-se as diversas indutâncias da máquina, de acordo com (3.51) a (3.87).

$$\ell_{aah} = K_{aah} \left\{ (L_{daa1} + L_{qaa1}) \cos[h(0)] + (L_{daa1} - L_{qaa1}) \cos[h(2\theta_R)] \right\} \quad (3.51)$$

$$\ell_{ach} = K_{aah} \left\{ (L_{daa1} + L_{qaa1}) \cos[h(120^\circ)] + (L_{daa1} - L_{qaa1}) \cos[h(2\theta_R + 120^\circ)] \right\} \quad (3.52)$$

$$\ell_{ach} = K_{aah} \left\{ (L_{daa1} + L_{qaa1}) \cos[h(120^\circ)] + (L_{daa1} - L_{qaa1}) \cos[h(2\theta_R + 120^\circ)] \right\} \quad (3.53)$$

$$\ell_{aDh} = K_{aDh} \left\{ (L_{daD1} + L_{qaD1}) \cos[h(\theta_R)] + (L_{daD1} - L_{qaD1}) \cos[h(\theta_R)] \right\} \quad (3.54)$$

$$\ell_{aQh} = K_{aQh} \left\{ (L_{daQ1} + L_{qaQ1}) \cos[h(\theta_R + 90^\circ)] + (L_{daQ1} - L_{qaQ1}) \cos[h(\theta_R - 90^\circ)] \right\} \quad (3.55)$$

$$\ell_{aFh} = K_{aFh} \left\{ (L_{daF1} + L_{qaF1}) \cos[h(\theta_R)] + (L_{daF1} - L_{qaF1}) \cos[h(\theta_R)] \right\} \quad (3.56)$$

$$\ell_{bah} = \ell_{abh} \quad (3.57)$$

$$\ell_{bbh} = K_{aah} \left\{ (L_{daa1} + L_{qaa1}) \cos[h(0)] + (L_{daa1} - L_{qaa1}) \cos[h(2\theta_R + 120^\circ)] \right\} \quad (3.58)$$

$$\ell_{bch} = K_{aah} \left\{ (L_{daa1} + L_{qaa1}) \cos[h(120^\circ)] + (L_{daa1} - L_{qaa1}) \cos[h(2\theta_R)] \right\} \quad (3.59)$$

$$\ell_{bDh} = K_{aDh} \left\{ (L_{daD1} + L_{qaD1}) \cos[h(\theta_R - 120^\circ)] + (L_{daD1} - L_{qaD1}) \cos[h(\theta_R - 120^\circ)] \right\} \quad (3.60)$$

$$\ell_{bQh} = K_{aQh} \left\{ (L_{daQ1} + L_{qaQ1}) \cos[h(\theta_R + 90^\circ - 120^\circ)] + (L_{daQ1} - L_{qaQ1}) \cos[h(\theta_R - 90^\circ - 120^\circ)] \right\} \quad (3.61)$$

$$\ell_{bFh} = K_{aFh} \left\{ (L_{daF1} + L_{qaF1}) \cos[h(\theta_R - 120^\circ)] + (L_{daF1} - L_{qaF1}) \cos[h(\theta_R - 120^\circ)] \right\} \quad (3.62)$$

$$\ell_{cah} = \ell_{ach} \quad (3.63)$$

$$\ell_{cbh} = \ell_{bch} \quad (3.64)$$

$$\ell_{cch} = K_{aah} \left\{ (L_{daa1} + L_{qaa1}) \cos[h(0)] + (L_{daa1} - L_{qaa1}) \cos[h(2\theta_R - 120^\circ)] \right\} \quad (3.65)$$

$$\ell_{cDh} = K_{aDh} \left\{ (L_{daD1} + L_{qaD1}) \cos[h(\theta_R + 120^\circ)] + (L_{daD1} - L_{qaD1}) \cos[h(\theta_R + 120^\circ)] \right\} \quad (3.66)$$

$$\ell_{cQh} = K_{aQh} \left\{ (L_{daQ1} + L_{qaQ1}) \cos[h(\theta_R + 90^\circ + 120^\circ)] + (L_{daQ1} - L_{qaQ1}) \cos[h(\theta_R - 90^\circ + 120^\circ)] \right\} \quad (3.67)$$

$$\ell_{cFh} = K_{aFh} \left\{ (L_{daF1} + L_{qaF1}) \cos[h(\theta_R + 120^\circ)] + (L_{daF1} - L_{qaF1}) \cos[h(\theta_R + 120^\circ)] \right\} \quad (3.68)$$

$$\ell_{Dah} = \ell_{aDh} \quad (3.69)$$

$$\ell_{Dbh} = \ell_{bDh} \quad (3.70)$$

$$\ell_{Dch} = \ell_{cDh} \quad (3.71)$$

$$\ell_{DDh} = K_{DDh} \left\{ (L_{dDD1} + L_{qDD1}) \cos[h(0)] + (L_{dDD1} - L_{qDD1}) \cos[h(0)] \right\} \quad (3.72)$$

$$\ell_{DQh} = K_{aQh} \left\{ (L_{daQ1} + L_{qaQ1}) \cos[h(90^\circ)] + (L_{daQ1} - L_{qaQ1}) \cos[h(90^\circ)] \right\} \quad (3.73)$$

$$\ell_{DFh} = K_{DFh} \left\{ (L_{dDF1} + L_{qDF1}) \cos[h(0)] + (L_{dDF1} - L_{qDF1}) \cos[h(0)] \right\} \quad (3.74)$$

$$\ell_{Qah} = \ell_{aQh} \quad (3.75)$$

$$\ell_{Qbh} = \ell_{bQh} \quad (3.76)$$

$$\ell_{Qch} = \ell_{cQh} \quad (3.77)$$

$$\ell_{QDh} = \ell_{DQh} \quad (3.78)$$

$$\ell_{QQh} = K_{QQh} \left\{ (L_{dQQ1} + L_{qQQ1}) \cos[h(0)] + (L_{dQQ1} - L_{qQQ1}) \cos[h(0)] \right\} \quad (3.79)$$

$$\ell_{QFh} = K_{QFh} \left\{ (L_{dQF1} + L_{qQF1}) \cos[h(90^\circ)] + (L_{dQF1} - L_{qQF1}) \cos[h(90^\circ)] \right\} \quad (3.80)$$

$$\ell_{Fah} = \ell_{aFh} \quad (3.81)$$

$$\ell_{Fbh} = \ell_{bFh} \quad (3.82)$$

$$\ell_{Fch} = \ell_{cFh} \quad (3.83)$$

$$\ell_{FDh} = \ell_{DFh} \quad (3.84)$$

$$\ell_{FQh} = \ell_{QFh} \quad (3.85)$$

$$\ell_{FFh} = K_{FFh} \cdot \{ (L_{dFF1} + L_{qFF1}) \cos[h(0)] + (L_{dFF1} - L_{qFF1}) \cos[h(0)] \} \quad (3.86)$$

Manipulando as expressões (3.51) a (3.86), têm-se (3.87) a (3.122).

$$\ell_{aah} = K_{aah} \{ L_{g0} + L_{g2} \cos(2h\theta_R) \} \quad (3.87)$$

$$\ell_{abh} = K_{aah} \{ L_{g0} \cos(120^0 h) + L_{g2} \cos[h(2\theta_R - 120^0)] \} \quad (3.88)$$

$$\ell_{ach} = K_{aah} \{ L_{g0} \cos(120^0 h) + L_{g2} \cos[h(2\theta_R + 120^0)] \} \quad (3.89)$$

$$\ell_{cDh} = K_{aDh} L_{aD1} \cos(h\theta_R) \quad (3.90)$$

$$\ell_{cQh} = -K_{aQh} L_{aQ1} \text{sen}(h\theta_R) \text{sen}(h90^0) \quad (3.91)$$

$$\ell_{cFh} = K_{aFh} L_{aF1} \cos(h\theta_R) \quad (3.92)$$

$$\ell_{bah} = \ell_{abh} \quad (3.93)$$

$$\ell_{cch} = K_{aah} \{ (L_{g0} + L_{g2}) \cos[h(2\theta_R + 120^0)] \} \quad (3.94)$$

$$\ell_{bch} = K_{aah} \{ L_{g0} \cos(120^0 h) + L_{g2} \cos(2h\theta_R) \} \quad (3.95)$$

$$\ell_{bDh} = K_{aDh} L_{aD1} \cos[h(\theta_R - 120^0)] \quad (3.96)$$

$$\ell_{bQh} = -K_{aQh} L_{aQ1} \text{sen}[h(\theta_R - 120^0)] \text{sen}(h90^0) \quad (3.97)$$

$$\ell_{bFh} = K_{aFh} L_{aF1} \cos[h(\theta_R - 120^0)] \quad (3.98)$$

$$\ell_{cah} = \ell_{ach} \quad (3.99)$$

$$\ell_{cbh} = \ell_{bch} \quad (3.100)$$

$$\ell_{cch} = K_{aah} \{L_{g0} + L_{g2} \cos[h(2\theta_R - 120^0)]\} \quad (3.101)$$

$$\ell_{cDh} = K_{aDh} L_{aD1} \cos[h(\theta_R + 120^0)] \quad (3.102)$$

$$\ell_{cQh} = -K_{aQh} L_{aQ1} \sin[h(\theta_R + 120^0)] \sin(h90^0) \quad (3.103)$$

$$\ell_{cFh} = K_{aFh} L_{aF1} \cos[h(\theta_R + 120^0)] \quad (3.104)$$

$$\ell_{Dah} = \ell_{aDh} \quad (3.105)$$

$$\ell_{Dbh} = \ell_{bDh} \quad (3.106)$$

$$\ell_{Dch} = \ell_{cDh} \quad (3.107)$$

$$\ell_{DDh} = K_{DDh} L_{dDD1} \quad (3.108)$$

$$\ell_{DQh} = 0 \quad (3.109)$$

$$\ell_{DFh} = K_{DFh} L_{DF1} \quad (3.110)$$

$$\ell_{Qah} = \ell_{aQh} \quad (3.111)$$

$$\ell_{Qbh} = \ell_{bQh} \quad (3.112)$$

$$\ell_{Qch} = \ell_{cQh} \quad (3.113)$$

$$\ell_{QDh} = \ell_{DQh} \quad (3.114)$$

$$\ell_{QQh} = K_{QQh} L_{QQ1} \quad (3.115)$$

$$\ell_{QFh} = \mathbf{0} \quad (3.116)$$

$$\ell_{Fah} = \ell_{aFh} \quad (3.117)$$

$$\ell_{Fbh} = \ell_{bFh} \quad (3.118)$$

$$\ell_{Fch} = \ell_{cFh} \quad (3.119)$$

$$\ell_{FDh} = \ell_{DFh} \quad (3.120)$$

$$\ell_{FQh} = \ell_{QFh} \quad (3.121)$$

$$\ell_{FFh} = K_{FFh} L_{FF1} \quad (3.122)$$

Onde:

$$\begin{aligned}
L_{g0} &= L_{daa1} + L_{qaa1} \\
L_{g2} &= L_{daa1} - L_{qaa1} \\
L_{aD1} &= 2L_{daD1} \\
L_{aQ1} &= 2L_{daQ1} \\
L_{aF1} &= 2L_{daF1} \\
L_{DD1} &= 2L_{dDD1} \\
L_{QQ1} &= 2L_{qQQ1} \\
L_{FF1} &= 2L_{dFF1}
\end{aligned} \tag{3.123}$$

As indutâncias " L_{g0} " e " L_{g2} " podem ser relacionadas com as tradicionais reatâncias de eixos "d" e "q", e de dispersão, expressas em (3.124) e (3.125).

$$L_{g0} = \frac{X_d + X_q - 2X_{disp}}{6\pi f} \tag{3.124}$$

$$L_{g2} = \frac{X_d - X_q}{6\pi f} \tag{3.125}$$

Os concatenamentos de fluxo magnético podem ser obtidos pela expressão (3.49), resultando em (3.126) a (3.131).

$$\lambda_a = \sum_h \ell_{aah} i_a + \sum_h \ell_{abh} i_b + \sum_h \ell_{ach} i_c + \sum_h \ell_{aDh} i_D + \sum_h \ell_{aQh} i_Q + \sum_h \ell_{aFh} i_F \tag{3.126}$$

$$\lambda_b = \sum_h \ell_{bah} i_a + \sum_h \ell_{bbh} i_b + \sum_h \ell_{bch} i_c + \sum_h \ell_{bDh} i_D + \sum_h \ell_{bQh} i_Q + \sum_h \ell_{bFh} i_F \tag{3.127}$$

$$\lambda_c = \sum_h \ell_{cah} i_a + \sum_h \ell_{cbh} i_b + \sum_h \ell_{cch} i_c + \sum_h \ell_{cDh} i_D + \sum_h \ell_{cQh} i_Q + \sum_h \ell_{cFh} i_F \tag{3.128}$$

$$\lambda_D = \sum_h \ell_{Dah} i_a + \sum_h \ell_{Dbh} i_b + \sum_h \ell_{Dch} i_c + \sum_h \ell_{DDh} i_D + \sum_h \ell_{DQh} i_Q + \sum_h \ell_{DFh} i_F \tag{3.129}$$

$$\lambda_Q = \sum_h \ell_{Qah} i_a + \sum_h \ell_{Qbh} i_b + \sum_h \ell_{Qch} i_c + \sum_h \ell_{QDh} i_D + \sum_h \ell_{QQh} i_Q + \sum_h \ell_{QFh} i_F \quad (3.130)$$

$$\lambda_F = \sum_h \ell_{Fah} i_a + \sum_h \ell_{Fbh} i_b + \sum_h \ell_{Fch} i_c + \sum_h \ell_{FDh} i_D + \sum_h \ell_{FQh} i_Q + \sum_h \ell_{FFh} i_F \quad (3.131)$$

Aplicando-se os enrolamentos da máquina na expressão (3.45), têm-se (3.132) a (3.137).

$$v_a = r_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + \frac{\partial \lambda_a}{\partial t} \quad (3.132)$$

$$v_b = r_b i_b + L_b \frac{di_b}{dt} + \frac{\partial \lambda_b}{\partial t} \quad (3.133)$$

$$v_c = r_c i_c + L_c \frac{di_c}{dt} + \frac{\partial \lambda_c}{\partial t} \quad (3.134)$$

$$v_D = r_D i_D + L_D \frac{di_D}{dt} + \frac{\partial \lambda_D}{\partial t} \quad (3.135)$$

$$v_Q = r_Q i_Q + L_Q \frac{di_Q}{dt} + \frac{\partial \lambda_Q}{\partial t} \quad (3.136)$$

$$v_F = r_F i_F + L_F \frac{di_F}{dt} + \frac{\partial \lambda_F}{\partial t} \quad (3.137)$$

Na forma matricial as expressões (3.132) a (3.137), tem-se (3.138).

$$[V] = \left\{ [R][I] + [L_{disp}] \frac{d[I]}{dt} + \frac{\partial [\lambda]}{\partial t} \right\} \quad (3.138)$$

Onde:

$$[V] = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \\ v_D \\ v_Q \\ v_F \end{bmatrix} \quad (3.139)$$

$$[R] = \begin{bmatrix} r_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_F \end{bmatrix} \quad (3.140)$$

$$[L_{disp}] = \begin{bmatrix} L_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_Q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_F \end{bmatrix} \quad (3.141)$$

$$[I] = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_D \\ i_Q \\ i_F \end{bmatrix} \quad (3.142)$$

$$[\lambda] = \begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \\ \lambda_D \\ \lambda_Q \\ \lambda_F \end{bmatrix} \quad (3.143)$$

O sistema matricial (3.138) representa as equações elétricas da máquina síncrona.

3.2.2 Equações Mecânicas

Aplicando-se a lei de Newton no eixo da máquina, tem-se a expressão (3.144).

$$T_t - T_e = J \frac{d\omega_R}{dt} \quad (3.144)$$

Nas equações elétricas existe uma grandeza vinculada à mecânica, ou seja, “ θ_R ”. Relaciona-se “ ω_R ” e “ θ_R ” através de (3.145).

$$\omega_R = \frac{2}{p} \frac{d\theta_R}{dt} \quad (3.145)$$

Em um sistema eletromagnético o conjugado pode ser calculado pela derivada da “co-energia” magnética em relação ao deslocamento mecânico. Considerando dois enrolamentos de eixos “i” e “j”, o conjugado eletromagnético entre eles é dado por (3.146).

$$T_{eij} = \frac{p}{2} \frac{dW'_{mg}}{d\theta_{ij}} \quad (3.146)$$

Onde:

$$W'_{mg} = \frac{\ell_{ii}}{2} i_i^2 + \frac{\ell_{jj}}{2} i_j^2 + \ell_{ij} i_i i_j \quad (3.147)$$

De (3.146) e (3.147), tem-se (3.148).

$$T_{eij} = \frac{p}{2} \left(\frac{i_i^2}{2} \frac{d\ell_{ii}}{d\theta_{ij}} + \frac{i_j^2}{2} \frac{d\ell_{jj}}{d\theta_{ij}} + i_i i_j \frac{d\ell_{ij}}{d\theta_{ij}} \right) \quad (3.148)$$

A expressão (3.148) torna-se (3.149).

$$2T_{eij} = \frac{p}{2} (i_i^2 \frac{d\ell_{ii}}{d\theta_{ij}} + i_j^2 \frac{d\ell_{jj}}{d\theta_{ij}} + 2i_i i_j \frac{d\ell_{ij}}{d\theta_{ij}}) \quad (3.149)$$

Colocando (3.149) na forma matricial, tem-se (3.150).

$$2T_{eij} = \frac{p}{2} \begin{bmatrix} i_i & i_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{d\ell_{ii}}{d\theta_{ij}} & \frac{d\ell_{ij}}{d\theta_{ij}} \\ \frac{d\ell_{ij}}{d\theta_{ij}} & \frac{d\ell_{jj}}{d\theta_{ij}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_i \\ i_j \end{bmatrix} \quad (3.150)$$

Portanto:

$$T_{eij} = \frac{p}{4} [I]^T [DL] [I] \quad (3.151)$$

Aplicando-se em (3.150), os eixos da máquina síncrona, tem-se (3.152).

$$T_e = \frac{p}{4} [I]^T [DL] [I] \quad (3.152)$$

Onde:

$$[I] = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_D \\ i_Q \\ i_F \end{bmatrix} \quad (3.153)$$

$$[DL] = \frac{d}{d\theta_R} \begin{bmatrix} \ell_{aa} & \ell_{ab} & \ell_{ac} & \ell_{aD} & \ell_{aQ} & \ell_{aF} \\ \ell_{ba} & \ell_{bb} & \ell_{bc} & \ell_{bD} & \ell_{bQ} & \ell_{bF} \\ \ell_{ca} & \ell_{cb} & \ell_{cc} & \ell_{cD} & \ell_{cQ} & \ell_{cF} \\ \ell_{Da} & \ell_{Db} & \ell_{Dc} & \ell_{DD} & \ell_{DQ} & \ell_{DF} \\ \ell_{Qa} & \ell_{Qb} & \ell_{Qc} & \ell_{QD} & \ell_{QQ} & \ell_{QF} \\ \ell_{Fa} & \ell_{Fb} & \ell_{Fc} & \ell_{FD} & \ell_{FQ} & \ell_{FF} \end{bmatrix} \quad (3.154)$$

De (3.144) a (3.154) formam o conjunto das equações mecânicas da máquina síncrona.

3.2.2.1 Dinâmica do Acoplamento

A modelagem mecânica iniciada pela expressão (3.144) admite o acoplamento plenamente rígido entre a turbina e o gerador. Se considerar os efeitos da rigidez do acoplamento e seu amortecimento, a equação que representa a lei de Newton é desmembrada em duas. Assim têm-se (3.155) e (3.156).

$$J \frac{d\omega_R}{dt} = T_T - T_e \longrightarrow \left\{ \begin{array}{l} J_T \frac{d\omega_T}{dt} = T_e + K_A(\theta_G - \theta_T) + C_A(\omega_G - \omega_T) \quad (3.155) \\ J_e \frac{d\omega_G}{dt} = T_T - K_A(\theta_G - \theta_T) - C_A(\omega_G - \omega_T) \quad (3.156) \end{array} \right.$$

Por consequência a relação, "rotação e posição angular" também são desenvolvidas, em (3.157) e (3.158).

$$\omega_R = \frac{d\theta_R}{dt} \longrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \omega_T = \frac{d\theta_T}{dt} \quad (3.157) \\ \omega_G = \frac{d\theta_G}{dt} \quad (3.158) \end{array} \right.$$

4.1 Introdução

Foram desenvolvidos dois programas computacionais com o objetivo de se obter resultados de simulação digital do gerador síncrono em regime permanente não senoidal.

Um dos programas elaborado foi através do software "Matlab" em uma de suas ferramentas de programa na extensão "ponto m", utilizando a modelagem matemática apresentada no Capítulo três. O outro programa foi desenvolvido utilizando a ferramenta "Sim Power Systems – Simulink – Matlab", que inclui seus próprios modelos matemáticos dos diversos equipamentos que compõem o sistema elétrico de potência.

4.2 Simulações em MatLab extensão em "ponto m"

Pretende-se simular o sistema mais simples possível, onde um gerador síncrono está conectado a um sistema elétrico de potência e submetido a correntes não senoidais.

Para tanto o circuito simulado está indicado na figura 4.2.1

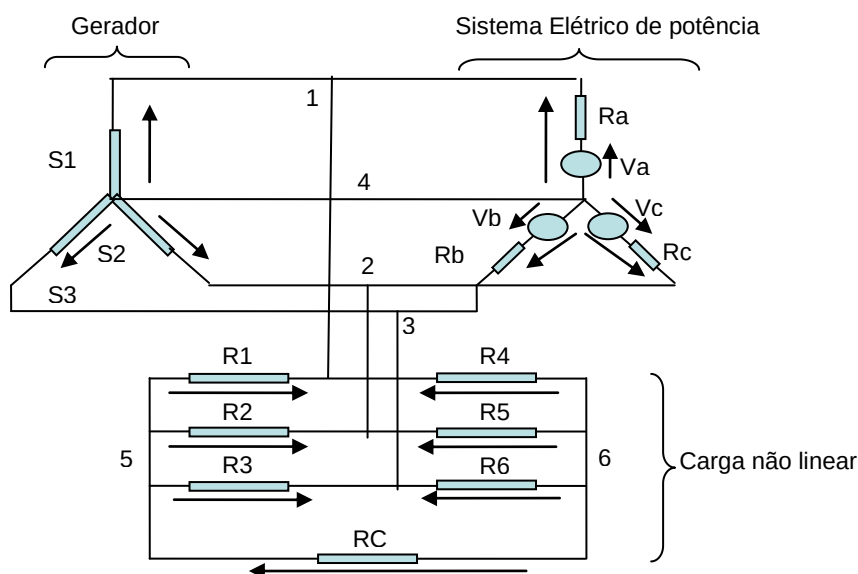


Figura 4.2.1 - Circuito dos Ramos

Na figura 4.2.1 o sistema elétrico de potência está representado por uma fonte trifásica ideal de tensão “ V_a, V_b, V_c ” e um conjunto de resistências “ R_a, R_b, R_c ”. O estator da máquina síncrona está representado pelas tensões “ V_{s1}, V_{s2}, V_{s3} ” e pelas correntes “ I_{s1}, I_{s2}, I_{s3} ”. O conjunto de resistências “R1” a “R6” representa um retificador, e, portanto, a carga não linear. A resistência R_c é a carga monofásica alimentada pelo retificador. As resistências “R1” a “R6” são as chaves eletrônicas do retificador, onde cada uma representa a chave aberta ou fechada, assumindo o valor de $300k\Omega$ condição aberta e 3Ω para fechada.

Aplicando-se a teoria dos grafos, apresentada no apêndice “C”, pode-se deduzir a expressão (4.2.1).

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} is1 \\ is2 \\ is3 \\ irr1 \\ irr2 \\ irr3 \\ W \\ \theta \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} [M1] & [0] & [0] & [LM] \\ [T1] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [-p/2] & [0] & [0] \\ [[MS][0]] & [0] & [0] & [ML] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} is1 \\ is2 \\ is3 \\ irr1 \\ irr2 \\ irr3 \\ W \\ \theta \end{bmatrix} + [V] \quad (4.2.1)$$

Com base na expressão (4.2.1), e outras equações apresentadas no apêndice "C", aplicando-se a modelagem matemática da máquina síncrona apresentada no capítulo três, foi desenvolvido um programa computacional em MATLAB, extensão em ponto "m", que permitiu fazer à simulação do gerador conectado a um sistema elétrico de potência e alimentando carga não linear. Para efeito de simulação foram utilizados os parâmetros indicados na tabela (4.2.1).

Parâmetros do estator						
V _{nom} (kV)	F (Hz)	Lss (mH)	Lss2 (mH)	Lrr (mH)	Lsr (mH)	Lsq (mH)
13.8	60	3.78	0.074	3.854	3.854	3.706
Torque da Turbina			Nº de polos			
kN.m			p			
175			2			
Parâmetros do amortecimento e Campo						
RLD (ohm)	RLQ (ohm)		RLF (ohm)		V _f (V)	
12.2778	50.5844		20		400	

Tabela 4.2.1 - Dados dos Paramentos da Máquina Utilizada.

A seguir são apresentados resultados da simulação digital.

Para facilitar o entendimento da sequência de operação do gerador no sistema elétrico, apresenta-se inicialmente na figura 4.2.2 a variação da sua rotação ao longo do tempo de simulação.

No instante inicial o gerador, com a rotação síncrona, é conectado ao sistema, com o retificador desligado. Assim observa-se pela figura 4.2.2 que o gerador percorre inicialmente um regime transitório, assumido o regime permanente em torno do instante 2,5 segundos, com carga linear. No instante 3 (três) segundos é ligada a carga não linear e novamente o gerador assume outro regime transitório, e em seguida um regime permanente no instante de tempo de 4,5 a 5 segundos, como apresentado na figura 4.2.2, agora porém com carga não linear em função da influência do retificador ligado no instante 3 (três) segundos.

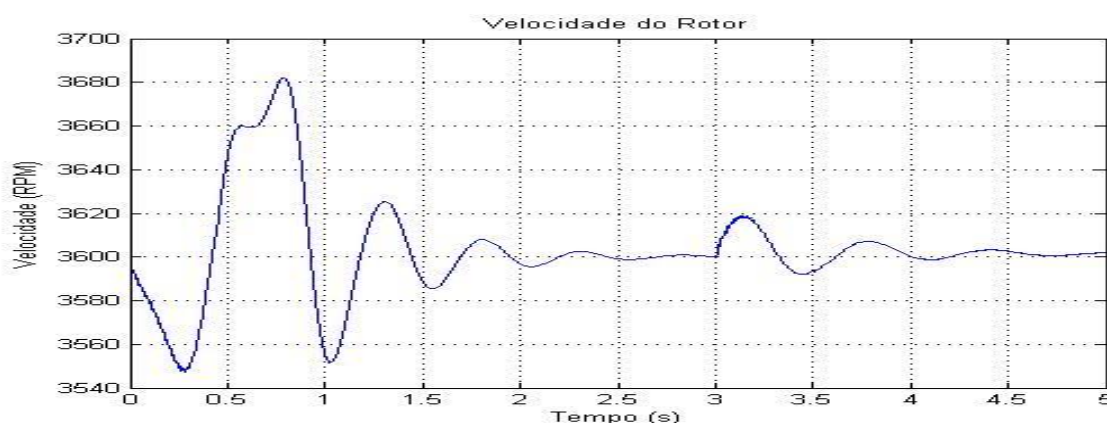


Figura 4.2.2 - Velocidade do Rotor.

Com base na análise da figura 4.2.2, as próximas figuras, 4.2.3 até 4.2.20, devem ser observados considerando o intervalo de 2,5 a 3 segundos com o gerador em regime permanente senoidal, e depois, entre 4,5 a 5 segundos o regime permanente não senoidal. Em ambos os regimes, o gerador é acionado por

um conjugado de turbina constante e igual a 175kN.m, na velocidade síncrona de 3600rpm.

As figuras 4.2.3 a 4.2.8 apresentam as correntes de estator nos regimes senoidal e não senoidal.

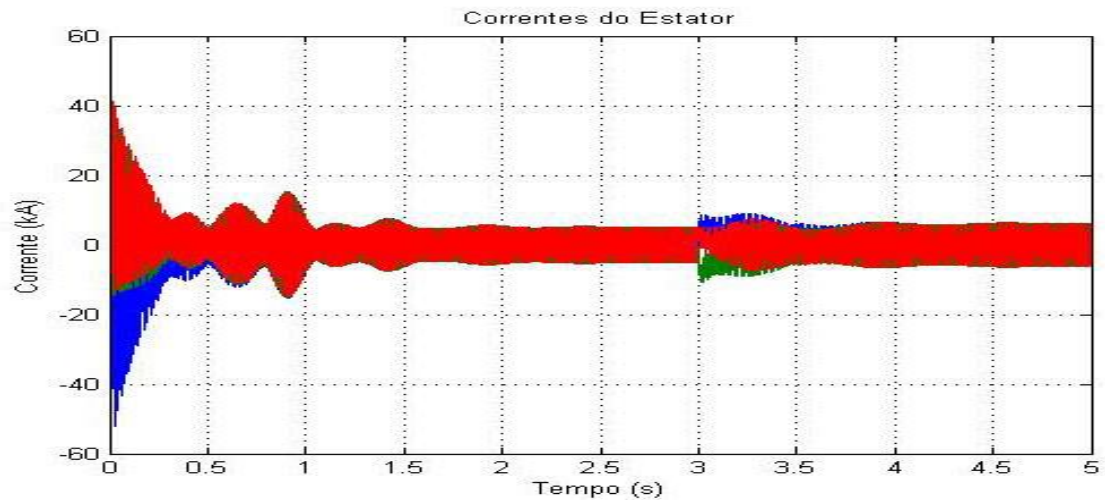


Figura 4.2.3 - Correntes do Estator Sem Harmônicos Espaciais. Nos intervalos de 2,5 a 3 segundos regime senoidal e de 4,5 a 5 segundos regime não senoidal.

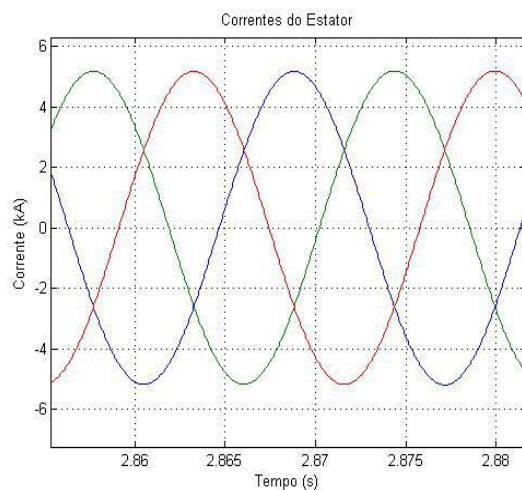


Figura 4.2.4 - Zoom da fig. 4.2.3 - Correntes do Estator Sem Harmônicos Espaciais regime senoidal.

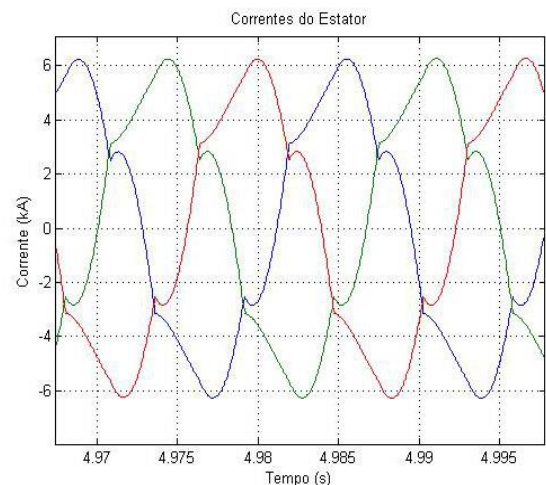


Figura 4.2.5 - Zoom da fig. 4.2.3 - Correntes do Estator Sem Harmônicos Espaciais regime não senoidal.

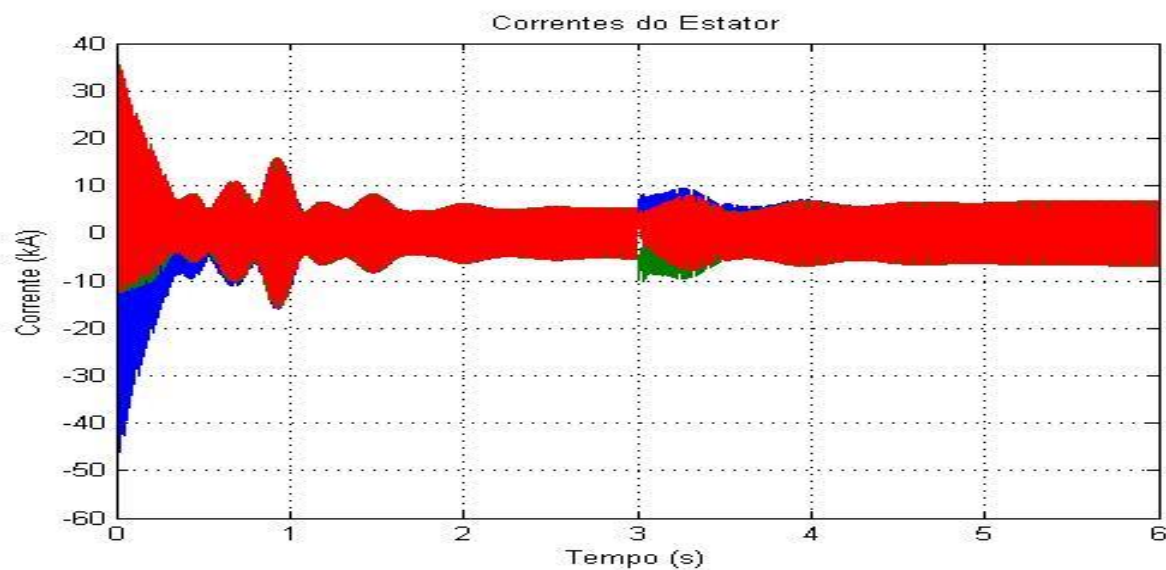


Figura 4.2.6 - Correntes do Estator Com Harmônicos Espaciais. Nos intervalos de 2,5 a 3 segundos regime senoidal e de 4,5 a 5 segundos regime não senoidal.

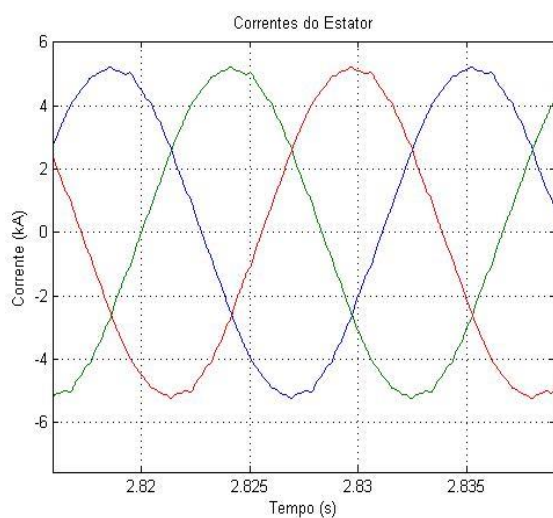


Figura 4.2.7 - Zoom da fig. 4.2.6 - Correntes do Estator Com Harmônicos Espaciais regime senoidal.

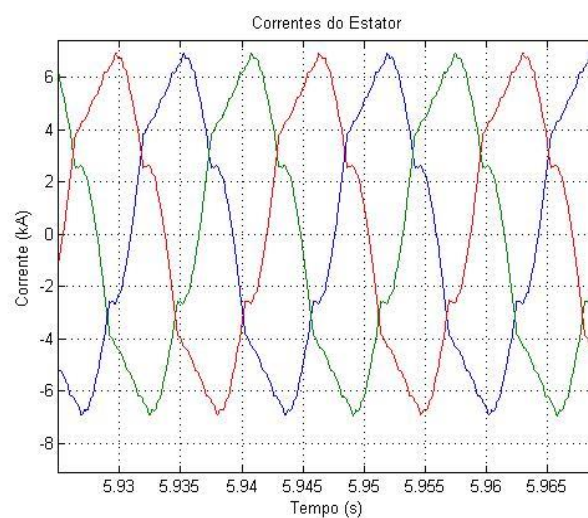


Figura 4.2.8 - Zoom da fig. 4.2.6 - Correntes do Estator Com Harmônicos Espaciais regime não senoidal.

As figuras 4.2.9 a 4.2.14 apresentam as correntes do rotor nos regimes senoidal e não senoidal.

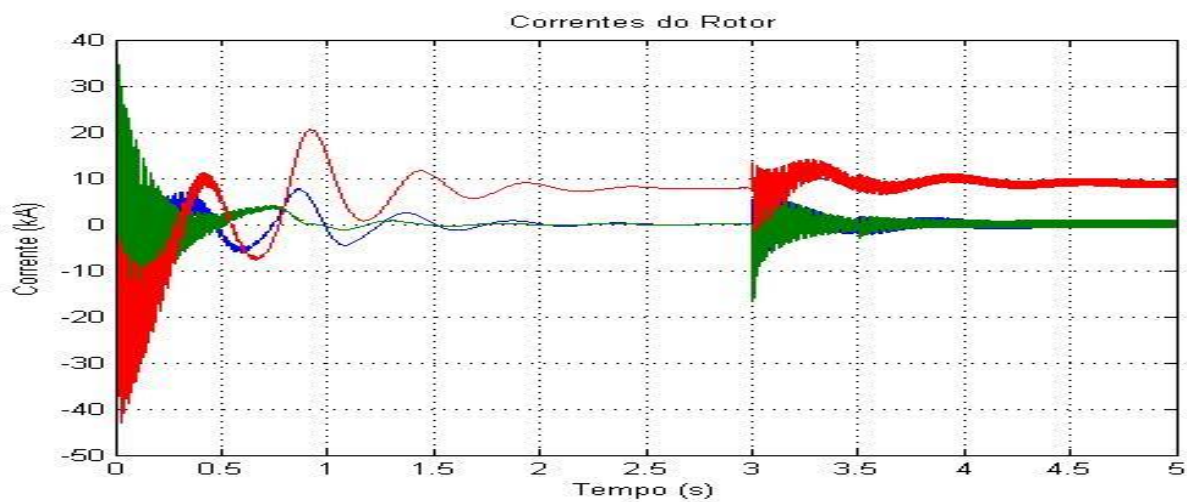


Figura 4.2.9 - Correntes do Rotor: Excitação e Enrolamento Amortecedor "D" e "Q" - Sem Harmônicos Espaciais. Nos intervalos de 2,5 a 3 segundos regime senoidal e de 4,5 a 5 segundos regime não senoidal.

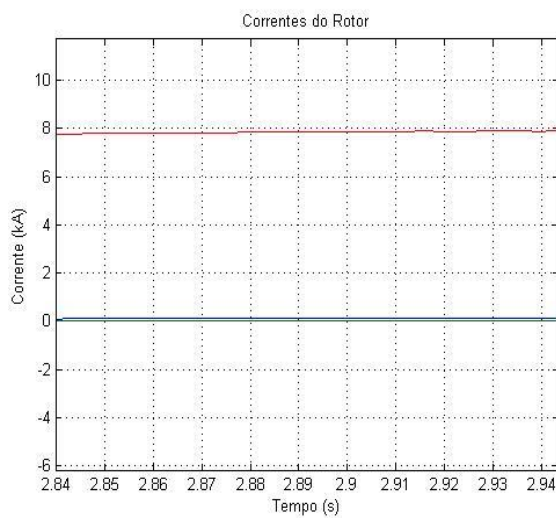


Figura 4.2.10 - Zoom da fig. 4.2.9 - Correntes do Rotor: Excitação e Enrolamento Amortecedor "D" e "Q" - Sem Harmônicos Espaciais regime senoidal.

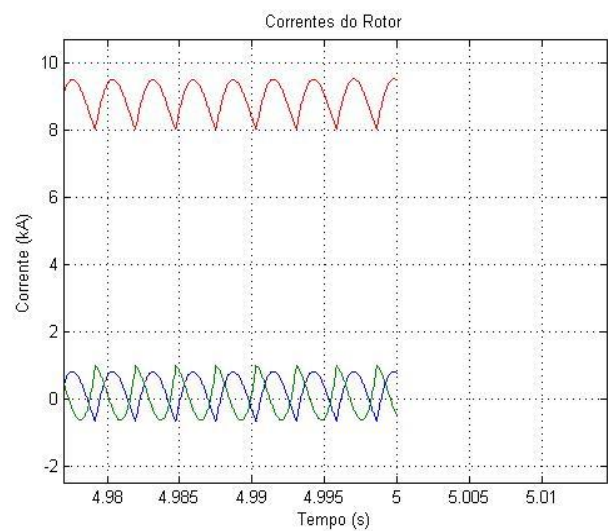


Figura 4.2.11 - Zoom da fig. 4.2.9 - Correntes do Rotor: Excitação e Enrolamento Amortecedor "D" e "Q" - Sem harmônicos Espaciais regime não senoidal.

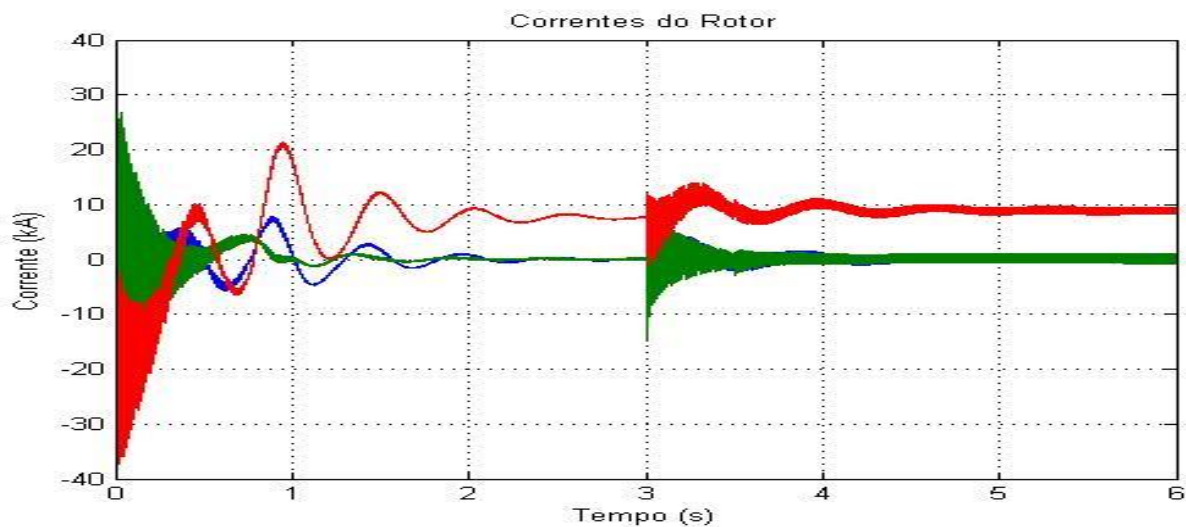


Figura 4.2.12 - Correntes do Rotor: Excitação e Enrolamento Amortecedor "D" e "Q" - Com Harmônicos Espaciais. Nos intervalos de 2,5 a 3 segundos regime senoidal e de 4,5 a 5 segundos regime não senoidal.

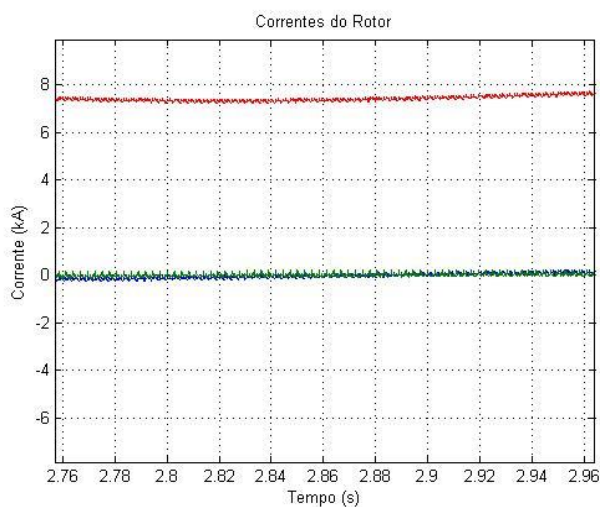


Figura 4.2.13 - Zoom da fig. 4.2.12 - Correntes do Rotor: Excitação e Enrolamento Amortecedor "D" e "Q" - Com Harmônicos Espaciais regime senoidal.

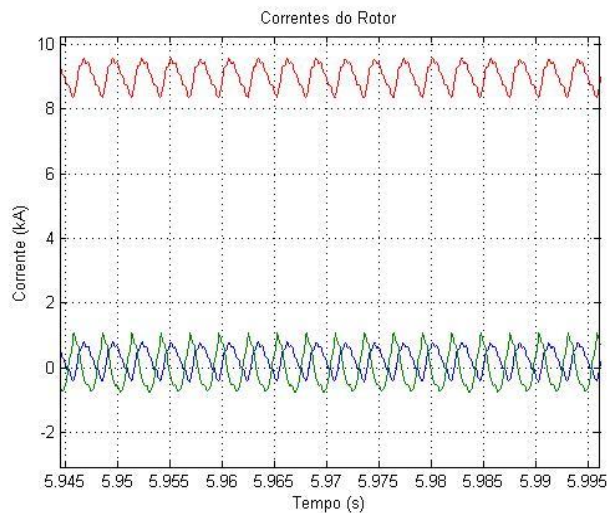


Figura 4.2.14 - Zoom da fig. 4.2.12 - Correntes do Rotor: Excitação e Enrolamento Amortecedor "D" e "Q" - Com Harmônicos Espaciais regime não senoidal.

As figuras 4.2.15 a 4.2.20 apresentam os torques eletromagnético nos regimes senoidal e não senoidal.

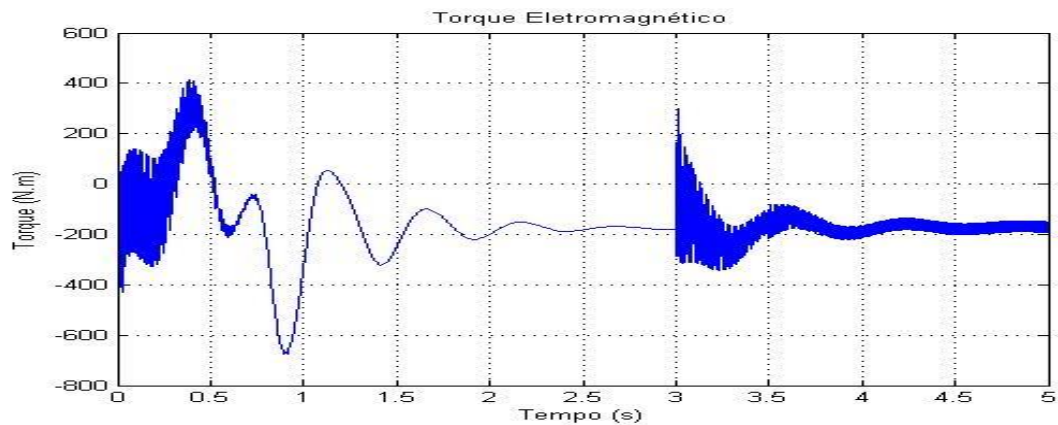


Figura 4.2.15 - Torque Eletromagnético Sem Harmônicos Espaciais. Nos intervalos de 2,5 a 3 segundos regime senoidal e de 4,5 a 5 segundos regime não senoidal.

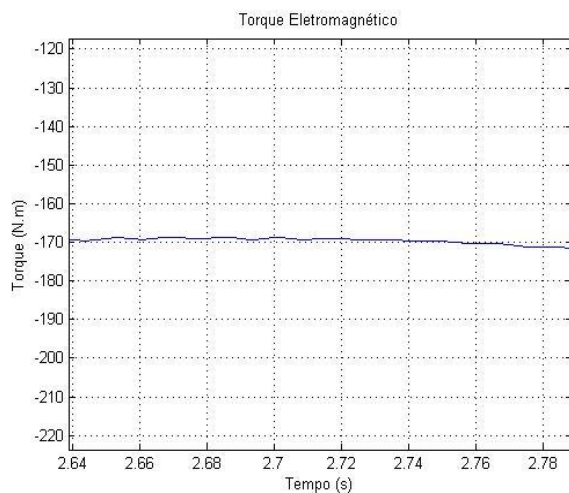


Figura 4.2.16 - Torque Eletromagnético Sem Harmônicos Espaciais - Zoom da fig. 4.2.15 regime senoidal.

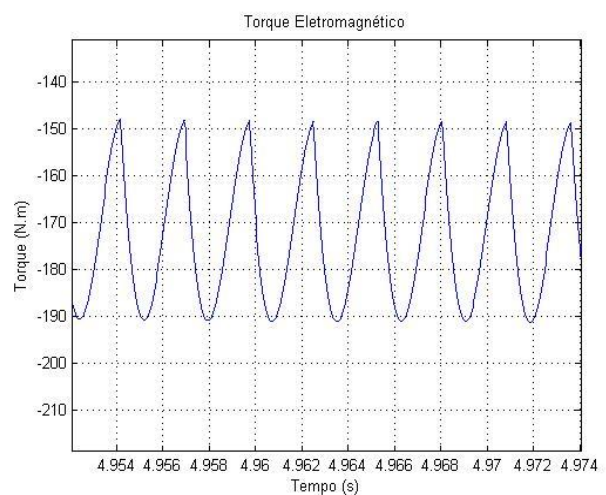


Figura 4.2.17 - Torque Eletromagnético Sem Harmônicos Espaciais - Zoom da fig. 4.2.15 regime não senoidal.

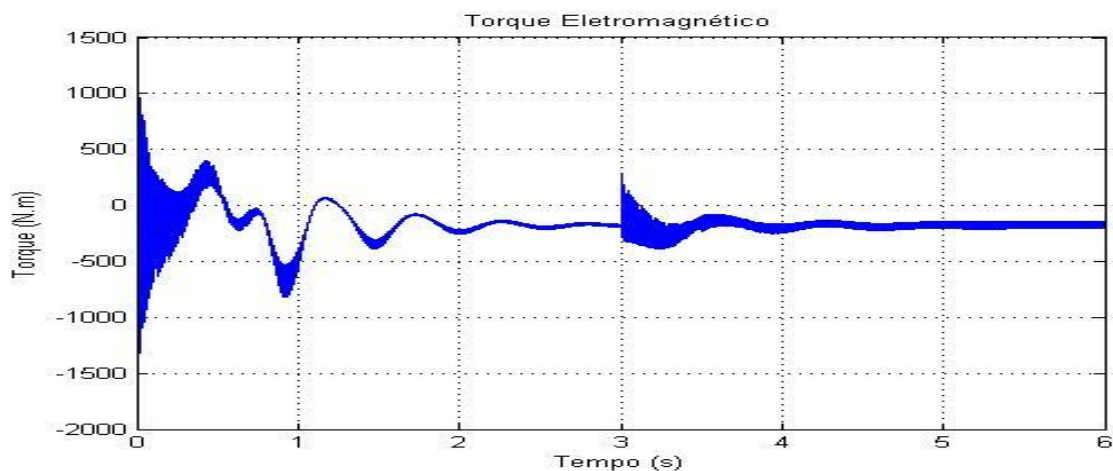


Figura 4.2.18 - Torque Eletromagnético Com Harmônicos Espaciais. Nos intervalos de 2,5 a 3 segundos regime senoidal e de 4,5 a 5 segundos regime não senoidal.

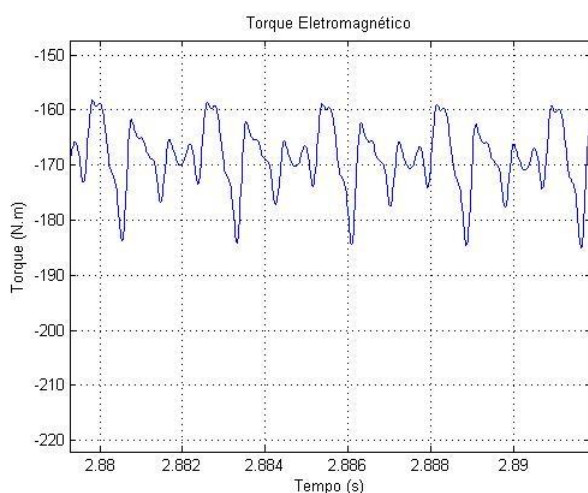


Figura 4.2.19 - Torque Eletromagnético Com harmônicos Espaciais - Zoom da fig. 4.2.18 regime senoidal.

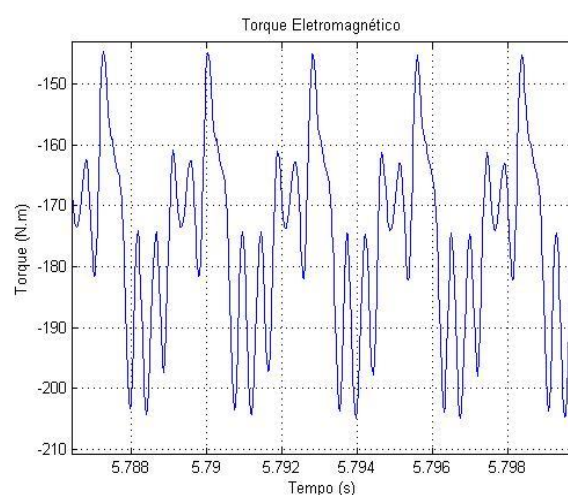


Figura 4.2.20 - Torque Eletromagnético Com harmônicos Espaciais - Zoom da fig. 4.2.18 regime não senoidal.

Duas análises podem ser efetuadas a partir dos resultados obtidos na simulação digital e apresentados nas figuras 4.2.2 e 4.2.14.

A primeira análise se refere a comparação entre os regimes senoidal e não senoidal impostos na simulação pela carga não linear. Observa-se que a potência fornecida pela turbina é a mesma nos dois regimes uma vez que o torque da turbina se mantém constante e igual a 175kN.m.

Comparando as figuras 4.2.4 e 4.2.5, observa-se a diferença na forma de onda da corrente do estator do gerador, caracterizando a não linearidade no regime não senoidal.

A comparação entre as figuras 4.2.7 e 4.2.8 tem o mesmo objetivo anterior. Porém, a comparação entre as figuras 4.2.4 e 4.2.7 e também entre 4.2.5 e 4.2.8 ressalta o efeito dos harmônicos espaciais, onde se percebe a presença de frequências superiores.

A comparação entre as figuras 4.2.10, 4.2.11, 4.2.13, e 4.2.14 tem os mesmos objetivos anteriores, correspondendo as correntes de excitação e amortecedoras. Ressaltando-se neste caso, influência das componentes harmônicas das correntes de estator nas correntes de rotor. A corrente de excitação deixa de ser contínua, assumido uma característica pulsante superposta a corrente contínua, cuja pulsação é acentuada e predominante na frequência de sexto harmônico. Embora a velocidade do rotor seja praticamente constante, as correntes nos enrolamentos amortecedores de eixos "d" e "q" observam-se uma pequena variação, cuja média é zero. Em função da saliência dos polos estas correntes apresentam formas de onda diferentes.

As figuras 4.2.16, 4.2.17, 4.2.19, e 4.2.20 apresentam o torque eletromagnético oferecido pelo gerador. Novamente os objetivos são os mesmos anteriores. Ressaltam-se as oscilações de conjugados de torque no regime não senoidal que são acentuados para as distorções harmônicas das correntes de estator. Observando-se na figura 4.2.17 uma oscilação de 150 a 190kN.m para torque de turbina constante e igual a 175kN.m, o que é de valor elevado e significativo levando-se em consideração que na prática as distorções harmônicas de corrente de estator podem assumir valores maiores do que este exemplo, resultando em oscilações de torque ainda maiores.

Outra observação importante apresentado na figura 4.2.19, sobre a oscilação de torque, mesmo com carga linear, porém com os harmônicos espaciais sendo considerado, o que na prática sempre acontece. No regime não senoidal o efeito dos harmônicos espaciais aumenta a oscilações de torque, como observa-se na figura 4.2.20. Uma oscilação de aproximadamente 154kN.m a

204kN.m, além de alterar a forma de onda desta oscilação em relação ao regime não senoidal sem harmônicos espaciais. Comparando as figuras 4.2.17 e 4.2.20.

Todas estas oscilações de torque tem origem na interação magnética entre as correntes de estator distorcidas e as oscilações da corrente de excitação e das correntes nos enrolamentos amortecedores.

4.3 Simulações em "SIMULINK"

O objetivo de se fazer a simulação utilizando "Sim-Power-Systems" é em função da necessidade de estudar a máquina síncrona em um sistema elétrico de potencia mais completo possível, onde se podem apresentar reguladores de tensão e velocidade, transformadores, linha da transmissão, ou seja, vários componentes de um sistema elétrico de potência. Para o desenvolvimento desta simulação foram utilizados os softwares "MATLAB" programando os blocos da biblioteca do "*SimPowerSystem*" do "*Simulink*".

Considerando que os conteúdos harmônicos são regionais, para verificação do estudo foram utilizadas duas arquiteturas, sendo uma com as cargas lineares e não lineares na saída do transformador elevador da máquina síncrona dentro da usina, conforme figura 4.3.1, e a outra arquitetura, também simulada, conforme figura 4.3.2, onde as cargas estão aproximadamente a 100km de distância. Nestas arquiteturas foram utilizadas a máquina síncrona do modelo "od23tb", que é um programa pertencente a biblioteca do "simulink". Como os resultados das simulações para as duas arquiteturas foram aproximadamente os mesmos, apenas o conjunto dos gráficos das simulações da segunda arquitetura é apresentado.

Nesta arquitetura as cargas estão dentro da usina entre o transformador elevador e a linha de transmissão figura 4.3.1.

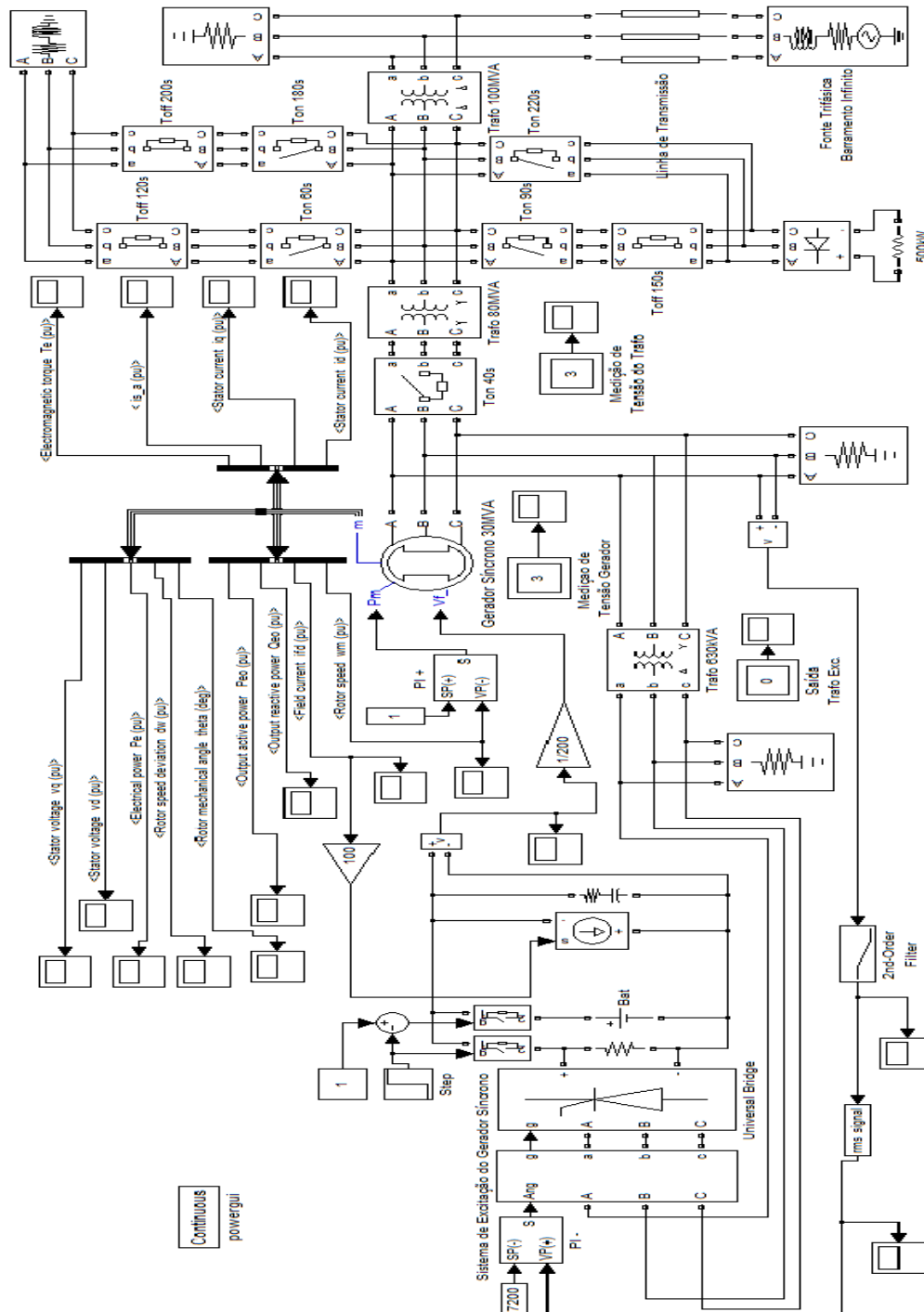


Figura 4.3.1 - Cargas dentro da usina.

Nesta arquitetura as cargas estão fora da usina depois da linha de transmissão a aproximadamente 100km figura 4.3.2.

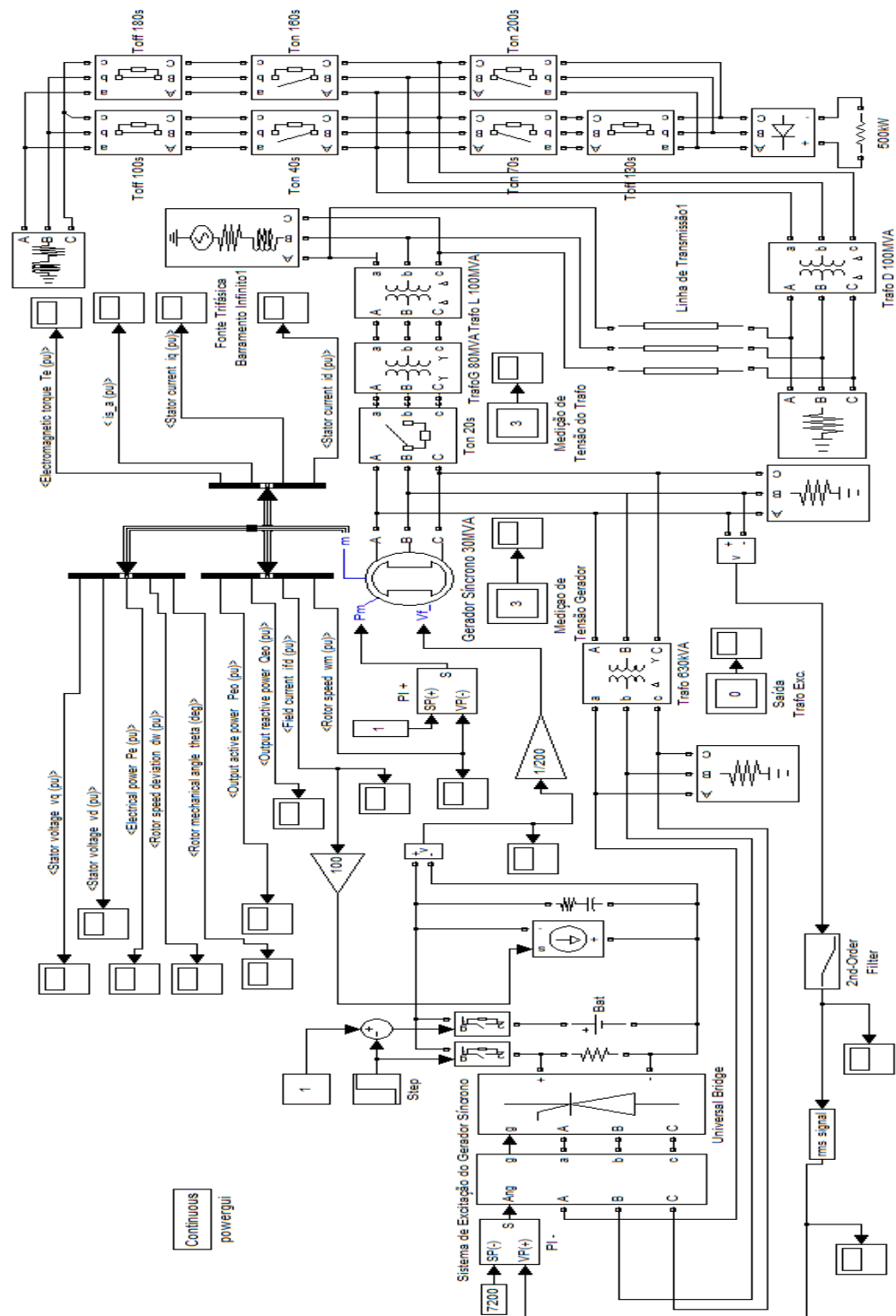


Figura 4.3.2 - Cargas fora da usina.

O modelo de máquina síncrona é o tradicional com variáveis em "d e q" e todos os parâmetros do rotor e variáveis elétricas são referenciadas ao estator. Eles são identificados por variáveis condicionadas, e os subscritos utilizados são definidos:

- d, q: parâmetros dos eixos "diretos" e em "quadratura";
- R, s: parâmetros do rotor e do estator;
- l, m: parâmetros da indutância de dispersão e magnetização;
- f, k: parâmetros do campo e do enrolamento amortecedor.

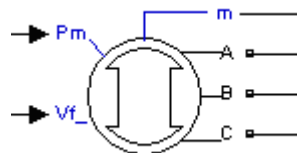


Figura 4.3.3 - Modelo de máquina síncrona de polos salientes 30MVA.

A máquina síncrona utilizada na simulação apresenta os dados da tabela 4.3.1.

Tabela 4.3.1 Dados dos Parâmetros da Máquina Utilizada

Parâmetros do estator						
V _{nom} [kV]	P _{nom} [MVA]	F [Hz]	Rs [pu]	LI [pu]	Lmd [pu]	Lmq [pu]
7,2	30,0	60	2,85E-03	0,114	1,19	0,36
Parâmetros do campo			Coeficiente de inércia		Nº de polos	
V _f [pu]	R _f [pu]	LI _f [pu]	H[s]		p	
1	5,79E-04	0,114	3,7		22	
Parâmetros do amortecimento						
Rkd[pu]	Llkd [pu]		Rkd1 [pu]		Llkd1 [pu]	
1.17E-02	0.182		1.97E-02		0.384	

As figuras 4.3.4a e 4.3.4b apresentam o torque eletromagnético simulado, para a sequência de chaveamento apresentado a seguir.

No instante zero a máquina é ligada com o sistema de excitação alimentado por um conjunto de bateria, no instante 10 segundos, é efetuado o chaveamento da excitação, até então com a bateria, para um sistema com eletrônica de potência, onde já é observada uma pequena oscilação do torque eletromagnético. No instante 20 segundos é chaveada o “transformador elevador”, observa-se uma forte oscilação do torque eletromagnético, em função do efeito da corrente “In-rush” do transformador, que depois de um dado tempo é atenuada. No instante 40 segundos é chaveado a carga linear de 500kW, onde verifica-se aumento do torque eletromagnético em função do acréscimo de carga no sistema. No instante 70 segundos, após a estabilização do sistema pela entrada da carga linear, é chaveado a carga não linear de valor 500kW observando-se um aumento bem acentuado na oscilação do torque eletromagnético, em função dessa carga gerar harmônicas. No instante 100 segundos é retirado do sistema a carga linear, ficando apenas a carga não linear. Prosseguindo com a simulação, agora apresentada na figura 4.3.4b, no instante 130 segundos, é retirada a carga não linear, ficando apenas a carga do transformador, com o “In-rush” bem menor. No instante 160 segundos, é ligada novamente a carga linear. No instante 180 segundos, é desligada. No instante 200 segundos, é ligada a carga não linear, onde apresenta as mesmas características de antes. No instante 230 segundos, é desligado o sistema.

A tabela 4.3.2 apresenta um resumo da sequência de chaveamento.

Tempo (s)	Chaveamento (manobras)
0	Partida do sistema;
10	Desliga sistema com Bateria e Liga sistema de Excitação;
20	Liga Transformador;
40	Liga carga Linear;
70	Liga carga não Linear;
100	Desliga carga Linear;
130	Desliga carga não Linear;
160	Liga novamente carga Linear;
180	Desliga carga Linear;
200	Liga novamente carga não Linear;
230	Desliga sistema.

A tabela 4.3.2 Resumo da sequência de chaveamento.

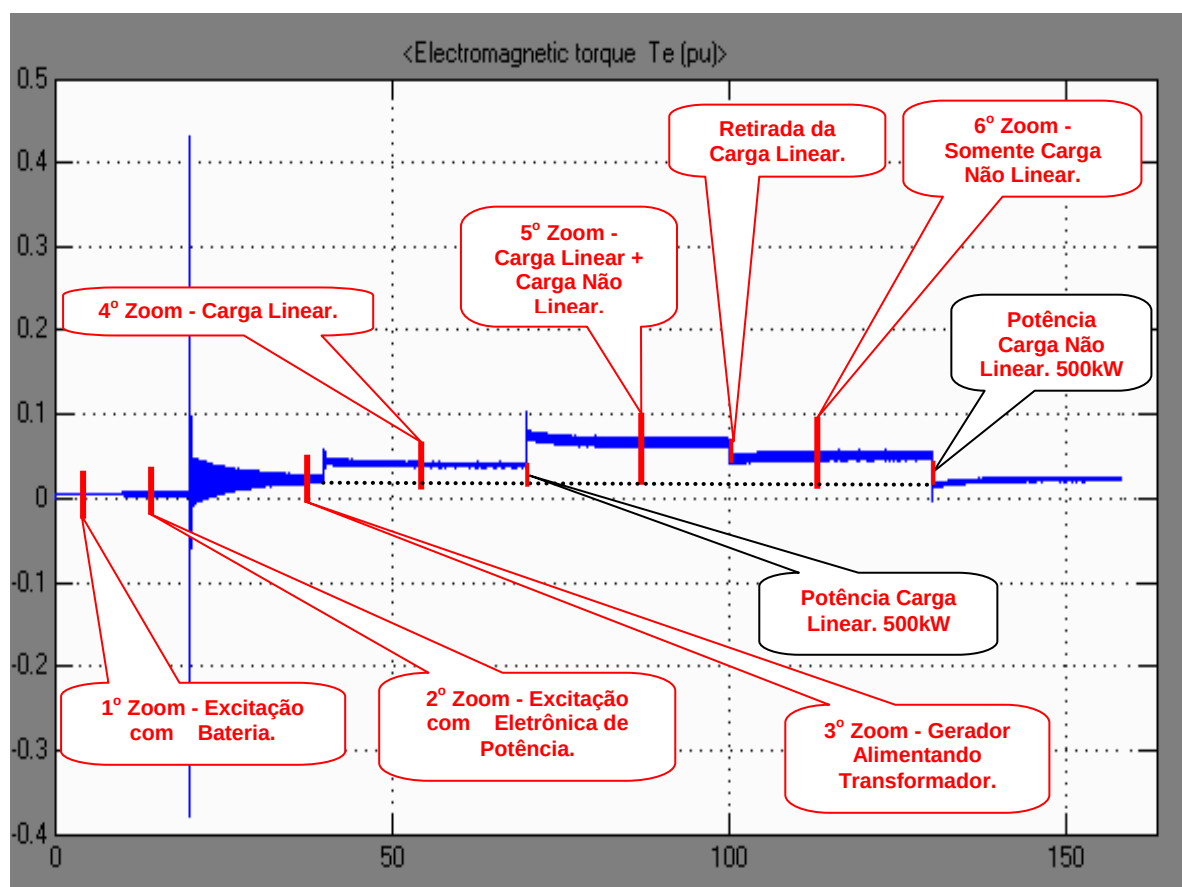


Figura 4.3.4a - Torque Eletromagnético do instante zero a 170 segundos.

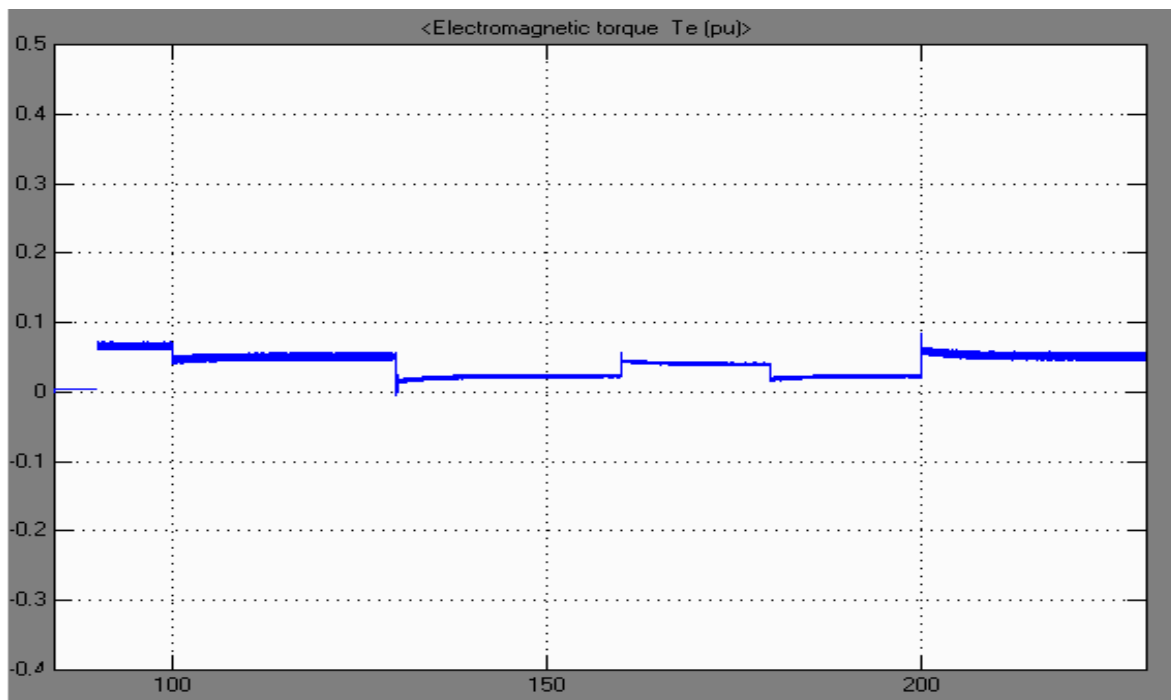


Figura 4.3.4b - Torque Eletromagnético a partir do instante 90 segundos. -
Continuação da figura 4.3.4a.

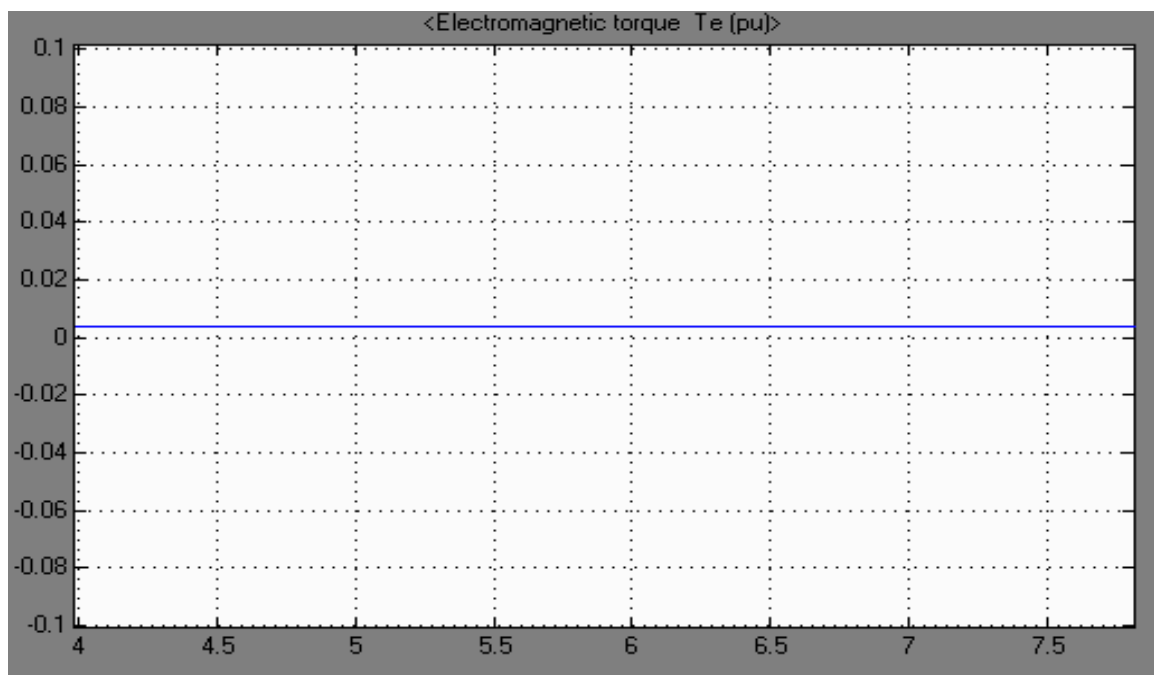


Figura 4.3.5 - Torque Eletromagnético de 4 a 8 segundos. Máquina com excitação alimentada em corrente contínua - Bateria. Zoom 1º da figura 4.3.4a.

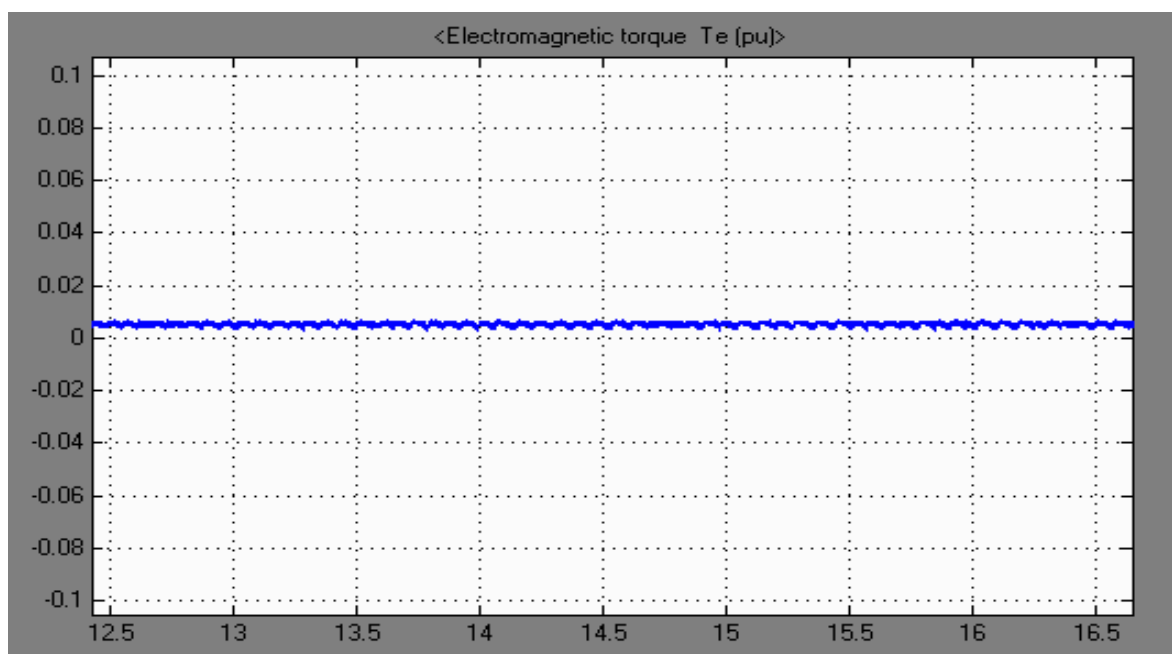


Figura 4.3.6 - Torque Eletromagnético de 12.5 a 17 segundos. Máquina com excitação alimentada com Eletrônica de Potência. Zoom 2º da figura 4.3.4a.

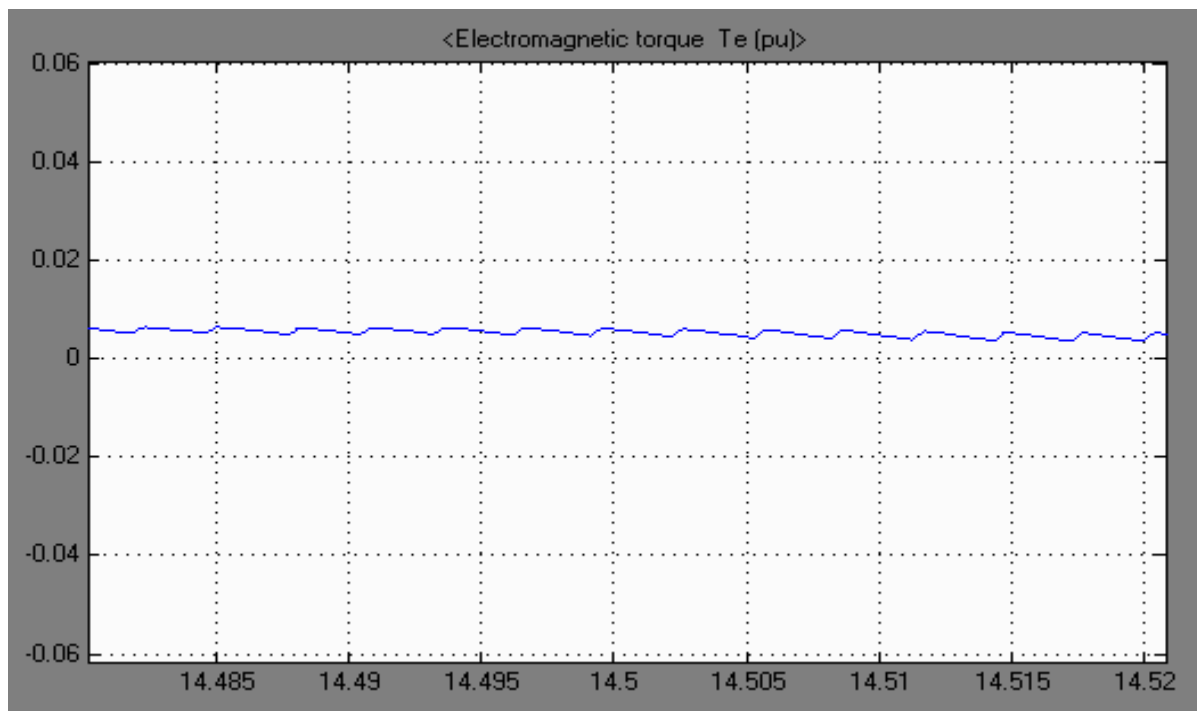


Figura 4.3.6a - Torque Eletromagnético de 14 a 14.6 segundos. Máquina com excitação alimentada com Eletrônica de Potência. Zoom da figura 4.3.6.

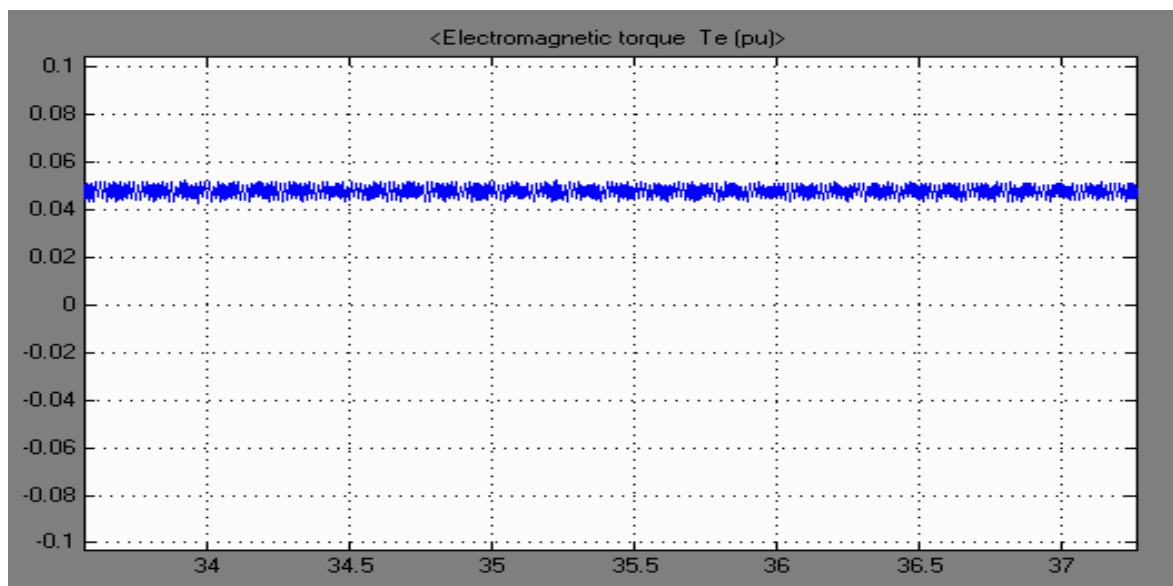


Figura 4.3.7 - Torque Eletromagnético de 33 a 38 segundos. Máquina alimentando Transformador Elevador. Zoom 3º da figura 4.3.4a.

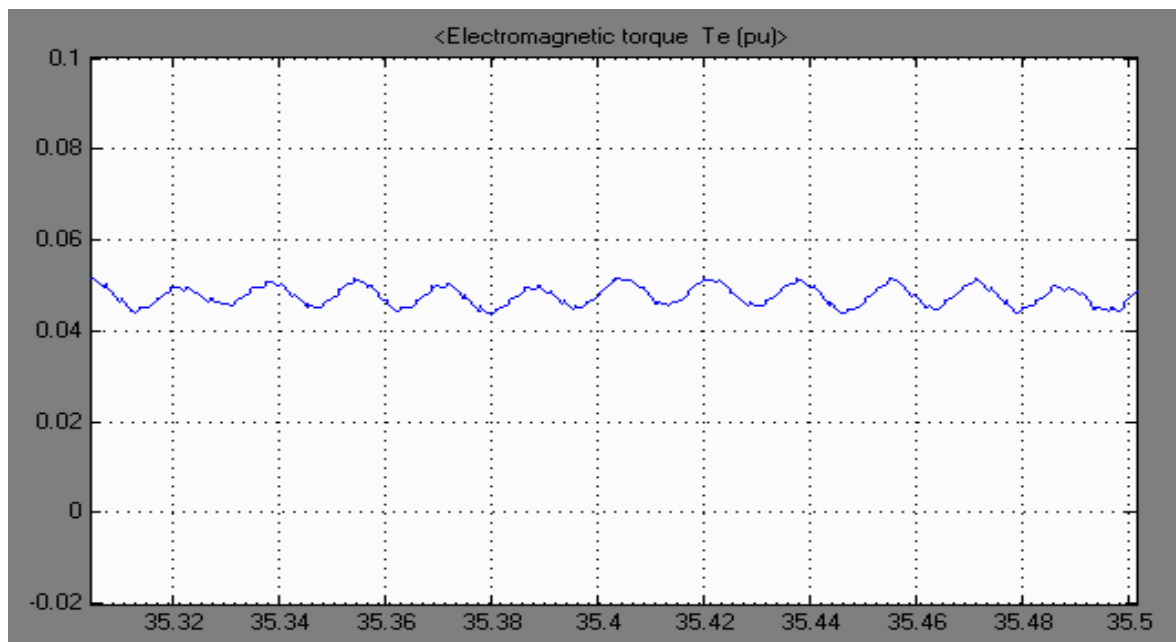


Figura 4.3.7a - Torque Eletromagnético de 35 a 35.5 segundos. Máquina alimentando Transformador Elevador. Zoom da figura 4.3.7.

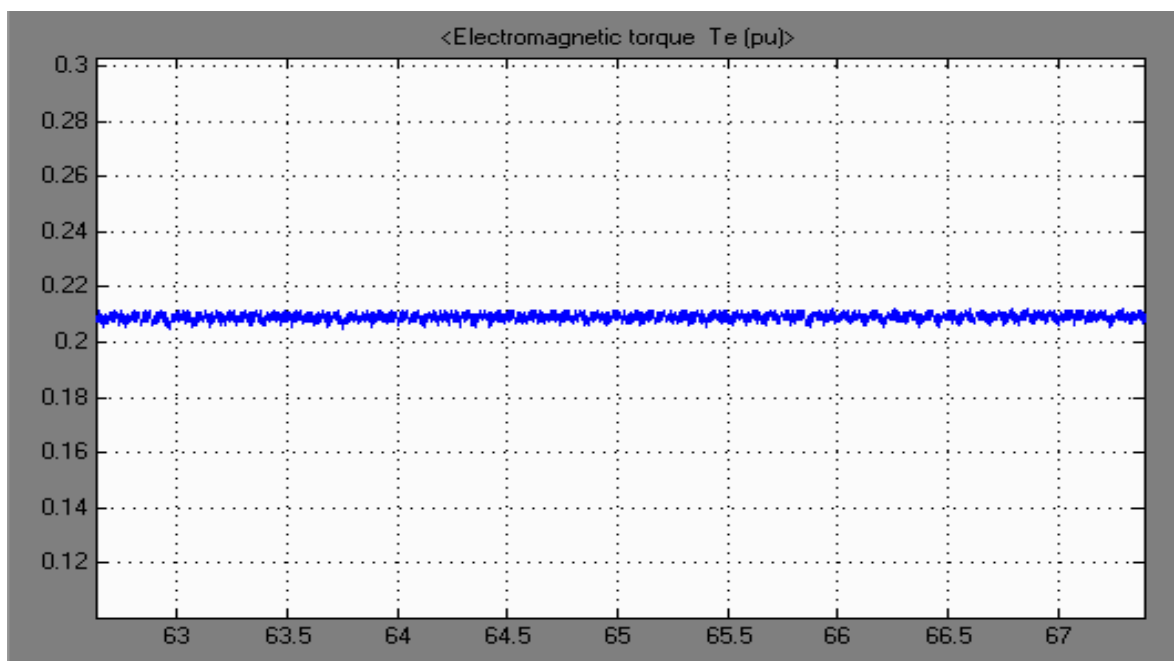


Figura 4.3.8 Torque Eletromagnético de 62 a 68 segundos. Máquina alimentando Transformador Elevador e Carga Linear. Zoom 4º da figura 4.3.4a.

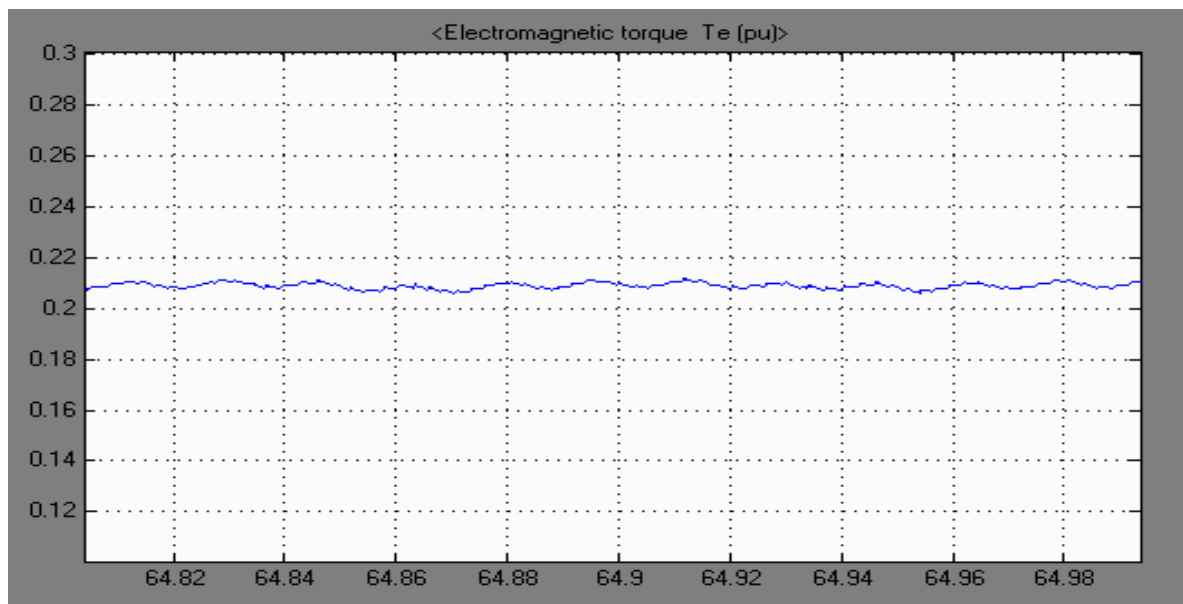


Figura 4.3.8a - Torque Eletromagnético de 64 a 64.99 segundos. Máquina alimentando Transformador Elevador e Carga Linear. Zoom da figura 4.3.8.

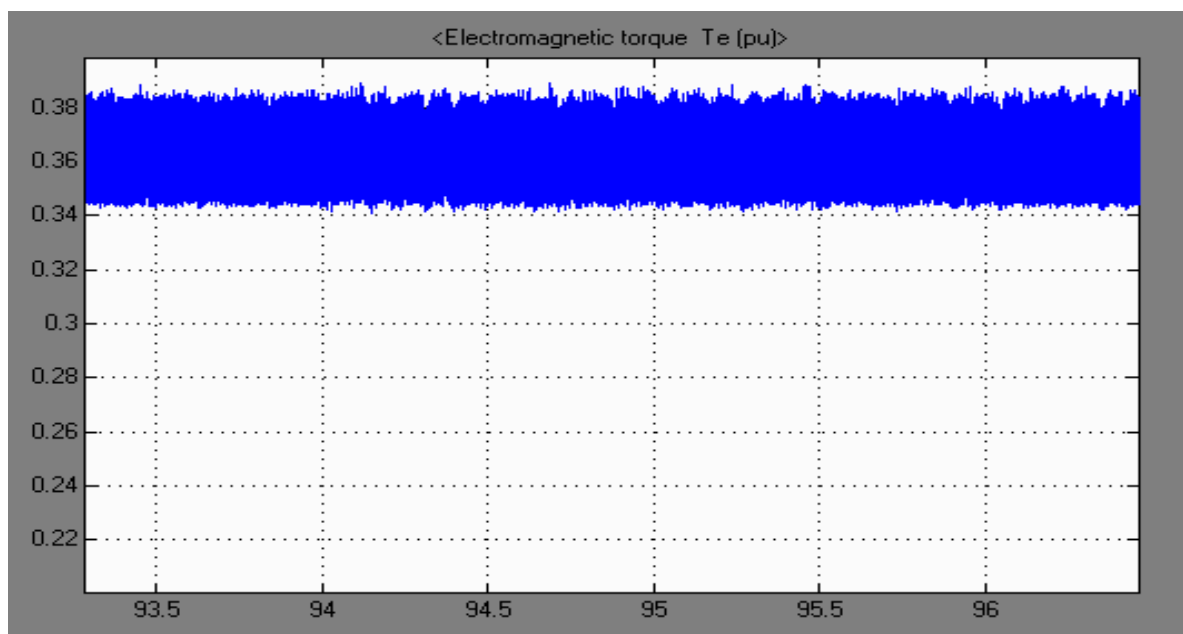


Figura 4.3.9 - Torque Eletromagnético de 93 a 98 segundos. Máquina alimentando Transformador Elevador, Cargas Linear e não Linear. Zoom 5º da figura 4.3.4a.

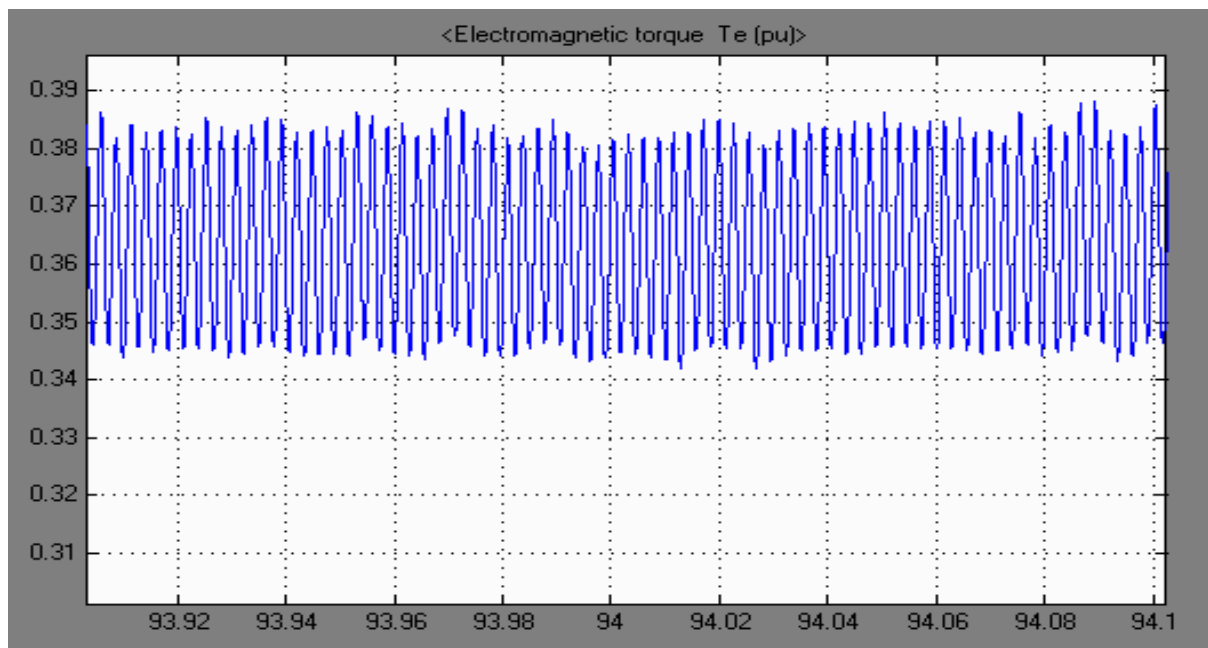


Figura 4.3.9a - Torque Eletromagnético de 93 a 94 segundos. Máquina alimentando Transformador Elevador, Cargas Linear e não Linear. Zoom da figura 4.3.9.

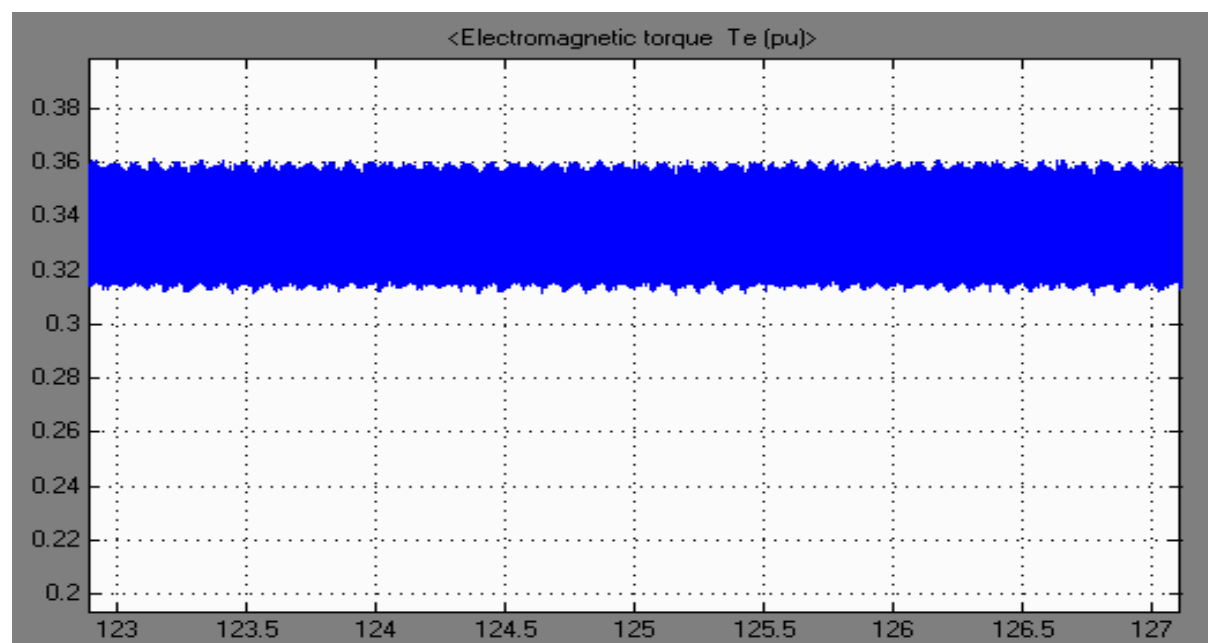


Figura 4.3.10 - Torque Eletromagnético de 122.5 a 127.5 segundos. Máquina alimentando Carga não Linear. Zoom 6º da figura 4.3.4a.

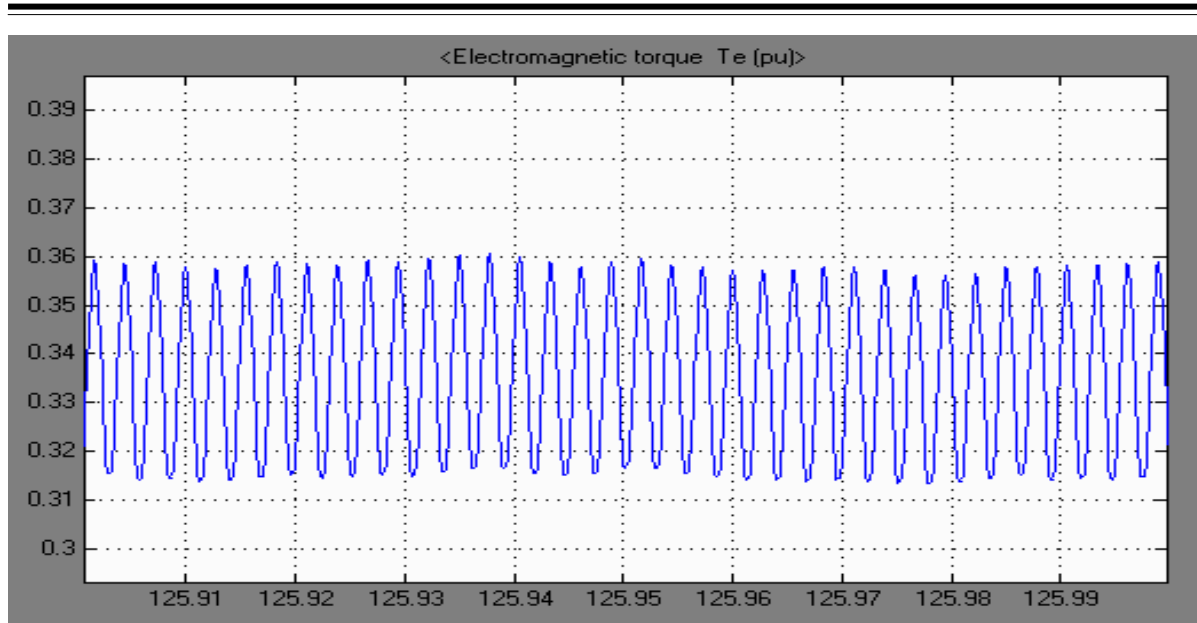


Figura 4.3.10a - Torque Eletromagnético de 125 a 126 segundos. Máquina alimentando Carga não Linear. Zoom da figura 4.3.10.

Na figura 4.3.11, está apresentado à forma de onda da tensão entre os instantes 19 e 19,016 segundos onde os harmônicos praticamente não existem. A máquina está alimentando apenas a carga do seu sistema de excitação.

As figuras 4.3.12 e 4.3.13 apresentam os espectros e valores numéricos de "THD" total e individual respectivamente.

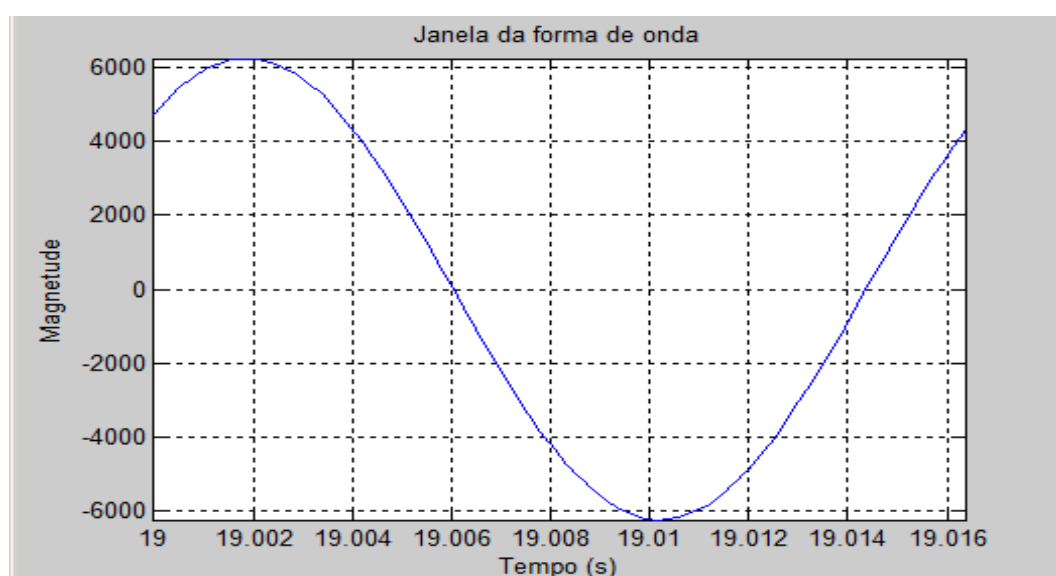


Figura 4.3.11 - Forma de Onda da Tensão da Máquina Síncrona.

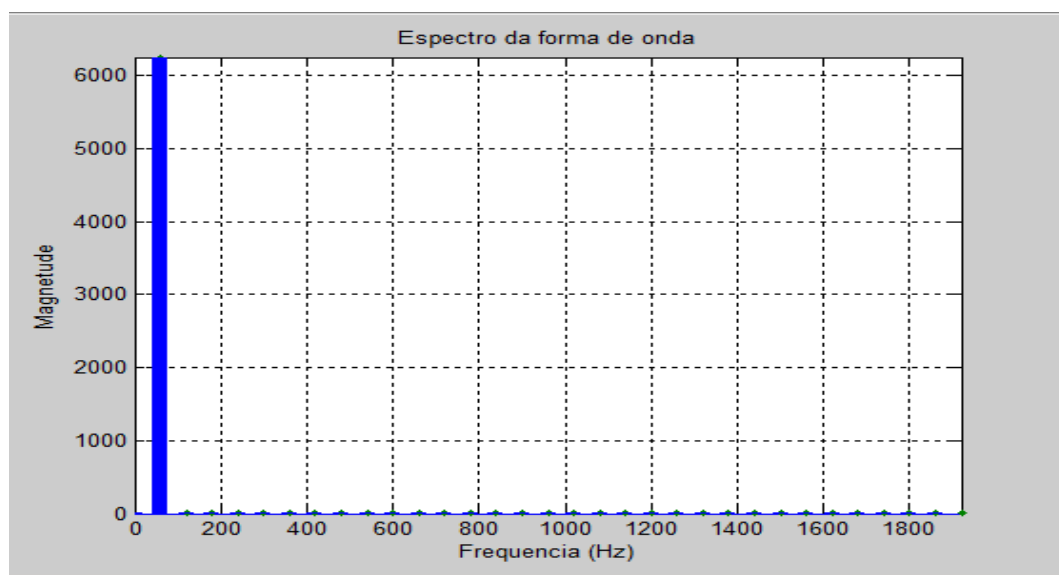


Figura 4.3.12 - Espectro da Forma de Onda da Tensão da Máquina Síncrona.

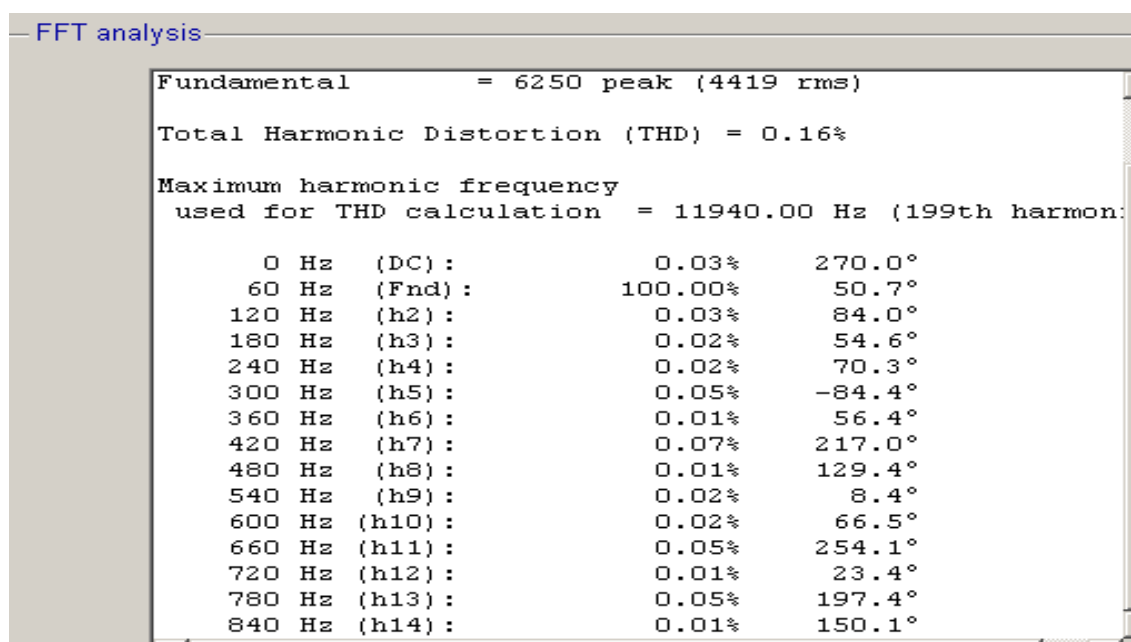


Figura 4.3.13 - Percentuais de harmônicas da forma de onda da tensão da máquina.

Na figura 4.3.14, apresenta a forma de onda da tensão ocorrida entre os instantes 220 segundos a 220,016 segundos, onde os harmônicos presentes são os da carga não linear. As duas figuras procedentes apresentam os espectro e valores de "THD".

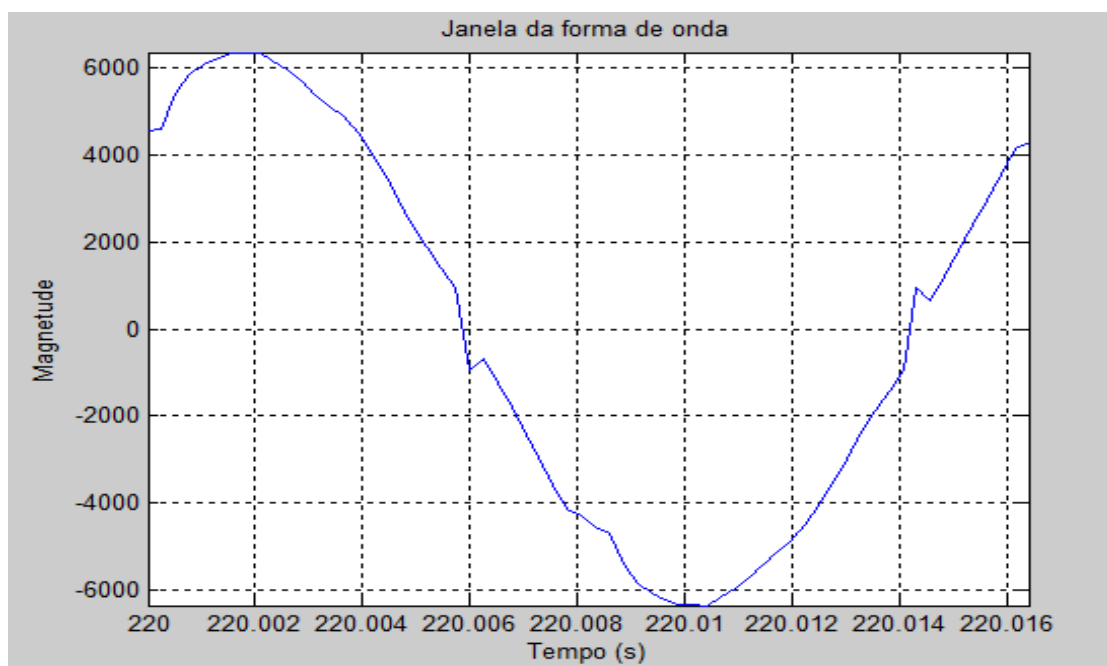


Figura 4.3.14 - Forma de Onda da Tensão da Máquina Síncrona.

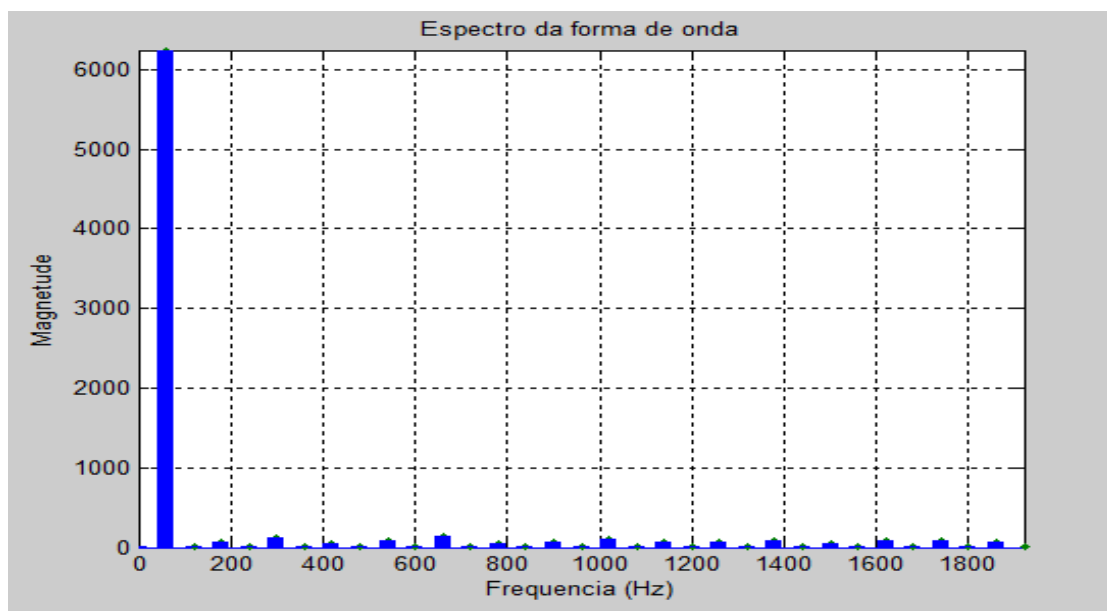


Figura 4.3.15 - Espectro da Forma de Onda da Tensão da Máquina Síncrona.

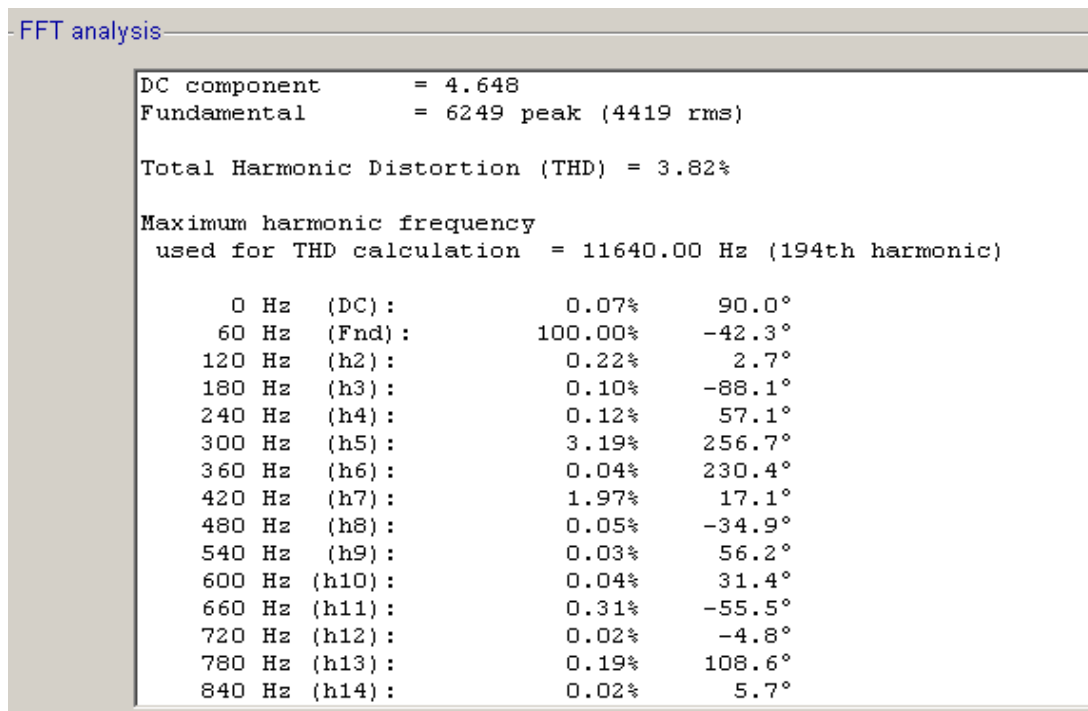


Figura 4.3.16 - Tabela apresenta os percentuais de harmônicas de 219 a 220 segundos da forma de onda da tensão da máquina.

As figuras 4.3.17 a 4.3.19 apresentam a corrente de armadura do gerador síncrono.

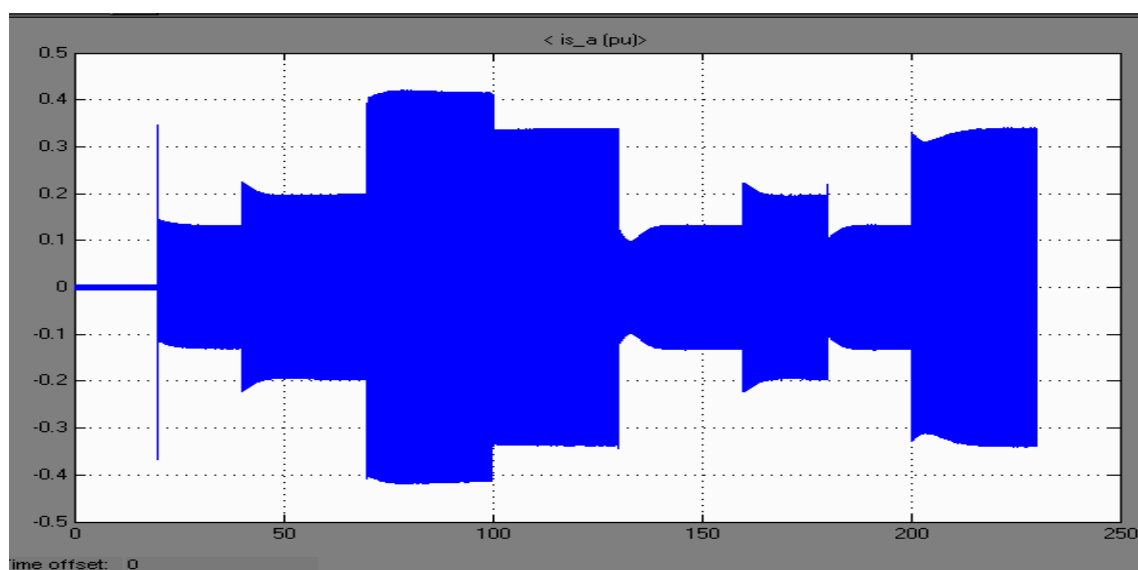


Figura 4.3.17 - Forma de Onda da Corrente de Armadura.

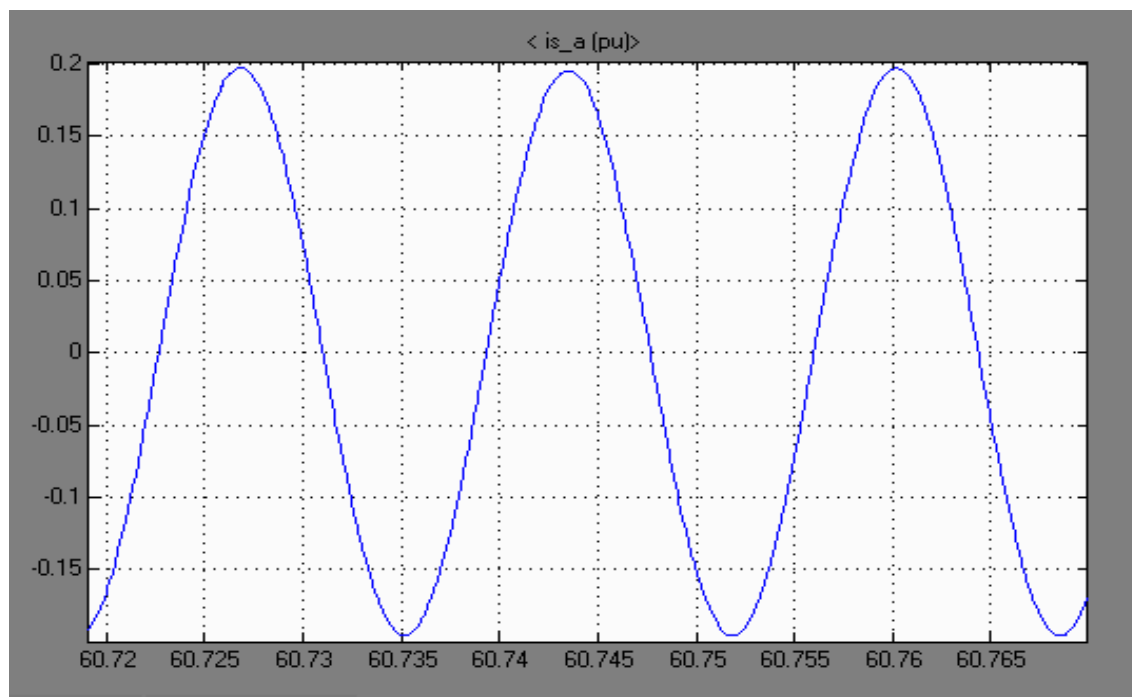


Figura 4.3.18 - Forma de Onda da Corrente de Armadura - Zoom da figura 4.3.17 de 60.72 a 60.756 segundos, com Carga Linear.

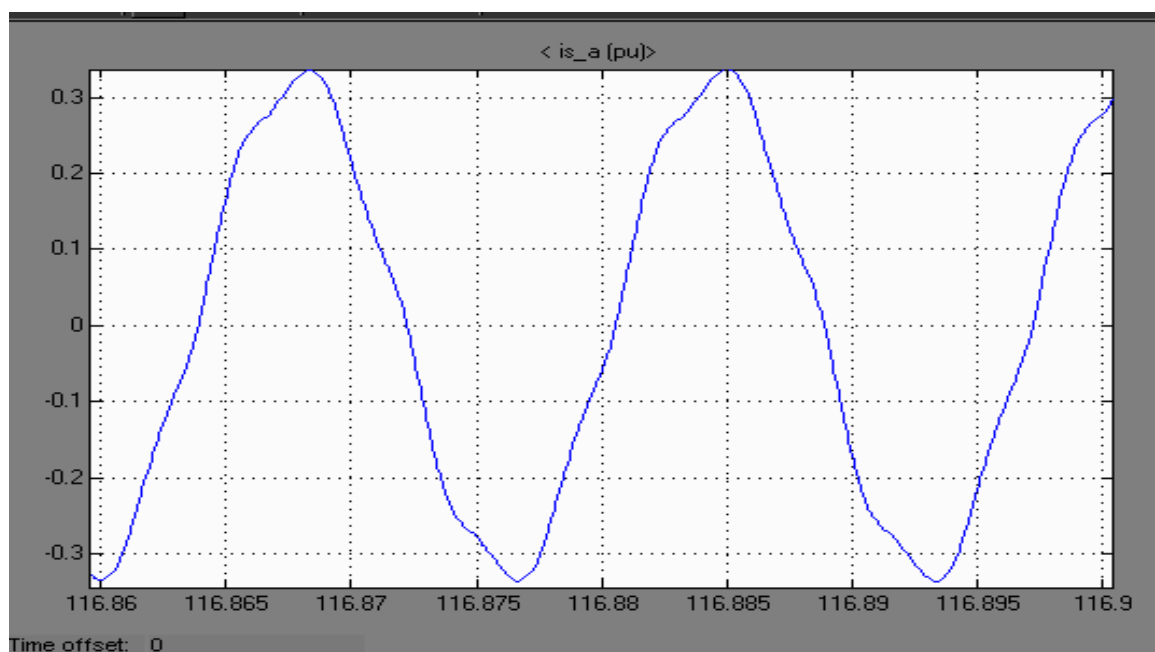


Figura 4.3.19 - Forma de Onda da Corrente de Armadura - Zoom da figura 4.3.17 de 116.86 a 116.9 segundos, com Carga Não Linear.

As figuras 4.3.20 a 4.3.29 apresentam a corrente de Excitação do Campo do gerador síncrono.

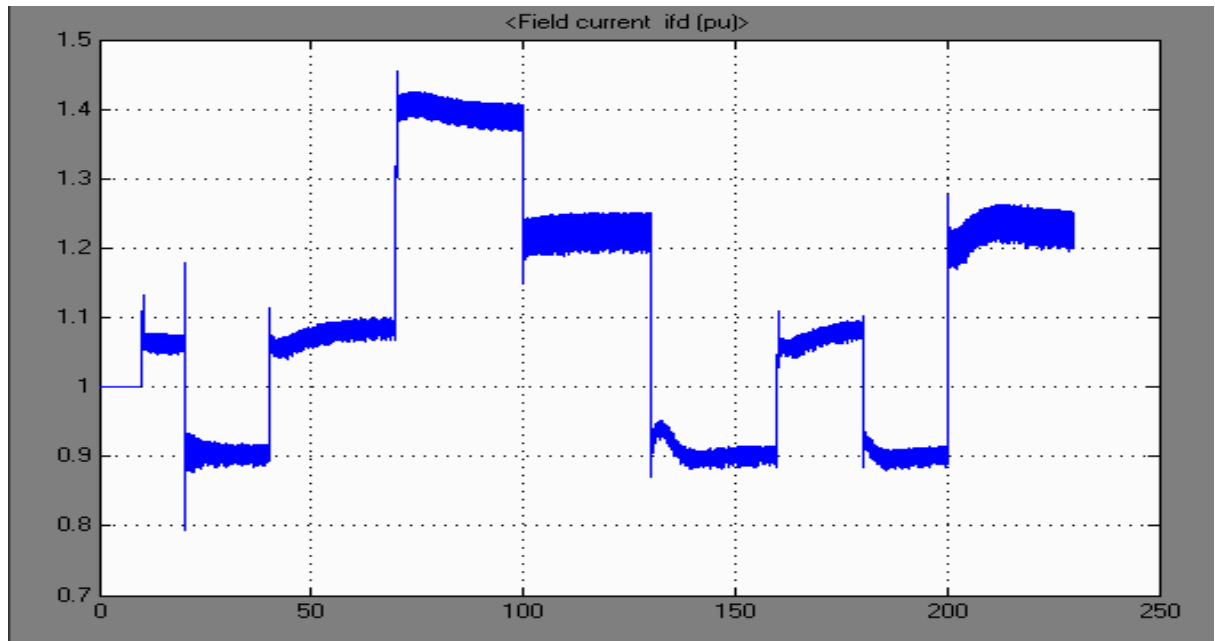


Figura 4.3.20 - Forma de Onda da Corrente de Excitação I_f .

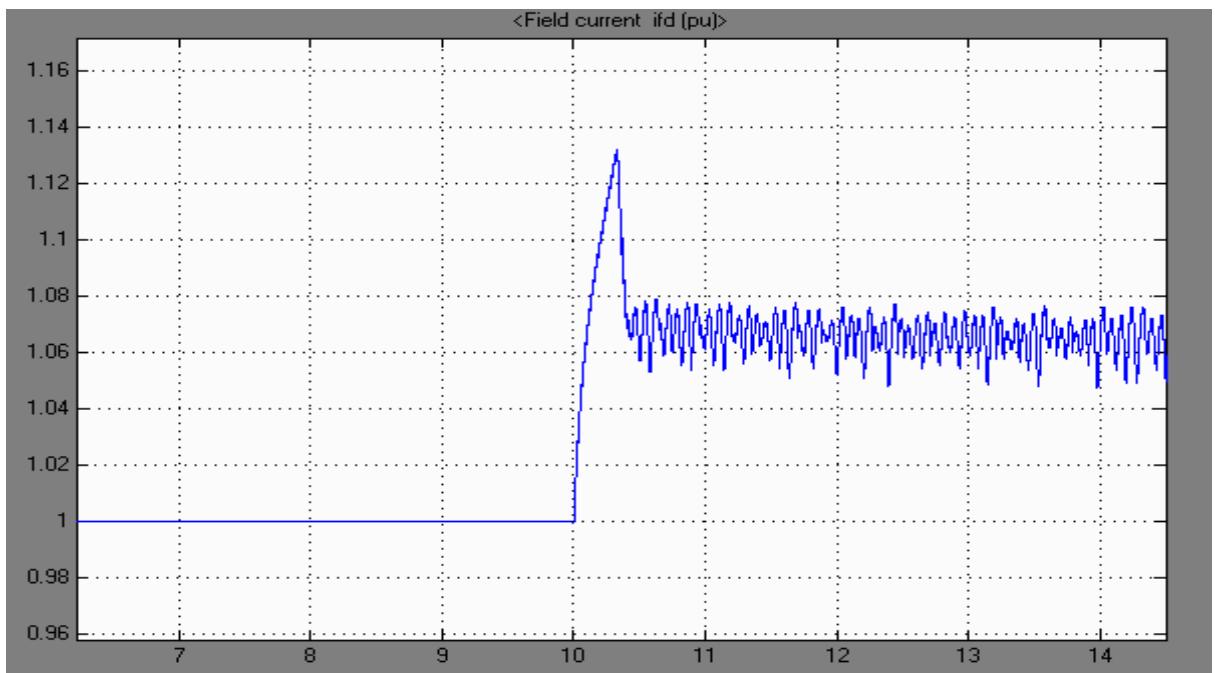


Figura 4.3.21 - Forma de Onda da Corrente de Excitação I_f - Zoom da figura 4.3.20 de 5 a 15 segundos. No instante 10 segundos o sistema de excitação passa de bateria para eletrônica da potência.

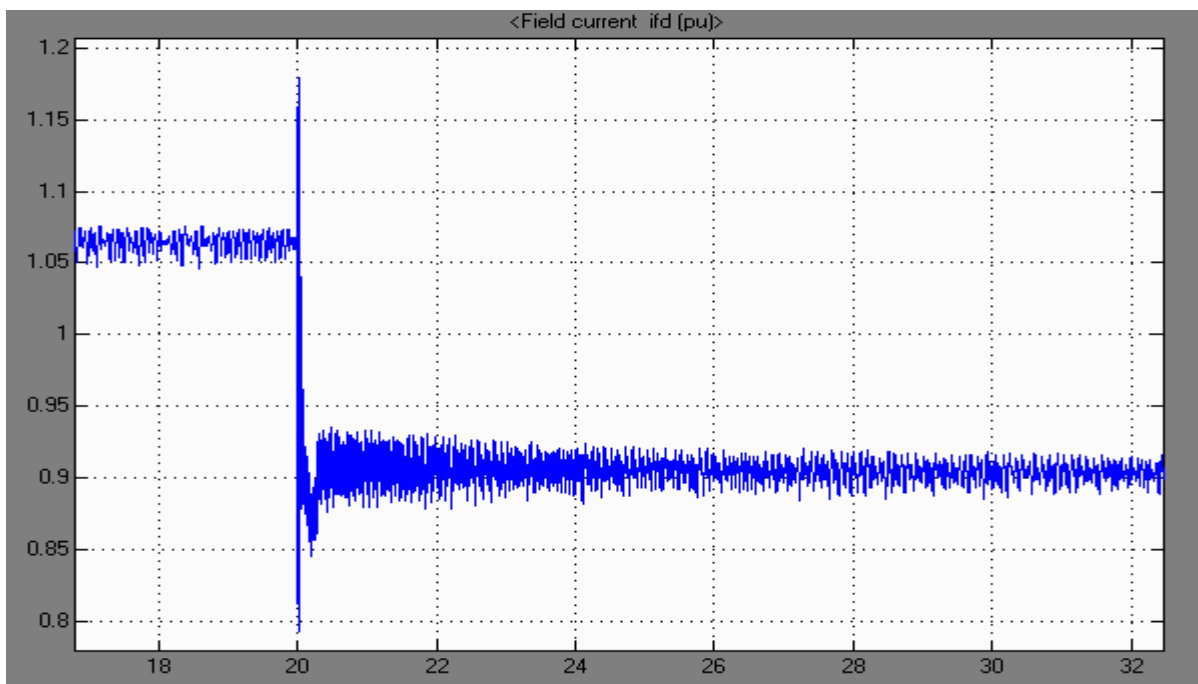


Figura 4.3.22 - Forma de Onda da Corrente de Excitação I_f - Zoom da figura 4.3.20 de 17 a 33 segundos. No instante 20 segundos ocorre o chaveamento do Transformador.

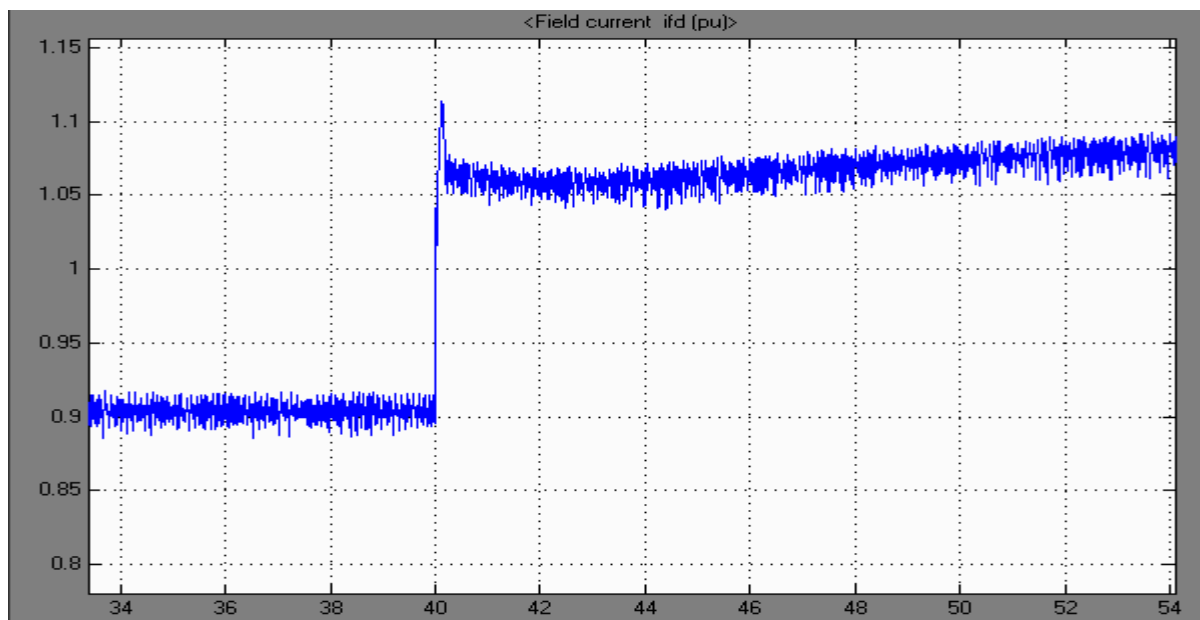


Figura 4.3.23 - Forma de Onda da Corrente de Excitação I_f - Zoom da figura 4.3.20 de 33 a 54 segundos. No instante 40 segundos, ocorre o chaveamento da Carga Linear.

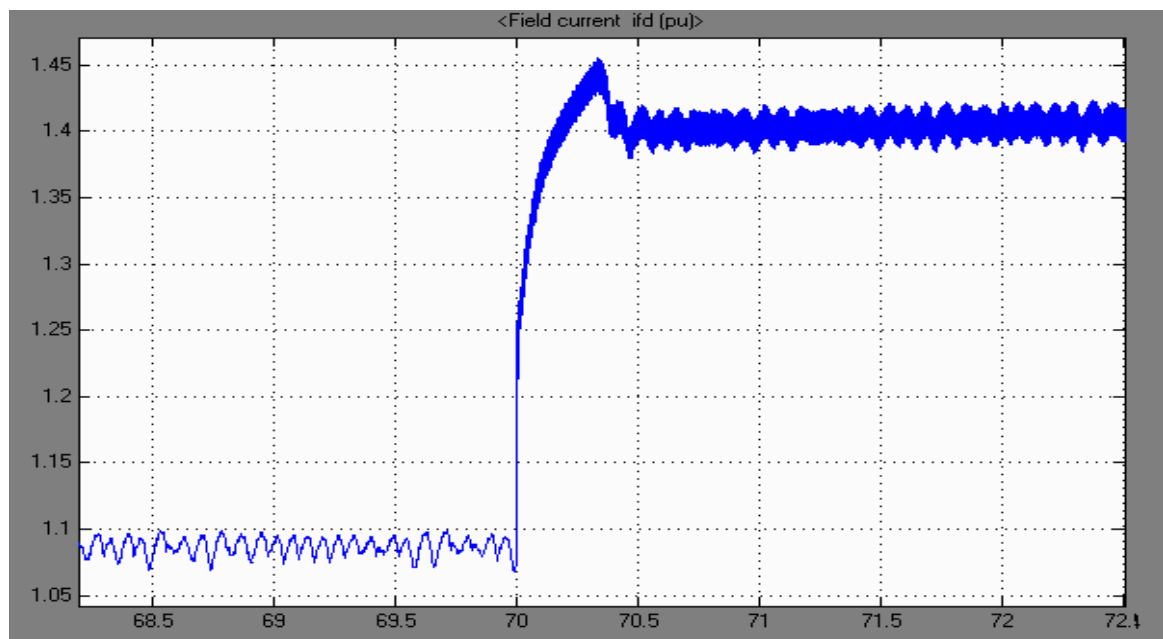


Figura 4.3.24 - Forma de Onda da Corrente de Excitação I_f - Zoom da figura 4.3.20 de 67 a 72 segundos. No instante 70 segundos, ocorre o chaveamento da Carga Não Linear.

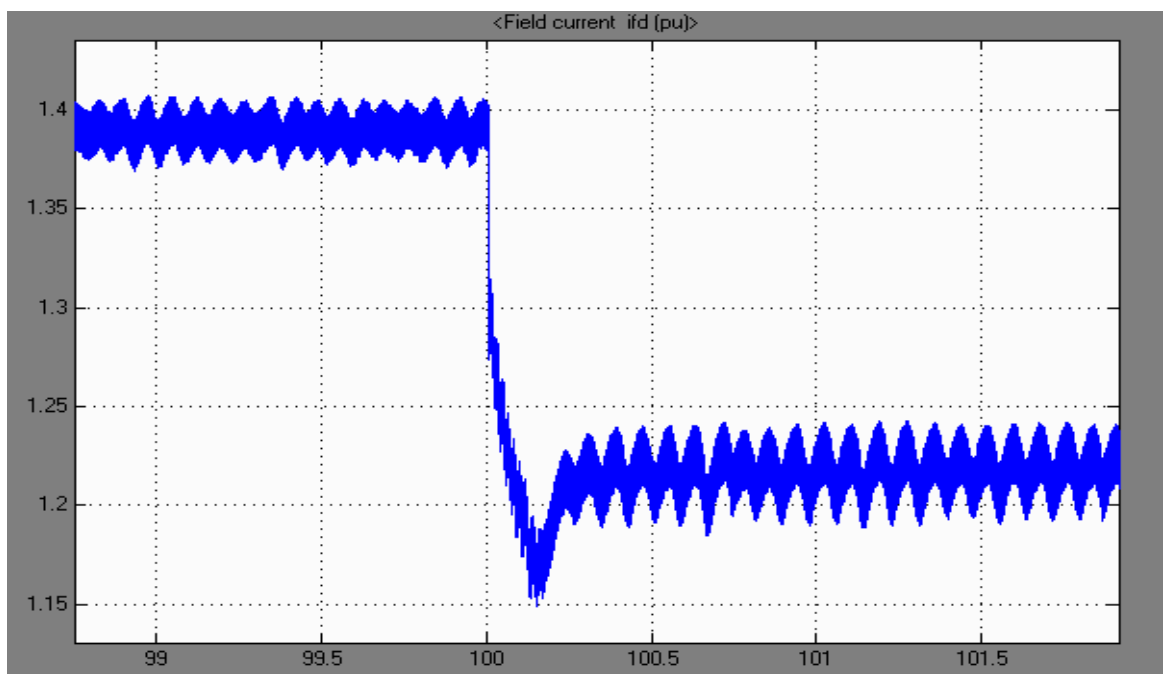


Figura 4.3.25 - Forma de Onda da Corrente de Excitação I_f - Zoom da figura 4.3.20 de 98 a 102 segundos. No instante 100 segundos, ocorre o chaveamento da Retirada da Carga Linear.

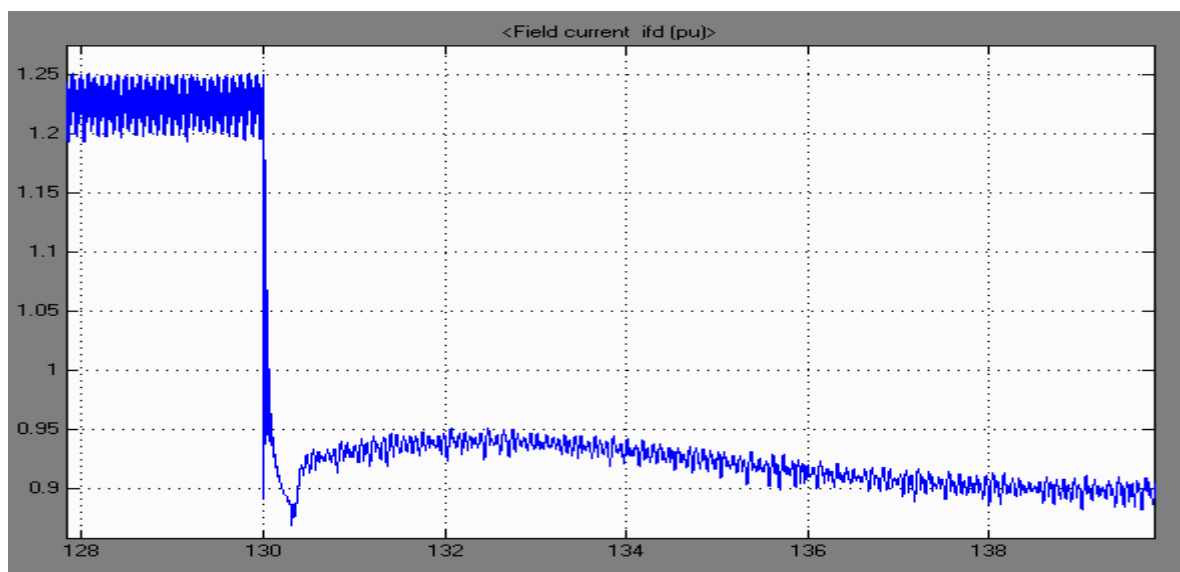


Figura 4.3.26 - Forma de Onda da Corrente de Excitação I_f - Zoom da figura 4.3.20 de 128 a 140 segundos. No instante 130 segundos, ocorre o chaveamento de retirada da Carga Não Linear.

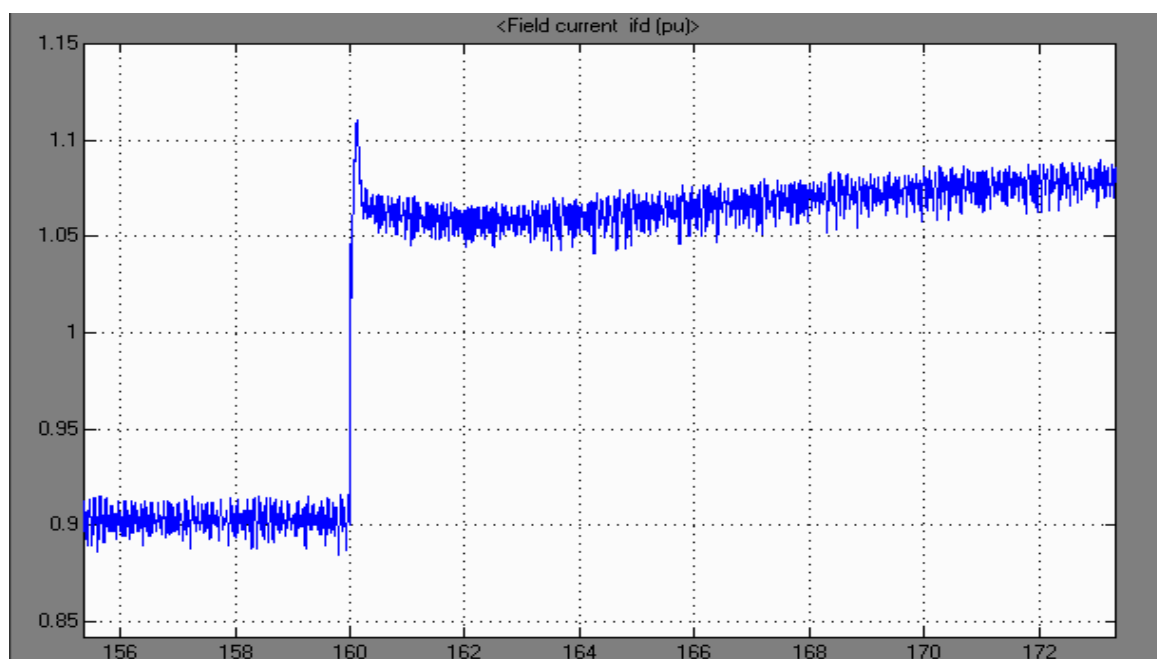


Figura 4.3.27 - Forma de Onda da Corrente de Excitação I_f - Zoom da figura 4.3.20 de 155 a 173 segundos. No instante 160 segundos, ocorre novamente o chaveamento da Carga Linear.

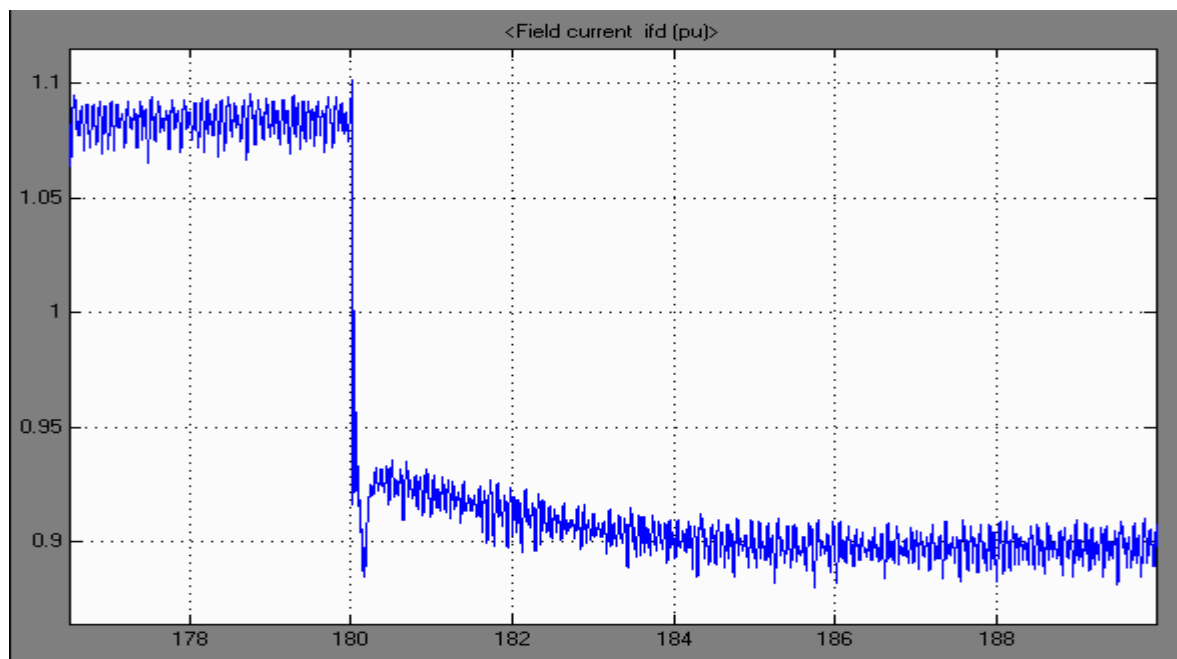


Figura 4.3.28 - Forma de Onda da Corrente de Excitação I_f - Zoom da figura 4.3.20 de 176 a 189 segundos. No instante 180 segundos, ocorre o chaveamento de retirada da Carga Linear.

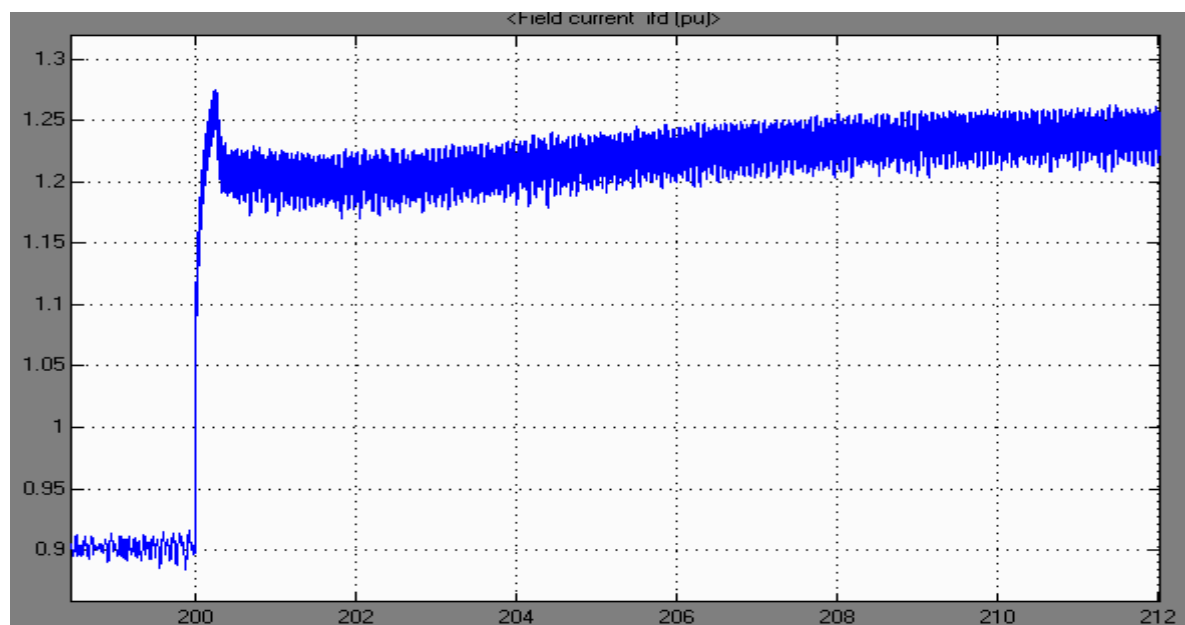


Figura 4.3.29 - Forma de Onda da Corrente de Excitação I_f - Zoom da figura 4.3.20 de 198 a 212 segundos. No instante 200 segundos, ocorre novamente o chaveamento da Carga Não Linear.

Nas figuras resultantes da simulação em "SIMULINK" pode-se observar:

A comparação entre a figura 4.3.5 e figuras 4.3.ba, 4.3.7a, e 4.3.8a apresenta o efeito não linear no torque eletromagnético provocado pelo sistema eletrônico de excitação. Este sistema produz uma corrente de excitação com um conteúdo harmônico superposto a corrente contínua como pode ser observado nas figuras 4.3.21 a 4.3.24.

O chaveamento da carga não linear aumenta acentuadamente a oscilação do torque eletromagnético como pode ser observado nas figuras 4.3.4a e b, 4.3.9a, 4.3.10a.

Confirma-se o efeito da carga não linear sobre as oscilações de torque e da corrente de excitação, comparando as figuras 4.3.9a e 4.3.10a, e também os lados direito e esquerdo das figuras 4.3.25, 4.3.26, e 4.3.29.

5.1 Introdução

Os ensaios experimentais foram desenvolvidos em bancada na Universidade Federal de Uberlândia Faculdade de Engenharia Elétrica, e medições praticas, realizadas na usina hidrelétrica de propriedade da Empresa Metropolitana de Águas e Energia S.A., localizada aproximadamente a cento e vinte quilômetros do centro de carga principal do estado de São Paulo.

5.2 Ensaios em Laboratório

Foram executados ensaios em bancada de laboratório para permitir a verificação da teoria desenvolvida. A bancada é composta por: gerador síncrono, motor elétrico acionando o gerador, cargas lineares e não lineares, e instrumentação de medição. As figuras 5.2.1 a 5.2.4 apresentam os detalhes da bancada em laboratório.



Figura 5.2.1 - Bancada de Ensaio.



Figura 5.2.2 - Torquímeter.

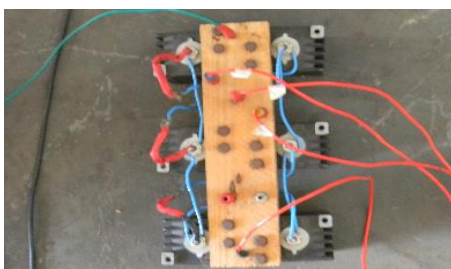


Figura 5.2.3 – Carga Não Linear



Figura 5.2.4 – Carga Linear

As medições de tensão e corrente foram efetuadas com sensores de efeito "Hall" e osciloscópio digital, modelo _____.

A medição de torque foi realizada com um Torquímetro modelo _____, sendo o sinal processado no osciloscópio digital.

As figuras 5.2.5 a 5.2.11 apresentam os resultados experimentais. Sendo as figuras 5.2.5 a 5.2.7 apresentam os resultados com a máquina operando em vazio.

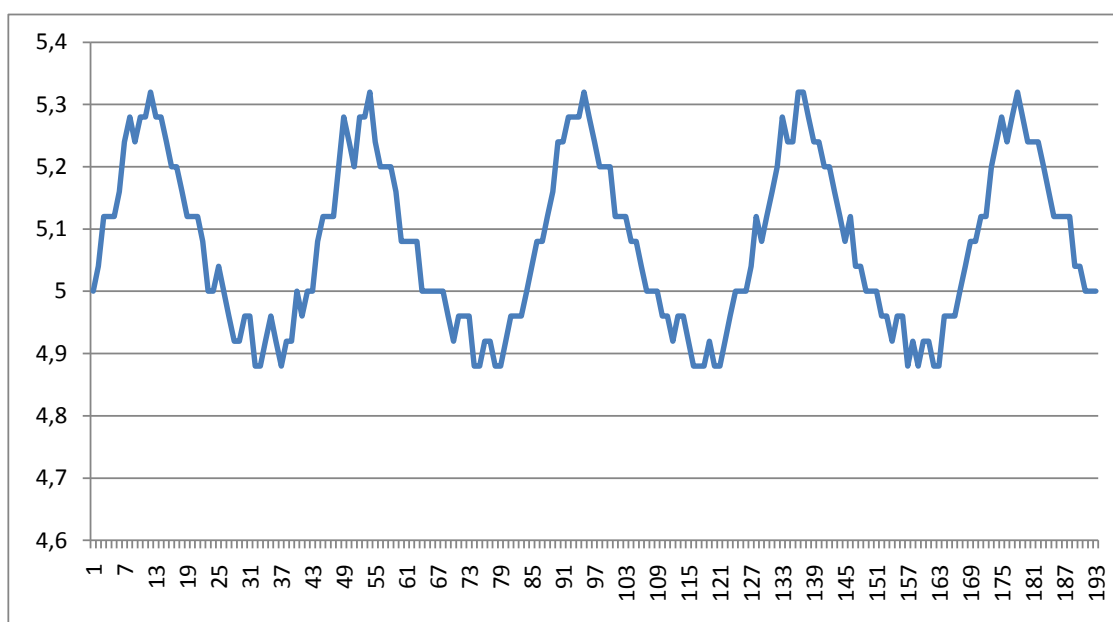


Figura 5.2.5 – Forma de Onda da Corrente de Excitação com a Máquina em vazio.

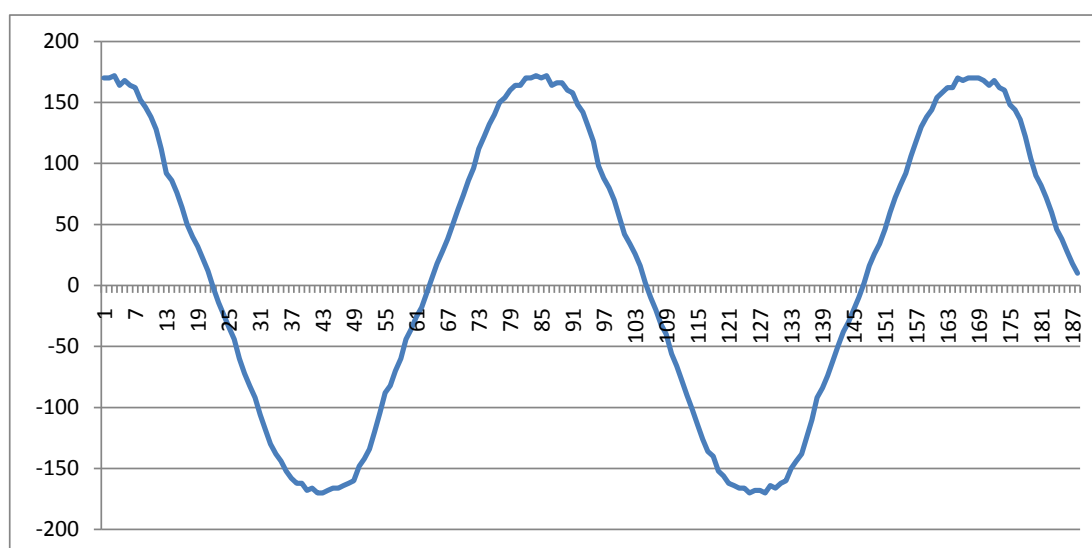


Figura 5.2.6 – Forma de Onda da Tensão do Estator com a Máquina em vazio.

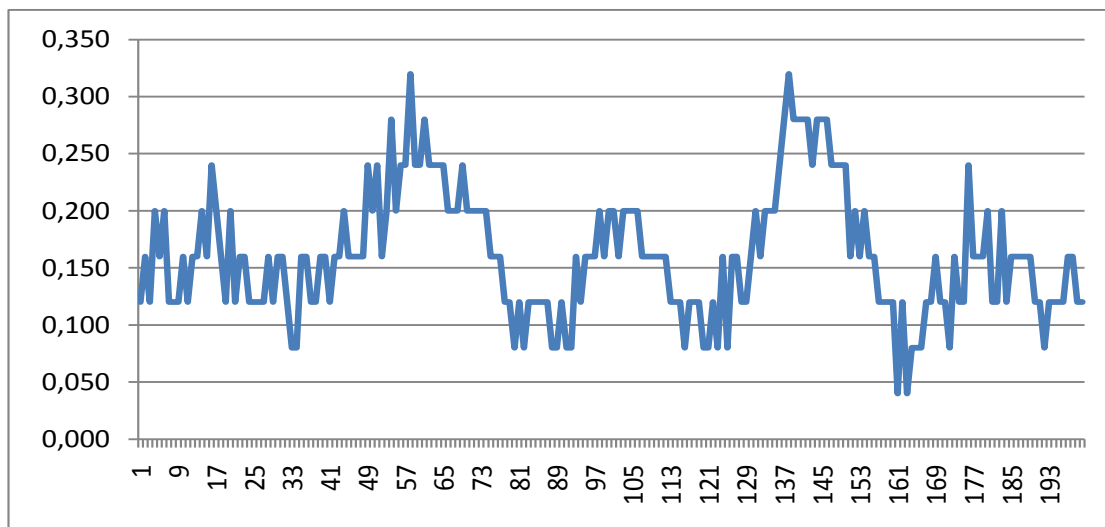


Figura 5.2.7 – Forma de Onda do Torque com a Máquina em vazio.

As figuras 5.2.8 a 5.2.14 apresentam os resultados com a máquina operando em carga.

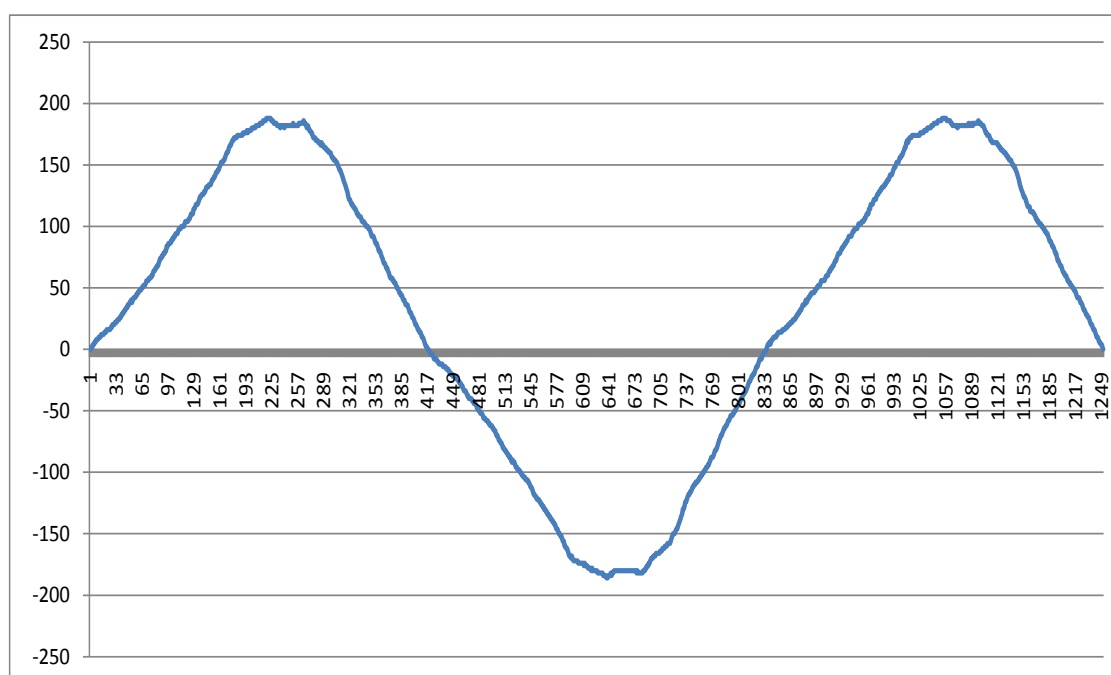


Figura 5.2.8 – Forma de Onda da Tensão do Estator com a Máquina em Carga.

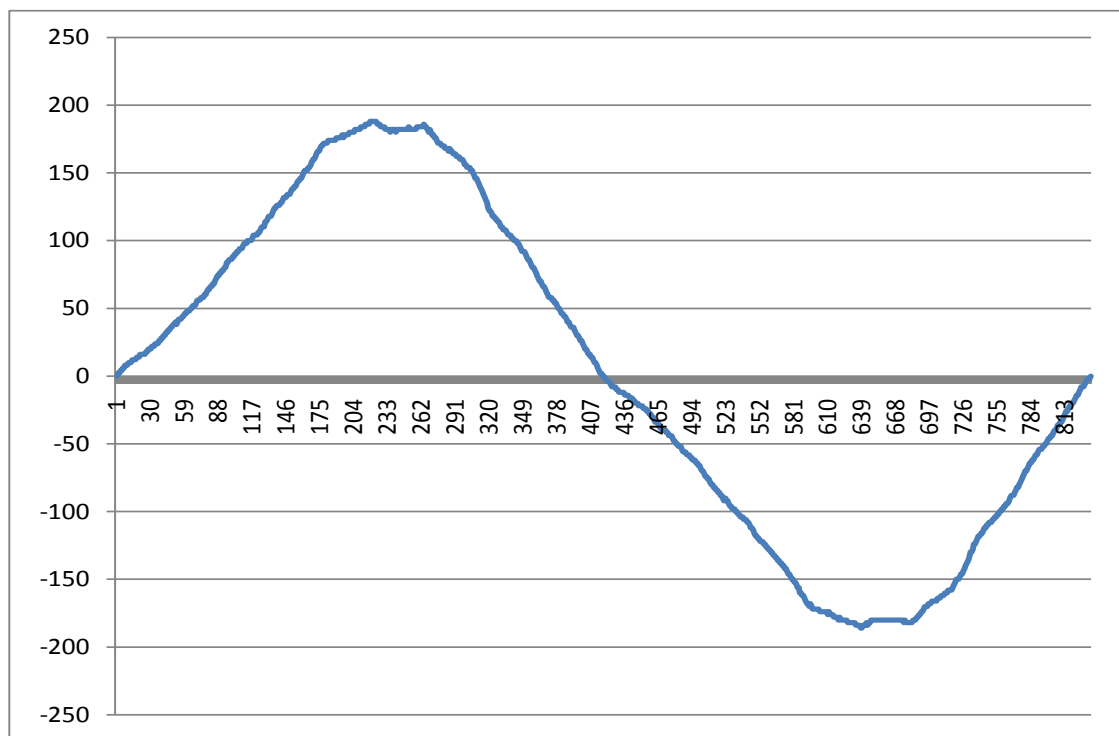


Figura 5.2.9 – Forma de Onda da Tensão do Estator com a Máquina em Carga - Zoom da figura 5.2.8.

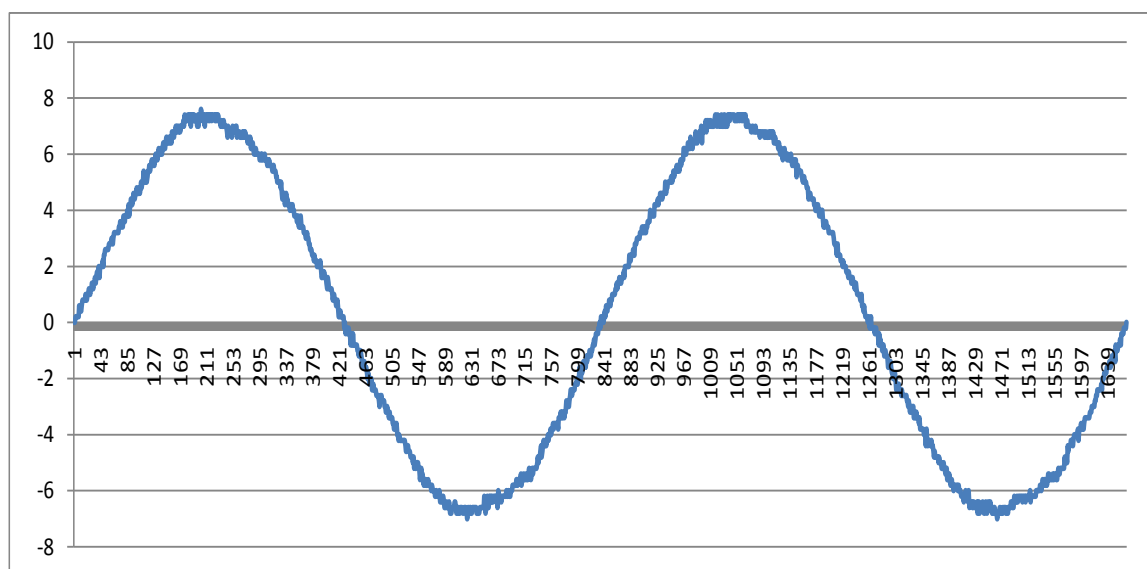


Figura 5.2.10 – Forma de Onda da Corrente do Estator com a Máquina em Carga.

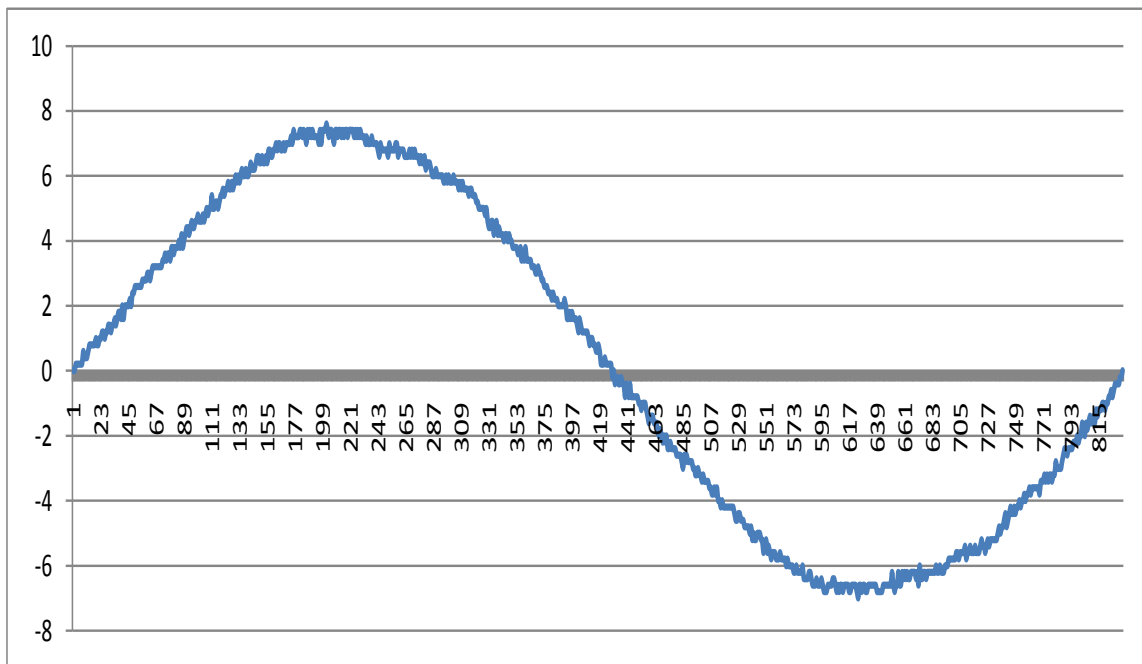


Figura 5.2.11 – Forma de Onda da Corrente do Estator com a Máquina em Carga. - Zoom da figura 5.2.10.

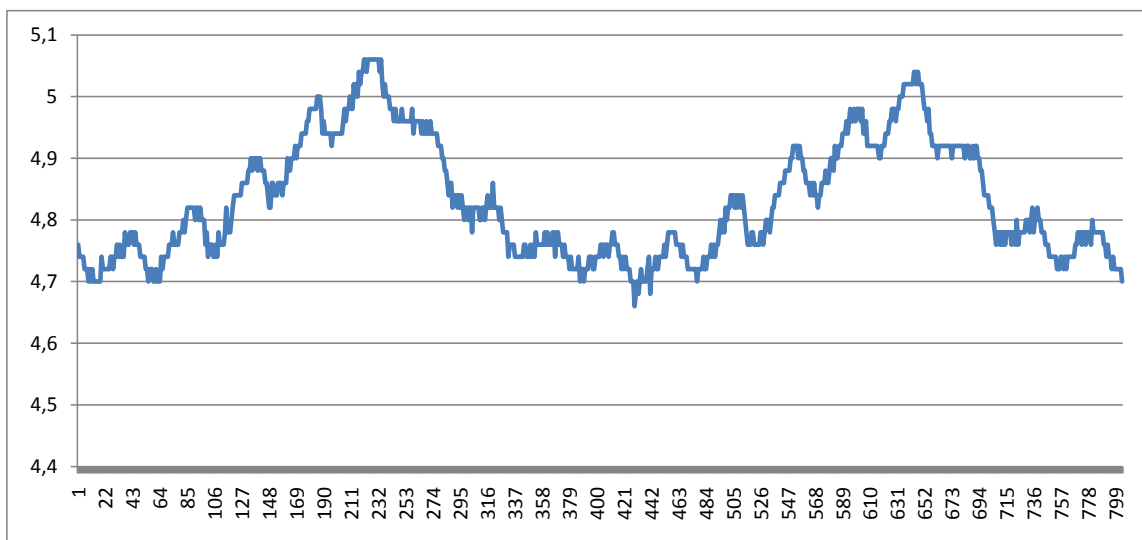


Figura 5.2.12 – Forma de Onda da Corrente de Excitação com a Máquina em Carga.

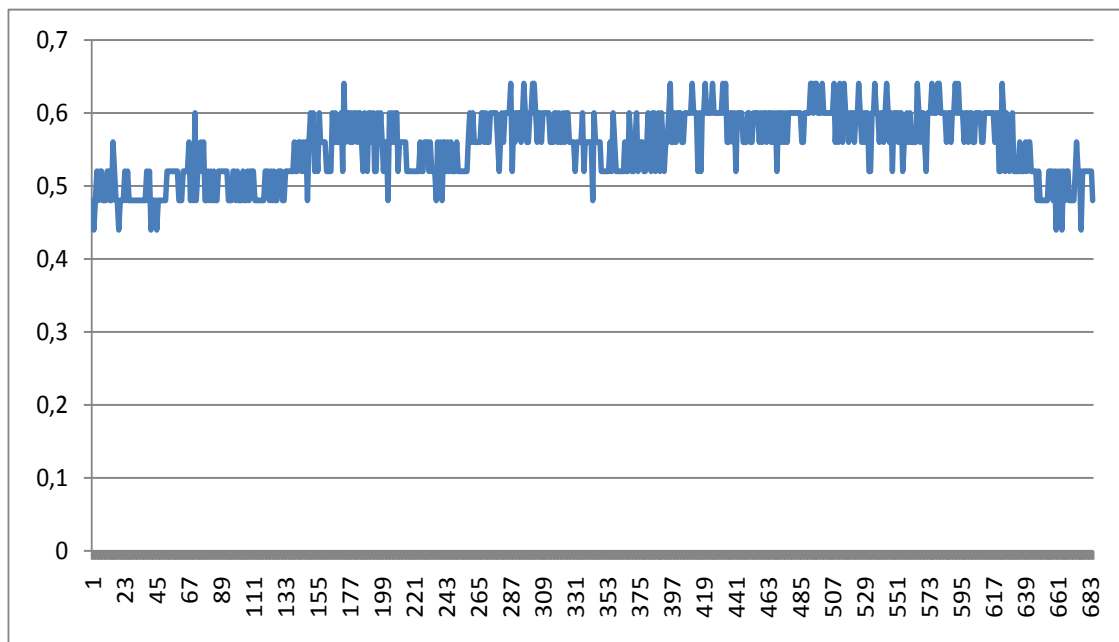


Figura 5.2.13 – Forma de Onda do Torque com a Máquina em Carga.

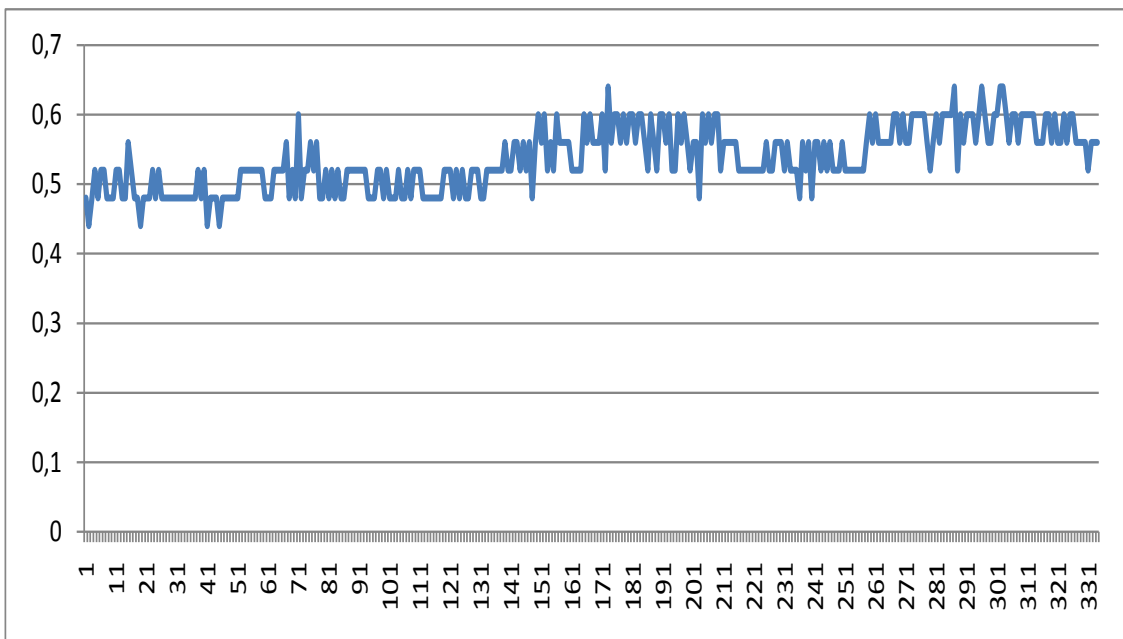


Figura 5.2.14 – Forma de Onda do Torque com a Máquina em Carga - Zoom da figura 5.2.13.

5.3 MEDIÇÕES EM CAMPO

As medições em campo foram executadas na unidade de geração, ilustrada na figura 5.3.1.

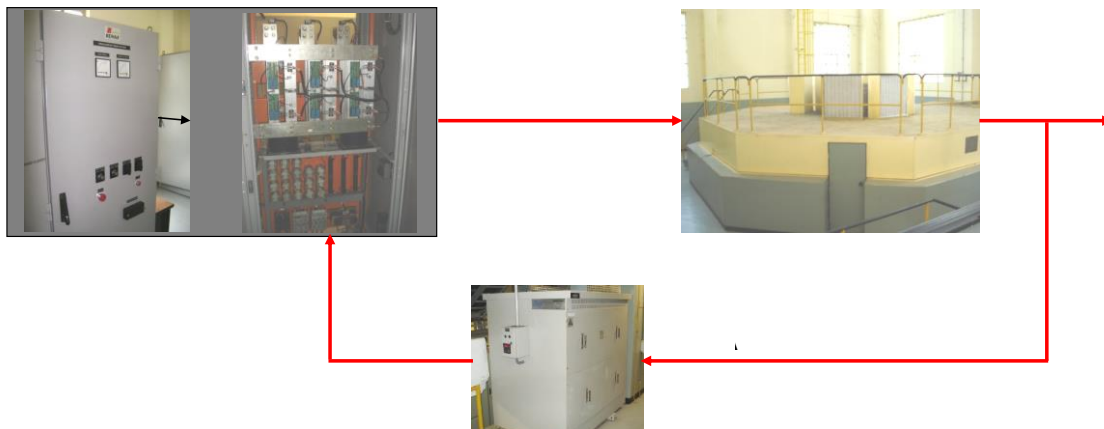


Figura 5.3.1 - Unidade de geração com eletrônica de excitação.

Inicialmente as medidas foram obtidas com o gerador não sincronizado ao sistema elétrico de potência e a figura 5.3.2 apresenta a tensão em vazio. O valor da “DHTv”, medido é de 5,05%, que pode ser considerado como alto. A maior contribuição deve-se ao 3º harmônico com 2,45%. Os valores de “DHIV” de 5º, 7º, 9º e 11º harmônicos, são: 1,42%; 1,29%; 1,36% e 1,11% respectivamente.

Como a máquina opera em vazio, as distorções ocorridas são provocadas pelo seu próprio sistema de excitação.

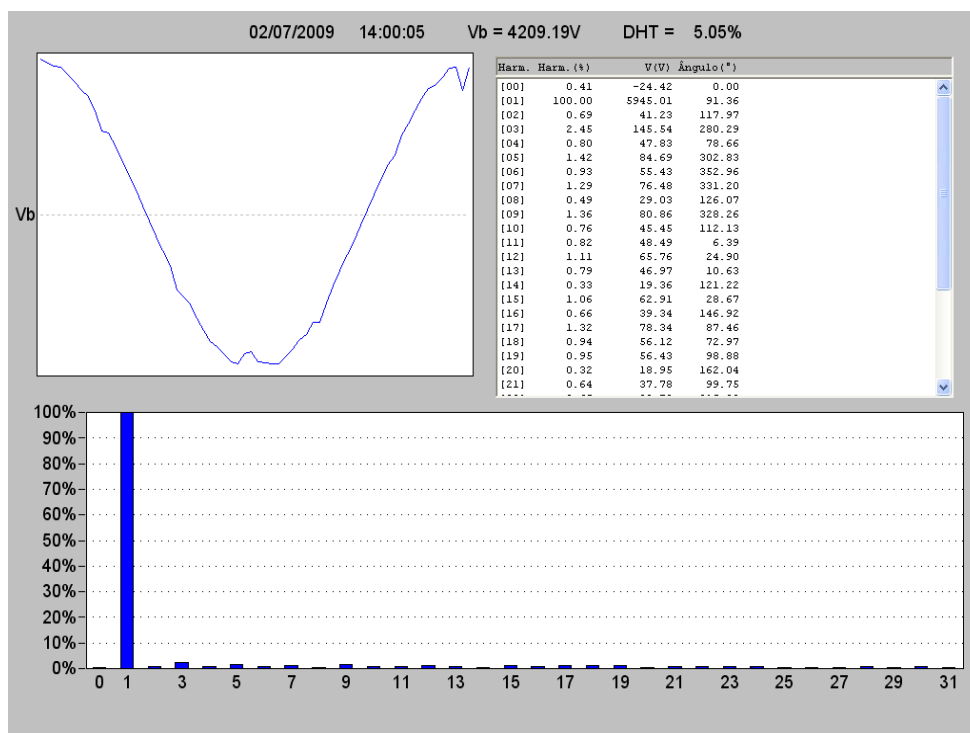


Figura 5.3. 2 – Gerador desconectado do sistema elétrico.

Na Figura 5.3.3 o sistema é o mesmo anterior, mas nesse instante o gerador está conectado ao sistema elétrico.

O valor do “DHTv” sofre uma grande elevação e atinge 14,29%.

Como o valor da “DHTv” se altera de forma bem expressiva, e como o sistema sem carga também apresenta valores significativos, deduz-se que o sistema alimentado possui distorções harmônicas que se combinam com a do sistema gerador/excitação.

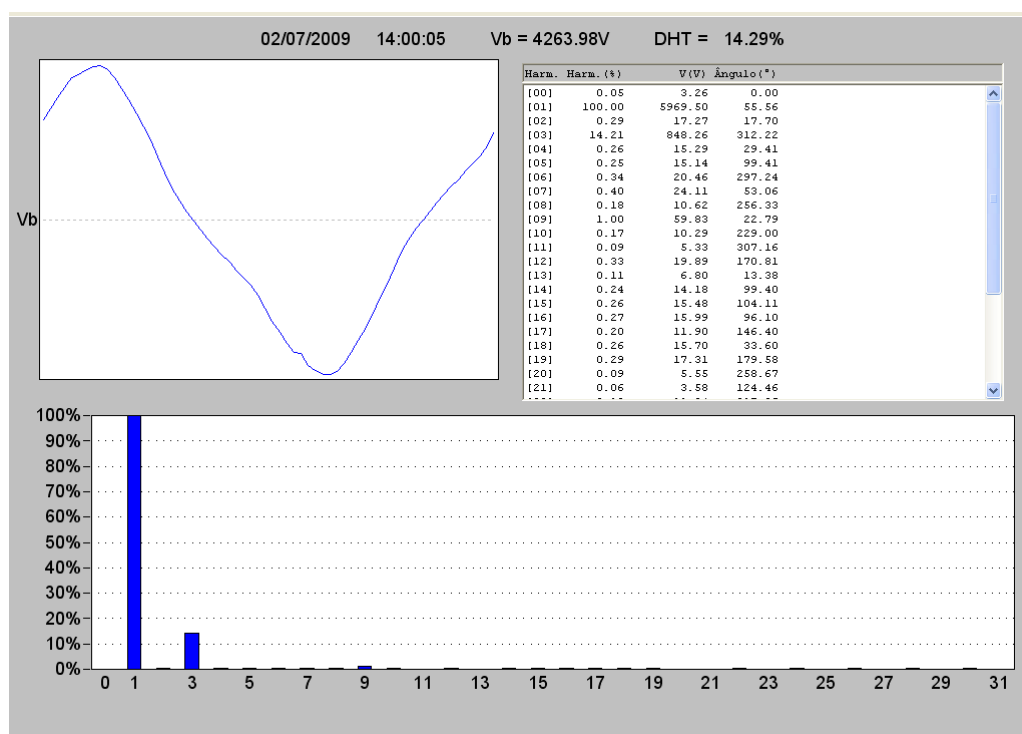


Figura 5.3.3 – Gerador conectado ao sistema elétrico.

5.4 CONCLUSÃO

Os resultados do ensaio em laboratório, apresentados nas figuras 5.2.9 a 5.2.11, evidenciam a conclusão teórica sobre a origem das oscilações de torque eletromagnético como sendo a interação magnética entre as distorções das correntes de estator e de rotor da máquina síncrona.

Os resultados das medições em campo mostram o efeito da excitação eletrônica na tensão do gerador, algo também observado na teoria. Para o gerador

em vazio pode-se comparar os índices harmônicos das figuras 4.3.13 e 5.3.2, verificando uma coerência com os harmônicos de ordem 5, 7 e 11.

Não é possível comparar os resultados referentes aos harmônicos 3a, 9a, 15a, e 21a, pois estes são produzidos pelo fenômeno de saturação magnética, que evidentemente aparece nos resultados das medições em campo, mas não aparece na modelagem matemática simulada.

Para o gerador em carga a comparação entre resultados de campo e simulados ficou prejudicada, pois não se tem informações suficientes para avaliar o nível de não linearidade no gerador submetido as medições em campo.

6.1 INTRODUÇÃO

Verificando o aumento das perdas na máquina síncrona operando em regime não senoidal, conduz-se a seguinte conclusão. As perdas no cobre e no ferro são previsíveis e precisas nos seus cálculos, como verificado no capítulo dois.

Nas perdas no cobre, verificou-se no dimensionamento dos condutores da armadura a possibilidade de atenuar o aumento através da diminuição da resistência estatórica, pois o valor a ser diminuído é bem pequeno e, portanto razoável.

As perdas no ferro não são preocupantes, pois o controle exigido por norma mantém o "THD" de tensão em valores baixos.

Para as perdas mecânicas, que tradicionalmente são traduzidas nos atritos e ventilação, estas não são preocupantes, pois as altas frequências da oscilação do torque eletromagnético, 6º harmônicos e seus múltiplos, aliado ao grande momento de inércia não proporcionam variações consideráveis na rotação da máquina. A exceção talvez seja feita para algumas máquinas, por exemplo, os "turbo-geradores", onde o momento da inércia é menor. Se de um lado, em geral as perdas por atrito e ventilação não são preocupantes, as oscilações de conjugado podem gerar perdas internas ao longo de todo o acoplamento mecânico, vibrações internas nos rotores e eixos "turbina-gerador", não perceptíveis como as tradicionais, e outras formas de atuação que comprometem a vida útil da máquina, ou então, com o tempo de funcionamento provocar rompimentos de partes mecânicas do rotor.

Por estes motivos justificam-se estudos que possibilitam atenuar as oscilações do torque eletromagnético.

Este capítulo mostra, teoricamente, uma possibilidade de se promover a referida atenuação, sem a diminuição dos conteúdos harmônicos de corrente de

armadura, ou seja, sem interferir na ligação elétrica do gerador ao sistema elétrico de potência.

6.2 ATENUAÇÃO

A possibilidade de atenuação se refere à utilização de uma fonte de tensão variável em série com a fonte que fornece a corrente de excitação.

Utilizou-se o programa computacional "MatLab" com extensão em ponto "m" apresentado no capítulo "IV", onde a tensão de alimentação do campo " V_F " da máquina síncrona é de 14V contínuo. Em série com esta fonte acrescentou-se uma fonte variável " V_v ", tal que a fonte de alimentação do campo se torna (6.1).

$$V_F = 14 + V_v \quad (6.1)$$

Após vários testes com diversas funções, o valor indicado em (6.2) foi aquele que resultou em uma significativa atenuação nas oscilações do torque eletromagnético.

$$V_v = -3000 \cdot \text{sen}(6 \cdot \omega \cdot t + 1,52) \quad (6.2)$$

Onde:

$$\omega = 2\pi 60$$

Desta forma, de (6.1) e (6.2) tem-se (6.3).

$$V_F = 14 - 3000 \cdot \text{sen}(6 \cdot \omega \cdot t + 1,52) \quad (6.3)$$

A título de futura comparação, são apresentadas nas figuras com os resultados de torque eletromagnético, corrente de excitação, tensão e corrente por fase de estator, para expressões de V_f .

Nas figuras 6.2.1 a 6.2.6 estão apresentadas as formas de ondas do torque eletromecânico, correntes de estator e de campo, para $V_f = 14V$.

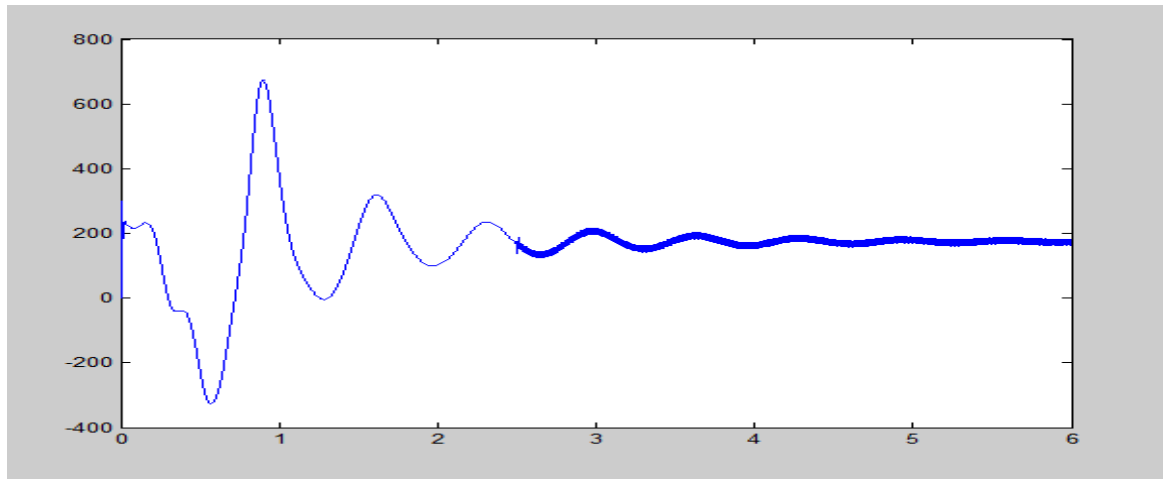


Figura 6.2.1 - Forma de onda do Torque Eletromagnético para $V_f = 14V$.

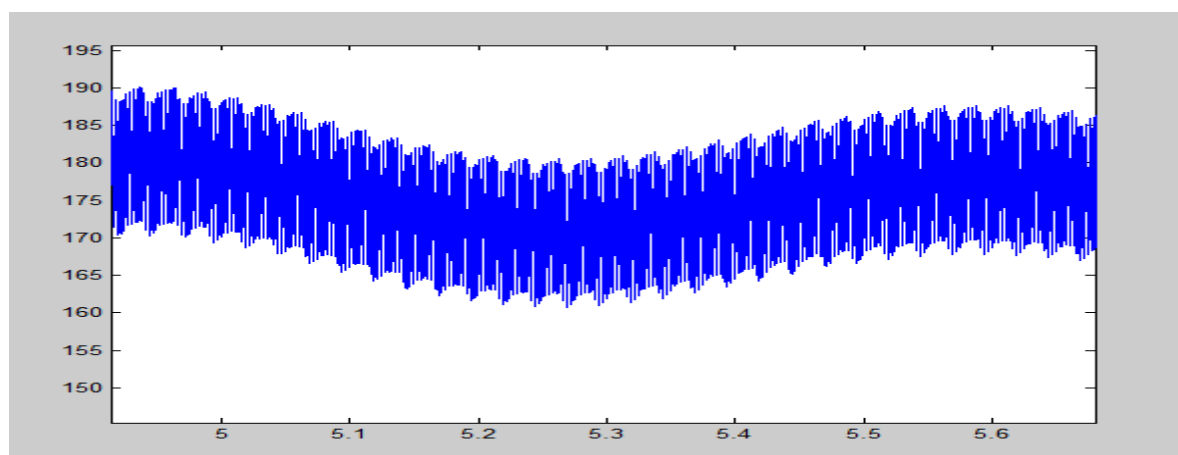


Figura 6.2.2 - Forma de onda do Torque Eletromagnético $V_f = 14V$ - Zoom da figura 6.2.1 de 4,5 a 5,7 segundos.

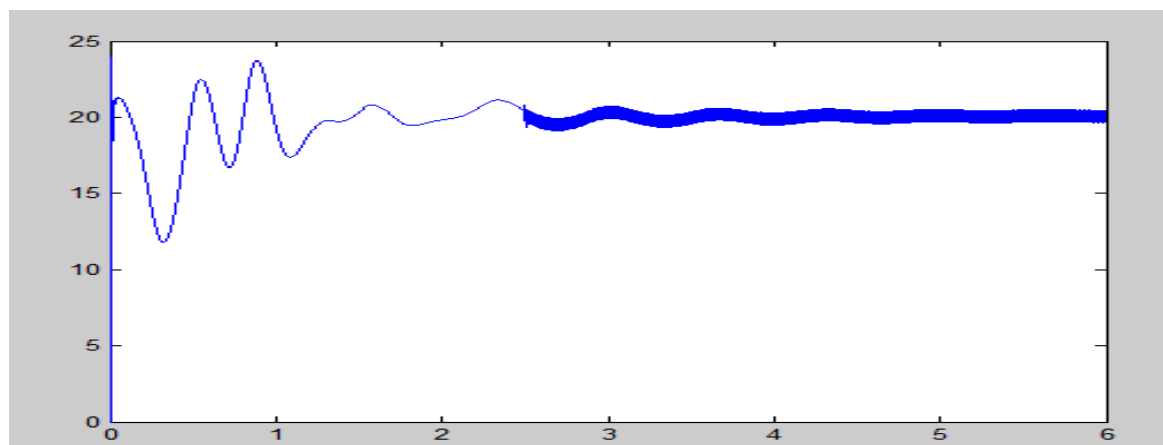


Figura 6.2.3 - Forma de onda da Corrente de Excitação $V_f = 14V$.

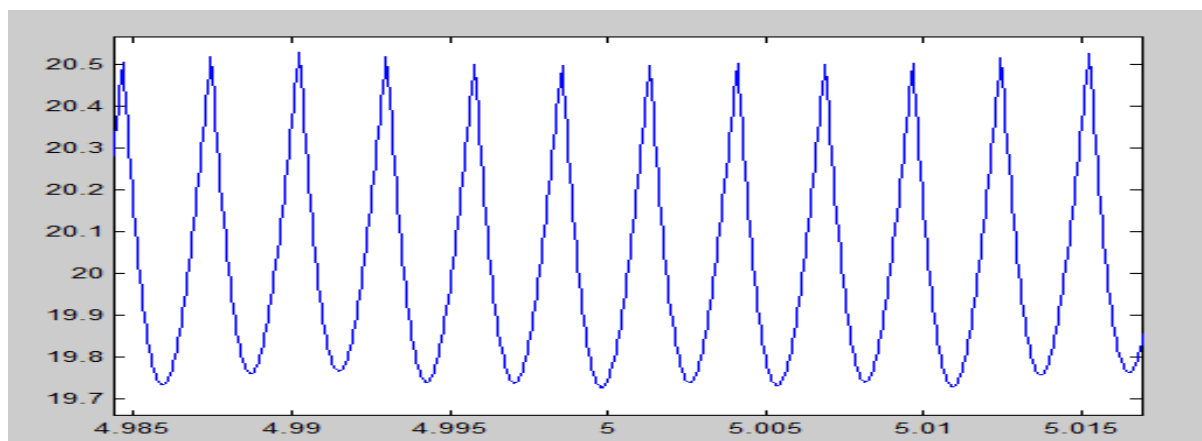


Figura 6.2.4 - Forma de onda da Corrente de Excitação $V_f = 14V$ - Zoom da figura 6.2.3 de 4,9 a 5,015 segundos.

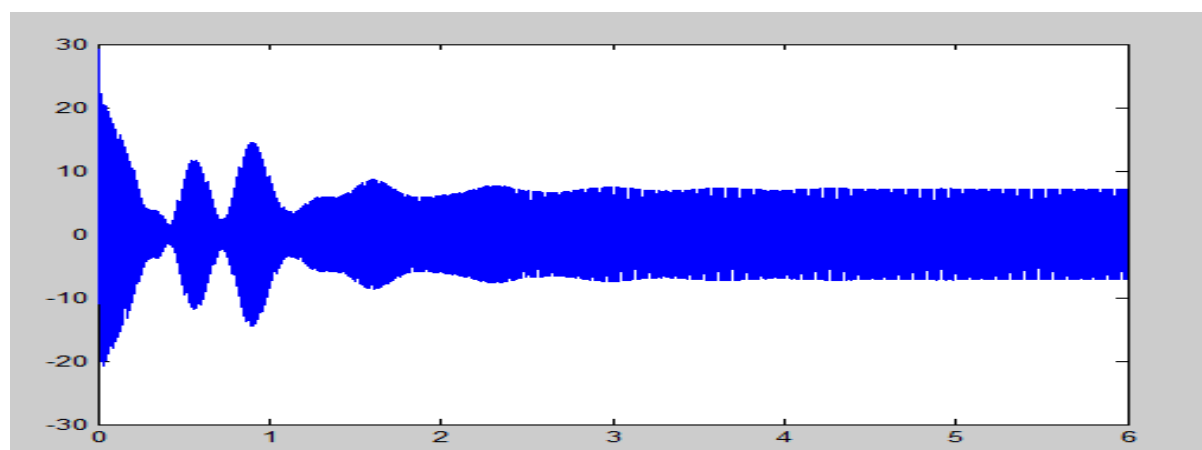


Figura 6.2.5 - Forma de onda da Corrente do Estator $V_f = 14V$.

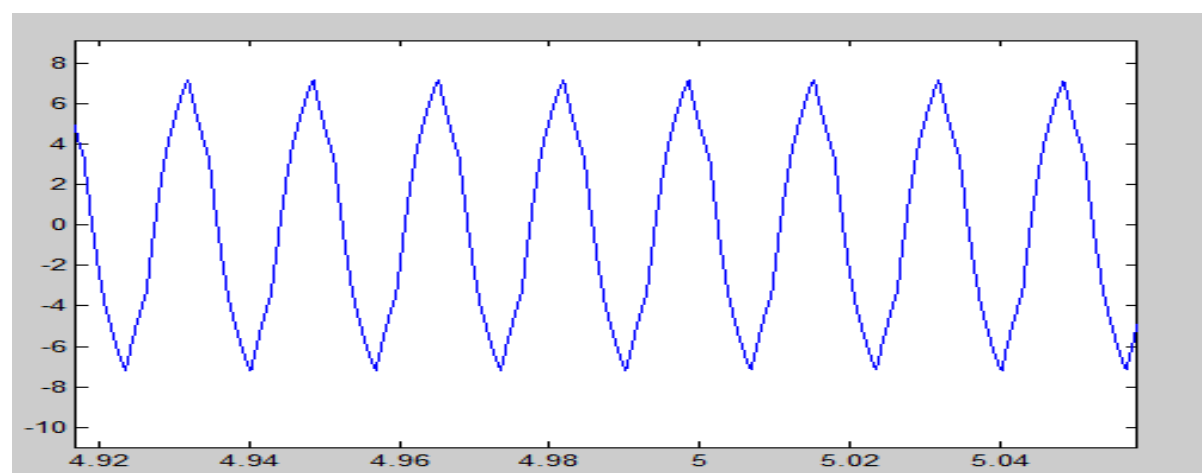


Figura 6.2.6 - Forma de onda da Corrente do Estator $V_f = 14V$ - Zoom da figura 6.2.5 de 4,9 a 5,06 segundos.

Nas figuras 6.2.7 a 6.2.12 estão apresentadas as formas de ondas do torque eletromecânico, correntes do estator, e de campo, para $V_f = (14 - 600.\text{sen}(6\omega t + 1,2))$.

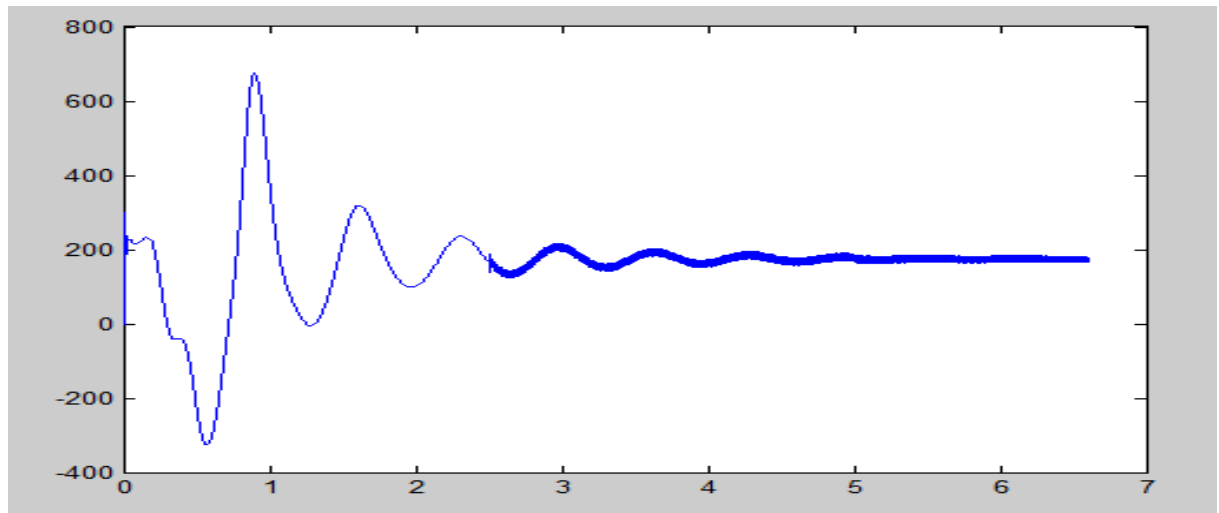


Figura 6.2.7 - Forma de onda do Torque Eletromagnético
 $V_f = (14 - 600.\text{sen}(6\omega t + 1,2))$.

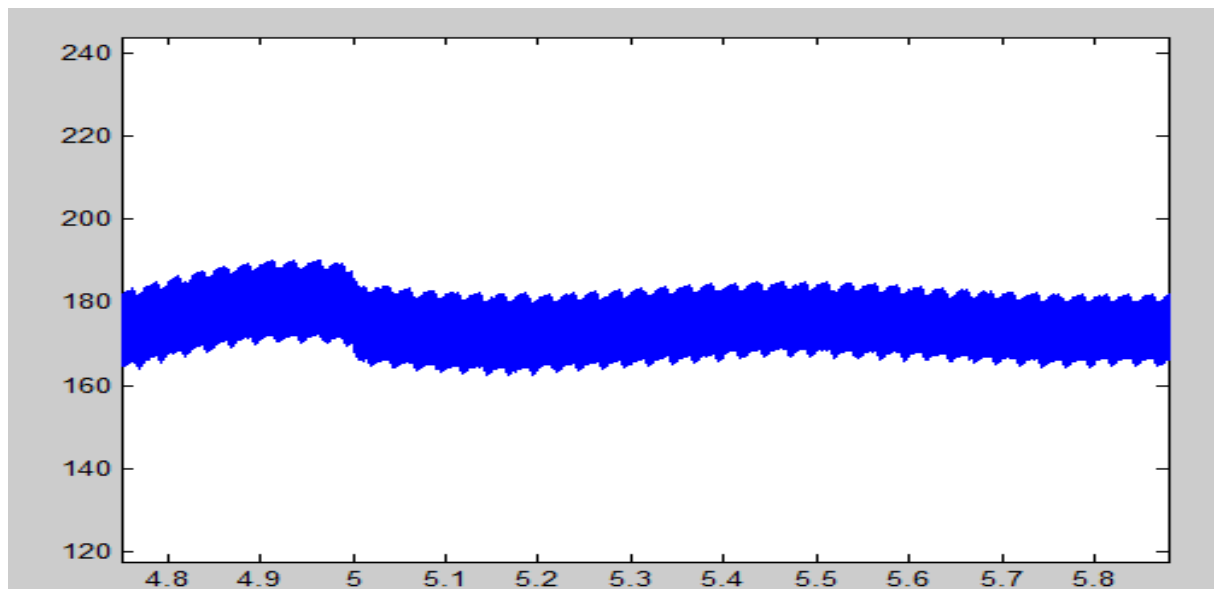


Figura 6.2.8 - Forma de onda do Torque Eletromagnético $V_f = (14 - 600.\text{sen}(6\omega t + 1,2))$
- Zoom da figura 6.2.7 de 4,7 a 5,9 segundos.

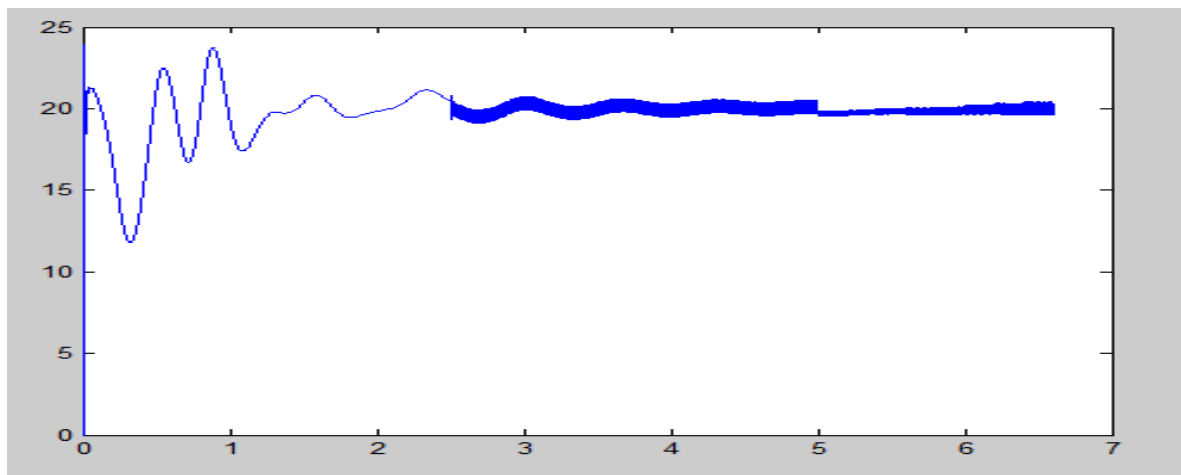


Figura 6.2.9 - Forma de onda da Corrente de Excitação
 $V_f = (14 - 600.\text{sen}(6\omega t + 1,2))$.

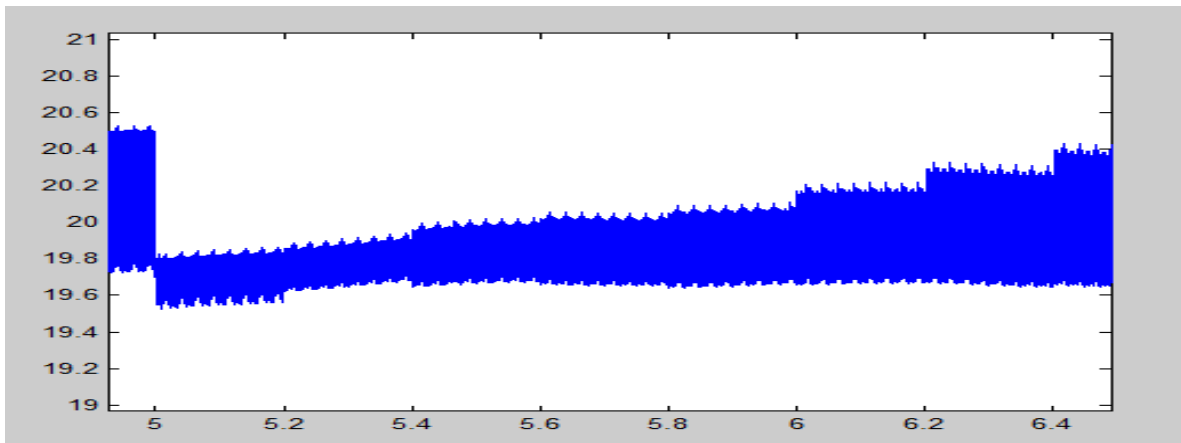


Figura 6.2.10 - Forma de onda da Corrente de Excitação
 $V_f = (14 - 600.\text{sen}(6\omega t + 1,2))$ - Zoom da figura 6.2.9 de 4,9 a 6,5 segundos.

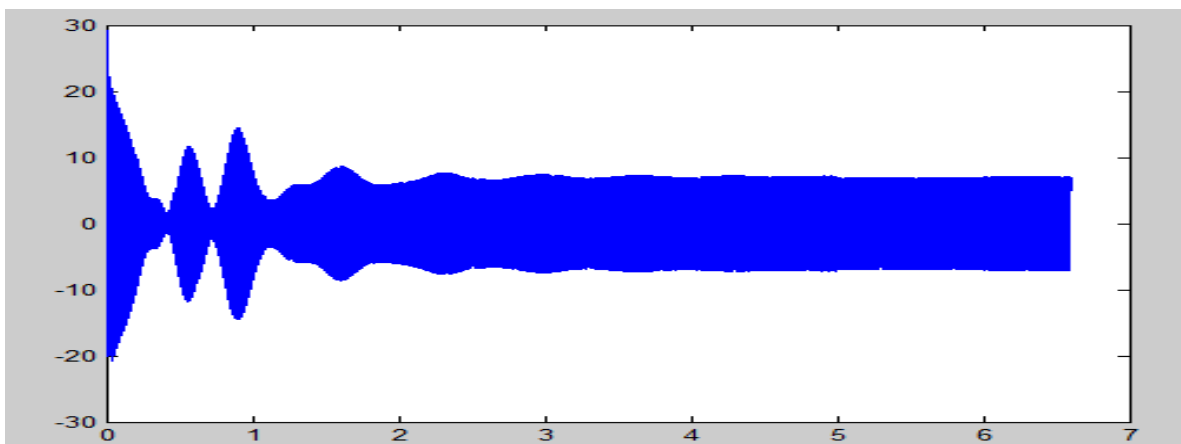


Figura 6.2.11 - Forma de onda da Corrente do Estator
 $V_f = (14 - 600.\text{sen}(6\omega t + 1,2))$.

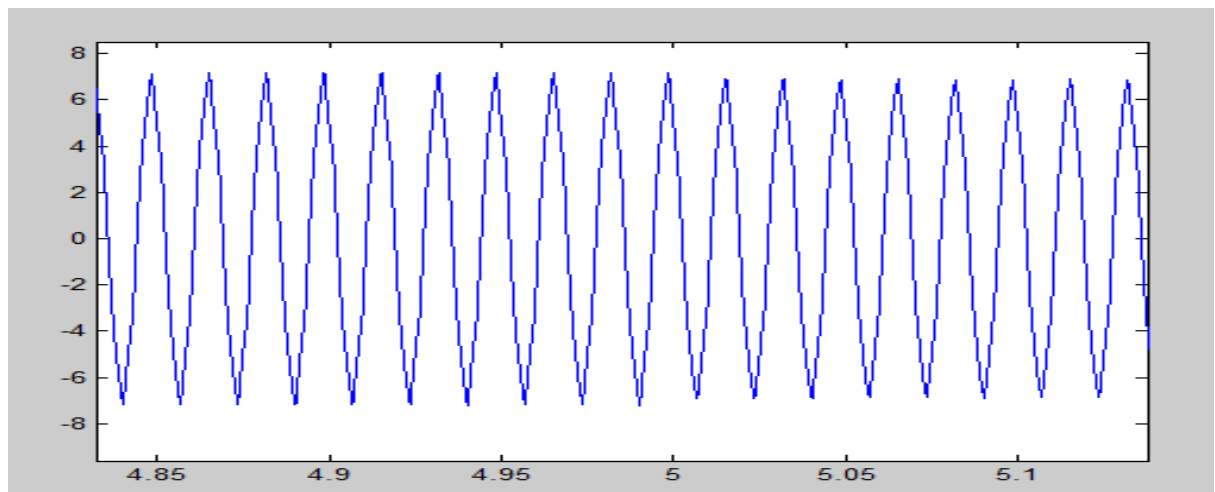


Figura 6.2.12 - Forma de onda da Corrente do Estator $V_f = (14 - 600.\text{sen}(6\omega t + 1,2))$ - Zoom da figura 6.2.11 de 4,84 a 5,3 segundos.

Nas figuras 6.2.13 a 6.2.19 estão apresentadas as formas de ondas do torque eletromecânico, correntes de estator, e de campo para $V_f = (14 - 3000.\text{sen}(6\omega t + 1,52))$.

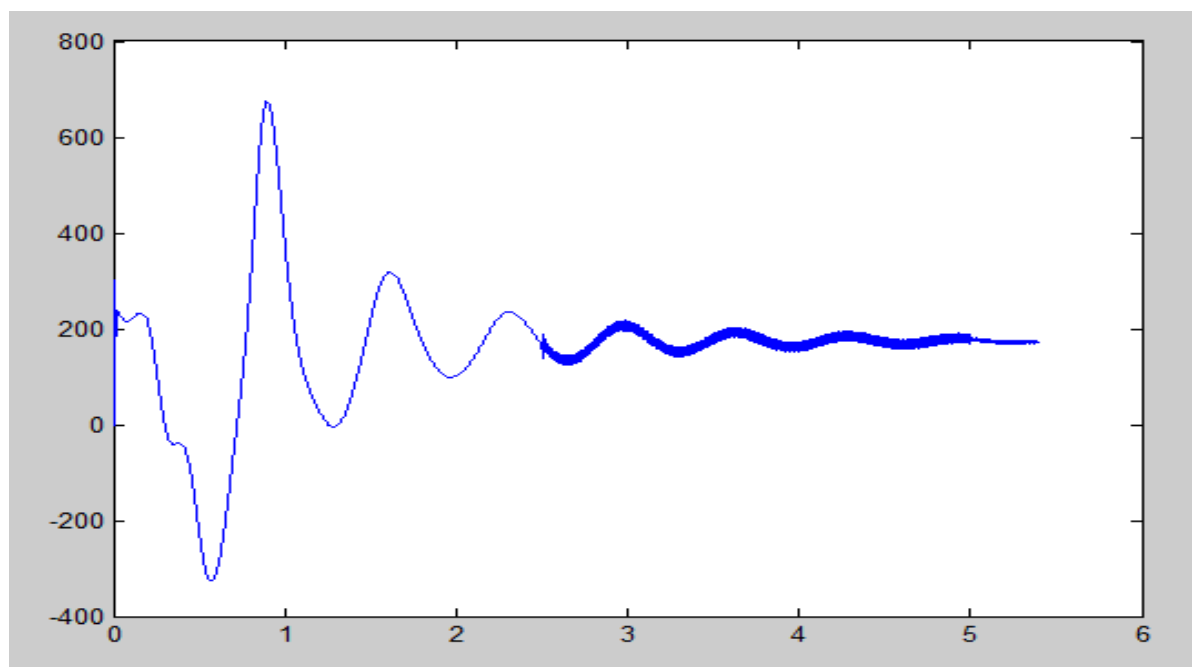


Figura 6.2.13 - Forma de onda do Torque Eletromagnético $V_f = (14 - 3000.\text{sen}(6\omega t + 1,52))$.

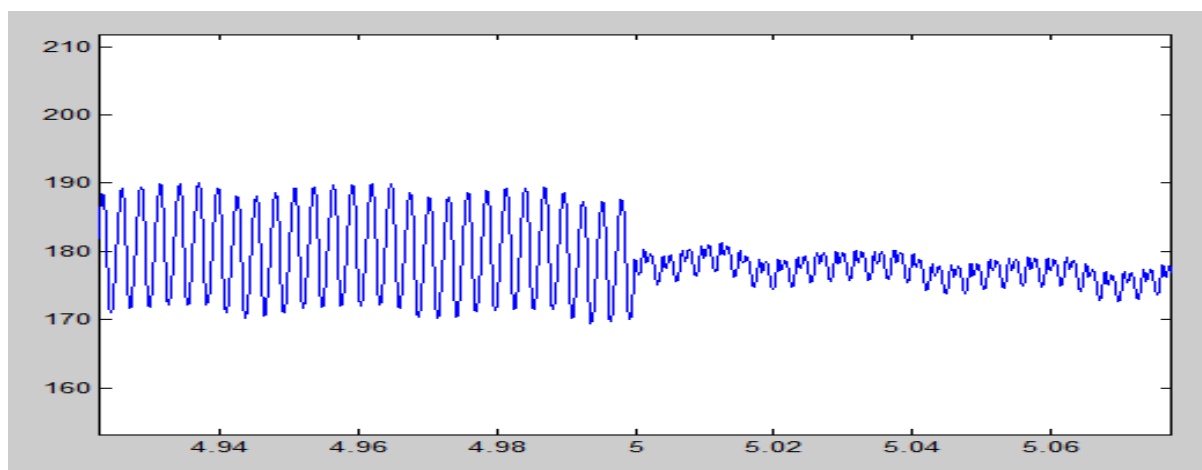


Figura 6.2.14 - Forma de onda do Torque Eletromagnético -
 $V_f = (14 - 3000 \cdot \text{sen}(6\omega t + 1,52))$ - Zoom da figura 6.2.13 de 4,93 a 5,07 segundos.

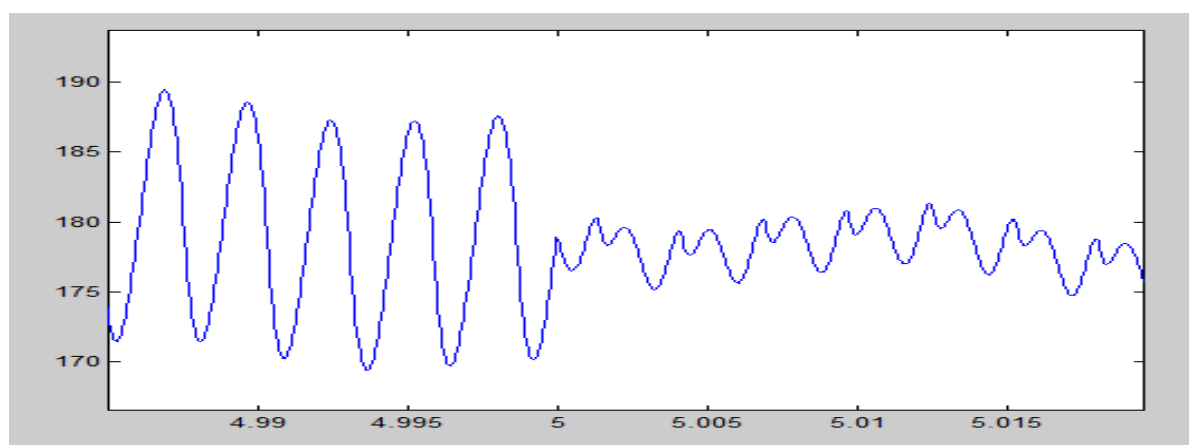


Figura 6.2.15 - Forma de onda do Torque Eletromagnético
 $V_f = (14 - 3000 \cdot \text{sen}(6\omega t + 1,52))$ - Zoom da figura 6.2.14 de 4,98 a 5,017 segundos.

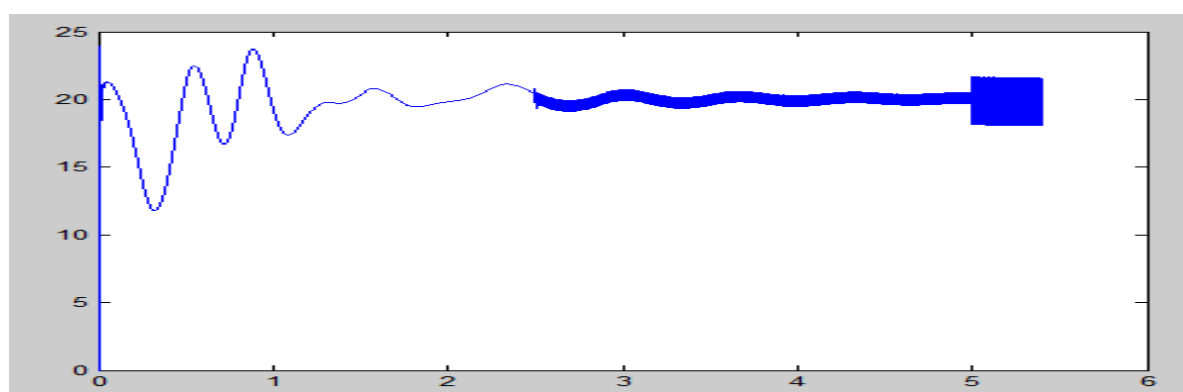


Figura 6.2.16 - Forma de onda da Corrente de Excitação
 $V_f = (14 - 3000 \cdot \text{sen}(6\omega t + 1,52))$.

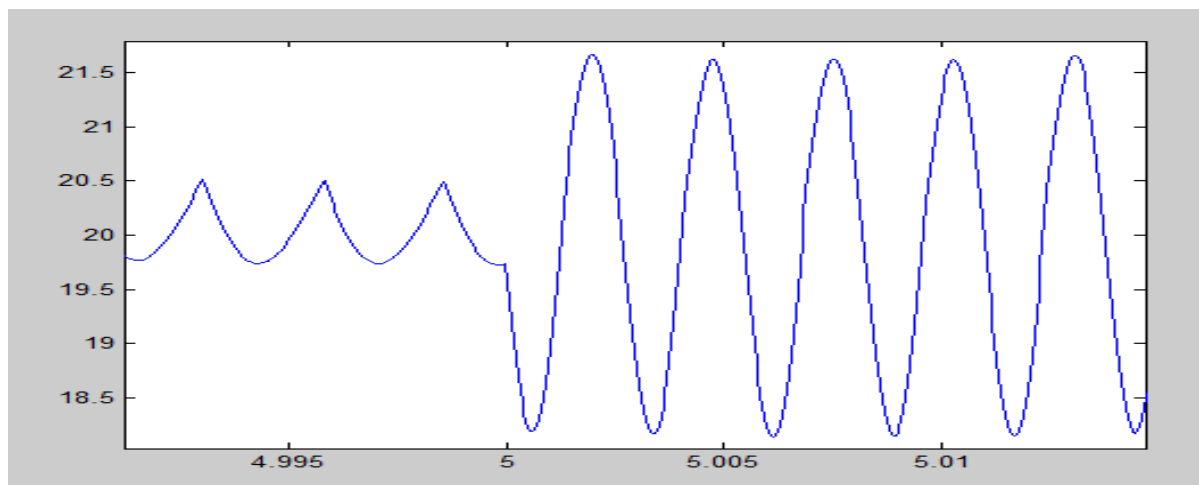


Figura 6.2.17 - Forma de onda da Corrente de Excitação -
 $V_f = (14 - 3000.\text{sen}(6\omega t + 1,52))$ - Zoom da figura 6.2.16 de 4,8 a 5,02 segundos.

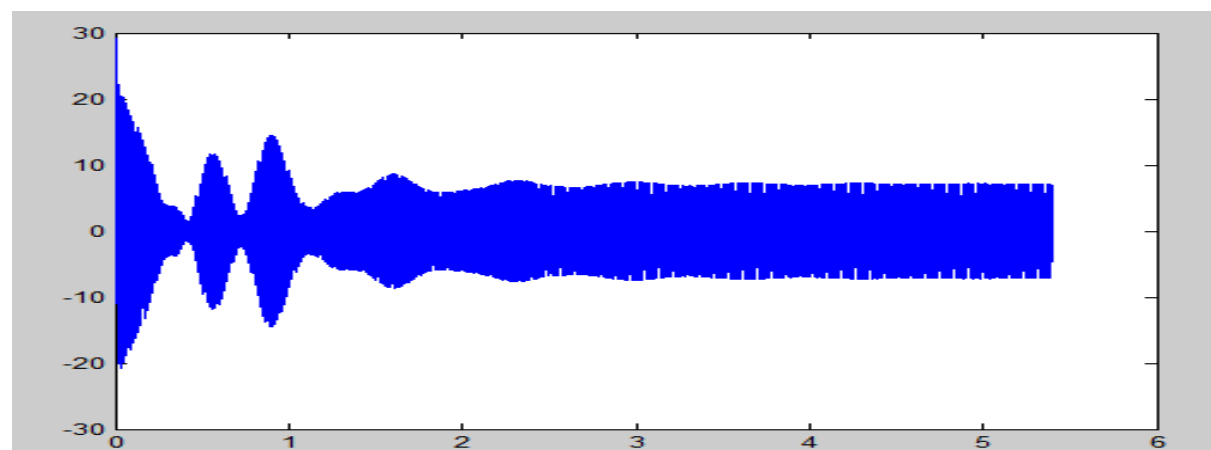


Figura 6.2.18 - Forma de onda da Corrente do Estator -
 $V_f = (14 - 3000.\text{sen}(6\omega t + 1,52))$.

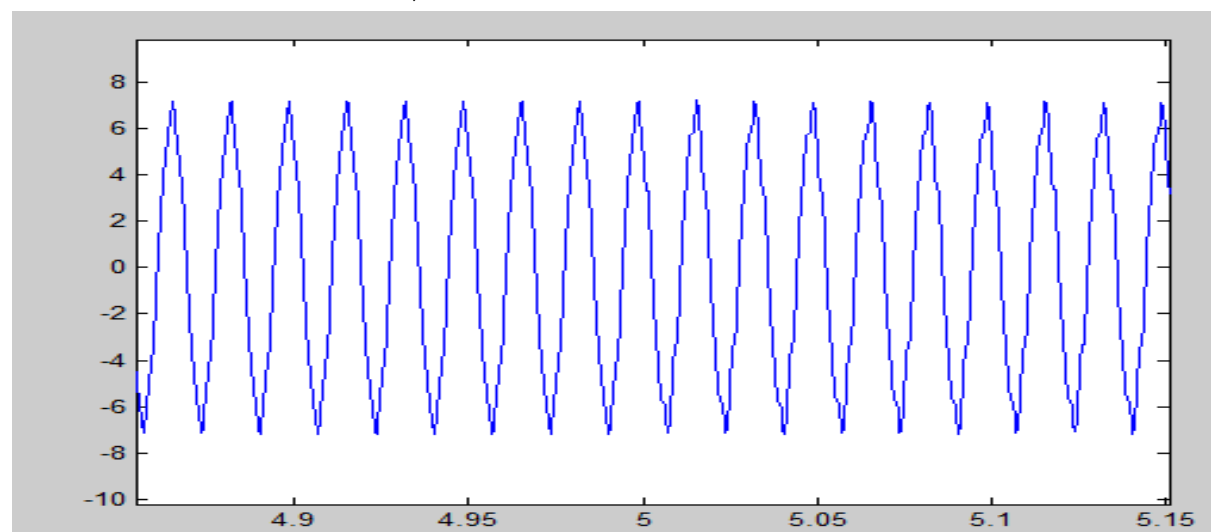


Figura 6.2.19 - Forma de onda da Corrente do Estator -
 $V_f = (14 - 3000.\text{sen}(6\omega t + 1,52))$ - Zoom da figura 6.2.18 de 4,80 a 5,15 segundos.

Comparando os resultados obtidos nas simulações de diversas expressões para V_f , verifica-se uma sensível atenuação da oscilação de torque eletromagnético para o caso de V_f dado pela expressão (6.3) que por comodidade é transcrita em (6.4).

$$V_f = (14 - 3000.\text{sen}(6\omega t + 1,52)) \quad (6.4)$$

As figuras 6.2.14 e 6.2.15 apresentam bem a atenuação da oscilação de torque eletromagnético quando se altera V_f de 14V para a expressão (6.4), onde isto ocorre no instante 5 segundos.

As figuras 6.2.16 e 6.2.17 ilustram a modificação na corrente de excitação, exatamente no instante 5 segundos.

As figuras 6.2.18 e 6.2.19 mostram que a corrente de estator não sofreu alteração, como pode ser observado na figura 6.2.19 antes e depois do instante 5 segundos.

6.3 Conclusão

Este capítulo mostra teoricamente a possibilidade de se atenuar as oscilações de torque eletromagnético, sem provocar alterações nos terminais de potência do gerador síncrono.

A solução encontrada é superpor à tensão contínua que alimenta o campo do gerador, uma tensão alternada de 6º harmônico, cujos valores máximos e fase são previamente obtidos teoricamente através da modelagem matemática do gerador.

Neste trabalho, propõe-se a solução baseando-se no modelo teórico do gerador. Ficando para futuramente a proposição da implantação prática.

7.1 CONCLUSÃO

A principal motivação para a realização desse trabalho baseou-se no fato de se verificar a necessidade de aumentar a vazão da água em certas usinas elétricas, ao longo dos últimos anos, gerando praticamente a mesma energia elétrica. Em uma análise mais cuidadosa observam-se que as certas usinas verificadas estão localizadas em regiões onde houve um aumento considerável de cargas não lineares em pelo menos nos últimos dez anos. Assim, pode-se concluir que cientificamente este fato se traduz em um aumento nas perdas do sistema de geração como um todo. A identificação desse aumento em cada tipo de perda é extremamente importante para o entendimento físico deste fato, dos problemas advindos, e das possíveis proposições de solução.

Este trabalho se desenvolveu nesta direção, adotando-se a estratégia de modelar matematicamente o gerador síncrono de polos salientes dando ênfase especial ao regime permanente não senoidal caracterizado pelas cargas não lineares, as responsáveis por toda a problemática até aqui apresentada.

É importante observar que a extensão deste problema é de tal dimensão que não se resolve em único trabalho.

A modelagem matemática foi desenvolvida e simulada digitalmente através da teoria dos grafos, exatamente para que não houvesse nenhuma particularidade imposta por quaisquer programas computacional específico. A simulação em "SIMULINK", que é um programa computacional específico, foi realizada apenas para se ter resultado do gerador do ponto de vista do sistema.

O ponto importante e conclusivo deste trabalho foi o fato dos resultados experimentais, principalmente os de laboratório, mostrarem o mesmo comportamento do gerador, com carga não linear, apresentando nos resultados da simulação digital da modelagem matemática desenvolvida.

Outros resultados consequentes do desenvolvimento do trabalho merecem destaque nas conclusões finais. O levantamento de possíveis problemas advindos da quantificação acima do aceitável para as oscilações de torque eletromagnético e a apresentação de uma proposta, ainda que na estagio teórico, para atenuar tais oscilações. A possibilidade de dimensionar os condutores que compõem o enrolamento de estator do gerador, atenuando o aumento das perdas no cobre em função da circulação das correntes não senoidais.

Por fim, uma conclusão do ponto de vista filosófico pode ser constatada como resultante deste trabalho. Tradicionalmente as componentes harmônicas são tratadas com algo indesejável, na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Este trabalho mostra a possibilidade de se conviver com os harmônicos, buscando a solução dos problemas gerados pelas mesmas de uma forma não tradicional. O exemplo vem da atenuação das oscilações de torque eletromagnético.

Em primeiro lugar, caracteriza-se bem o problema, no caso a oscilação demasiada do torque eletromagnético. Em seguida busca-se uma solução do problema sem o tradicional uso de filtros. Neste exemplo a solução vem exatamente no sentido oposto ao funcionamento dos filtros. Procura-se uma forma de onda adequada para corrente de excitação, tal que, interagindo magneticamente com as correntes não senoidais do estator, resulte em uma atenuação das oscilações do torque eletromagnético. Exatamente o procedimento efetuado no capítulo VI.

Esta forma de resolver o problema, se generalizada, passa a ser uma filosofia diferente da tradicional, e talvez venha a ser futuramente mais eficiente. Esta filosofia admite o sistema elétrico de potência conviver normalmente com o regime permanente não senoidal, pois não se pode negar que este regime, proveniente das cargas não lineares controladas eletricamente, vieram para melhorar substancialmente, e em todos os sentidos, a utilização da energia elétrica, contribuindo decisivamente para a conservação de energia.

Um outro exemplo compatível com esta filosofia, e que mostra bem a possibilidade de sua generalização, diz respeito ao efeito muito comum no regime não senoidal, dos harmônicos de corrente contribuírem para o aumento dos

harmônicos de tensão. Isto é comum ocorrer nas quedas de tensão nos alimentadores que em baixa tensão são resistivos, e, portanto proporcionais as correntes não senoidais. Por ocasião do projeto dos alimentadores pode-se utilizar como critério de dimensionamento a minimização das referidas quedas de tensão. Este é um procedimento que tem como filosofia a convivência com os harmônicos.

7.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

- Desenvolvimento de uma eletrônica, capaz de executar o chaveamento para atender a nova forma de onda da tensão de alimentação de campo;
- Aprofundamento no estudo das perdas relacionadas com as oscilações de torque eletromagnético;
- Utilização dos resultados que podem ser obtidos na modelagem matemática, proposta para calcular as perdas no cobre, no ferro, e mecânicas, com precisões maiores que as atuais;
- Maior precisão em relação a atual, na estimativa de vida útil do gerador utilizando resultados a serem obtidos nas pesquisas relacionadas com a sugestão anterior.

REFERÊNCIAS E BIBLIOGRÁFIAS CONSULTADAS

REFERENCIAS

- [01] **"Power Engineering Summer Metting"** 1999 IEEE: IEEE Power Engineering Society, Sponsor (Power Engineering Society Summer Metting 1999); IEEE Power Engineering Society - Norma;
- [02] **"Recommended practice for Monitoring Eletric Power Qualit"**; IEEE Power Engineering Society - IEEE, NY, March. 1992 - Norma;
- [3] ANSI/TEEE C57.110/D7, **"Recommended Practice for Establishing Transformer Capability, when Supplying Non-sinusoidal Load Currents"**, IEEE, NY, febr. 1998 - Norma;
- [4] ANSI/TEEE C57.110/D7, **"Recommended Practice for Establishing Transformer Capability, when Supplying Non-sinusoidal Load Currents"**, IEEE, NY, febr. 1998 - Norma;
- [5] Emanuel A. E., S.N. Makarov, **"Corrected Harmonic Loss Factor for Transformers Supplying Nonsinusoidal Load Currents"**, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, MA 01609, USA, 2000/IEEE - Artigo;
- [6] Bishop, M. T.; Gilker, C. - **"Portable harmonics meter evaluates transformer heating"** Computer Applications in Power System, pp. 41-44, October 1992 - Artigo;
- [7] IEEE – std – 519-1992 – **"Recommended Practices and Requirements For Harmonic Control in Electrical Power Systems"**, 1992/IEEE -Norma;
- [8] Ladjavardi, M.; Masoum, M.A.S.; Islam, S.M. – **"Impact of Time and Space Harmonic on Synchronous Generator Load Angle"** – IEEE, PESC, 2006 - Artigo;

-
- [9] Dinh, N. Q.; Arrilaga, J. – **“A Saliente – Pole Generator Model for Harmonic Analysis”** - IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 16, No 4, nov. 2001 - Artigo;
- [10] Steinbuch, M; Bosgra, O. H. – **“Dynamic Modeling of a Generator /Rectifier System”** – IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 7, N°1, jan. 1992 - Artigo;
- [11] Jadric, I. ; Borojevic, D. ; Jadric, M. – **“A Simplified Model of a Variable Speed Synchronous Generator Loaded with Diode Rectifier”** - IEEE Transaction on Power Electronics, 1997- Artigo;
- [12] Rocco A. – **“Máquinas Síncronas e Cargas não Lineares, Efeitos da Distorção Harmônica, uma Analise Numérica - Experimental”** – USP-SPG/433/EP/06/07/1998 - Tese;
- [13] PINHEIRO DE ALVARENGA, B. – **“Modelo para o Cálculo do Conjugado de uma Máquina de Indução Incluindo os Efeitos de Enrolamento e Saturação Magnética”**. - Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 1993 – Mestrado;
- [14] PINHEIRO DE ALVARENGA, B.; Martins Neto L. – **“Efeitos de Enrolamento e Saturação Magnética no Conjugado de uma Máquina de Indução”**. – Sociedade Brasileira de Automática – Controle & Automação – Vol.07 No3 Setembro/Dezembro 1996 – Artigo;
- [15] Montsinger, V. M., Loading Transformers by Temperature, AIEE Trans., Vol. 49, 1930 - Artigo;
- [16] Darkin T. W., Electrical Insulation Deterioration Treated as a Chemical Rate Phenomena, AIEE Trans., Vol. 67, 1948 - Artigo;
- [17] Dixon R. R., “Thermal Aging Prediction from an Arrhenius Plot with Only Data Point”, IEEE Transaction Electrical Insulation, vol. EI-15, no 4, 1980, pp331-334, 1980 - Artigo.
- [18] http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_motor Acesso em 13 de out de 2007.

BIBLIOGRÁFIAS CONSULTADAS

- [18] FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, Charles; UMANS, Stephen D. **“Máquinas elétricas”**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006;

-
- [19] GROSS, Charles A. **"Power system analysis"**. United States: John Wiley & Sons, 1986;
- [20] MACHOWSKI, Jan; BIALEK, Janusz W.; BUMBY, James R. **"Power system dynamics"**: stability and control. 2. ed. United Kingdom: John Wiley & Sons, 2008;
- [21] LANGSDORF, Alexander S. **"Teoria de las máquinas de corriente alterna"**. 2. ed. NAUCALPAN DE JUÁREZ: McGraw-Hill de Mexico, 1967;
- [22] JORDÃO, Rubens G. **"Máquinas síncronas"**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1980;
- [23] FALCONE, Aurio Gilberto. **"Eletromecânica"**. São Paulo: Edgard Blücher, 1979;
- [24] KUNDUR, Prabha. **"Power system stability and control"**. New York: MacGraw- Hill, 1994;
- [25] ELGERD, Olle Ingemar. **"Introdução à teoria de sistemas de energia elétrica"**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1977;
- [26] BOLDEA, Ion. **"Synchronous generators"**. Romania: Taylor & Francis Group, LLC, 2005;
- [27] A E FITZGERALD; CHARLES KINGSLEY JR; ALEXANDRE KUSKO. **Máquinas Elétricas**, Mc Graw Hill - 1978;
- [28] <http://www.ieee-virtual-museum.org/> Acesso em 23 de jul de 2007;
- [29] <http://www.weg.com.br> Acesso em 03 de agos de 2007;
- [31] http://institutosantana.com/artfor_0.htm Acesso em 24 de nov de 2007;
- [32] Silva, R. V. R.; Neto, L. M.; Mendonça, R.G.; Paula, S. C. M.; Andrade, D. A. - **Performance Analyses Induction Motor With Saturation Fed by na Inverter** - IEEE - CCECE 2001 – Canadian Conference on electrical & Computer Engineering – May, 13-16, 2001 – Toronto Ontário – Canadá;
- [33] Mendonça, R. G.; Neto, L. M.; Silva, R. V. R.; Paula, S. C. M. - **Three-Phase Induction Generator Feeding a Single-Phase Electrical Distribution System – Time Domain Mathematical Model** - IEEE – ACEMP 2001 – International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics – Jun, 27-29, 2001 – Kusadasi – Turkey;
-

-
- [34] **Electric Power Quality Control Techniques**; Wilson E., PH.D. Kazibwe Musoke H., PH.D. Sendaula (Livro Voltado para Controle da Qualidade de Energia);
- [35] Domijan A., Heydt G.T., Meliopoulos A.P.S., Venkata S.S., West S., ***"Directions of research on Electric Power Quality"***, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, no 1, January/1993;
- [36] Yildirim D., Fuchs E-F, ***"Measured Transformer Derating Comparison with Harmonic Loss Factor (FHL) Approach,"*** IEEE Transactions on Power Delivery, vol.15, No.1, pp.186-91, Jan. 2000;
- [37] Emanuel A. E., ***"The effect of harmonic randomness upon temperature rise of electrical equipment"***, Proceedings of International Conferences on Harmonics in Power Systems, ICHIPS III, Nashville, Indiana, pp. 257-262, October/1988;
- [38] Santana J., Rezende M. J., Pierrat L., ***"Thermal Loss of Life for Transformers Subjected to Random Load and Ambient Temperature"***, PMAPS'97 Vancouver, B.C;
- [39] Funchs E.F., Yildirim D. and Batan T., ***"Innovative procedure for measurement of losses of transformers supplying nonsinusoidal loads"***, IEE proc. Gener Distrib. Vol. 146, no 6, November 1999;
- [40] Pierce L. W., ***"Transformer design and application considerations for nonsinusoidal load currents"***, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 32, no 3, pg. 633-645, May/June/1996;

A.1 Introdução

Como neste trabalho o objetivo é o estudo da Identificação e Tratamentos das Interferências de Harmônicas nas Perdas, Rendimento e Vida Útil de Máquinas Síncronas de Polos Salientes, este capítulo é dedicado à teoria sobre os harmônicos em sistemas elétricos.

O conceito de harmônico teve suas origens nos estudos do "movimento harmônico simples", da acústica, da eletricidade, e de outros fenômenos da Física.

Para o presente trabalho, será estudado o fenômeno que ocorre nos sistemas elétricos, onde as deformações ou distorções se fazem presentes nas formas de ondas das tensões e das correntes e são chamadas de distorções harmônicas. Estas distorções são originadas por cargas não lineares, isto é, que não podem ser descritos por equações algébricas lineares, como por exemplo, a lei de Ohm, presentes no sistema elétrico.

A.2 Distorções Harmônicas

Uma onda senoidal não periódica pode ser representada pela soma de ondas senoidais de diferentes frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental. Tais frequências são chamadas de harmônicos da onda fundamental e a soma dessas senoides recebe o nome de Série de Fourier, definida na expressão (A.2.1).

$$v(t) = V_{cc} + \sum_{n=1}^{\infty} V_{nm} \sin(n\omega t + \alpha_n) \quad (\text{A.2.1})$$

A representação de uma onda distorcida por uma série de senoides se deve a possibilidade de poder utilizar a teoria convencional de análise de circuitos

elétricos senoidais no seu estudo, tendo como desvantagem, a necessidade de análise para cada frequência em separado.

A distorção harmônica da tensão é o resultado da corrente harmônica circulando através da impedância do circuito elétrico. Para cada harmônico há uma queda de tensão de mesma frequência, resultando assim, na distorção total do circuito.

A Figura A.2.1 ilustra bem o comportamento de um circuito onde uma onda periódica, não senoidal, é representada pela soma das ondas senoidais de diferentes frequências, que por sua vez, são múltiplas inteiras da frequência fundamental do circuito.

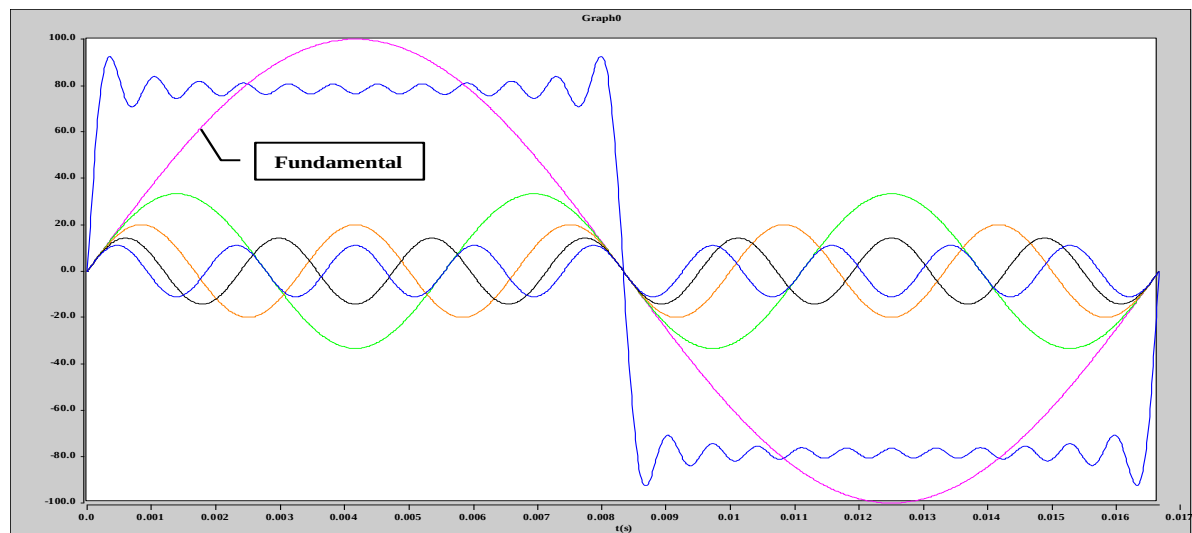


Figura A.2.1 – Decomposição de onda distorcida em sua série.

A.3 Distorções Harmônica Individual, Total e Valor Eficaz.

A Distorção Harmônica Individual, “DHI”, é um parâmetro adotado para indicar o conteúdo de harmônico presente em uma onda elétrica. Ele pode ser usado tanto para o cálculo dos harmônicos da corrente, como para os da tensão e suas expressões são as seguintes:

$$\text{Para a tensão: } DHI_v(\%) = \frac{V_h}{V_1} \cdot 100 \quad (A.3.1)$$

$$\text{Para a corrente: } DHI_I(\%) = \frac{I_h}{I_1} \cdot 100 \quad (\text{A.3.2})$$

Outro parâmetro também muito utilizado para estimar o nível de distorção harmônica é o que mede a distorção harmônica total, DHT. Podendo ser utilizado tanto para tensão como para corrente, sendo suas expressões escritas a seguir:

$$\text{Para tensão: } DHT_V(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h^2}}{V_1} \cdot 100 \quad (\text{A.3.3})$$

$$\text{Para corrente: } DHT_I(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} I_h^2}}{I_1} \cdot 100 \quad (\text{A.3.4})$$

Em um circuito onde a corrente possua um valor baixo, o valor da componente fundamental pode ser baixo também, o que implicaria num DHT_I de valor elevado, assim, recomenda-se usar o valor da corrente fundamental nominal do circuito e não a componente fundamental do momento da amostragem.

O valor eficaz da tensão de um circuito que contenha várias componentes harmônicas não é a soma aritmética da tensão de cada componente, mas sim conforme a expressão (A.3.5):

$$V_{\text{ef}} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{\max}} V_h^2} \quad (\text{A.3.5})$$

A.4 Harmônicos em Máquinas Síncronas

Um fenômeno importante que tem sua origem associada às componentes harmônicas são as oscilações mecânicas que envolvem a turbina. São oscilações que podem ser originadas pela interação entre o campo magnético na frequência fundamental e os harmônicos da corrente. Tanto as correntes de 5º, como as de 7º harmônico estabelecem um torque contínuo de 6º harmônico no rotor da máquina. Caso esses valores se aproximem do valor da frequência de ressonância da massa total do conjunto da máquina (turbina + rotor), a estrutura girante pode atingir a fadiga mecânica com consequências imprevisíveis.

A sensibilidade das máquinas síncronas em relação às distorções harmônicas se deve ao fato dos harmônicos de tensão presentes no estator induzir correntes harmônicas no rotor e estes não são projetados para circular corrente alternada em regime estacionário.

Outro problema nas máquinas síncronas é o aquecimento do rotor devido à interação entre pares de harmônicos de mesma frequência. Os harmônicos de 5ª e 7ª ordem induzem no rotor corrente de frequência igual a seis vezes a fundamental. Tais correntes criam campos rotóricos de velocidade igual a seis vezes a velocidade síncrona, mas em de direção contrária. Este fenômeno é responsável por um dos piores efeitos dos harmônicos em máquinas síncronas, que é aumento das perdas na superfície do rotor.

Os padrões internacionais de suportabilidade adotados para as máquinas síncronas são:

- 100% - Corrente nominal de sequência positiva;
- 5% - Corrente de sequência negativa.

Comumente tem-se liberado estes 5% de tolerância para correntes harmônicas. A ocorrência simultânea de correntes harmônicas e componentes de sequência negativa. A distorção harmônica é determinada por:

$$DHT_1(\%) = \left(\frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} I_h^2}}{I_1} \cdot 100 + \frac{I_{2-}}{I_1} \cdot 100 \right) \leq 5\% \quad (\text{A.4.1})$$

B.1 Considerações Iniciais

Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS é órgão responsável no Brasil, para ditar as normas nacionais que estabelecem os limites para os níveis de distorção harmônica total de tensão num sistema elétrico, neste caso o Procedimento de Rede 2.8.

Uma usina de geração de energia elétrica é designada pelo ONS, como um agente de operação do sistema. E a não observação das normas de operação são chamadas de não conformidade.

As não conformidades tipificadas neste submódulo sujeitarão os agentes de operação às seguintes penalidades:

- (a) advertência;
- (b) multa.

As multas a serem aplicadas aos agentes de operação são classificadas em 02 (dois) grupos, a saber:

- (a) Grupo I: corresponderá a 5% (cinco por cento) do valor anual da contribuição associativa. Paga pelo agente de operação ao ONS, relativa ao exercício em que ocorreu a não conformidade.
- (b) Grupo II: corresponderá a 10% (dez por cento) do valor anual da contribuição associativa. Paga pelo agente de operação ao ONS, relativa ao exercício em que ocorreu a não conformidade.

As recomendações do órgão operador nacional do sistema elétrico para os níveis de distorções harmônicas em todo o país.

O indicador para avaliar o desempenho global quanto a harmônicos, em regime permanente, nos barramentos da rede básica, corresponde à distorção de tensão harmônica.

Esse indicador não se aplica a fenômenos transitórios ou de curta duração que resultem em injeção de correntes harmônicas, como ocorre, por exemplo, na

energização de transformadores ou em partida de unidades geradoras que utilizem equipamentos conversores de frequência.

Entende-se por Distorção de Tensão Harmônica Total – DTHT a raiz quadrada do somatório quadrático das tensões harmônicas de ordens 2 a 50. Esse conceito procura quantificar o conteúdo harmônico total existente em um determinado barramento da rede básica:

$$DTHT = \sqrt{\sum V_h^2} \text{ em \%} \quad \text{e} \quad V_h = 100 \frac{V_h}{V_1}$$

B.2 Definição do Indicador

Os valores dos indicadores – tanto o indicador total (DTHTS95%) quanto os indicadores por harmônicos – a serem comparados com os valores limites são assim obtidos:

- determina-se o valor que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos no período de 1 dia (24 horas), considerando os valores dos indicadores integralizados em intervalos de 10 (dez) minutos, ao longo de 7 (sete) dias consecutivos;
- o valor do indicador corresponde ao maior entre os sete valores obtidos, anteriormente, em base diária.

B.3 Avaliação de Desempenho

- Os limites globais inferiores correspondentes aos indicadores de tensões harmônicas individuais de ordens 2 a 50, bem como ao indicador DTHTS95%

V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
ÍMPARES		PARES		ÍMPARES		PARES	
ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)
3, 5, 7	5%			3, 5, 7	2%		
		2, 4, 6	2%			2, 4, 6	1%
9, 11, 13	3%			9, 11, 13	1,5%		
		≥8	1%			≥8	0,5%
15 a 25	2%			15 a 25	1%		
≥27	1%			≥27	0,5%		
DTHTS95% = 6%				DTHTS95% = 3%			

Tabela II.3.1 – Limites globais inferiores de tensão em porcentagem da tensão fundamental

- Os limites globais superiores são determinados pela multiplicação dos limites globais inferiores correspondentes pelo fator (4/3). Por exemplo, os limites globais superiores relativos aos indicadores DTHTS95% para $V < 69$ kV e $V \geq 69$ kV são, respectivamente, 8% e 4%.

- Na definição desses limites, deve-se levar em consideração que, para cada ordem harmônica h , a tensão harmônica resultante em qualquer ponto do sistema é obtida com a combinação dos efeitos provocados por diferentes agentes.

- Os limites individuais de tensões harmônicas de ordens 2 a 50, bem como o limite para a Distorção de Tensão Harmônica Total (DTHTS95%), são apresentados na Tabela II.3.2.

13,8 kV $\leq$ V < 69 kV				V $\geq$ 69 kV			
ÍMPARES		PARES		ÍMPARES		PARES	
ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)
3 a 25	1,5%			3 a 25	0,6%		
		todos	0,6%			todos	0,3%
≥ 27	0,7%			≥ 27	0,4%		
DTHTS95% = 3%				DTHTS95% = 1,5%			

Tabela II.3.2 – Limites individuais em porcentagem da tensão

No caso em que determinadas ordens de tensão harmônica e/ou a distorção harmônica total variem de forma intermitente e repetitiva, os limites especificados podem ser ultrapassados em até o dobro, desde que a duração cumulativa acima dos limites contínuos estabelecidos não ultrapasse 5% do período de monitoração.

C.1 Introdução

O advento das técnicas digitais vem promovendo profundas transformações na sociedade, exercendo pressão inequívoca, onde a cultura dos procedimentos sequenciais vem se tornando rapidamente um padrão. Acessar a Internet, pesquisar dados, decidir qual o caminho de menor custo, minimizar despesas, requerem procedimentos algorítmicos.

Os grafos permite, de forma simples e contextualizada, a construção das idéias básicas que permeiam os processos algorítmicos, além de ser uma área riquíssima em aplicações, as quais nos remetem a problemas realmente contextualizados, tais, como: Ciclos “Eulerianos” e Ciclos Hamiltonianos, o Problema do caminho mínimo, do caminho crítico, dentre outros.

O desenvolvimento da Teoria dos Grafos, cujos primeiros resultados derivaram de desafios despretensiosos e jogos desafiadores, nos remetem a problemas que, apesar de serem simples em sua compreensão e, portanto, acessíveis e oportunos para desencadeiam soluções e discussões complexas.

C.2 A Teoria dos Grafos

A teoria dos grafos pode ser considerada um ramo recente da matemática se comparada com a Geometria, o Cálculo, a Trigonometria, a Resolução de Equações Algébricas, etc. Apesar de ser atualmente utilizada em variados campos da ciência, como a Física, Química, Computação, Bioinformática, Genética, Pesquisa operacional, Eletricidade, Estatística, Psicologia, Sociologia, dentre outros, seu início foi tímido.

Os primeiros passos para o desenvolvimento da Teoria dos Grafos foram dados no século XVIII pelo matemático suíço Leonardo Euler (1707-1783). Euler

resolveu o famoso *Problema das pontes de Königsberg*, que é considerado o resultado inicial do que chamamos hoje de Teoria dos Grafos.

Tudo começou com um desafio recreativo que os habitantes da cidade de Königsberg (hoje Kaliningrado) propuseram. A cidade (representada na figura C.1) era dividida em quatro distritos (representados por A, B, C e D, na figura C.2) por braços do rio Pregel, que eram conectados por sete pontes. Dessa caminhada, surgiu uma questão: é possível atravessar as sete pontes do Rio Pregel, sem passar duas vezes na mesma ponte, retornando ao ponto de partida. A figura figura C.2 ilustra a situação.

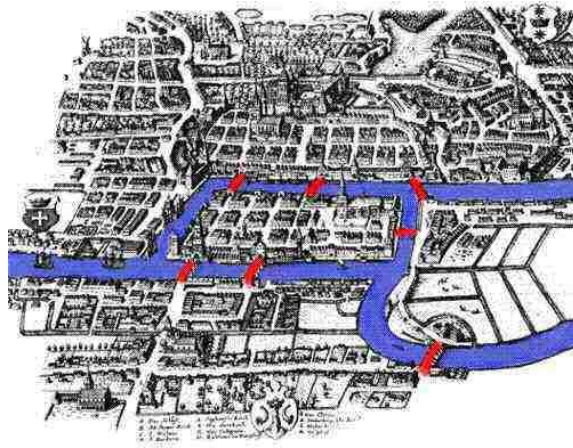


Figura C.1 – A cidade de Königsberg nos tempos de Euler.

Euler publicou um artigo, em 1736, onde ele demonstrava que tal percurso era impossível. Ele representou cada distrito por um ponto (nó ou vértices) e cada ponte por uma ligação (arco ou aresta) entre os pontos.

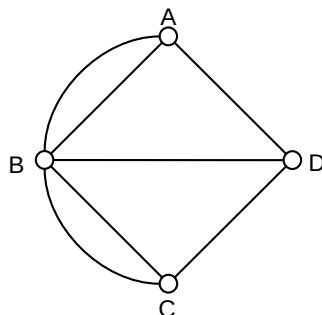


Figura C.2 – Grafo associado ao *Problema das sete pontes de Königsberg*.

Esse resultado é considerado como o primeiro teorema da teoria dos grafos.

Para utilização dessa teoria na resolução de uma rede elétrica são necessários à definição de termos, assim como bipolo e topologia. Com essas definições a teoria dos grafos tem grandes aplicações na resolução de redes elétricas. Basicamente esta teoria reúne os componentes da rede, definidos por bipolos, e a forma de interligação dos mesmos, definida pela topologia da rede. Conforme apresentado na figura C.3, onde estão apresentados os tipos de bipolos a serem considerados na rede elétrica, assim como no desenrolar deste apêndice e suas respectivas equações que relacionam tensão e corrente elétricas.

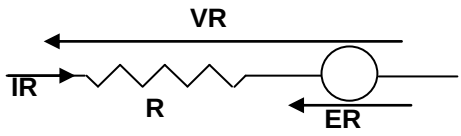
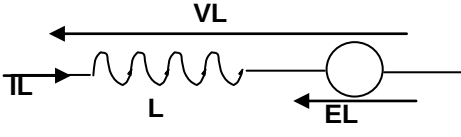
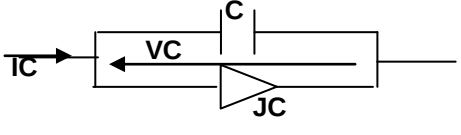
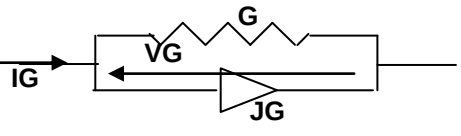
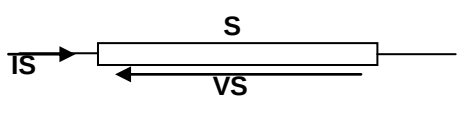
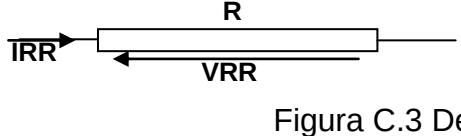
BIPOLOS		EQUAÇÃO	
TIPO			
		$VR = R.IR + ER$	(C.1)
		$VL = L.\frac{dIL}{dt} + EL$	(C.2)
		$IC = C.\frac{dVC}{dt} + JC$	(C.3)
		$IG = G.VG + JG$	(C.4)
		$VS = RS.IS + \frac{d\lambda S}{dt}$	(C.5)
		$VRR = RR.IRR + \frac{d\lambda R}{dt}$	(C.6)

Figura C.3 Definição dos bipolos e termos

Dada uma topologia de rede, e conhecido os tipos dos diversos bipolos, através dos conceitos de árvore e de matriz fundamental, é possível obter a relação entre as equações referentes aos bipolos, obedecendo as duas leis de Kirckoff .

A **ÁRVORE**. Um conjunto de ramos com os bipolos "R", "L", "S", onde estão presentes todos os nós, sem existir circuito fechado, ou seja, malha.

A **MATRIZ FUNDAMENTAL**. Formada através das regras com segue:

- 1- Seus elementos são apenas: 1, -1, 0.
- 2- Número de linhas igual à soma dos números de ramos "R", "L", "S".
- 3- Número de colunas igual à soma dos números de ramos "G", "C".

Exemplo: resolução de uma rede elétrica, conforme figura C.4.

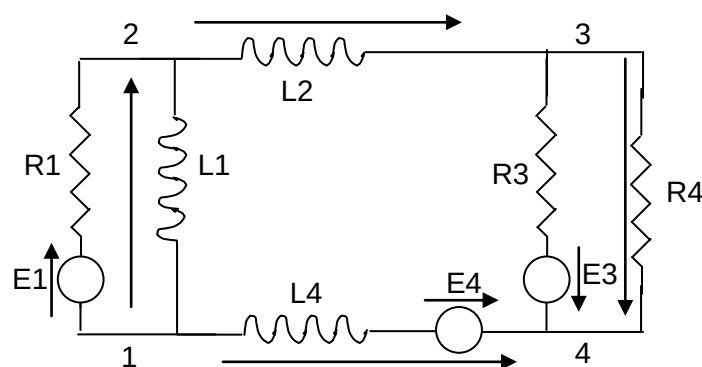


Figura C.4. Configuração da rede

Supondo a rede da figura C.4, é possível obter a árvore e sua matriz fundamental. A fim de estabelecer uma sistemática a qualquer tipo de rede elétrica, acrescenta-se um nó fictício à rede elétrica, formando uma árvore de geometria radial, com os ramos saindo do referido nó. A figura C.5 apresenta a rede original, o nó e os ramos fictícios.

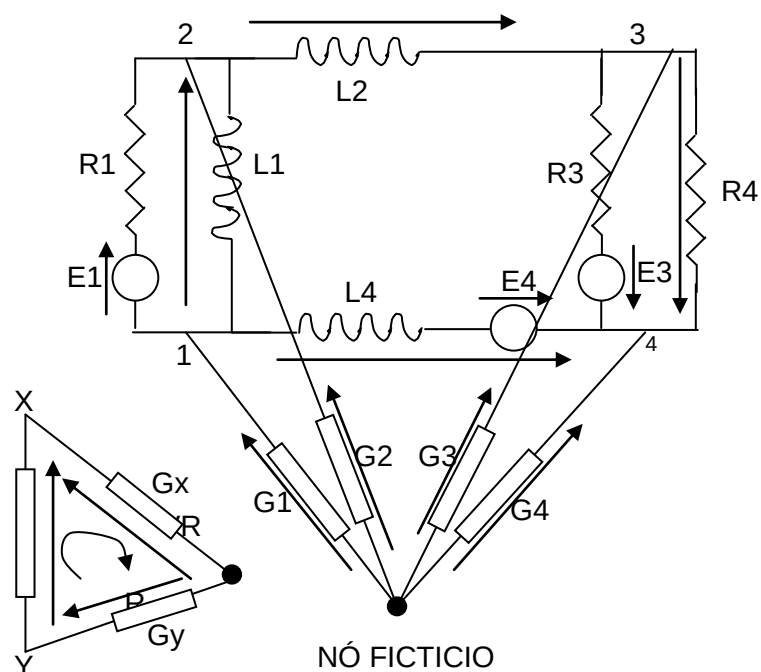


Figura C.5 Rede Original, Nó e Ramos Fictício.

A matriz fundamental pode ser obtida obedecendo à convenção de sinais do esquema. Assim como as sub-matrizes “FRG” e “FLG” irão dar o significado da matriz fundamental.

$G \rightarrow$	1	2	3	4	FRG	(C.7)
R_1 1-2	1	-1	0	0		
R_4 3-4	0	0	1	-1		
R_3 3-4	0	0	1	-1		

$L \rightarrow$	1	2	3	4	FLG	(C.8)
L_1 1-2	1	-1	0	0		
L_4 1-4	1	0	0	-1		
L_2 2-3	0	1	-1	0		

$$\text{FRG} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{pmatrix} \quad (\text{C.9})$$

$$\text{FLG} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \end{pmatrix} \quad (\text{C.10})$$

É possível provar que:

$$[\text{VL}] = - [\text{FLG}] [\text{VG}] \quad (\text{C.11})$$

$$[\text{VR}] = - [\text{FRG}] [\text{VG}] \quad (\text{C.12})$$

Onde:

$$\text{VR} = \begin{pmatrix} \text{VR1} \\ \text{VR4} \\ \text{VR3} \end{pmatrix} \quad (\text{C.13});$$

$$\text{VL} = \begin{pmatrix} \text{VL1} \\ \text{VL4} \\ \text{VL2} \end{pmatrix} \quad (\text{C.14});$$

$$\text{VG} = \begin{pmatrix} \text{VG1} \\ \text{VG2} \\ \text{VG3} \\ \text{VG4} \end{pmatrix} \quad (\text{C.15})$$

Das expressões anteriores, pode-se obter:

$$\begin{pmatrix} \text{VR1} \\ \text{VR4} \\ \text{VR3} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{VG1} \\ \text{VG2} \\ \text{VG3} \\ \text{VG4} \end{pmatrix} \quad (\text{C.16})$$

$$\begin{pmatrix} \text{VL1} \\ \text{VL4} \\ \text{VL2} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{VG1} \\ \text{VG2} \\ \text{VG3} \\ \text{VG4} \end{pmatrix} \quad (\text{C.17})$$

ou então :

$$VR1 = -VG1 + VG2 \quad (C.18)$$

$$VR4 = -VG3 + VG4 \quad (C.19)$$

$$VR3 = -VG3 + VG4 \quad (C.20)$$

$$VL1 = -VG1 + VG2 \quad (C.21)$$

$$VL4 = -VG1 + VG4 \quad (C.22)$$

$$VL2 = -VG2 + VG3 \quad (C.23)$$

Relacionando estas últimas seis equações com o circuito da figura C.5, observa-se que elas são a aplicação da primeira lei de Kirchoff no referido circuito. Portanto conclui-se que as equações:

$$[VR] = -[FRG][VG] \quad (C.24)$$

$$[VL] = -[FLG][VG] \quad (C.25)$$

Representa a aplicação da primeira lei de Kirchoff em um circuito qualquer.

Por outro lado, observando-se as correntes em um circuito elétrico, pode-se provar que:

$$[IG] = [FRG][IR]^t + [FLG][IL]^t \quad (C.26)$$

Representam a aplicação da primeira lei de Kirchoff em um circuito qualquer.

Onde:

$$IG = \begin{bmatrix} IG1 \\ IG2 \\ IG3 \\ IG4 \end{bmatrix} \quad (C.27) \quad IR = \begin{bmatrix} IR1 \\ IR4 \\ IR3 \end{bmatrix} \quad (C.28) \quad IL = \begin{bmatrix} IL1 \\ IL4 \\ IL2 \end{bmatrix} \quad (C.29)$$

$$FRG^t = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & -1 & -1 \end{pmatrix} \quad (C.30)$$

$$FLG^t = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \quad (C.31)$$

Através destas últimas 6 equações, obtém-se:

$$IG1 = IR1 + IL1 + IL4 \quad (C.32)$$

$$IG2 = -IR1 - IL1 + IL2 \quad (C.33)$$

$$IG3 = IR4 + IR3 - IL2 \quad (C.34)$$

$$IG4 = -IR4 - IR3 - IL4 \quad (C.35)$$

Relacionando estas quatro equações com o circuito da figura 2, observa-se que elas são a aplicação da segunda lei de Kirchoff no referido circuito. Portanto conclui-se que a equação:

$$[IG] = [FRG]^t [IR] + [FLG]^t [IL] \quad (C.36)$$

Representa a aplicação da segunda lei de Kirchoff em um circuito qualquer. Podem-se relacionar as equações dos bipolos com as respectivas equações que definem a topologia da rede, ou seja:

$$[VR] = [R][IR] + [ER] \quad (C.37)$$

$$[VR] = -[FRG][VG] \quad (C.38)$$

$$[L] \frac{d[IL]}{dt} + [EL] = -[FLG][VG] \quad (C.39)$$

$$[VL] = -[FLG][VG] \quad (C.40)$$

$$[VS] = [RS][IS] + \frac{d[\lambda S]}{dt} \quad (C.41)$$

$$[VS] = -[FSG][VG] \quad (C.42)$$

$$[IG] = [G][VG] \quad (C.43)$$

$$[IG] = [FRG]^t [IR] + [FLG]^t [IL]^t + [FLS]^t [IS]^t \quad (C.44)$$

Igualando as respectivas equações vem:

$$[R][IR] + [ER] = -[FRG][VG] \quad (C.45)$$

$$[L] \frac{d[IL]}{dt} + [EL] = -[FLG][VG] \quad (C.46)$$

$$[RS][IS] + \frac{d[\lambda S]}{dt} = -[FSG][VG] \quad (C.47)$$

$$[G][VG] = [FRG]^t [IR] + [FLG]^t [IL] + [FSG]^t [IS] \quad (C.48)$$

De (1) vem:

$$[IR] = -[R]^{-1} \{ [ER] + [FRG][VG] \} \quad (C.49)$$

Substituindo (C.49) em (C.48) vem:

$$[VG] = [MG]^{-1} \{ [FLG]^t [IL] + [FSG]^t [IS] - [FRG]^t [R]^{-1} [ER] \} \quad (C.50)$$

$$[MG] = [G] + [FRG]^t [R]^{-1} [FRG] \quad (C.51)$$

Substituindo (50) em (C.46), (C.47) e (C.51) vem:

$$[L] \frac{d[IL]}{dt} + [EL] = -[FLG][MG]^{-1} \{ [FLG]^t [IL] + [FSG]^t [IS] - [FRG]^t [R]^{-1} [ER] \} \quad (C.52)$$

$$[RS][IS] + \frac{d[\lambda S]}{dt} = -[FSG][MG]^{-1} \{ [FLG]^t [IL] + [FSG]^t [IS] - [FRG]^t [R]^{-1} [ER] \} \quad (C.53)$$

Além das equações diferenciais em IL e λS tem-se (C.54).

$$[RR][IRR] + \frac{d[\lambda R]}{dt} = [VRR] \quad (C.54)$$

As equações dos fluxos são:

$$[\lambda S] = [LSS][IS] + [LSR][IRR] \quad (C.55)$$

$$[\lambda R] = [LSR]'[IS] + [LRR][IRR] \quad (C.56)$$

E, portanto suas derivadas são:

$$\frac{d[\lambda S]}{dt} = [LSS]\frac{d[IS]}{dt} + \frac{d[LSS]}{dt}[IS] + [LSR]\frac{d[IRR]}{dt} + \frac{d[LSR]}{dt}[IRR] \quad (C.57)$$

$$\frac{d[\lambda R]}{dt} = [LSR]'\frac{d[IS]}{dt} + \frac{d[LSR]'}{dt}[IS] + [LRR]\frac{d[IRR]}{dt} + \frac{d[LRR]}{dt}[IRR] \quad (C.58)$$

Chamando de:

$$\frac{d[LSS]}{dt} = \frac{d\theta}{dt} \frac{d[LSS]}{d\theta} = W[DLSS] \quad ; \quad \frac{d[LSR]}{dt} = \frac{d\theta}{dt} \frac{d[LSR]}{d\theta} = W[DLSR] \quad e$$

$$\frac{d[LRR]}{dt} = \frac{d\theta}{dt} \frac{d[LRR]}{d\theta} = W[DLRR]$$

Temos:

$$\frac{d[\lambda S]}{dt} = [LSS]\frac{d[IS]}{dt} + W[DLSS][IS] + [LSR]\frac{d[IRR]}{dt} + W[DLSR][IRR] \quad (C.59)$$

$$\frac{d[\lambda R]}{dt} = [LSR]'\frac{d[IS]}{dt} + W[DLSR]'[IS] + [LRR]\frac{d[IRR]}{dt} + W[DLRR][IRR] \quad (C.60)$$

Substituindo (59) em (C.53) e (60) em (C.54), vem:

$$[RS][IS] + [LSS]\frac{d[IS]}{dt} + W[DLSS][IS] + [LSR]\frac{d[IRR]}{dt} + W[DLSR][IRR] = -[FSG][MG]^{-1} \left\{ [FLG]'[IL] + [FSG]'[IS] - [FRG]'[R]^{-1}[ER] \right\} \quad (C.61)$$

$$[RR][IRR] + [LSR]'\frac{d[IS]}{dt} + W[DLSR]'[IS] + [LRR]\frac{d[IRR]}{dt} + W[DLRR][IRR] = [VRR] \quad (C.62)$$

Reorganizando as equações (C.52), (C.61), e (C.62), vem:

$$[LSS]\frac{d[IS]}{dt} + \{W[DLSS] + [MS]\}[IS] + [MLS][IL] + [LSR]\frac{d[IRR]}{dt} + [DLSR][IRR] - [MSR][ER] = [0] \quad (C.63)$$

$$[LSR]^T \frac{d[IS]}{dt} + W[DLSR]^T [IS] + [LRR] \frac{d[IRR]}{dt} + \{W[DLRR] + [RR]\} [IRR] - [VRR] = [0] \quad (C.64)$$

$$\frac{d[IL]}{dt} + [ML][IL] + [MSL][IS] + [L]^{-1} [EL] - [MLR][ER] = [0] \quad (C.65)$$

Onde:

Colocando na forma matricial as equações de (C.63) a (C.65), tem-se:

$$[DL] = \begin{bmatrix} [DLSS] & [DLSR] \\ [DLSR]^T & [DLRR] \end{bmatrix} \quad (C.67)$$

$$[MC] = \begin{bmatrix} [MS] & [0] \\ [0] & [RR] \end{bmatrix} \quad (C.68)$$

$$[VG] = [MG]^{-1} \{ [FLG]^T [IL] + [FSG]^T [IS] - [FRG]^T [R]^{-1} [ER] \} \quad (C.69)$$

Fazendo a integração numérica da equação (C.66), obtêm-se as correntes $[IS]$, $[IRR]$, e $[IL]$. De posse dessas correntes, obtêm-se as tensões $[VG]$, $[VR]$, $[VL]$, $[VS]$, e as correntes restantes $[IR]$, através das respectivas equações:

$$[VR] = - [FRG] [VG] \quad (C.38)$$

$$[VL] = - [FLG] [VG] \quad (C.40)$$

$$[VS] = - [FSG] [VG] \quad (C.42)$$

$$[IR] = - [R]^{-1} \{ [ER] + [FRG][VG] \} \quad (C.49)$$

Estas últimas quatro equações deduzidas no início deste equacionamento, e que por comodidade aqui transcrita. Fazendo aplicação na figura C.6, um gerador síncrono, cujo estator é dado por S1, S2, S3; um barramento infinito dado pelas fases a, b, c; um retificador dado pelas resistências de R1 a R6, representando as chaves eletrônicas, e RC sua carga.

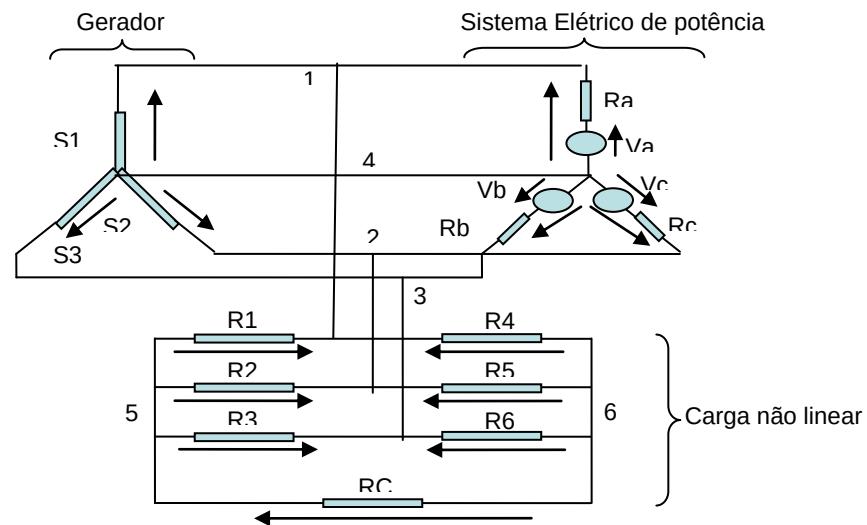


Figura C.6 Representação do Gerador Síncrono, barramento infinito e cargas.

De acordo com o circuito da figura C.6, têm-se os ramos e a matriz fundamental:

G →		1	2	3	4	5	6
Ra 1-4		-1	0	0	1	0	0
Rb 2-4		0	-1	0	1	0	0
Rc 3-4		0	0	-1	1	0	0
R1 1-5		-1	0	0	0	1	0
R4 1-6		-1	0	0	0	0	1
R2 2-5		0	-1	0	0	1	0
R5 5-6		0	-1	0	0	0	1
R3 3-5		0	0	-1	0	1	0
R6 3-6		0	0	-1	0	0	1
RC 5-6		0	0	0	0	-1	1
S1 1-4		-1	0	0	1	0	0
S2 2-4		0	-1	0	1	0	0
S3 3-4		0	0	-1	1	0	0

(C.70)

Portanto, tem-se FRG e FSG.

$$[FRG] = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (C.71)$$

$$[FSG] = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (C.72)$$

Utilizando-se as expressões (C.66), (C.71) e (C.72), e Agregando as equações mecânicas desenvolvidas no Capítulo II, tem-se a equação (C.73).

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} is1 \\ is2 \\ is3 \\ irr1 \\ irr2 \\ irr3 \\ W \\ \theta \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} [M1] & [0] & [0] & [LM] \\ [T1] & [0] & [0] & [0] \\ [0] & [-p/2] & [0] & [0] \\ [[MS][0]] & [0] & [0] & [ML] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} is1 \\ is2 \\ is3 \\ irr1 \\ irr2 \\ irr3 \\ W \\ \theta \end{bmatrix} + [V] \quad (C.73)$$

Onde as equações (C.74; C.75; C.76; C.77 e C.78) determinam as variáveis da equação (C.73):

$$[IS] = \begin{bmatrix} is1 \\ is2 \\ is3 \end{bmatrix} \quad (C.74)$$

$$[IRR] = \begin{bmatrix} irr1 \\ irr2 \\ irr3 \end{bmatrix} \quad (C.75)$$

$$[M1] = -[L]^{-1} [[MC] + W[DL]] \quad (C.76)$$

$$[LM] = -[L]^{-1} \begin{bmatrix} [MLS] \\ [0] \end{bmatrix} \quad (C.77)$$

$$[V] = \begin{bmatrix} [L]^{-1} \begin{bmatrix} [MSR][ER] \\ VRR \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} [MLR][ER] - [L]^{-1}[EL] \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (C.78)$$

D.1 Introdução

Para auxílio nas simulações foi desenvolvido aplicativo em "MATLAB", conforme apresentado neste apêndice.

D.2 Aplicativo

```
function GSPSR3
% Modelagem de uma máquina síncrona trifásica polos salientes ligada a
rede com retificador, carga RC; Vf=14; Carga não linear Rabc=200; RLF=0.7
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
close all;
clear all;
clc;
tic; % Zera o contador do tempo de simulação
% Declaração das Variáveis Globais
global VF Tt Ld Lss Lss2 Lsr Kss KDD KQQ KFF KsD KsQ KsF KFD h1 p J ...
        wo alpha Vm RS  G FRG  FSG RLD RLQ RLF JB TFRG TFSG Ra Rb Rc
disp(' ');
disp('==> Simulação da Máquina Síncrona <==');
disp(' ');
disp('Por favor, NÃO INTERROMPA A SIMULAÇÃO...');

%% Parâmetros da Simulação
ts = [0 6];          % Tempo da Simulação
h  = 1;              % Ordem Harmonica Espacial
yo = [0 0 0 0 0 0 3600*pi/30 0 0]; % Valor inicial das variáveis de estado

%      [ia,ib,ic,iA,iB,iC,w,Pos]

%% Parâmetros da rede
Vm = 15000*sqrt(2)/sqrt(3); %Tensão de pico por fase em V
f  = 60;                    %Frequência
wo = 2*pi*f;                %Frequência em rd/s
alpha = 2*pi/3;             %Angulo entre fases - Espacial e vetorial

%% Dados do Circuito em t inicial
%R=getR(0); % Resistencia para t=0 (cálculo desnecessário)
%% Arquitetura do circuito

Ra=200;
Rb=200;
Rc=200;

G = 1e-10*eye(6); % condutância para nó virtual
```

```

FRG=[  -1    0    0    1    0    0;
       0   -1    0    1    0    0;
       0    0   -1    1    0    0;
      -1    0    0    0    1    0;
      -1    0    0    0    0    1;
       0   -1    0    0    1    0;
       0   -1    0    0    0    1;
       0    0   -1    0    1    0;
       0    0   -1    0    0    1;
       0    0    0    0   -1    1];
FSG=[  -1    0    0    1    0    0;
       0   -1    0    1    0    0;
       0    0   -1    1    0    0];

```

```

TFRG = FRG'; %Matriz transposta FRG
TFSG=FSG';  %Matriz transposta FSG

```

```

%% Parâmetros do gerador
RS = 5.25*eye(3); % Resistencia do Estator em mOhm
ns = 3; %Número de Ranhuras por Polo do Estator
nD = 2; %Número de Ranhuras por Polo do Enrolamento Amortecedor eixo d
nQ = 2; %Número de Ranhuras por Polo do Enrolamento Amortecedor eixo q
nF = 2; %Número de Ranhuras por Polo do Enrolamento de Campo
As=pi/9;%Ângulo entre duas Ranhuras do Estator (rad)
AD=pi/3;%Ângulo entre duas Ranhuras do Enrolamento Amortecedor eixo d
      (rd)
AQ = pi/3;          %Ângulo entre duas Ranhuras do Enrolamento Amortecedor
eixo q (rd)
AF = pi/3;          %Ângulo entre duas Ranhuras do Enrolamento de Campo (rd)
Bs = 0.888;         %Passo do Enrolamento do Estator
BD = 0.833;         %Passo do Enrolamento Amortecedor eixo d
BQ = 0.833;         %Passo do Enrolamento Amortecedor eixo q
BF = 0.833;         %Passo do Enrolamento de Campo
J  = 5.3;           %Momento de Inercia (Kg.m^2 / 1000)
p  = 2;             %Numero de Polos
RLD = 12.2778;      %Resistencia do enrolamento amortecedor de eixo d
referido ao estator em mOhm
RLQ = 50.5844;      %Resistencia do enrolamento amortecedor de eixo q
referido ao estator em mOhm
RLF = 20;%roda com 2          %0.6956 Resistencia do enrolamento de campo
referida ao estayort em mOhm
Tt = 175;           %Conjugado de turbina (kN.m)
VF = 400; %roda com 15.0      %VF = 16.2375
Ls = 0.5595;        %Indutância de dispersão do estator em mH
Lr = 0.5595;        %Indutância de dispersão dos enrolamentos do rotor
referidos ao estator em mH
Lss = 3.78;         %Indutância Lg0 em mH
Lss2 = 0.074;       %Indutância Lg2 em mH
Lrr = 3.854;        %Indutância Lssdm em mH
Lsr = 3.854;        %Indutância Lssdm em mH
Lsq = 3.706;        %Indutância Lssqm em mH
%inicializa matriz Ld
Ld = zeros(6,6);
Ld(1,1) = Ls;
Ld(2,2) = Ls;
Ld(3,3) = Ls;
Ld(4,4) = Lr;
Ld(5,5) = Lr;

```

```

Ld(6,6) = Lr;
%% Início dos cálculos
h1 = [1:2:h]; % Vetor de harmônicos
Kps = sin((Bs*pi/2)*h1); % Fator de passo Estator
KpD = sin((BD*pi/2)*h1); % Fator de passo do enr.
amort. eixo d
KpQ = sin((BQ*pi/2)*h1); % Fator de passo do enr.
amort. eixo q
KpF = sin((BF*pi/2)*h1); % Fator de passo do enr.
de campo
Kds = sin((ns*As/2)*h1)./(ns*sin((As/2)*h1)); % Fator de distribuição do
estator %eixo d
KdD = sin((nD*AD/2)*h1)./(nD*sin((AD/2)*h1)); % Fator de distribuição do
enr. amort. eixo d
KdQ = sin((nQ*AQ/2)*h1)./(nQ*sin((AQ/2)*h1)); % Fator de distribuição do
enr. amort. eixo d
KdF = sin((nF*AF/2)*h1)./(nF*sin((AF/2)*h1)); % Fator de distribuição do
enr. campo
Kws = Kps.*Kds; % Fator de enrolamento do
Estator
KwD = KpD.*KdD; % Fator de enrolamento do
enr. amort. eixo d
KwQ = KpQ.*KdQ; % Fator de enrolamento do
enr. amort. eixo q
KwF = KpF.*KdF; % Fator de enrolamento do
enr. de campo
KsD = (Kws.*KwD)./(h1.*h1); % Constante mutua
KsQ = (Kws.*KwQ)./(h1.*h1); % Constante mutua
KsF = (Kws.*KwF)./(h1.*h1); % Constante mutua
KFD = (KwF.*KwD)./(h1.*h1); % Constante mutua
Kss = (Kws.*Kws)./(h1.*h1); % Constante estator
KDD = (KwD.*KwD)./(h1.*h1); % Constante rotor eixo d
KQQ = (KwQ.*KwQ)./(h1.*h1); % Constante rotor eixo q
KFF = (KwF.*KwF)./(h1.*h1); % Constante rotor campo

%% Integração das equações diferenciais
JB=0;% Contador de interações/execuções da função GSPSFUN

%options = odeset('MaxStep',5e-5);
%[t,ys] = ode23tb(@GSPSFUNR3,[ts(1),ts(2)],yo,options);
[t,ys]=rk3(@GSPSFUNR3,ts(1),ts(2),5e-5,yo);ys=ys';
disp(['A função diferencial foi executada ' int2str(JB) ' vezes durante a
simulação']);
mostraGraficos(t,ys);

% Tempo de simulacao em minutos
disp('Tempo total da simulacao:')
tt = mostraTempo;
% % save('Dados_Simulacao'); %Salva Workspace em disco para futura
inspeção

%% Funções complementares
function tempo=mostraTempo
%% mostra o tempo de execução
tempo=toc;
if tempo<60 disp(['Tempo: ' int2str(tempo) ' segundos']);
elseif tempo <3600 disp(['Tempo: ' int2str(round(tempo/60)) ' minutos']);
else disp(['Tempo: ' int2str(tempo/3600) ' Horas']);
end

```

```

function yyh=GSPSFUNR3(t,y)
%% Calcula derivadas das equações de estado na forma  $dY = V - A*Y$ 

global JB VF Vm MC Ld p J wo alpha R RS G FRG FSG RLD RLQ RLF TFRG TFSG
JB=JB+1; % contador de interações
Pos = y(8); %Posição do rotor
w = y(7); %Velocidade do rotor
wi=wo*t; %angulo de referencia no instante t
Tcc=getTorque(t);%Torque da turbina
Lij=getLij(Pos);%Inicializa matriz Lij
dLij=getdLij(Pos);%Inicializa matriz dLij/dPos
R=getR(t);
if (t>2.1)
    RLF= 0.7;
    VF=14;
    %VF = 14 -200*sin(6*wi); % 14
    %Estou acertando esta express~so 19.99-0.14*sin(6*377*t-2) para
    %ficar igual a iC
end
%COMENTÁRIOS para Rabc=100:
%1 - COM VF=14-500*sin(6*wi) ia resultou em : 5.9*sin(377*t+0.68*pi)SEM
%O RETIFICADOR
%2 - COM iC constante igual a 20 ia resultou em :
%6.5*sin(377*t+0.7*pi)+0.1*sin(5*377*t+0.7*pi) + 0.03*sin(7*377*t+0.7*pi)
%COM O RETIFICADOR
%3 - COM VF = 14 ia ficou igual ao caso com iC constante igual a 20 COM
%RETIFICADOR;

VRR = [ 0 ; 0 ; VF ];
IR=inv(R);
V=Vm*[sin(wi);sin(wi-alpha);sin(wi+alpha)]; %tensões no instante t
L = Lij+Ld;%Soma a indutancia de dispersão
IL=inv(L);
MG=G+TFRG*IR*FRG;
IMG=inv(MG);
MS=FSG*IMG*TFSG+RS;
MR=FSG*IMG*TFRG*IR;
MC = zeros(6,6);
MC(1:3,1:3) = MS(1:3,1:3);
MC(4,4) = RLD;
MC(5,5) = RLQ;
MC(6,6) = RLF;
ER = [ V ; 0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0 ];
ME = MR*ER;
VMER = [ ME ; VRR ] ;
V = IL*VMER;
V=[ V; -Tcc/J; 0 ];

%Inicializa a matriz M
M = zeros(8,8);
M(1:6,1:6) = IL*(MC + (w*dLij));
M(7,1:6) = -(p/(4*J))*y(1:6)'*dLij;
M(8,7) = -p/2;
yyh= V - M*y;

function Tcc=getTorque(t)
%% Cálculo o torque da turbina
global Tt
if (t>0.5)

```

```

        Tcc= -Tt;
    else
        Tcc= 0;
    end
    function R=getR(t)

    %% Cálcula a matriz de resistência
    global wo alpha Vm Ra Rb Rc
    %Tensões de alimentação
    wi=wo*t; %ângulo no instante t
    V=Vm*[sin(wi),sin(wi-alpha),sin(wi+alpha)]; %tensões no instante t
    Vab = V(1) - V(2); %Tensão entre-fase A e B
    Vbc = V(2) - V(3); %Tensão entre-fase B e C
    Vca = V(3) - V(1); %Tensão entre-fase C e A
    Vba = V(2) - V(1); %Tensão entre-fase A e B
    Vcb = V(3) - V(2); %Tensão entre-fase B e C
    Vac = V(1) - V(3); %Tensão entre-fase C e A
    K=300000;
    L=3;
    if (t > 2.5)

    if ((Vab >= Vcb) & (Vab >= Vac))1;
    R1=L;
    R5=L;
    R2=K;
    R3=K;
    R4=K;
    R6=K;
    end

    if ((Vac >= Vab) & (Vac >= Vbc))2;
    R1=L;
    R6=L;
    R2=K;
    R3=K;
    R4=K;
    R5=K;
    end

    if ((Vbc >= Vac) & (Vbc >= Vba))3;
    R2=L;
    R6=L;
    R1=K;
    R3=K;
    R4=K;
    R5=K;
    end

    if ((Vba >= Vbc) & (Vba >= Vca))4;
    R2=L;
    R4=L;
    R1=K;
    R3=K;
    R5=K;
    R6=K;
    end

    if ((Vca >= Vba) & (Vca >= Vcb))5;
    R3=L;
    R4=L;
    R1=K;

```

```

R2=K;
R5=K;
R6=K;
end

if ((Vcb >= Vca) & (Vcb >= Vab))6;
R3=L;
R5=L;
R1=K;
R2=K;
R4=K;
R6=K;
end

else
    R1 = 1300; %300000; % para carga equilibrada ou seja sem retificador
    fazer:
    % R1 1300 e if(t>10) nas chaves de Ri(i de 1 a 6 ) e de RC
        R2 = R1;
        R3 = R1;
        R4 = R1;
        R5 = R1;
        R6 = R1;
    end

    if (t > 2.5)%2.1
        RC=1300;
    else
        RC=300000;
    end

    R(1,1)=Ra;
    R(2,2)=Rb;
    R(3,3)=Rc;
    R(4,4)=R1;
    R(5,5)=R4;
    R(6,6)=R2;
    R(7,7)=R5;
    R(8,8)=R3;
    R(9,9)=R6;
    R(10,10)=RC;

    function Lij=getLij(Pos)
    %% Cálcula a matriz de indutancia do rotor
    global Lss Kss Lss2 h1 alpha Lsr KsD KsQ KsF KDD KFD KQQ KFF
    %Inicializa matriz Lij
    Lij = zeros(6,6);
    Lij(1,1) = Lss*sum(Kss) + Lss2*sum(Kss.*cos(2*h1*Pos)); %Laah
    Lij(1,2)=Lss*sum(Kss.*cos(h1*alpha))+Lss2*sum(Kss.*cos(h1*(2*Pos+alpha))); %Labh
    Lij(1,3)=Lss*sum(Kss.*cos(h1*alpha))+Lss2*sum(Kss.*cos(h1*(2*Pos+alpha))); %Lach
    Lij(1,4)=Lsr*sum(KsD.*cos(h1*Pos)); %LaAh
    Lij(1,5)=-Lsr*sum(KsQ.*(sin(h1*Pos)).*(sin(h1*3.1416/2))); %LaBh
    Lij(1,6)=Lsr*sum(KsF.*cos(h1*Pos)); %LaCh
    Lij(2,1)=Lij(1,2); %Lbah
    Lij(2,2)=Lss*sum(Kss)+Lss2*sum(Kss.*cos(h1*(2*Pos+alpha))); %Lbbh
    Lij(2,3)=Lss*sum(Kss.*cos(h1*alpha))+Lss2*sum(Kss.*cos(2*h1*Pos)); %Lbch
    Lij(2,4)=Lsr*sum(KsD.*cos(h1*(Pos-alpha))); %LbAh
    Lij(2,5)=-Lsr*sum(KsQ.*(sin(h1*(Pos-alpha))).*(sin(h1*3.1416/2))); %LbBh

```

```

Lij(2,6)=Lsr*sum(KsF.*cos(h1*(Pos-alpha))); %LbCh
Lij(3,1)=Lij(1,3);
%Lcah
Lij(3,2)=Lij(2,3);
%Lcbh
Lij(3,3)=Lss*sum(Kss)+Lss2*sum(Kss.*cos(h1*(2*Pos-alpha)));
%Lcch
Lij(3,4)=Lsr*sum(KsD.*cos(h1*(Pos+alpha)));
%LcAh
Lij(3,5)=-Lsr*sum(KsQ.*(sin(h1*(Pos+alpha)).*(sin(h1*3.1416/2))));
%LcBh
Lij(3,6)=Lsr*sum(KsF.*cos(h1*(Pos+alpha)));
%LcCh
Lij(4,1) = Lij(1,4); %LAah
Lij(4,2) = Lij(2,4); %LABh
Lij(4,3) = Lij(3,4); %LACH
Lij(4,4) = Lsr*sum(KDD); %LAAh
Lij(4,5) = 0; %LABh
Lij(4,6) = Lsr*sum(KFD); %LACH
Lij(5,1) = Lij(1,5); %LBah
Lij(5,2) = Lij(2,5); %LBbh
Lij(5,3) = Lij(3,5); %LCch
Lij(5,4) = Lij(4,5); %LBAh
Lij(5,5) = Lsr*sum(KQQ); %LBBh
Lij(5,6) = 0; %LBCh
Lij(6,1) = Lij(1,6); %LCah
Lij(6,2) = Lij(2,6); %LCbh
Lij(6,3) = Lij(3,6); %LCch
Lij(6,4) = Lij(4,6); %LCAh
Lij(6,5) = Lij(5,6); %LCBh
Lij(6,6) = Lsr*sum(KFF); %LCCh

function dLij=getdLij(Pos)
%%Cálcula a matriz derivada da indutância do rotor

global Lss2 h1 Kss alpha Lsr KsD KsQ KsF
dLij = zeros(6,6);
dLij(1,1)=-2*Lss2*sum(h1.*Kss.*sin(2*h1*Pos)); %Laah
dLij(1,2)=-2*Lss2*sum(h1.*Kss.*sin(h1*(2*Pos - alpha))); %Labh
dLij(1,3)=-2*Lss2*sum(h1.*Kss.*sin(h1*(2*Pos + alpha))); %Lach
dLij(1,4)=-Lsr*sum(h1.*KsD.*sin(h1*Pos)); %LaAh
dLij(1,5)=-Lsr*sum(h1.*KsQ.*(cos(h1*Pos)).*(sin(h1*3.1416/2)))); %LaBh
dLij(1,6)=-Lsr*sum(h1.*KsF.*sin(h1*Pos)); %LaCh
dLij(2,1) = dLij(1,2); %Lbah
dLij(2,2) = -2*Lss2*sum(h1.*Kss.*sin(h1*(2*Pos + alpha))); %Lbbh
dLij(2,3) = -2*Lss2*sum(h1.*Kss.*sin(2*h1*Pos)); %Lbch
dLij(2,4) = -Lsr*sum(h1.*KsD.*sin(h1*(Pos - alpha))); %LbAh
dLij(2,5)=-Lsr*sum(h1.*KsQ.*(cos(h1*(Pos-alpha)).*(sin(h1*3.1416/2))));
%LbBh
dLij(2,6) = -Lsr*sum(h1.*KsF.*sin(h1*(Pos - alpha))); %LbC
dLij(3,1) = dLij(1,3); %Lcah
dLij(3,2) = dLij(2,3); %Lcbh
dLij(3,3) = -2*Lss2*sum(h1.*Kss.*sin(h1*(2*Pos - alpha))); %Lcch
dLij(3,4) = -Lsr*sum(h1.*KsD.*sin(h1*(Pos + alpha))); %LcAh
dLij(3,5)=-Lsr*sum(h1.*KsQ.*(cos(h1*(Pos+alpha)).*(sin(h1*3.1416/2))));
%LcBh
dLij(3,6)=-Lsr*sum(h1.*KsF.*sin(h1*(Pos + alpha))); %LcCh
dLij(4,1) = dLij(1,4); %LAah
dLij(4,2) = dLij(2,4); %LABh

```

```

dLij(4,3) = dLij(3,4); %LAch
dLij(5,1) = dLij(1,5); %LBah
dLij(5,2) = dLij(2,5); %LBbh
dLij(5,3) = dLij(3,5); %LCch
dLij(6,1) = dLij(1,6); %LCah
dLij(6,2) = dLij(2,6); %LCbh
dLij(6,3) = dLij(3,6); %LCch

function mostraGraficos(t,ys)
%% recomposição das variáveis de estado
global p Vm wo alpha G TFRG FRG TFSG
ia = ys(:,1);
ib = ys(:,2);
ic = ys(:,3);
iA = ys(:,4);
iB = ys(:,5);
iC = ys(:,6);
w = ys(:,7);
Pos= ys(:,8);
Tcc(length(t))=0;
Tmotor(length(t))=0;
%Calcula Torque motor
V14(length(t))=0;
V24(length(t))=0;
V34(length(t))=0;

for i=1:length(t)
%R=getR(t(i));
%IR = inv(R);
%MG=G+TFRG*IR*FRG;
%IMG=inv(MG);

wi=wo*t(i); %angulo de referencia no instante t
Va(i) = Vm*sin(wi);
%VB=Vm*[sin(wi);sin(wi-alpha);sin(wi+alpha)]; %tensões no instante t
%ER = [ VB ; 0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0 ];
%VVG=IMG*(TFSG*ys(i,1:3)'+TFRG*IR*ER);
%V14(i)=VVG(1)-VVG(4);
%V24(i)=VVG(2)-VVG(4);
%V34(i)=VVG(3)-VVG(4);

I = ys(i,1:6);
%W = ys(i,7);
Tcc(i)=getTorque(t(i));%Calcula torque da turbina
dLij=getdLij(Pos(i));%Inicializa matriz dLijg/dPosg
Tmotor(i)=-(p/4)*I*dLij*I';
%E(i,1:6) = W*dLij*I';
end
save('Dados_GraficosR3');%Salva Workspace em disco para futura inspeção
%tt=t;
%save('algo','V14','V24','V34','tt');
%% Representação gráfica das variáveis de saída
% plot(t,ia,t,ib,t,ic);
% title('Correntes do Estator');
% xlabel('Tempo (s)');
% ylabel('Corrente (kA)');
% grid;
%
% figure;
% plot(t,iA,t,iB,t,iC);

```

```

% title('Correntes do Rotor');
% xlabel('Tempo (s)');
% ylabel('Corrente (kA)');
% grid;
%
% figure;
% plot(t,w*30/pi);
% title('Velocidade do Rotor');
% xlabel('Tempo (s)');
% ylabel('Velocidade (RPM)');
% grid;
%
% figure;
% plot(t,Tcc);
% title('Torque da turbina');
% xlabel('Tempo (s)');
% ylabel('Torque (N.m)');
% grid;
%
% figure;
% plot(t,Tmotor);
% title('Torque Eletromagnético');
% xlabel('Tempo (s)');
% ylabel('Torque (N.m)');
% grid;

function [t,y]=rk3(funcao,t0,tf,passo,y0)

j=1;b=fix((tf-t0)/passo)+1;
y(:,b)=zeros(size(y0));t(b)=0;
y(:,1)=y0;
t(1)=t0;

for ti=(t0+passo):passo:tf
    yi=y(:,j);
    k0=passo*feval(funcao,ti,yi);
    k1=passo*feval(funcao,ti+passo/2, yi+k0/2);
    k2=passo*feval(funcao,ti+passo/2, yi+k1/2);
    k3=passo*feval(funcao,ti+passo, yi+k2);
    j=j+1;
    y(:,j)=y(:,j-1)+(k0+k1*2+k2*2+k3)/6;

    %if (ti> 2.3)%2.1
        %y(6,j)= 20;
    %    %y(5,j)= 0;
    %    %y(4,j)= 0;
    %end
    t(j)=ti;
end.

```



Manoel Berto Alves Nasceu em Bom Conselho, Estado de Pernambuco, Brasil, Graduado em Engenharia Elétrica pela Faculdade de Engenharia São Paulo, Especialização em Sistema Elétrico de Potência, Qualidade de Energia e Automação pela Universidade Federal de Uberlândia (2001), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (2004), com a criação de "Sistema Especialista para Comandos, Controle, Proteção e Supervisão de Usinas e suas Subestações" e doutoramento em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (2011), com a tese "Estudo e análise teórica e experimental do comportamento do gerador síncrono de polos salientes em regime permanente não senoidal". Atualmente é Gestor de Empreendimentos técnicos

no departamento de engenharia da Empresa Metropolitana de Águas e Energia S.A.; Consultor da Empresa MBA Consultoria Automação e Comércio Ltda. Onde desenvolvem nessas Empresas, experiências na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Projetos de Máquinas Elétricas, Sistemas de Medição de Energia Elétrica, Sistemas de Proteção, Sistema de Supervisão, Comandos e Controles, Automação em Geral para equipamentos e sistemas na Área de Energia Elétrica; Pesquisador nas áreas de Máquinas Elétricas, bem como processos e sistemas digitais de comando, controle, supervisão, sincronismo e proteção, e de telecomunicação. Trabalhando atualmente em pesquisas, sendo uma delas, com ênfase em rendimento e vida útil de Máquinas Síncronas, quando trabalhando em ambiente não senoidal e Comando, Controle, supervisão, sincronismo e proteção de Gerador de Indução operando em sistema elétrico interligado.

Manoel Berto Alves

e-mail: mbaalves@terra.com.br