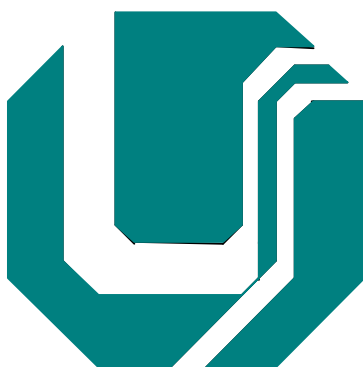


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA - UFU
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS - GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



LUCIO APARECIDO BORBA

ESTUDO DOS HARMÔNICOS ENTRE DIFERENTES
SISTEMAS DE EXCITAÇÃO DE MÁQUINAS SÍNCRONAS

UBERLÂNDIA
ABRIL - 2011

LUCIO APARECIDO BORBA

**ESTUDO DOS HARMÔNICOS ENTRE DIFERENTES
SISTEMAS DE EXCITAÇÃO DE MÁQUINAS SÍNCRONAS.**

Dissertação apresentada por Lucio
Aparecido Borba à Universidade
Federal de Uberlândia - UFU, como
parte dos requisitos para obtenção
do título de Mestre em Ciências.
Aprovado em 14/04/2011

Prof. Dr. Luciano Martins Neto: Orientador
Prof. Dr. Décio Bispo – UFU
Prof .Dr. Alexandre Rocco - UNISANTA

UBERLÂNDIA

ABRIL - 2011

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

LUCIO APARECIDO BORBA

ESTUDO DOS HARMÔNICOS ENTRE DIFERENTES
SISTEMAS DE EXCITAÇÃO DE MÁQUINAS SÍNCRONAS

Dissertação apresentada por Lucio Aparecido Borba à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos para obtenção do título de 'Mestre em Ciências'.

Prof. Dr Luciano Martins Neto
Orientador

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

UBERLÂNDIA

ABRIL - 2011

Dedico este trabalho à minha, esposa Rosângela, aos meus filhos, Renato, Fábio, Fernanda e Luis Augusto, pelo apoio, incentivo e confiança, e a minha mãe Carmelita e a meu pai Luiz (póstuma) que sempre me encorajaram e proporcionaram-me condições para estudos.

Agradecimentos

A Deus, pela graça da vida em minha família, com paz e harmonia e pela perseverança no sentido de cuidar dos meus.

Ao Professor Luciano Martins Neto pela generosidade da orientação acadêmica neste trabalho.

Aos professores do curso de especialização em sistema elétrico de potência, pela disposição em ministrar as diversas disciplinas do curso.

Ao engenheiro, Manoel Berto Alves pelo incentivo e orientação durante toda a elaboração do trabalho.

Aos amigos, Álvaro Martins, Edval Delbone, Ester da Conceição Silveira, Francisco Carlos de Siqueira, João Marcos Brito da Silva e Jorge Luiz Rangel Machado, pelo companheirismo, apoio e incentivo durante o curso de especialização.

Aos engenheiros André Gontijo e Luis Cláudio de Matos pela colaboração nas simulações e medições realizadas.

A empresa EMAE, pela oportunidade de trabalho e desenvolvimento intelectual, nas pessoas do Gerente do Departamento de Engenharia, Fernando José Moliterno e do Diretor-Presidente Antonio Bolognesi.

É graça divina começar bem.
Graça maior é persistir na caminhada certa.
Mas a graça das graças é não desistir nunca.
Autor: Dom Hélder Câmara.

RESUMO

Neste trabalho são estudadas inicialmente, através de simulações computacionais e medições em campo, as distorções harmônicas geradas por diferentes configurações de sistemas de excitações utilizados em máquinas síncronas atualmente.

A seguir, é proposto e estudado um sistema com uma configuração que melhor atenda as atuais exigências da qualidade de energia gerada, quanto ao critério de distorções harmônicas em sistemas elétricos de potência.

Como base para análise de cada sistema, este trabalho escolheu duas usinas da empresa “EMAE - Empresa Metropolitana de Águas e Energia S/A”, concessionária de energia elétrica situada na região metropolitana da cidade de São Paulo, que busca além de fornecer energia de boa qualidade a seus clientes, verificar quais as interferências e conseqüências dos harmônicos no rendimento e na vida útil de suas máquinas síncronas.

Palavras chaves: Distorções harmônicas; sistemas de excitação; máquinas síncronas; qualidade de energia.

ABSTRACT

This work initially studied through computer simulations and field measurements, harmonic distortions generated by different system configurations of excitations used in synchronous machines today.

The following is proposed and studied a system with a configuration that best meets the current requirements of the quality of generated energy as the criterion for harmonic distortions in electric power systems..

As base for analysis of each system, this work chooses two plants of the company EMAE – Empresa Metropolitana de Águas e Energia S/A, An electrical Company located in the metropolitan area of the city of São Paulo - Brazil, that seek besides supplying energy of good quality to their customers, to check which the interferences and consequences of the harmonic signals in the efficiency and the lifetime of their synchronous machines.

Keywords: Distortion harmonics excitation systems, synchronous machines, power quality.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	1
1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	1
1.2 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	3
MÁQUINAS SÍNCRONAS	5
2.1 INTRODUÇÃO	5
2.2 DETALHES CONSTRUTIVOS.....	9
2.2.1 Carcaça	9
2.2.2 Estator	10
2.2.3 Rotor.....	13
2.2.3.1 Rotores de pólos lisos:.....	13
2.2.3.2 Rotores de pólos salientes:.....	13
2.2.3.3 Enrolamento amortecedor	15
2.2.3.4 Ensaios	15
SISTEMAS DE EXCITAÇÃO	18
3.1 INTRODUÇÃO	18
3.2 SISTEMA COM EXCITATRIZ DE CORRENTE CONTÍNUA AUTO-EXCITADA.....	19
3.3 SISTEMA COM EXCITATRIZ DE CAMPO ROTATIVO E RETIFICADORES ESTÁTICOS ..	20
3.4 SISTEMA TIPO BRUSHLESS - SEM ESCOVAS.....	22
3.5 SISTEMA COM EXCITAÇÃO ESTÁTICA A TIRISTORES.....	23
3.6 CONCLUSÃO.....	25
ESTUDO DOS SISTEMAS EM USO	26
4.1 DESCRIÇÃO DOS BLOCOS DE MODELOS.....	26

4.1.1	Blocos utilizados.....	26
4.1.1.1	<i>Máquina síncrona</i>	26
4.1.1.2	<i>Excitatriz DC</i>	27
4.1.1.3	Transformador elevador.....	28
4.1.1.4	Ponte retificadora controlada.....	29
4.1.1.5	Controlador automático de tensão.....	29
4.1.1.6	Elementos auxiliares de controle e cargas	30
4.2	SIMULAÇÃO DOS MODELOS	31
4.2.1	Modelo de excitação com excitatriz sem regulação automática de tensão 31	
4.2.1.1	<i>Descrição</i>	31
4.2.1.2	<i>Resultados obtidos na simulação</i>	34
4.2.2	Modelo de excitação sem excitatriz, com regulação automática de tensão alimentado em CA.....	37
4.2.2.1	<i>Descrição</i>	37
4.2.2.2	<i>Resultados obtidos na simulação</i>	41
4.2.3	Modelo de excitação com excitatriz e regulação automática de tensão alimentado em CA	44
4.2.3.1	<i>Descrição do sistema</i>	44
4.2.3.2	<i>Resultados obtidos na simulação</i>	47
4.2.4	Análise dos resultados das simulações.....	50
4.3	MEDIÇÕES EM CAMPO DOS SISTEMAS	51
4.3.1	Sistema de excitação com Excitatriz sem AVR, auto excitada.....	52
4.3.1.1	<i>Descrição do sistema</i>	52
4.3.1.2	<i>Medições Realizadas</i>	54
4.3.2	Sistema de excitação com AVR, sem excitatriz e alimentação em CA .	56
4.3.2.1	<i>Descrição do sistema</i>	56

4.3.2.2	<i>Medições Realizadas</i>	58
4.3.3	Sistema de Excitação com AVR, excitatriz e realimentação em CA.....	60
4.3.3.1	<i>Descrição do sistema</i>	60
4.3.3.2	<i>Medições Realizadas</i>	61
4.3.4	Análise dos resultados das medições	63
4.4	CONCLUSÃO.....	64
	ESTUDO DO SISTEMA PROPOSTO.....	65
5.1	INTRODUÇÃO	65
5.2	SIMULAÇÕES	65
5.2.1	Descrição do sistema	65
5.2.2	Simulações do modelo	66
5.2.3	Resultados obtidos na simulação	68
5.2.4	Análise dos resultados das simulações.....	71
5.3	MEDIÇÕES REALIZADAS	72
5.3.1	Análise dos resultados das medições	75
	CONCLUSÃO	76
6.1	CONCLUSÃO.....	76
6.2	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	77
6.3	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	77
6.4	PUBLICAÇÕES	78
	HARMÔNICOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS	79
A.1.	DESCRIÇÃO.....	79
A.2.	DISTORÇÕES HARMÔNICAS	79
A.3.	DISTORÇÕES HARMÔNICAS INDIVIDUAL, TOTAIS E VALOR EFICAZ	81
A.4.	HARMÔNICOS EM MÁQUINAS SÍNCRONAS	82

	PROCEDIMENTOS DE REDES	84
A.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	84
B.	DEFINIÇÃO DO INDICADOR.....	85
C.	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO	86
	ANÁLISE ECONÔMICA / FINANCEIRA	88
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Gerador síncrono com excitatriz acoplada ao eixo.....	5
Figura 2.2 – Rotor de uma máquina síncrona.....	5
Figura 2.3 – Estator de uma máquina síncrona.....	7
Figura 2.4 – Máquina Síncrona de pólos lisos.....	8
Figura 2.5 – Máquina Síncrona de pólos salientes.....	8
Figura 2.6 – Carcaça de uma máquina síncrona.....	10
Figura 2.7 – Chapeamento do núcleo estátorico.....	10
Figura 2.8- Montagem da bobinas nas ranhuras do estator.....	12
Figura 2.9- Rotor de pólos lisos.....	13
Figura 2.10- Fabricação de um pólo.....	14
Figura 2.11- Rotores de pólos salientes.....	14
Figura 2.12- Rotor com enrolamento amortecedor.....	15
Figura 3.1 – Configuração típica de um sistema de excitação.....	18
Figura 3.2 - Excitatriz principal com controle do reostato de campo.....	19
Figura 3.3 - Excitatriz de Campo Rotativo com Retificadores Estáticos.....	21
Figura 3.4 – Excitação tipo <i>Brushlles</i>	22
Figura 3.5 – Excitação com ponte retificadora a tiristor.....	24
Figura 4.1 - Modelo de máquina síncrona de pólos salientes.....	27
Figura 4.2 - Modelo de Excitariz	27
Figura 4.3 - Modelo de Transformador.....	28
Figura -4.4 – Modelo de ponte retificadora controlada de tensão.....	29
Figura 4.5 – Controlador automático de tensão.....	30
Figura 4.6- Modelos de elementos de controle e de cargas do simulink.....	30
Figura 4.7 – Esquema implementado no Matlab para simulação do sistema.....	33
Figura 4.8 – Forma de onda da tensão do sistema com excitatriz sem AVR, gerador em vazio..	34
Figura 4.9 – Forma de onda da tensão do sistema com excitatriz sem AVR, gerador com carga.....	36
Figura 4.10 - Esquema utilizado no Matlab para simulação do sistema sem excitatriz com AVR.....	40
Figura 4.11 – Forma de onda da tensão do sistema sem excitatriz com AVR, gerador em vazio.....	41
Figura 4.12 – Forma de onda da tensão do sistema sem excitatriz com AVR, gerador com carga.....	43
Figura 4.13 – Esquema implementado para simulação do sistema.....	46
Figura 4.14 – Forma de onda da tensão do sistema com excitatriz e AVR, gerador em vazio....	47
Figura 4.15 – Forma de onda da tensão do sistema com excitatriz e AVR, gerador com carga...	49
Figura 4.16 - Sistema de excitação com Excitatriz sem AVR, auto excitada.....	52

Figura 4.17 - Sistema de Excitação sem AVR.....	54
Figura 4.18 – Gerador desconectado do sistema elétrico.....	55
Figura 4.19 – Gerador conectado ao sistema elétrico.....	56
Figura 4.20 - Sistema de excitação com AVR, sem excitatriz e alimentação em CA.....	57
Figura 4.21 – Esquema de excitação com AVR a tiristores, sem excitatriz com realimentação CA.....	57
Figura 4.22 – Gerador desconectado do sistema elétrico.....	58
Figura 4.23 – Gerador conectado ao sistema elétrico.....	59
Figura 4.24 - Sistema de Excitação com AVR, excitatriz e realimentação em CA.....	60
Figura 4.31 – Sistema de excitação com excitatriz, AVR e transformador de excitação alimentado em CA.....	64
Figura 4.32 – Gerador desconectado do sistema elétrico.....	65
Figura 4.33 – Gerador conectado ao sistema elétrico.....	66
Figura 5.1 – Esquema implementado para o sistema com excitatriz e AVR alimentado em CC..	70
Figura 5.2 – Forma de onda da tensão do sistema com excitatriz e AVR, gerador em vazio.....	71
Figura 5.3 – Gráfico do FFT do sistema com excitatriz e AVR, gerador sem carga.....	72
Figura 5.4 - Forma de onda da tensão do sistema com excitatriz e AVR, gerador com carga.....	73
Figura 5.5 – Gráfico do FFT do sistema com excitatriz e AVR, gerador com carga.....	74
Figura 5.6- Sistema de excitação com excitatriz e AVR alimentado em CC.....	76
Figura 5.7 – Sistema de excitação com excitatriz e AVR alimentado em CC.....	77
Figura 5.8 – Gerador desconectado do sistema elétrico.....	77
Figura 5.9 – Gerador conectado ao sistema elétrico.....	78
Figura A.2 – Decomposição de onda distorcida em sua série.....	83
Figura C.1- Sistema 1,com transformador de excitação, ponte de tiristores e regulador de tensão.....	91
Figura C.2 – Sistema 2, com excitatriz e regulador de tensão.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Parâmetros utilizados para o gerador do sistema de excitação com excitatriz, sem AVR, auto excitada.....	34
Tabela 4.2– Parâmetros utilizados para o gerador do sistema de excitação sem excitatriz, com AVR alimentado em CA.....	39
Tabela 4.3 – Parâmetros utilizados para o gerador do sistema de excitação com excitatriz e AVR alimentado em CA.....	45
Tabela 4.4 - Resumo dos valores de DHTv para cada sistema de excitação.....	50
Tabela 4.5 - Resumo dos valores de DHTv para cada sistema.....	63
Tabela 5.1 – Parâmetros utilizados para o gerador do sistema de excitação com excitatriz e AVR alimentado em CC.....	66
Tabela 5.2 – Resumo dos valores das DHTv do sistema de excitação.....	74
Tabela 6.1 - Comparação dos valores simulados e medidos nos sistemas de excitação	76
Tabela B.1 – Limites globais inferiores de tensão em porcentagem da tensão fundamental.....	86
Tabela B.2 – Limites individuais em porcentagem da tensão fundamental.....	87
Tabela C - Comparação dos preços dos sistemas 1 e 2.....	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

➤	a	Fase a do estator
➤	b	Fase b do estator
➤	c	Fase c do estator
➤	A	Fase A do rotor
➤	CA	Corrente Alternada
➤	CC	Corrente Contínua
➤	AVR	<i>Automatic Voltage Regulator</i>
➤	B	Fase B do rotor
➤	C	Fase C do rotor
➤	(θ)	Ângulo elétrico medido a partir do eixo magnético do rotor
➤	B(θ)	Densidade de indução magnética
➤	B_m	Densidade de indução magnética máxima
➤	e	Tensão induzida no estator
➤	f	Frequência
➤	p	Número de pólos
➤	Φ	Fluxo produzido pelo rotor
➤	N	Número total de espiras enlaçada pelo fluxo
➤	λ	Fluxo concatenado
➤	n_s	Velocidade síncrona

➤	r	Raio da superfície interna do estator
➤	L	Comprimento axial do estator
➤	α	Ângulo entre o eixo magnético da fase e do rotor
➤	ω	Velocidade angular do rotor
➤	t	Tempo
➤	$E_{\max}$	Tensão máxima induzida
➤	E_{ef}	Tensão eficaz induzida
➤	M_f	Indutância mútua entre os enrolamentos do campo e da armadura
➤	L_f	Indutância do enrolamento do campo
➤	r_f	Resistência do enrolamento do campo
➤	R	Resistência do reostato de campo
➤	Φ_F	Fluxo magnético que enlaça o enrolamento de campo
➤	Φ_{ef}	Fluxo magnético no entreferro da excitatriz
➤	V_{fd}	Tensão no campo da máquina
➤	V_R	Tensão de entrada do sistema de excitação
➤	V_{CC}	Tensão em corrente contínua
➤	V_{CA}	Tensão em corrente alternada
➤	V_{ref}	Tensão de referência
➤	E_{fd}	Tensão de saída da excitatriz

- **R_{enf}** Inclinação da curva de saturação da excitatriz
- **DHI_V** Distorção Harmônica Individual de Tensão
- **V_h** Valor eficaz da tensão de ordem harmônica “h”
- **V_1** Valor eficaz da tensão fundamental, 60 Hz no Brasil
- **DHI_I** Distorção Harmônica Individual de corrente
- **I_h** Valor eficaz da corrente de ordem harmônica “h”
- **I_1** Valor eficaz da corrente fundamental, 60 Hz no Brasil
- **DHT_V** Distorção Harmônica Total de Tensão
- **DHT_I** Distorção Harmônica Total de Corrente
- **TP** Transformador de Potencial de Corrente
- **TC** Transformador de Corrente
- **ANEEL** Agência Nacional de Energia elétrica
- **ONS** Operador Nacional do Sistema Elétrico
- **EMAE** Empresa Metropolitana de Águas e Energia S/A

1.1 Objetivos do trabalho

Foram desenvolvidos estudos em diferentes modelos e configurações de sistemas de excitação empregados nas máquinas síncronas, com os objetivos de:

- Estabelecer uma nova configuração, onde as interferências das distorções harmônicas geradas pela eletrônica de potência utilizada sejam as menores possíveis, e que estejam dentro das normas para as cargas geradoras de distorções harmônicas;

- Efetuar simulação computacional das diversas configurações, e apresentar comparação dos resultados obtidos com os valores em ensaios de campo com as máquinas síncronas de algumas usinas da EMAE (Empresa Metropolitana de Águas e Energia S.A..

1.2 Considerações iniciais

Nos últimos anos, tanto as centrais elétricas mais antigas como as mais novas, passaram por processos de remodelação e reforma com a substituição de seus sistemas de controle, proteção e supervisão.

Dentre os fatores que motivaram tais processos destacam-se:

- O obsolescência;
- As dificuldades nos “*retro-fits*”, que refletem nas manutenções dos sistemas convencionais;
- As exigências do setor elétrico na utilização de controles mais eficientes e rápidos.

Esses processos tiveram como consequência o grande avanço da aplicação da eletrônica aos sistemas elétricos de potência. Os sistemas, antes eletromecânicos ou eletroeletrônicos, começaram a ser substituídos por equipamentos que empregam a eletrônica de potência em conjunto com a eletrônica digital.

Entre os sistemas remodelados se destaca o de excitação (alimentação do campo das máquinas síncronas), o qual avançou da excitatriz de corrente contínua auto-excitada para a estática, com reguladores automáticos de tensão fundamentados na eletrônica de potência.

Nos novos sistemas a potência necessária para a excitação das máquinas síncronas é obtida através de transformador conectado aos terminais de saída das máquinas, o secundário desse transformador alimenta os painéis com retificadores de sinais e reguladores de tensão compostos por: diodos, tiristores, capacitores e filtros, onde é gerado o sinal alternado, convertido em sinal contínuo e executado o controle da excitação da máquina. [19]

Vários componentes da eletrônica de potência presentes nos modernos sistemas de excitação formam circuitos não lineares, isto é, apresentam correntes não senoidais, mesmo quando alimentados por uma tensão senoidal geram componentes harmônicos nas redes elétricas. Os harmônicos influenciam negativamente na qualidade da energia gerada, não só ao sistema elétrico, mas também às próprias máquinas síncronas e aos demais equipamentos conectados ao mesmo barramento. [18]

O órgão regulador do sistema elétrico brasileiro, ANEEL, bem como o Operador Nacional do Sistema – ONS, estão cada vez mais exigentes quanto à qualidade da energia fornecida aos consumidores. Os sistemas de geração de

energia elétrica podem controlar apenas a qualidade da tensão gerada. A fiscalização dos demais componentes fica a cargo de outros órgãos envolvidos no sistema elétrico.

1.3 Organização do trabalho

A fim de alcançar os objetivos citados, o trabalho foi realizado e está descrito em etapas, organizado em seis capítulos e três apêndices, como segue:

O capítulo II aborda uma introdução teórica sobre a máquina síncrona, com os tipos de rotores, seus sistemas de excitação, suas aplicações. É apresentada também uma descrição de detalhes construtivos da máquina síncrona.

No capítulo III são descritos os modelos e tipos de ligações das configurações de sistemas de excitação utilizados em máquinas síncronas e a caracterização da evolução tecnológica ocorrida.

No capítulo IV são apresentados os resultados obtidos nos estudos dos sistemas de excitação em uso nas PCHs objeto desse projeto. Utiliza-se como metodologia de trabalho a realização de simulações computacionais e medições em campo.

No capítulo V são mostrados os estudos de um sistema proposto como solução para redução das distorções harmônicas geradas pelos sistemas de excitação, e para tal, utiliza-se a mesma metodologia de trabalho do capítulo anterior.

No capítulo VI são feitas as conclusões do trabalho, vantagens e desvantagens, bem como sugestões para trabalhos futuros derivados dessa dissertação.

No apêndice I, é apresentada uma introdução teórica sobre os componentes harmônicos em sistemas elétricos com sua geração e influência nas cargas e equipamentos dos sistemas elétricos.

No apêndice II são apresentadas as recomendações do ONS para os níveis de distorções harmônicas em todo o país.

No apêndice III é feita a análise econômica com valores obtidos de fabricantes de sistemas de excitação.

2.1 Introdução

As máquinas síncronas são máquinas de corrente alternada onde a frequência da tensão induzida e a velocidade possuem uma relação constante, e elas constituem uma das famílias de máquinas elétricas mais importantes. [11]



Figura 2.1 – Gerador síncrono com excitatriz acoplada ao eixo
Fonte: Usina Hidrelétrica de Rasgão - EMAE

Os geradores síncronos produzem a maior parte da energia elétrica consumida no mundo. Os motores síncronos, por sua vez, são raramente

utilizados, no caso específico da carga mecânica exigir velocidade rigidamente constante, ou quando em vazio, operando no controle de potência [11]

O rotor das máquinas síncronas, Figura 2.2, é constituído por chapas laminadas de material magnético, justapostas, que formam os pólos magnéticos e um enrolamento alimentado com corrente contínua. No rotor estabelece-se o campo magnético principal na máquina, produzido pela corrente contínua proveniente do sistema conhecido por excitação.



Figura 2.2 – Rotor de uma máquina síncrona

Fonte: Usina Porto Góes - EMAE

A estrutura do estator, Figura 2.3, também é composta de chapas laminadas de materiais magnéticos dispostas de modo a formar ranhuras axiais onde são alojadas as bobinas que constituem o enrolamento “estatórico”. Nestes enrolamentos, geralmente trifásicos, são induzidas as tensões quando o campo magnético principal se movimenta com o rotor. [7]

O estator possui características magnéticas de alta permeabilidade, estabelecendo um caminho magnético de baixa relutância para o fluxo, e conseqüentemente diminuindo o fluxo disperso. [7].

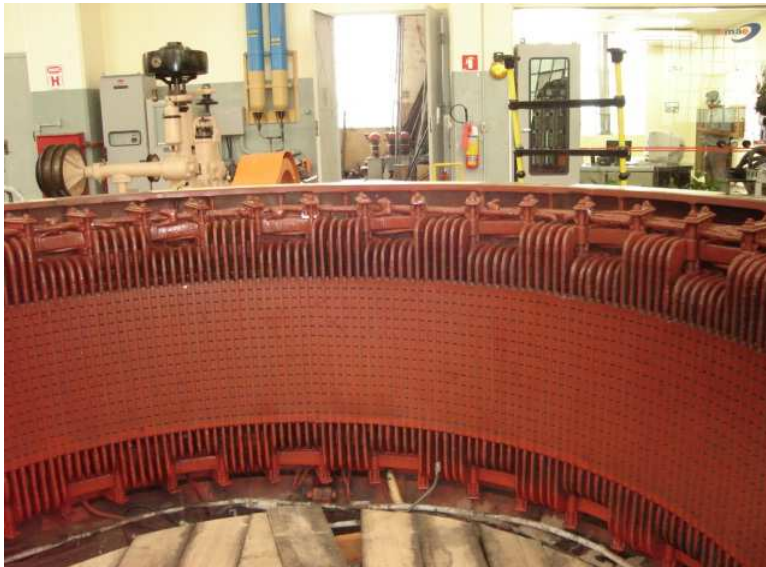


Figura 2.3 – Estator de uma Máquina Síncrona

Fonte: Usina Porto Góes - EMAE

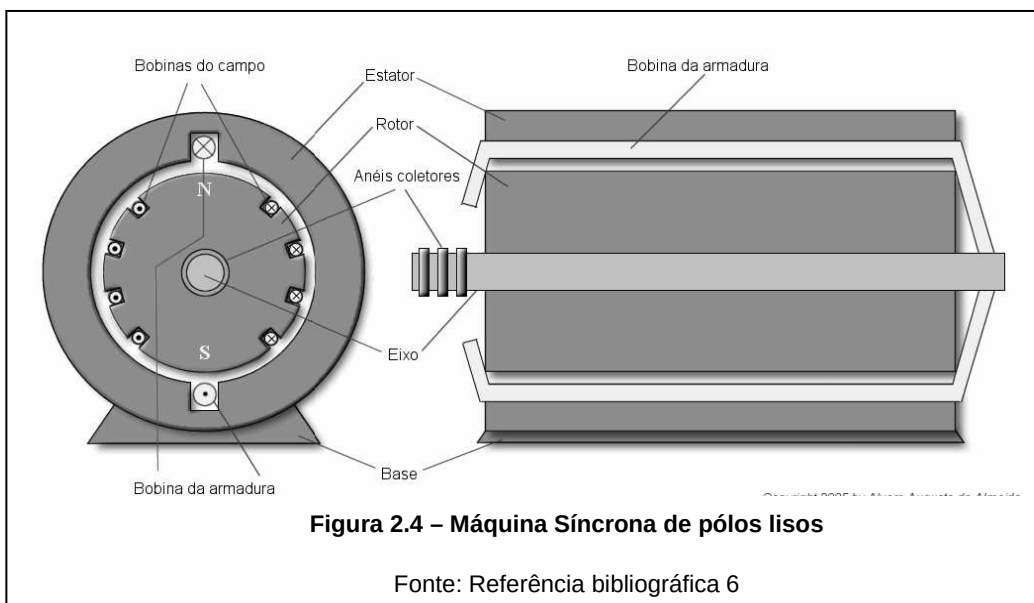
A velocidade de uma máquina síncrona é determinada pelo número de pólos e pela frequência, isto é:

$$\eta_s(\text{rpm}) = 120 \frac{f(\text{Hz})}{P}.$$

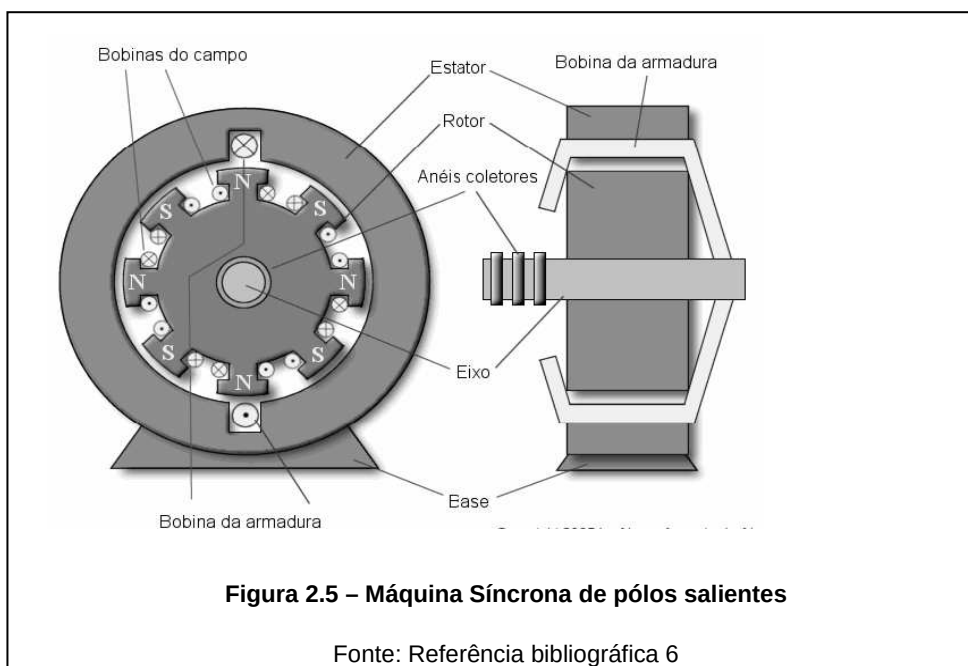
Como se tem a frequência, “f”, constante, e o número de pólos também, a máquina síncrona opera com velocidade constante.

Existem dois tipos básicos de rotores: pólos salientes e lisos. Essas diferenças levam a modelos equivalentes diferentes. No entanto, o princípio de funcionamento é o mesmo.

Os rotores de pólos lisos possuem maior faixa de aplicação em turbo alternadores, onde o número de pólos estão entre 2 a 4. Isto se deve ao fato dos rotores de pólos lisos serem mais robustos, o que possibilita às máquinas o trabalho em altas rotações (3600 e 1800 rpm). [19]



Os rotores de pólos salientes são construídos com número de pólos igual ou superior a 4, e são aplicados nas máquinas que trabalham com baixa rotação, como por exemplo em geradores de usinas hidroelétricas. Assim, a escolha do número de pólos é feita em função da rotação mais apropriada para máquina. [19]



2.2 Detalhes Construtivos

Complementa-se a conceituação da máquina síncrona através de uma descrição mais detalhada de seus elementos construtivos, com suas principais características.

Os fabricantes nacionais de máquinas síncronas projetam, fabricam e testam as máquinas segundo as normas ABNT, IEC e DIN. Especificamente pode-se citar:[21]

- VDE 0530 - Maquinas Elétricas Girantes (Especificação e Características de Ensaio);
- NBR 5117 - Maquinas Síncronas (Especificação);
- NBR 5052 - Maquinas Síncronas (Método de Ensaio).

2.2.1 Carcaça

Tem como função principal apoiar e proteger o máquina, também é onde o pacote de chapas e enrolamentos do estator está alojado. Podem ser construídas nos tipos horizontal e vertical e com grau de proteção de acordo com as necessidades do ambiente. Construída em chapas e perfis de aço soldadas, forma um conjunto sólido e robusto que é a base estrutural da máquina.

Atualmente, os melhores construtores aplicam ao conjunto da carcaça um tratamento térmico de normalização, caracterizado pelo aquecimento acima da zona crítica e por equalização nesta temperatura seguida de resfriamento uniforme ao ar, para alívio de tensões provocadas pelas soldas. Tal construção proporciona excelente rigidez estrutural de maneira a suportar esforços mecânicos provenientes de eventuais curtos-circuitos e baixas vibrações, o que capacita a máquina a atender as mais severas solicitações. [21]



Figura 2.6 – Carcaça de uma máquina síncrona [15]

2.2.2 Estator

Constituído por um pacote laminado de chapas de aço silício de alta qualidade, com ranhuras para alojar o enrolamento do estator, onde as correntes alternadas criam o campo magnético girante. [7]



Figura 2.7- Chapeamento do núcleo estatórico
Fonte: site- <http://alvaug.multiply.com/photos/album/2/2>

Geralmente o enrolamento do estator consiste de bobinas pré-formadas inseridas nas ranhuras do estator e devidamente conectadas. Quando construídas para baixa tensão as bobinas do estator são formadas de fios com seção circular e esmaltados; as ranhuras do estator são, neste caso, do tipo semi-abertas. No caso de enrolamentos de alta tensão os condutores são de seção retangular e as bobinas recebem uma camada extra de isolação com material a base de mica e as ranhuras são do tipo aberta [7]

Para assegurar resistência contra forças centrífugas e igualdade em tamanho, forma e peso à todas as bobinas, a maioria dos enrolamentos da armadura são de dupla camada, ou seja, dois lados de bobina são inseridos em cada ranhura [19]

Quase sempre, as bobinas cobrem 180° elétricos, ou seja, vão do centro de um pólo até o centro de um outro pólo de polaridade oposta, fisicamente adjacentes. Estas são chamadas bobinas de passo inteiro. Pode-se ter também estator onde as bobinas são de passo fracionário, ou seja, abrangem menos de 180° elétricos. Este tipo de bobina além de economizar o uso de cobre na fabricação das máquinas, reduz as harmônicas da força eletromotriz, “fem”, induzida nas bobinas do estator [6]. Devido a utilização desse esquema de construção surge o fator de passo “ K_p ”, que depende do ângulo elétrico abrangido pela bobina, devendo ser considerado no cálculo da tensão induzida.

Outro fator construtivo da máquina é a distribuição das bobinas nas ranhuras do estator em relação aos pólos. Elas podem estar com todos os lados de bobina de uma fase concentradas em uma única ranhura sob um dado pólo, caracterizando o enrolamento concentrado, ou quando as ranhuras são

distribuídas uniformemente em torno da armadura, e assim caracterizar o enrolamento distribuído. Essas características são quantificadas pelo fator de distribuição, " K_d ". [6]

O dois fatores, " K_p " e " K_d ", são considerados no cálculo da tensão gerada em cada fase da máquina síncrona. A utilização de máquinas com enrolamento distribuído e bobina de passo fracionário é a mais comum entre os fabricantes de máquinas síncronas, com o objetivo de obter reduções consideráveis nos harmônicos da máquina.



Figura 2.8- Montagem da bobinas nas ranhuras do estator
Fonte: site:www.nishi.com.br

Conectando-se as bobinas colocadas em todas as ranhuras do estator em série tem-se um enrolamento monofásico. Para ter-se o enrolamento bifásico, conecta-se dois enrolamentos em série, separados e isolados entre si, e aloja-os nas ranhuras de forma que eles fiquem fisicamente separados. O enrolamento trifásico é construído de forma similar. [6]

2.2.3 Rotor

Assim como estator, o rotor é formado de chapas laminadas de aço silício, justapostas, e que em geral, são do mesmo material do estator. Construtivamente existem dois tipos básicos de rotores:

2.2.3.1 Rotores de pólos lisos:

Nesse tipo de rotor, o enrolamento do campo é alojado em ranhuras construídas sobre a sua própria superfície. A alta velocidade de rotação produz uma alta força centrífuga, a qual impõe um limite superior ao diâmetro do rotor.

Rotores com pólos lisos são mais robustos, e mais aptos a trabalharem em altas rotações (3600 e 1800 rpm).[19]



Figura 2.9 - Rotor de pólos lisos
Fonte: Apresentação DT-5 WEG

2.2.3.2 Rotores de pólos salientes:

Nos rotores de polos salientes os enrolamentos de campo não são construídos na superfície do rotor, eles são montados em sapatas polares, formando os polos, e são fixadas em ranhuras do bloco do rotor, formando saliências. Os aspecto final é bastante compacto, conforme mostrado na Figura.2.1



Figura 2.10 Fabricação de um pólo
Fonte: Apresentação DT-5 WEG

Determina-se o número de pólos pela rotação mais apropriada para a máquina trabalhar. Nas turbinas hidráulicas, por exemplo que trabalham com baixa rotação, tem-se os geradores com alto número de pólos.



Figura 2.11- Rotores de pólos salientes
Fonte: Apresentação DT-5 WEG

2.2.3.3 Enrolamento amortecedor

Em certas máquinas síncronas , além do enrolamento de campo, o rotor pode conter um outro enrolamento chamado de enrolamento amortecedor, alojado em ranhuras semi-abertas e de formato circular sobre a superfície do rotor.[6]

Sua função é amortecer oscilações transitórias, como uma variação brusca de carga, alterações súbitas de tensão, e variações de velocidade, a fim de manter uma maior estabilidade à máquina. Somente na ocorrência de transitórios é que surge tensão induzida neste enrolamento, e conseqüentemente corrente.

Em motores síncronos ele pode atuar como dispositivo de arranque, como atua o enrolamento em gaiola de esquilo dos motores de indução. Neste caso o enrolamento é chamado de enrolamento de partida, e a partida do motor é chamada de partida assíncrona. [3]



Figura 2.12- Rotor com enrolamento amortecedor [16]

2.2.3.4 Ensaios

A seguir lista-se os ensaios normais que geralmente são realizados na máquina. Os ensaios são agrupados em ensaios de rotina, ensaios de tipo e ensaios especiais, realizados conforme normas VDE 530 e NBR 5052. Outros

ensaios não citados poderão ser realizados mediante consulta prévia e acordo entre as partes interessadas.[21]

Ensaio de Rotina:

- Resistência ôhmica dos enrolamentos, a frio;
- Resistência do Isolamento;
- Tensão Elétrica Aplicada ao Dielétrico;
- Seqüência e Equilíbrio de Fases;
- Saturação em Vazio;
- Em vazio com excitação própria (regulador de tensão);
- Curto-Circuito Trifásico Permanente.

Ensaio de Tipo:

- Todos os Ensaio de Rotina;
- Elevação de temperatura (em curto e vazio);
- Sobrevelocidade;
- Reatância sub-transitória de eixo direto (X_d'').

Ensaio Especial:

- Relação de Curto Circuito Trifásico Permanente;
- Manutenção da Corrente em Curto-Circuito;
- Desempenho do Regulador de Tensão;
- Distorção Harmônica;
- Rendimento;
- Vibração;
- Nível de Ruído;
- Determinação do fator de Interferência Telefônica;

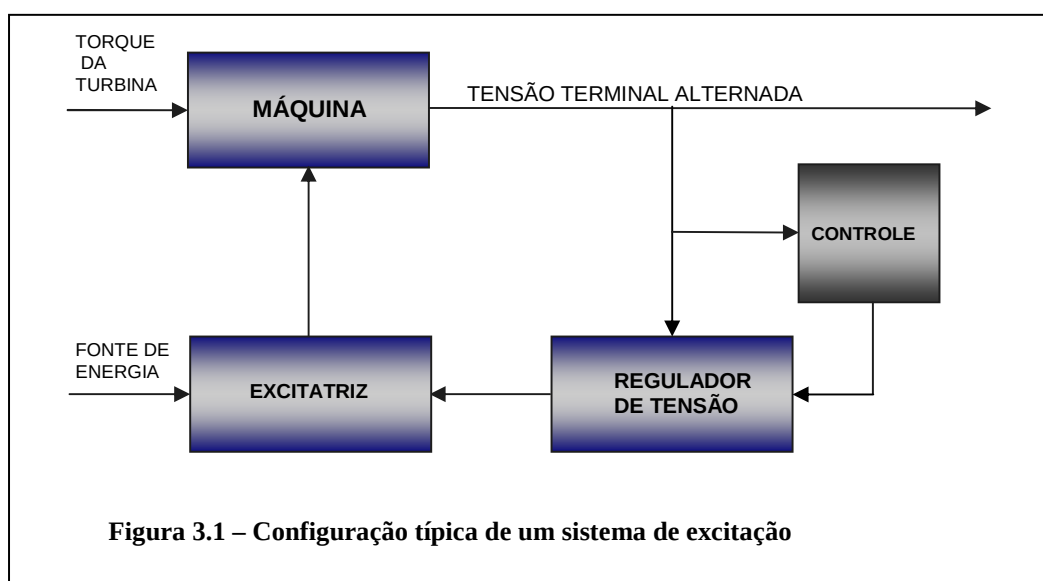
- Determinação das características em "V" de máquinas síncronas.

Os ensaios são limitados pela capacidade de potência do laboratório de ensaios. Para potências superiores a capacidade do laboratório, alguns ensaios poderão ser realizados com potência reduzida e seus resultados extrapolados conforme previsto nas normas de ensaios.

3.1 Introdução

O sistema de excitação de uma máquina síncrona tem a função básica de estabelecer e controlar a tensão nos terminais da máquina, e também ser responsável pelo suprimento da potência reativa solicitada pelas cargas. O diagrama de blocos da Figura 3.1 apresenta a configuração típica de um sistema de excitação.

O regulador de tensão atua na excitatriz e controla a corrente de excitação, de forma a fazê-la manter nos terminais da máquina os níveis de tensão e potência reativa desejada. Nos sistemas mais antigos essa função é desempenhada pelo operador da máquina através da observação dos instrumentos e atuação no reostato de campo da excitatriz. Os sistemas de excitação mais modernos dispõem de dispositivos automáticos de supervisão e controle.

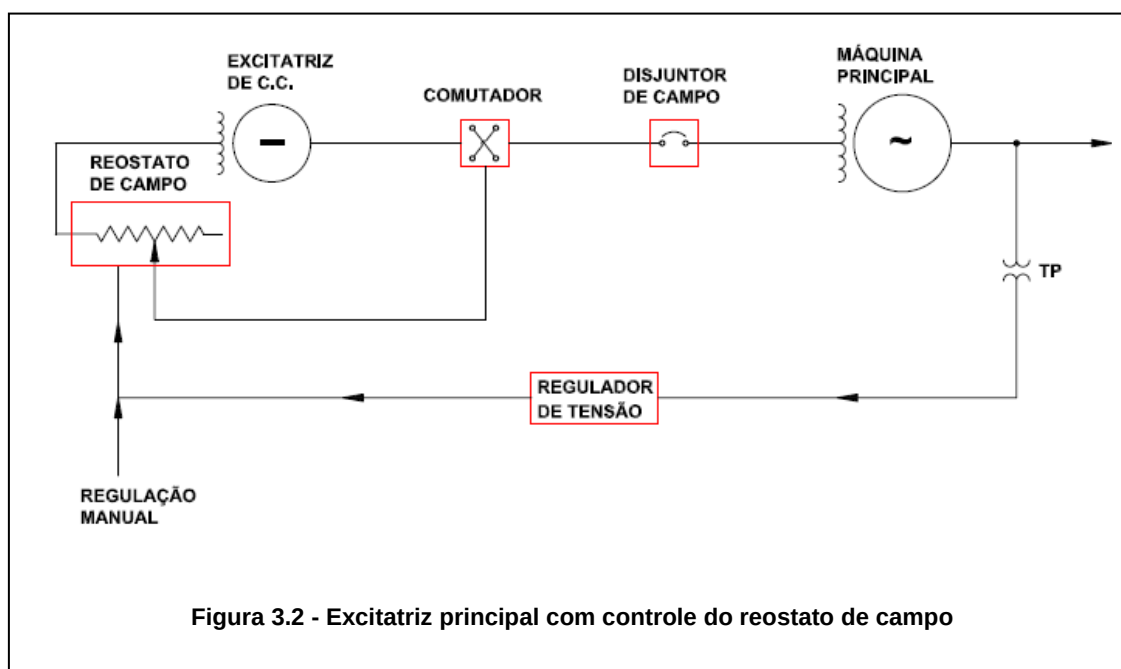


3.2 Sistema com excitatriz de corrente contínua auto-excitada

Este sistema de excitação pode ser considerado como o pioneiro, e sua característica de maior importância é a alimentação da excitatriz principal realizada pela tensão de saída de seus próprios terminais, por isso o fato de ser chamada de auto-excitada.

Suas características principais são:

- Aquisição dos parâmetros de tensão e corrente realizada através de TP e TC na saída da máquina;
- Esses parâmetros são comparados com uma referência, e caso estejam fora do ponto de operação pré-fixado o regulador de tensão corrige o valor da corrente de excitação através da atuação nos reostatos de campo, conectados nas saídas das excitatrizes.



A construção de máquinas com potência nominal elevada apresentam problemas no uso de excitatrizes de corrente contínua, tais como:

- Dificuldades de acoplar grandes máquinas c.c. ao eixo do gerador, que gira a altas velocidades, no caso de “turbo-geradores”, e quando se tem que fazê-lo, a aplicação será sempre moto-redutor;

- Faíscamentos nos contatos do comutador, durante as súbitas variações de carga, devidos aos altos valores das correntes necessitadas;

- Utilização de pentes com números elevados de escovas devido às altas correntes de excitação;

- Elevado índice de manutenção, nas escovas e comutadores devido aos altos valores da corrente de excitação.

Atualmente são utilizadas excitatrizes de sinal em corrente continua diretamente acoplada ao eixo das máquinas com potência nominal até 50 MVA e de baixa velocidade, bem como acionadas através de engrenagens acopladas no eixo das máquinas de até 275MVA.[20]

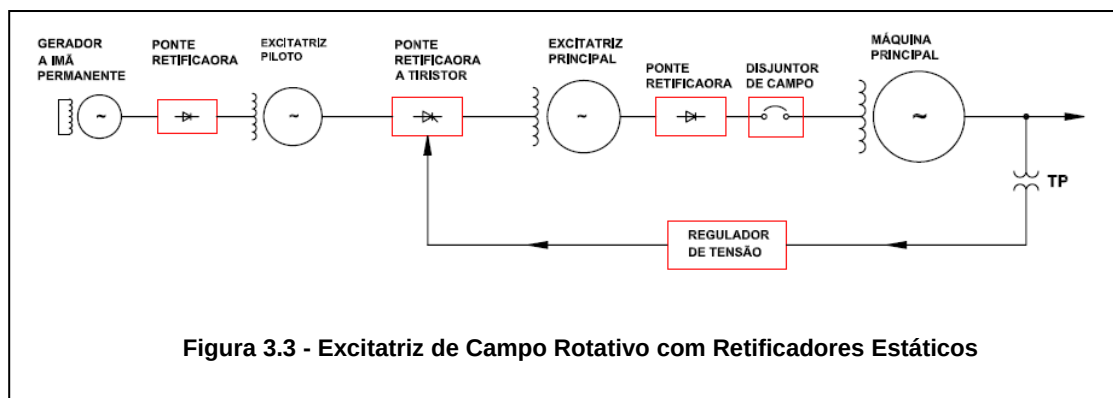
Uma evolução deste sistema foi a utilização de outra excitatriz de menor porte, chamada excitatriz piloto, com a função de excitar a excitatriz principal. Foram desenvolvidas para eliminar com o processo de “auto-excitação”. Essa modificação trouxe o benefício de tornar as respostas mais rápidas, uma vez que o controle do campo da excitatriz principal tornou-se independente da tensão de saída da máquina principal.

3.3 Sistema com excitatriz de campo rotativo e retificadores estáticos

Os problemas descritos anteriormente serviram de motivação para o estudo de novos sistemas de excitação. Uma das soluções apontou para o emprego de

um sistema de excitação com utilização de uma excitatriz de corrente alternada e retificadores.[20]

Está representado de maneira básica um sistema de excitação usando retificador estático, conforme o esquema mostrado na Figura 3.3, sendo esta montagem típica para um gerador de potência elevada.



Uma ponte de tiristores é alimentada por uma excitatriz piloto de corrente alternada, que por sua vez, tem seu campo controlado por um gerador a imã permanente. A função da ponte de tiristores é controlar a excitação da excitatriz principal. Como o regulador de tensão controla o disparo dos tiristores a resposta do sistema de excitação é bem mais rápida que os anteriormente estudados.

O sistema de retificação estática embora elimine o comutador e escovas associadas às excitatrizes de corrente contínua, ainda existem os inconvenientes de se manter os anéis deslizantes no campo do gerador, principalmente problemas de manutenção. [12]

Inicialmente, a substituição do antigo sistema de excitatriz de corrente contínua auto-excitada e suas derivações por uma excitatriz de corrente alternada e retificadores acarretam problemas de elevação de custo e também técnicos. Destacam-se os decorrentes da tensão máxima inversa nos diodos com fabricação

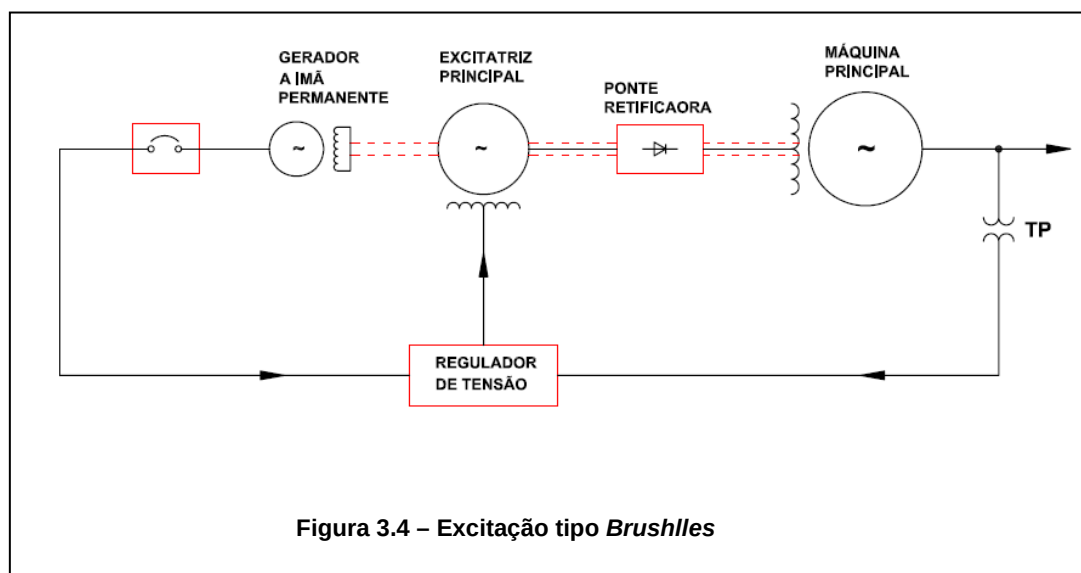
em germânio utilizados nos primeiros retificadores, não satisfazendo as necessidades dos grandes geradores. [13]

Tanto os problemas econômicos, como os técnicos, já foram superados, pois ao longo do tempo os aumentos de custos foram compensados pela redução das manutenções necessárias, bem como a utilização de diodos de “silício” para o sistema suportar elevados valores da tensão inversa. [19]

3.4 Sistema tipo brushless - sem escovas

Embora o emprego de sistema de retificação estática tenha eliminado o uso do comutador e escovas necessários à excitatriz de corrente contínua, ainda mantém a utilização dos anéis deslizantes da máquina, os quais também exigem manutenção freqüente. [19]

A questão principal é como transferir a potência de excitação da excitatriz para o campo da máquina, principalmente para máquinas de grande porte, sem utilização de anéis. Uma solução desenvolvida para o problema foi a fixação de todo o sistema de excitação (excitatrizes piloto e principal, e ponte retificadora) no próprio eixo da máquina, sistema este chamado de Brushless Excitation System. [19]



A montagem do Sistema *Brushless* consiste de uma excitatriz de corrente alternada e um retificador rotativo montado no mesmo eixo da máquina, no qual também está um gerador a ímã permanente.

Seu funcionamento consiste da comparação do sinal de saída do gerador a ímã permanente com o sinal da tensão terminal. O resultado é amplificado e alimenta o campo da excitatriz de corrente alternada. Esta, por sua vez, se assemelha a uma máquina de corrente contínua sem comutador, com enrolamento de campo no estator e armadura no rotor. Assim, a saída da armadura rotativa da excitatriz de corrente alternada alimenta o retificador rotativo, e este finalmente, alimenta o campo principal da máquina.

3.5 Sistema com excitação estática a tiristores

Atualmente este sistema de excitação é o mais utilizado no controle das máquinas síncronas, tanto nas novas, como nas mais antigas através de substituição de equipamentos originais por novos sistemas tiristorizados.[19]

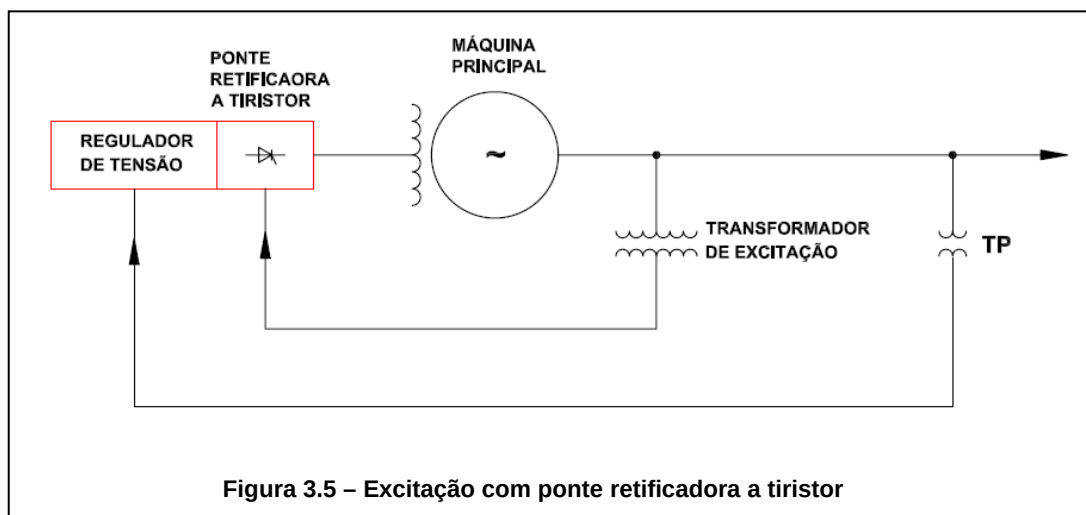
O esquema básico deste sistema é constituído por um transformador de excitação conectado na saída da máquina alimentando uma ponte retificadora a tiristor e também o campo da máquina. O controle de disparo dos tiristores é feito pelo regulador de tensão que adquire o sinal de referência por um TP, também conectado na saída da máquina, conforme pode ser visto na Figura 4.5.

O uso de tiristores em conjunto com a eletrônica digital tem resultado em grandes modificações nos sistemas de excitação das máquinas síncronas, tais como:

- redução considerável do tempo de resposta do sistema de excitação;
- melhoria na qualidade de “*field forcing*” (força do campo);

- redução do comprimento total das unidades;
- diminuição do problema mecânico de alinhamento de eixos e mancais;

Entretanto, permanecem os problemas inerentes à presença dos anéis deslizantes do rotor da máquina. Seria interessante aliar às facilidades de manutenção do sistema sem escovas à rapidez de resposta obtida quando o regulador de tensão comanda o circuito de disparo dos tiristores.[19]



Vem sendo estudada a possibilidade de utilizar um sistema de excitação sem escovas e a tiristores, no entanto, existem dois complicadores para a utilização de tal esquema:

- os esforços centrífugos sobre os tiristores e equipamentos auxiliares, isto é, como fazer o disparo de tiristores rotativos;
- a supressão do campo, quando for necessário.

O disparo dos tiristores rotativos que está em teste é feito através de um transformador de pulso rotativo sendo necessária a amplificação dos pulsos sobre o eixo.

Para a outra questão da supressão de campo, esta é facilmente contornada nos sistemas de excitação convencionais através da utilização de um resistor de descarga (*Crow-bar*) colocado em paralelo com o campo[14]. Isso possibilita reduzir rapidamente a corrente de campo do gerador no caso de defeito grave, como um curto-circuito, minimizando os danos ao estator provocados pelas correntes de defeito ou sobretensão. Já nos sistemas sem escovas é complicada a instalação de equipamento grande como são o resistor de descarga e a chave de campo.

Com diodos, a desexcitação pode ser conseguida suprimindo-se o campo da excitatriz tão rapidamente quanto for possível. Com tiristores, há possibilidade de usar a capacidade de inversão transitória dos mesmos para dar uma supressão de campo tão boa quanto à dos sistemas convencionais. [19]

3.6 Conclusão

Do exposto acima, pode-se verificar a grande evolução pelo que passaram os sistemas de excitações das máquinas síncronas e a grande aplicação da eletrônica nesses sistemas, que são indispensáveis para manter a estabilidade dos sistemas elétricos.

No capítulo seguinte, são apresentados os estudos das distorções harmônicas provocadas pelos sistemas de excitação, com diferentes configurações utilizadas em máquinas.

4.1 Descrição dos blocos de modelos

Os modelos matemáticos de cada bloco que utiliza-se na composição dos modelos de sistemas de excitação, fazem parte da biblioteca do *SimPowerSystem* do *software* Matlab.

4.1.1 Blocos utilizados

Apresenta-se a seguir as descrições e as representações esquemáticas de cada um dos blocos de modelos utilizados nas simulações dos sistemas estudados.

4.1.1.1 Máquina síncrona

O bloco de máquina síncrona opera tanto como gerador como motor. O modo de operação é ditado pelo sinal da energia mecânica (positivo para o modo de gerador, negativo para o modo de motor). O modelo de máquina síncrona considera a dinâmica do estator, do campo e enrolamentos amortecedores. Todos os parâmetros do rotor e as grandezas elétricas são referenciadas ao estator. Eles são identificados por variáveis condicionadas, e os subscritos utilizados são definidos como segue:

d, q: parâmetros dos eixos “d” e “q”

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

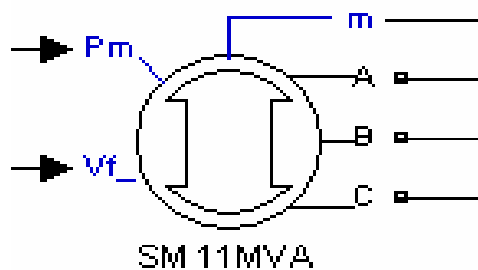


Figura 4.1 Modelo de máquina síncrona de pólos salientes

4.1.1.2 Excitatriz DC

O bloco utilizado como excitatriz da máquina síncrona é um gerador de corrente contínua, ele pode ser conectado tanto como gerador-shunt ou como gerador-série.

A tensão de campo da máquina é fornecida nos terminais “F+” e “F-”, e a tensão da armadura nos terminais “A+” e “A-”. O torque aplicado ao eixo é fornecido pelo eixo da máquina principal.

Os parâmetros fornecidos para a simulação são:

- R_a : Resistência da armadura;
- L_a : Indutância da armadura;
- R_f : Resistência do campo;
- L_f : Indutância do campo;
- L_{af} : Indutância mútua.

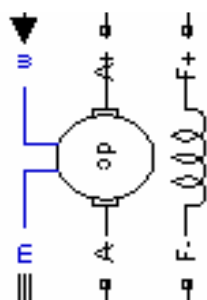


Figura 4.2 Modelo de Excitariz

4.1.1.3 Transformador elevador

O bloco do transformador trifásico é implementado por meio de três transformadores monofásicos. Seus parâmetros de ajustes são:

- Pn: Potência aparente nominal;
- fn: Frequência nominal;
- Tipo da conexão no primário: estrela ou triângulo;
- V1: Tensão fase-fase do primário;
- R1: Resistência do enrolamento primário;
- L1: Indutância do enrolamento primário;
- Tipo da conexão no secundário: estrela ou triângulo;
- V2: Tensão fase-fase do secundário;
- R2: Resistência do enrolamento secundário;
- L2: Indutância do enrolamento secundário;
- Rm: Resistência de magnetização;
- Lm: Indutância de magnetização

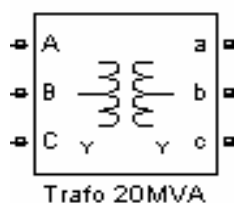
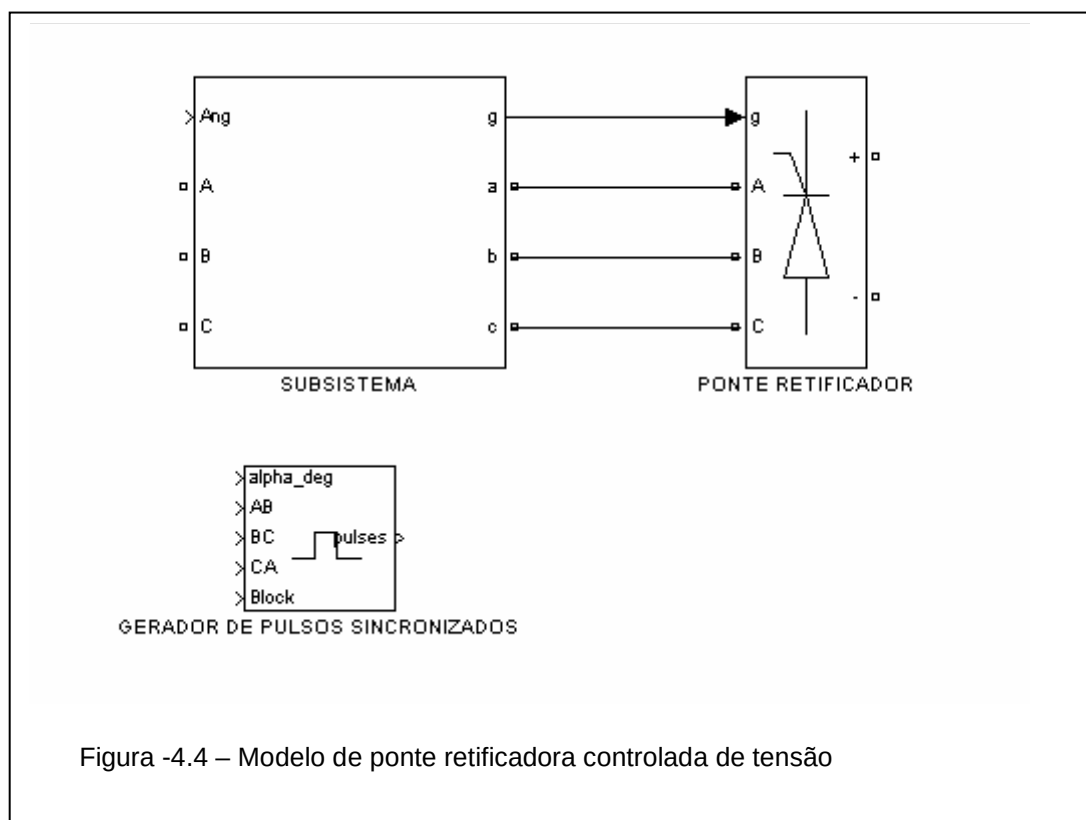


Figura 4.3 - Modelo de Transformador

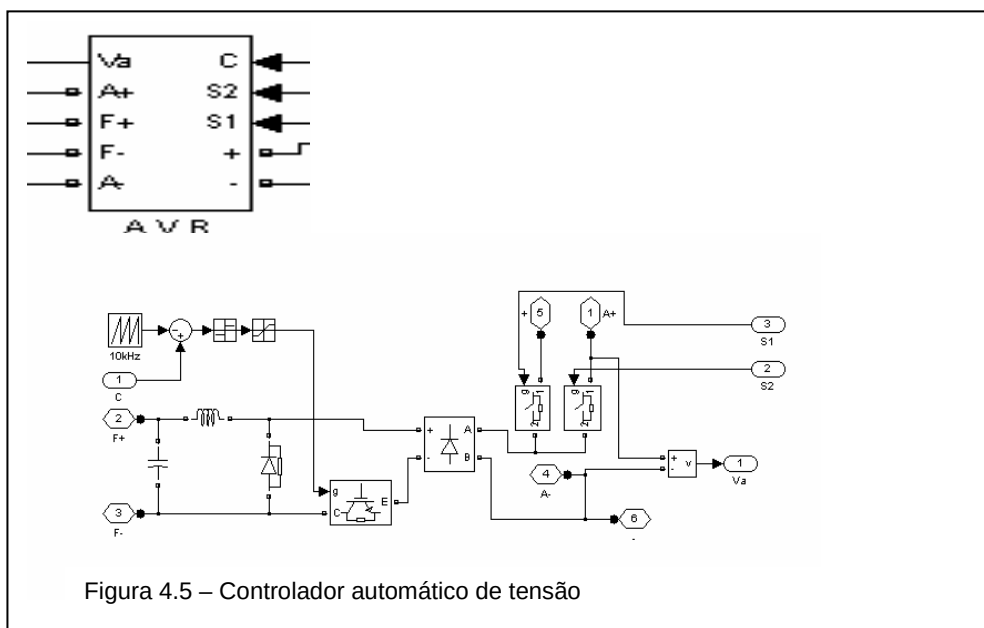
4.1.1.4 Ponte retificadora controlada

O bloco da figura 4.4, refere-se a uma ponte de tiristores de seis pulsos controlada, aplicada num sistema de excitação elaborado para fornecer a corrente de campo da máquina síncrona, em dois modelos estudados. O subsistema que compõem o sistema maior, é composto por um gerador de pulso sincronizado de seis pulsos e um transdutor de tensão



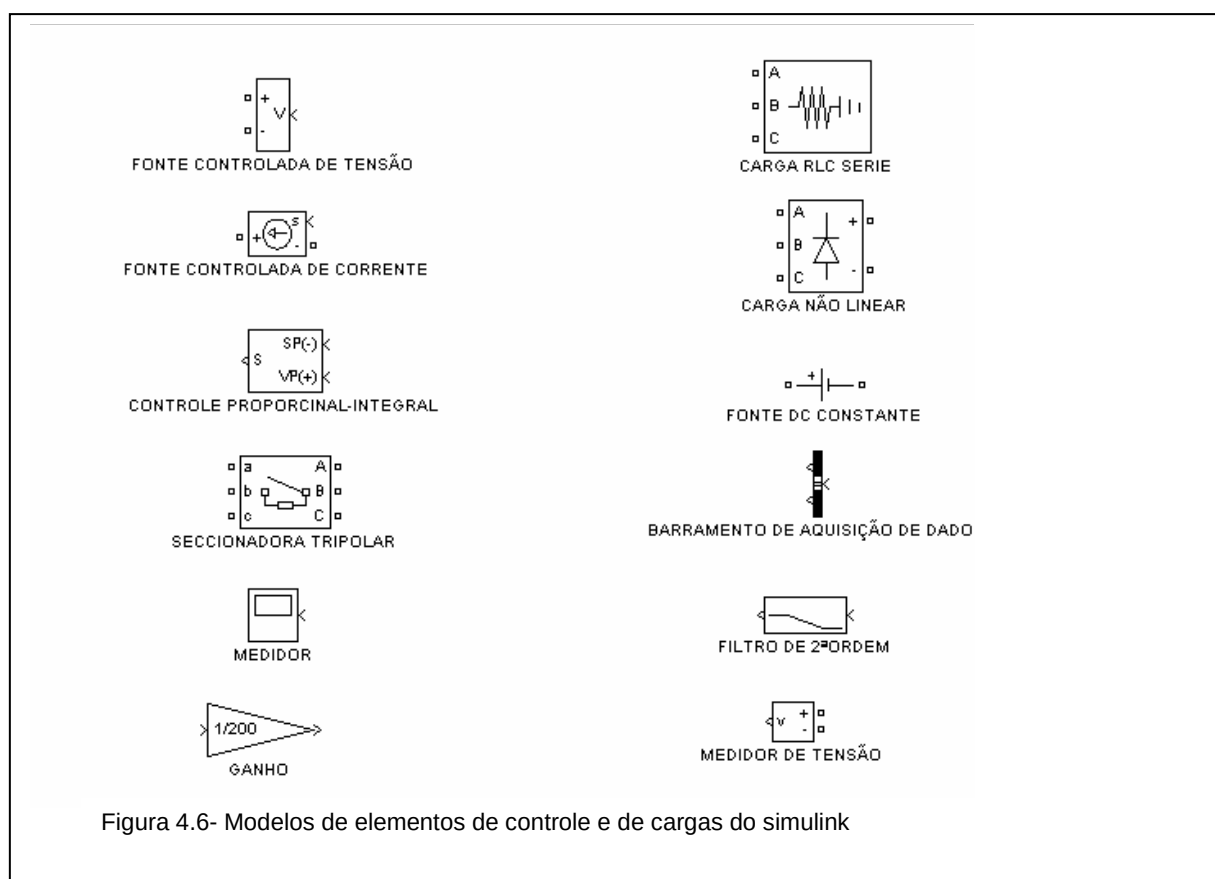
4.1.1.5 Controlador automático de tensão

Este bloco, mostrado na Figura 4.5, atua como um controlador automático de tensão, AVR, para o modelo 4 simulado adiante. Ele é formado, basicamente, por um IGBT, por um conversor de energia comutável, e por diodos, indutância, capacitor e chaves.



4.1.1.6 Elementos auxiliares de controle e cargas

Na figura 4.6- reúnem-se os modelos dos elementos utilizados no controle da excitatriz e os modelos de carga.



4.2 Simulação dos modelos

São analisados aqui os resultados obtidos nas simulações de três modelos de sistemas de excitação, baseados em configurações reais dos sistemas em uso nas máquinas síncronas objeto de estudo, e na simulação aplica-se a ferramenta *Simulink*.

Para cada um dos sistemas, efetua-se as simulações em duas configurações distintas: com o gerador em vazio, e em carga, sendo esta composta por cargas RLC e cargas não lineares, e as medidas são tomadas na saída do gerador.

4.2.1 Modelo de excitação com excitatriz sem regulação automática de tensão

4.2.1.1 Descrição

A primeira configuração a ser simulada corresponde ao sistema de excitação com excitatriz auto alimentada em CC e regulação de tensão manual, isto é, sem o regulador automático de tensão, AVR.

O modelo de simulação compõe-se de um gerador síncrono trifásico, que tem sua corrente de campo fornecida por uma excitatriz. Esta, é composta por um gerador de CC e a tensão de sua armadura é fornecida por uma fonte de CC fixa. Nos terminais de saída do gerador, tem-se conectado um transformador elevador de tensão que alimenta as cargas que são compostas por uma carga RLC e uma carga com característica não linear.

Como não se tem a figura do operador para ajustar, através da manipulação do reostato de campo, a corrente de excitação, no modelo de simulação é utilizado

de um pequeno sistema formado por elementos de controle pertencentes a biblioteca “*simulink*”, para tal ajuste.

O modelo de simulação, compreende basicamente os seguintes blocos:

- um gerador síncrono trifásico;
- um gerador de CC, que faz a função de excitatriz, juntamente com o sistema de ajuste da corrente de excitação;
- uma fonte de tensão CC, fixa;
- um transformador trifásico elevador de tensão;
- duas carga RLC;
- uma carga não linear;
- três chaves seccionadoras.

A figura 4.7, representa o esquema do modelo geral, incluindo o sistema de excitação a ser simulado. Duas condições de funcionamento são apresentadas: gerador em vazio e em carga.

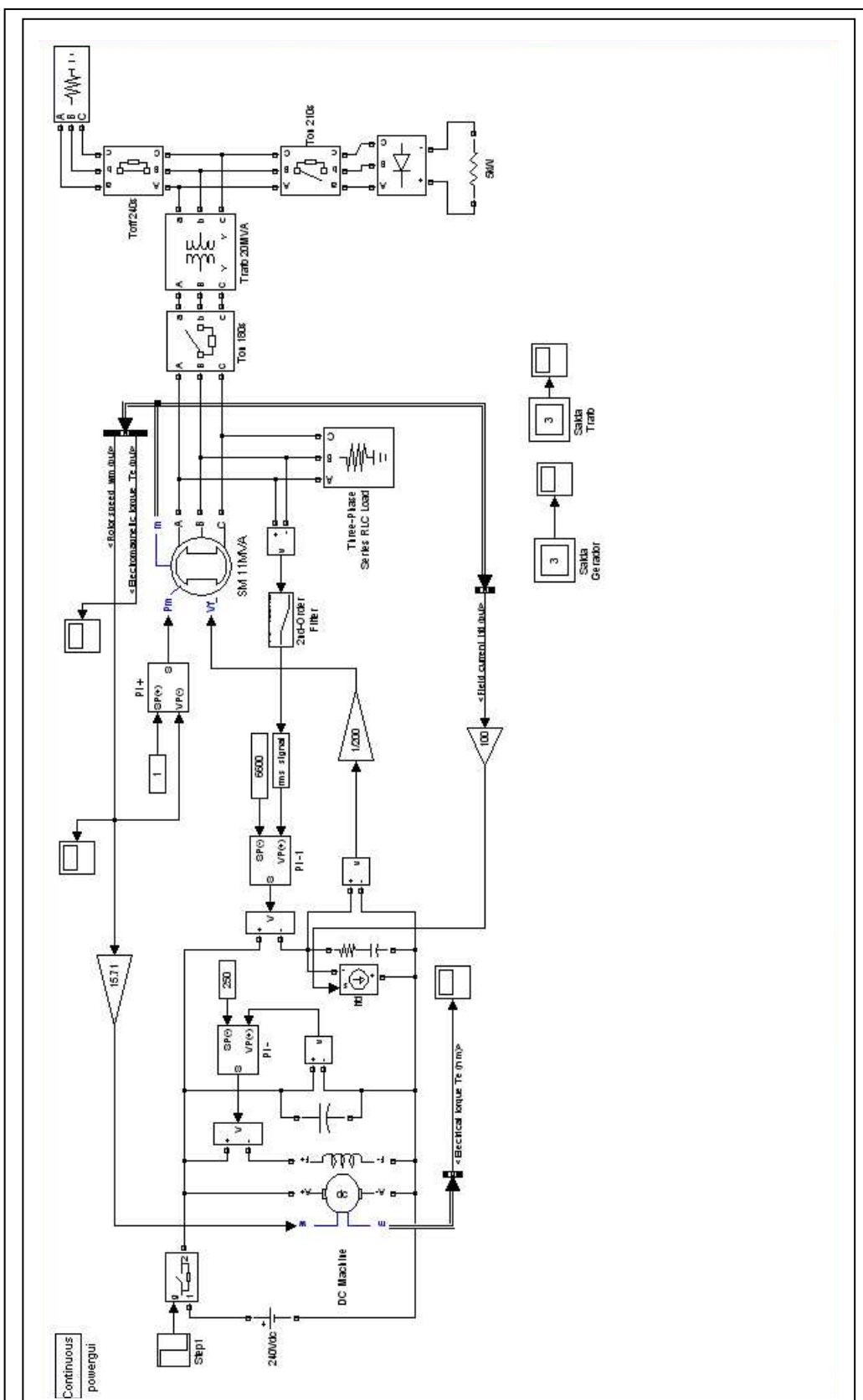


Figura 4.7– Esquema implementado para simulação do modelo sem AVR

A seguir são listados os parâmetros utilizados para o gerador.

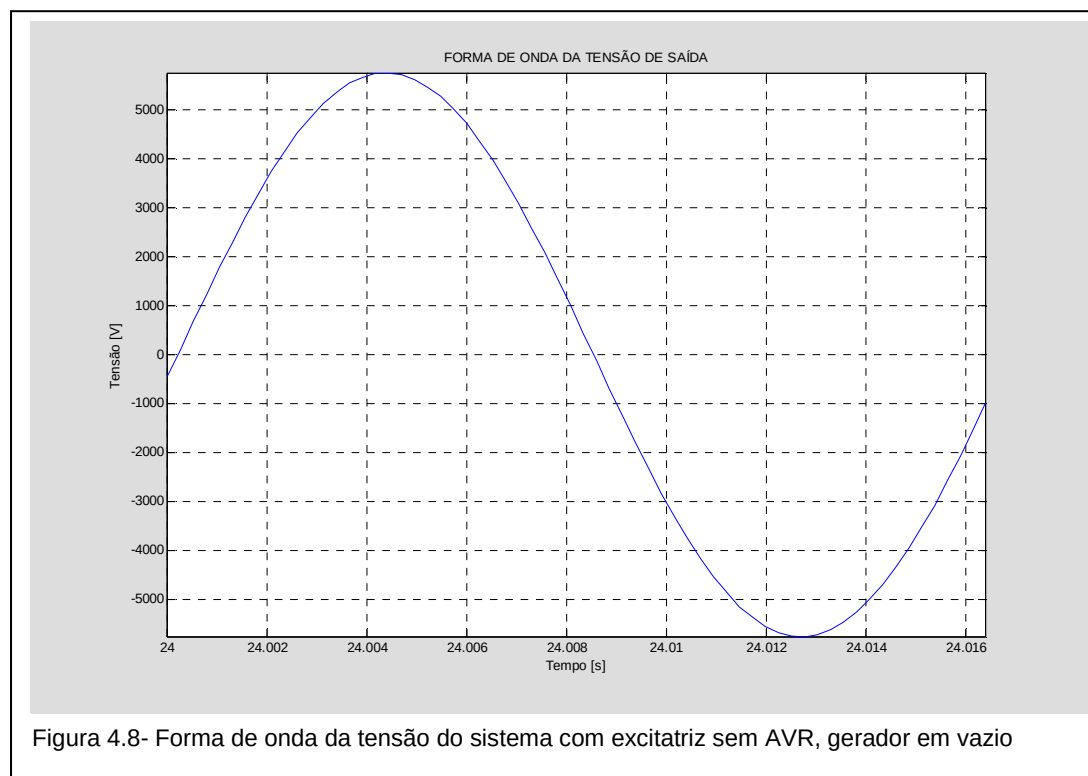
Parâmetros do estator						
V _{nom} [kV]	P _{nom} [MVA]	F [Hz]	Rs [pu]	LI [pu]	Lmd [pu]	Lmq [pu]
6,6	11,0	60	2,85E-03	0,114	1,19	0,36
Parâmetros do campo			Coeficiente de inércia		Nº de pólos	
V _f [pu]	R _f [pu]	LI _{fd} [pu]	H[s]			p
1	5,79E-04	0,114	3,7			24
Parâmetros do amortecimento						
Rkd[pu]	LIkd [pu]		Rkd1 [pu]		LIkd1 [pu]	
1,17E-02	0,182		1,97E-02		0,384	

Tabela 4.1 – Parâmetros utilizados para o gerador do sistema de excitação com Excitatriz, sem AVR, auto excitada

4.2.1.2 Resultados obtidos na simulação

Apresenta-se a seguir os gráficos e os valores das duas condições simuladas no modelo implementado.

Na figura 4.8 pode-se verificar a forma de onda da tensão medida nos terminais do gerador já estabilizado, isto é, com a velocidade nominal e constante, porém sem carga.



Justifica-se iniciar os estudos com esse modelo de sistema de excitação, ou seja, sem o AVR, para tê-lo como base de análise dos demais modelos, devido ao fato dele não utilizar eletrônica na regulação de tensão da máquina, ou seja, não ter a possibilidade de gerar harmônicos.

Nota-se que não apresenta sinais de distorções na forma de onda da tensão gerada, o que justifica-se pelo fato de sua regulação ser realizada sem a utilização de cargas não lineares. sem carga,

Para melhor auxiliar na análise da simulação, na tabela 4.2 apresenta-se uma lista com o resultado da transformada rápida de Fourier, FFT, que possibilita verificar que a DHTv, é zero, bem como a contribuição de cada parcela da distorção harmônica.

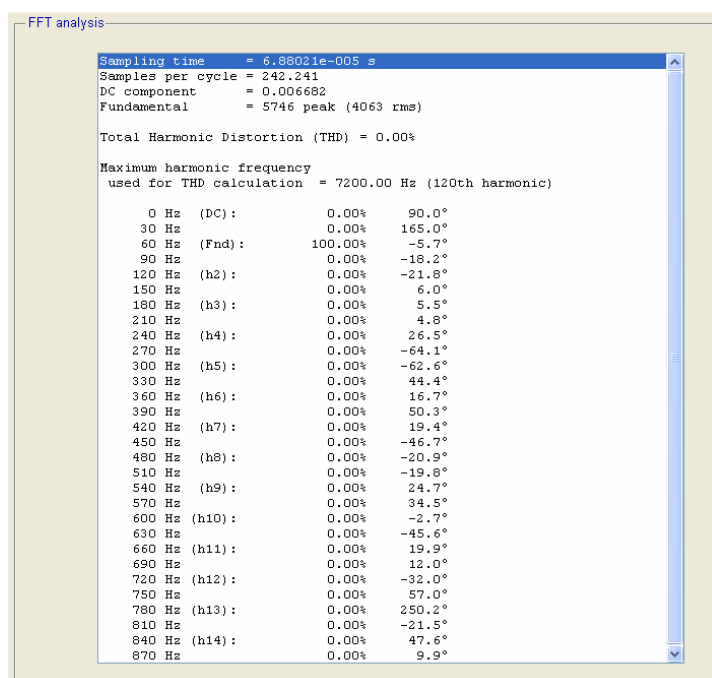
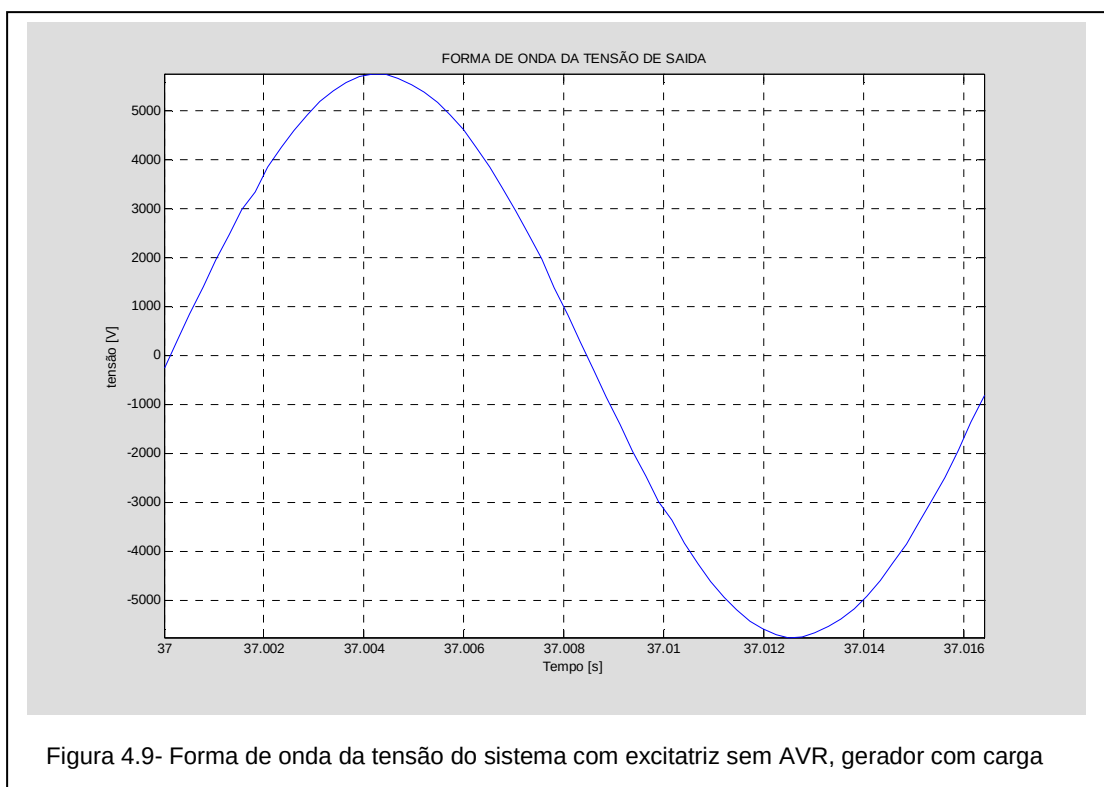


Tabela 4.2- Análise da FFT do sistema com excitatriz sem AVR, gerador em vazio

A seguir tem-se as figuras a partir do momento em que são conectadas as cargas RLC e não lineares aos terminais do gerador, na tensão de 88,0kV, ou seja, no barramento alimentado pelo transformador elevador de tensão.

O gráfico com a forma de onda da tensão que representa este momento é o da Figura 4.9, e apresenta pequenos sinais de deformação devido as cargas não lineares, as quais provocam distorções harmônicas nas correntes do estator do gerador.



Como as contribuições de cada componente é pequena tornam-se quase que imperceptíveis no gráfico anterior, mas podem ser verificadas na lista da análise da FFT.

Na tabela 4.3 apresenta-se a lista do resultado da transformada rápida de Fourier, FFT, da nova configuração, que possibilita verificar a contribuições de cada parcela da distorção harmônica total, DHT_V , para auxiliar na análise da simulação

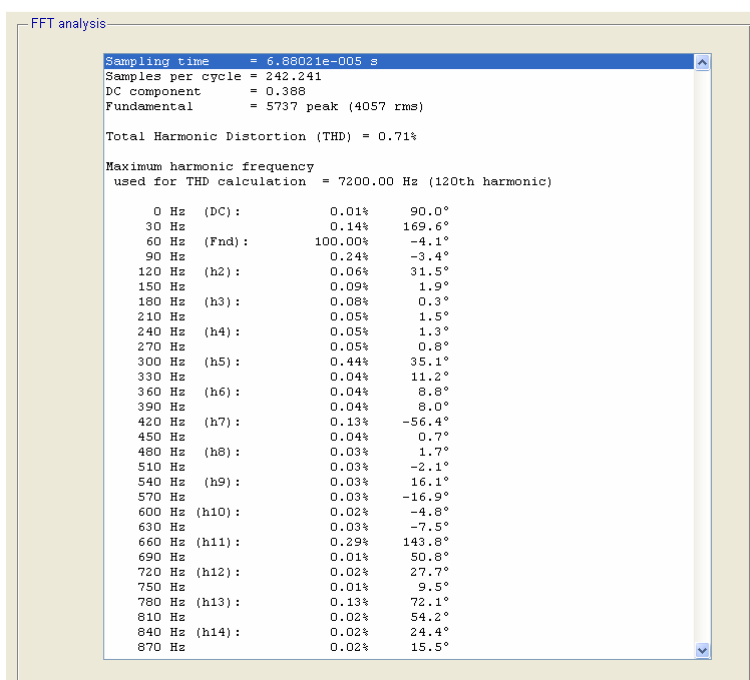


Tabela 4.3 – Análise da FFT do sistema com excitatriz sem AVR, gerador com carga

Percebe-se pela lista que as maiores contribuições são, do 5º, do 7º, do 11º e o do 13º harmônicos, os quais são gerados pela carga não linear, composta por uma ponte retificadora trifásica não controlada de diodos, geradora dessas distorções harmônicas. Pode-se notar, ainda, que a contribuição do 3º harmônico e seus múltiplos é desprezível, devido ao filtro realizado pelo enrolamento do transformador elevador.

4.2.2 Modelo de excitação sem excitatriz, com regulação automática de tensão alimentado em CA

4.2.2.1 Descrição

Essa segunda configuração a se simular, é a do sistema de excitação sem excitatriz, com regulador automático de tensão, AVR, alimentado em CA, por um transformador de excitação.

Compõe-se esse modelo de simulação, com um gerador síncrono trifásico, o qual tem a sua corrente de campo, fornecida por uma ponte retificadora de

tensão trifásica à tiristores. Realiza-se o controle da corrente fornecida pela ponte, através de um gerador de pulsos sincronizados, que atua no disparo dos tiristores.

Com o bloco formado pela ponte e gerador de pulsos simula-se o regulador automático de tensão. Esse bloco é alimentado por um transformador abaixador, trafo de excitação, que conecta-se na saída do gerador.

Também nesse modelo, nos terminais de saída do gerador, tem-se conectado um transformador elevador de tensão trifásico que alimenta as cargas do sistema, que são formadas por uma carga RLC e uma carga com característica não linear.

O modelo de simulação, compreende basicamente os seguintes blocos:

- um gerador síncrono trifásico;
- uma ponte retificadora de tensão trifásica de seis pulsos à tiristores;
- um regulador automático de tensão, AVR, formado por um gerador de pulsos,
- um transformador trifásico de excitação;
- um transformador trifásico elevador de tensão;
- duas carga RLC;
- uma carga não linear;
- três chaves seccionadoras.

A seguir tabela-se os parâmetros utilizados para o gerador do esquema implementado:

Parâmetros do estator						
V _{nom} [kV]	P _{nom} [MVA]	F [Hz]	Rs [pu]	LI [pu]	Lmd [pu]	Lmq [pu]
7,2	15,0	60	2,85E-03	0,114	1,19	0,36
Parâmetros do campo			Coeficiente de inércia		Nº de pólos	
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]	LIkd [pu]	Rkd1 [pu]		LIkd1 [pu]		
1,17E-02	0,182	1,97E-02		0,384		

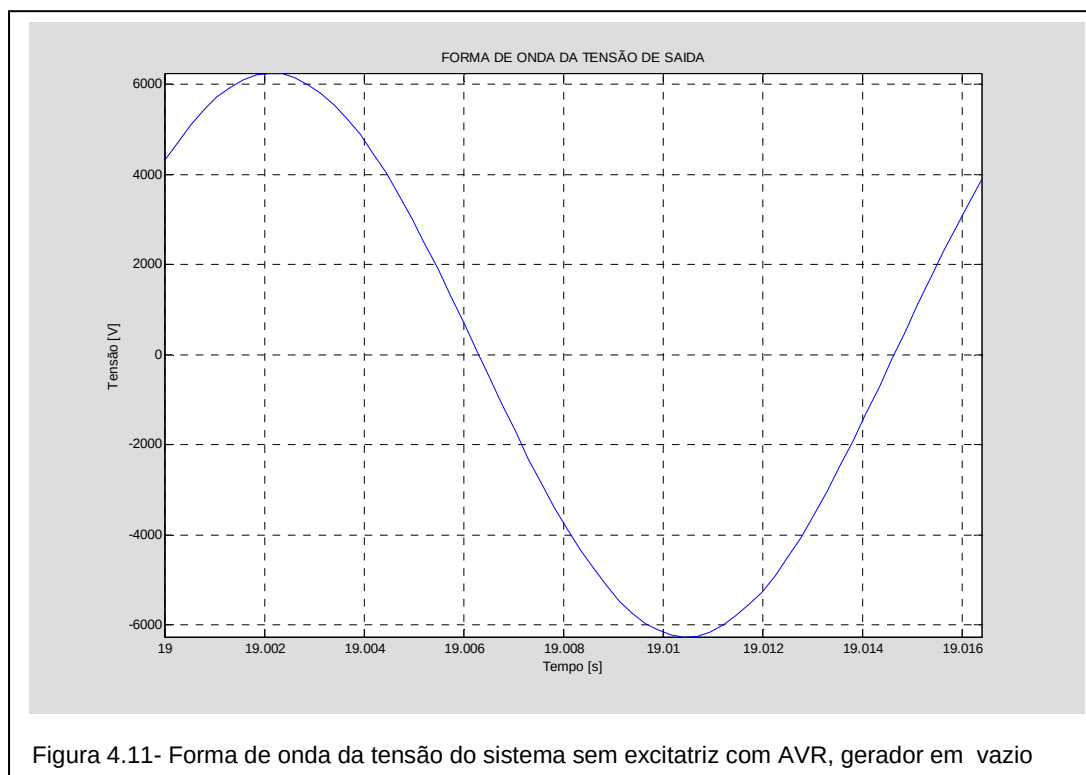
Tabela 4.4 – Parâmetros utilizados para o gerador do sistema de excitação sem excitatriz, com AVR alimentado em CA

Na figura 4.10, representa-se o esquema do modelo completo do sistema de excitação simulado. O tempo total de simulação é de 150 segundos, com o sistema em 2 configurações, primeiro com gerador em vazio e depois com o gerador em carga.

4.2.2.2 Resultados obtidos na simulação

São apresentados a seguir os gráficos com as distorções harmônicas desse modelo de sistema de excitação. Da mesma forma que na simulação do sistema anterior, inicialmente verifica-se o comportamento do gerador sem carga, e a seguir é conectada cargas ao circuito através do fechamento da seccionadora tripolar. As cargas que compõem o modelo são: carga RLC e a outra com características de carga não linear.

Na Figura 4.11 pode-se verificar a forma de onda da tensão na saída do gerador sem carga.



O gráfico para a condição do gerador sem carga, permite visualizar a ocorrência de pequenas deformações, apesar do valor da DHT_V ser de apenas 0,25%.

Para auxiliar a análise dos resultados mostra-se na Tabela 4.5, uma lista com os valores da FFT do modelo simulado.

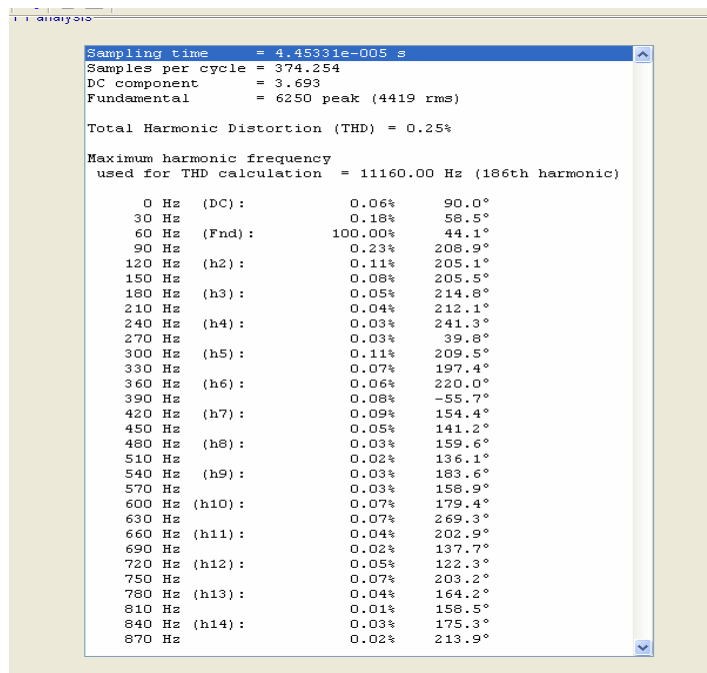
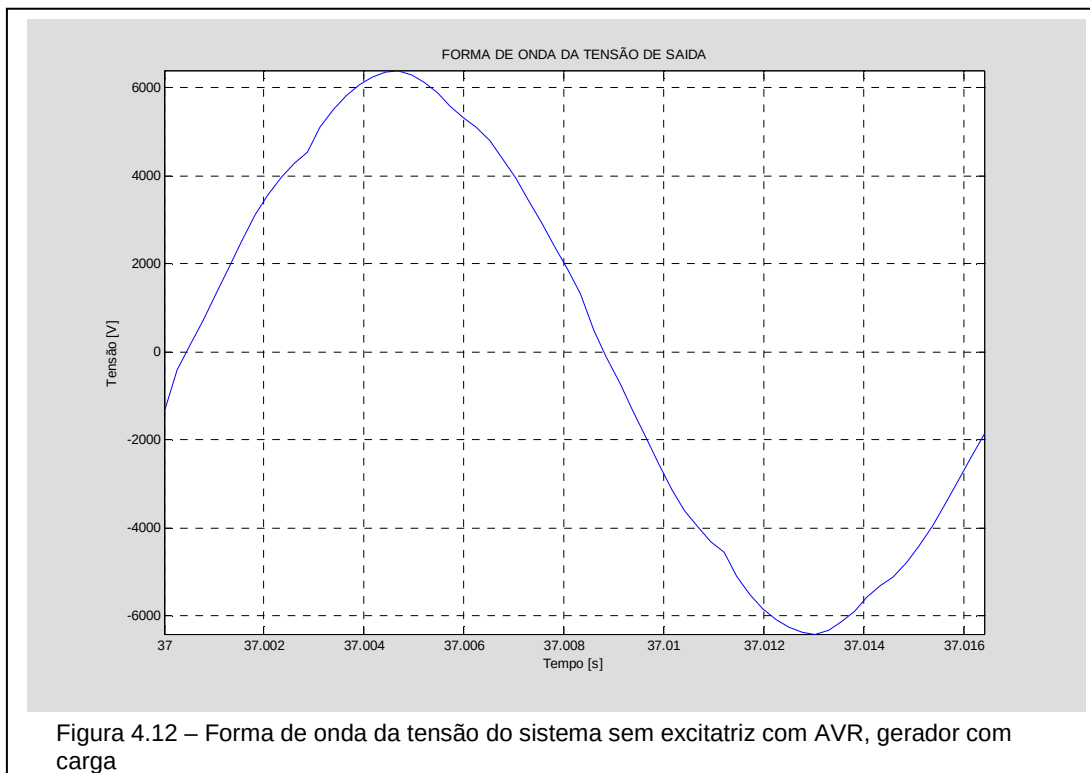


Tabela 4.5 – FFT do sistema sem excitatriz com AVR, gerador sem carga

Nota-se pela lista do FFT a contribuição de harmônicos de diversas ordens para o DTH_V . Essas distorções podem ser explicadas pelo fato do sistema de excitação simulado ser composto por ponte uma de tiristores, que é realimentada pela máquina, sendo que durante o processo de regulação esta ponte gera distorções harmônicas na corrente do sistema.

Na seqüência da simulação, tem-se o instante em que as cargas conectadas na saída do transformador são alimentadas pelo gerador, na Figura 4.12 mostra-se a forma de onda da tensão na saída do gerador, podendo-se perceber a ocorrência de distorções significativas na mesma.



Nota-se nessa configuração, que ocorreu um aumento substancial no valor do DTH_V passando de 0,25% com o gerador em vazio para 2,46% com o gerador alimentando cargas não lineares. Porém, percebe-se que as componentes apresentam um melhor comportamento, pois além de inserir-se um transformador de potência bem maior que o transformador de excitação, TE, também insere-se uma carga RLC com potência superior que a utilizada na saída do TE.

A Tabela 4.6 mostra a lista da FFT do modelo simulado, onde observa-se que as maiores contribuições são do 5º, 11º, 7º e do 13º nessa ordem decrescente, e mais uma vez, a contribuição do 3º e de seus múltiplos é ínfima. Esse fato mostra que essas distorções são causadas pela carga não linear como no modelo anterior, mas a elevação do DTH_V em relação ao primeiro modelo, indica que houve uma contribuição importante da ponte de tiristores presente no regulador de tensão do gerador.

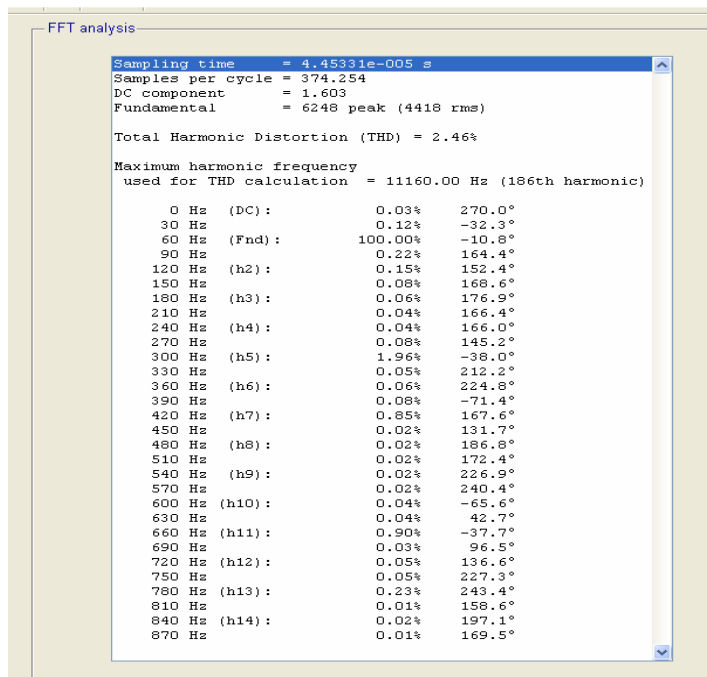


Tabela 4.6 –FFT do sistema sem excitatriz com AVR, gerador com carga

4.2.3 Modelo de excitação com excitatriz e regulação automática de tensão alimentado em CA

4.2.3.1 Descrição do sistema

A terceira configuração que se simula, é a do sistema de excitação composto por uma excitatriz, com regulador automático de tensão, AVR, alimentado em CA, através de um transformador de excitação.

O modelo de simulação, compreende basicamente os seguintes blocos:

- um gerador síncrono trifásico;
- uma gerador de CC, que faz a função de excitatriz ;
- uma ponte retificadora de tensão trifásica de seis pulsos à tiristores;
- um regulador automático de tensão, AVR, formado por um gerador de pulsos,
- um transformador trifásico de excitação;
- um transformador trifásico elevador de tensão;
- duas carga RLC;
- uma carga não linear;

- três chaves seccionadoras.

Esse modelo é um misto dos outros dois simulados anteriormente, pois possui a excitatriz e a ponte de tiristores controlada pelo AVR. Agora a corrente de campo do gerador, é fornecida pela excitatriz, a qual tem a sua corrente de armadura fornecida pela ponte de tiristores, que é controlada pelo AVR. O transformador elevador alimenta as cargas RLC e não lineares, e o transformador de excitação alimenta a ponte de tiristores.

Lista-se a seguir os parâmetros utilizados para o gerador escolhido na simulação desse modelo.

Parâmetros do estator						
V _{nom} [kV]	P _{nom} [MVA]	F [Hz]	Rs [pu]	LI [pu]	Lmd [pu]	Lmq [pu]
7,2	15,0	60	2,85E-03	0,114	1,19	0,36
Parâmetros do campo				Coeficiente de inércia		Nº de pólos
V _f [pu]	R _f [pu]	LI _f [pu]	H[s]		p	
1	5,79E-04	0,114	3,7		24	
Parâmetros do amortecimento						
Rkd[pu]		LIkd [pu]		Rkd1 [pu]		LIkd1 [pu]
1,17E-02		0,182		1,97E-02		0,384

Tabela 4.7 – Parâmetros utilizados para o gerador do sistema de excitação com excitatriz e AVR alimentado em CA

Na Figura 4.13, representa-se o esquema do modelo completo do sistema de excitação simulado. O tempo total de simulação é de 28 segundos, com o sistema em 2 configurações, primeiro com gerador em vazio e depois com o gerador em carga.

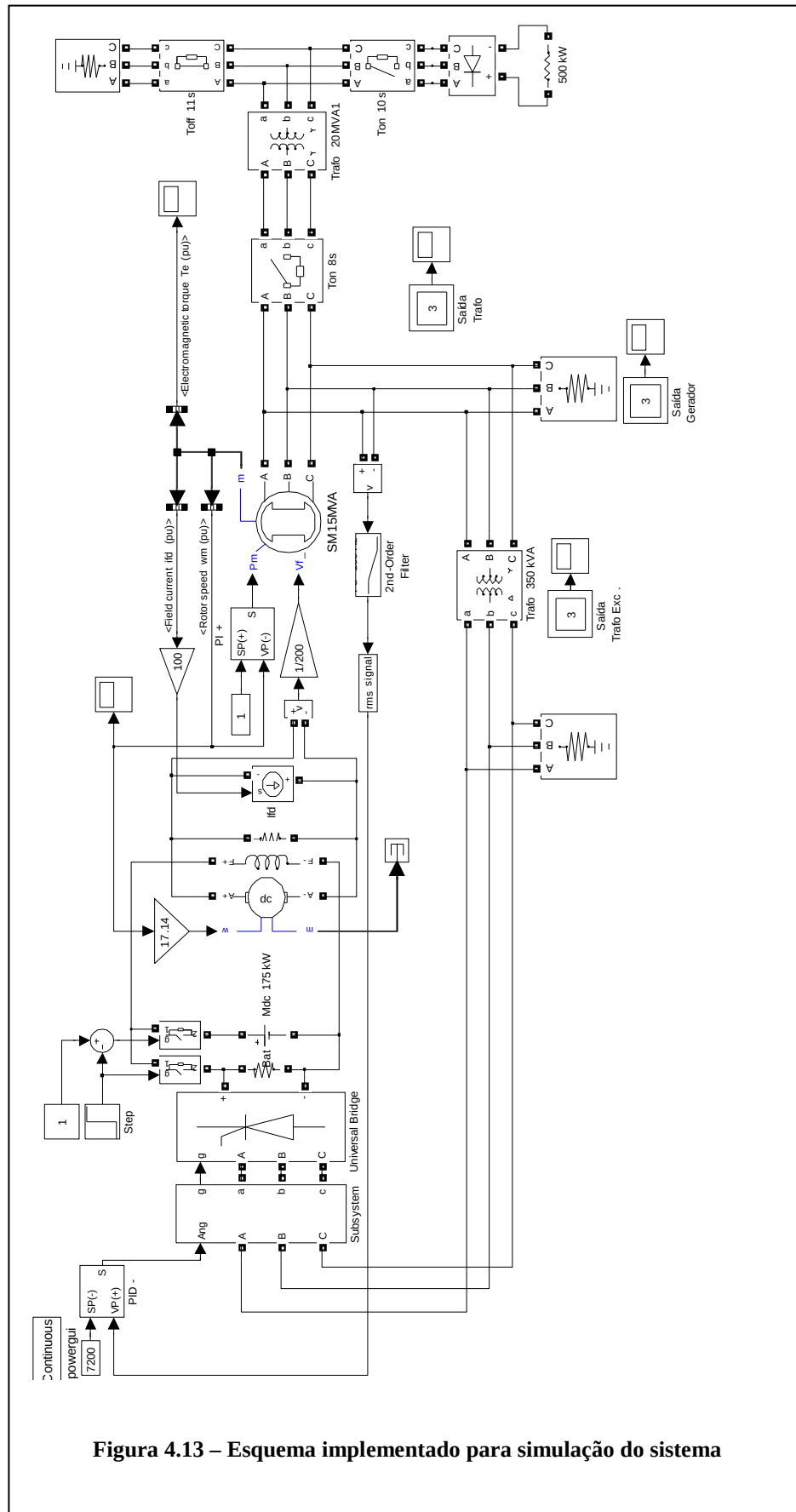


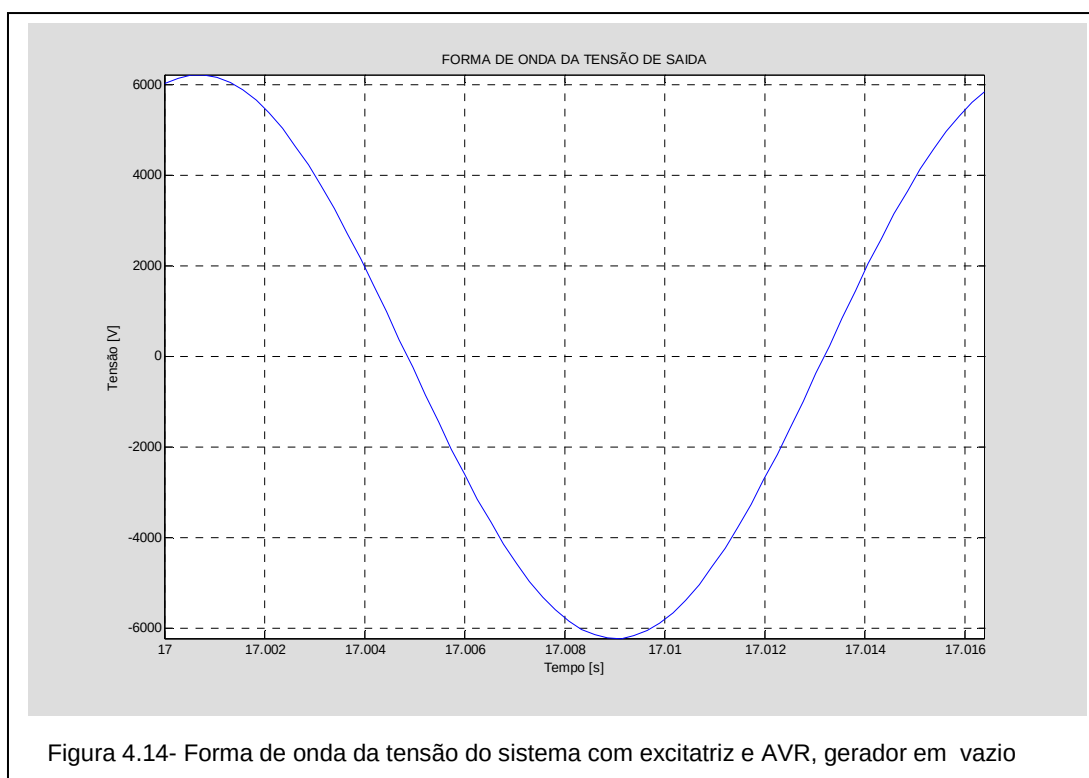
Figura 4.13 – Esquema implementado para simulação do sistema

4.2.3.2 Resultados obtidos na simulação

A seguir apresenta-se os resultados das simulações do sistema de um modelo de excitação com excitatriz controlado por AVR alimentado em CA em forma de gráficos e listas das transformadas rápidas de Fourier.

As figuras referem-se a duas configurações do modelo: uma com o gerador sem carga e outra com o gerador alimentando cargas RLC e não lineares.

Na Figura 4.14, tem-se o gráfico com a forma de onda da tensão nos terminais de saída do gerador.



As deformações presentes na forma de onda são quase imperceptíveis, pois o valor da DHT_V é bem pequeno, somente 0,04%, que permite visualizar o papel da excitatriz como um filtro de harmônicos.

A lista com os valores da FFT, da Tabela 4.8, permite observar quanto cada componente harmônica contribui para o sistema. Nota-se que as parcelas de contribuição de cada ordem é muito pequena e decrescente, e que ainda tem harmônicos de ordem par, indicado a presença da componente contínua no sistema nesse instante.

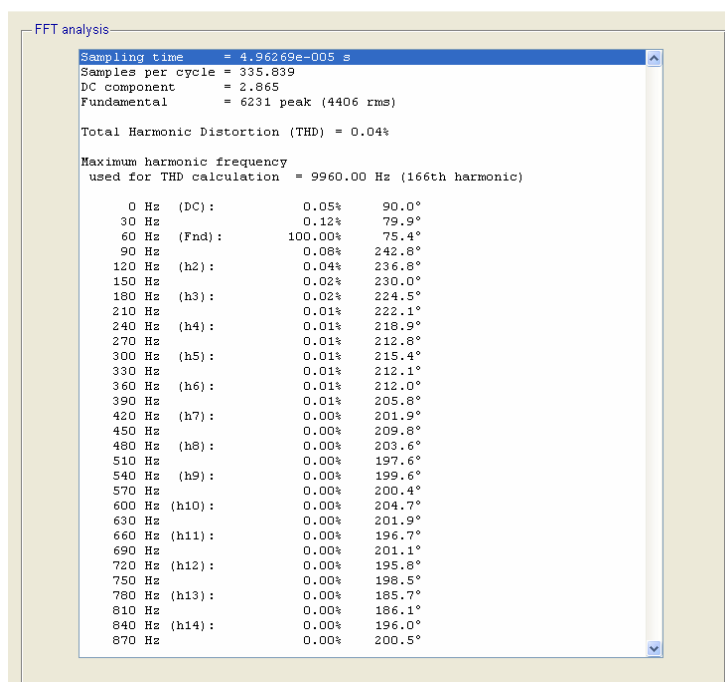


Tabela 4. 8 – FFT do sistema com excitatriz e AVR, gerador sem carga

A seguir, simula-se o sistema com as cargas RLC e não lineares, e expõe-se os gráficos com os resultados obtidos. Na Figura 4.15 encontra-se a forma de onda da tensão na saída do gerador.

Pode-se notar que para esta condição do sistema, as deformações na forma de onda da tensão são bastante acentuadas, indicando ocorrência de distorções harmônicas significativas.

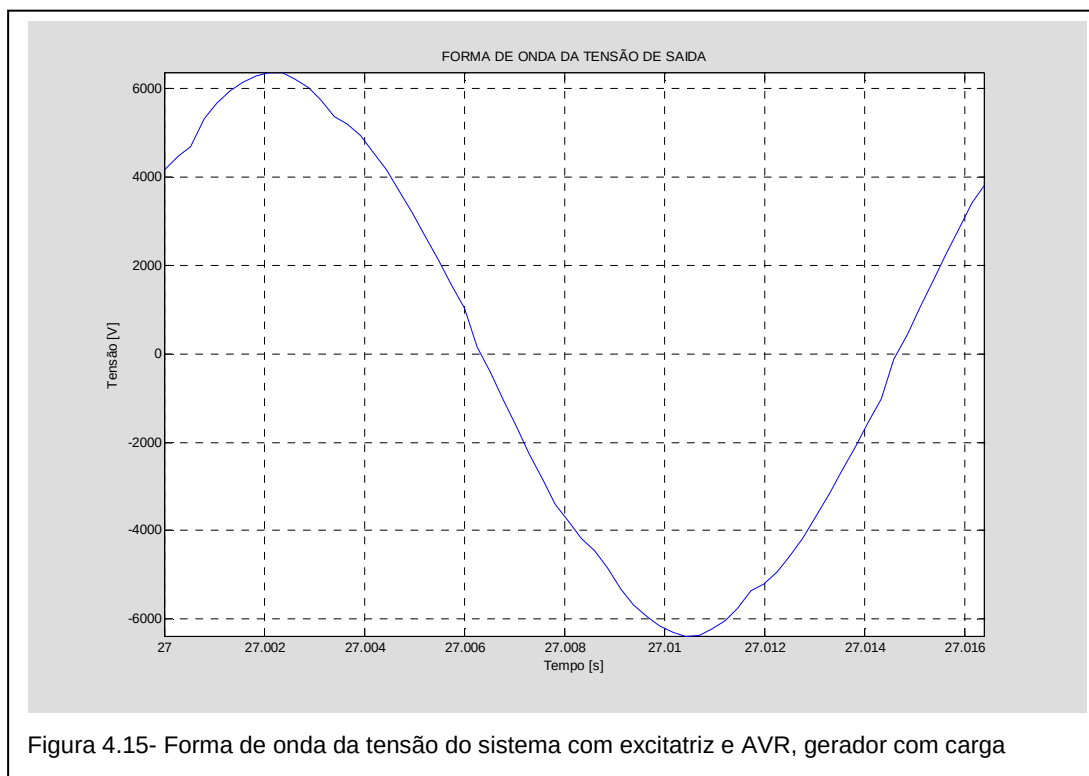


Figura 4.15- Forma de onda da tensão do sistema com excitatriz e AVR, gerador com carga

Com a lista da FFT do sistema simulado, da Tabela 4.9, pode-se conferir os valores de contribuição de cada componente harmônica que se manifesta no processo.

Observa-se uma elevação no valor da DHT_V , que atinge 2,41%, resultado que pode-se explicar, pela combinação das distorções geradas pela cargas não lineares com as distorções geradas pelo sistema de excitação durante o disparos dos tiristores.

Nota-se ainda, um comportamento mais regular do espectro das componentes, com pouca presença de componentes de ordem par, indicando uma melhor regulação pelo AVR, nessa configuração.

Percebe-se pelos valores da lista, que a maior parcela de distorção harmônica é o de 5ª ordem, com 1,95%, porém os harmônicos de ordem 7ª, 11ª e 13ª contribuem com valores consideráveis, e novamente quase não se percebe as

parcelas relativas a 3ª ordem e seus múltiplos, evidenciando que as distorções devem-se a carga não linear, composta por retificadores.

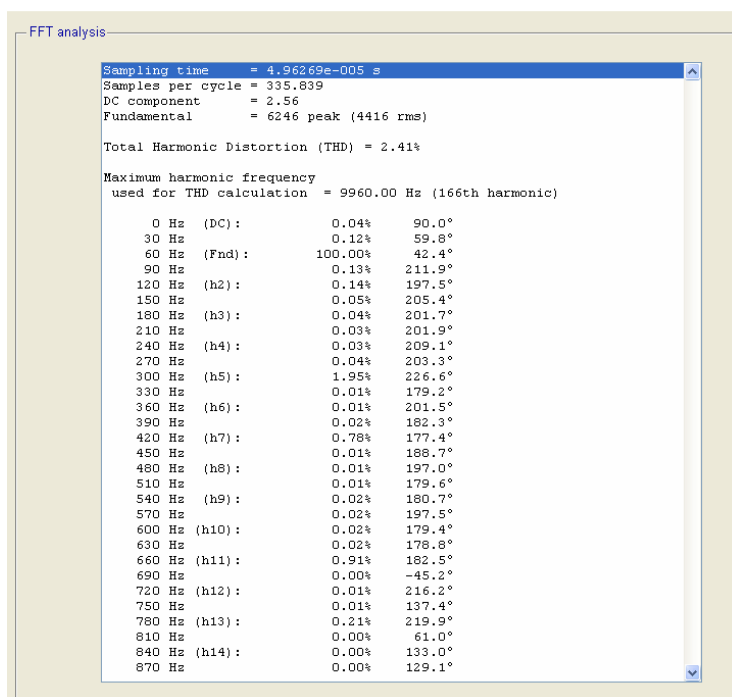


Tabela 4.9 – FFT do sistema com excitatriz e AVR, gerador sem carga

4.2.4 Análise dos resultados das simulações

A Tabela 4.5 apresenta o resumo dos valores das DHTv para cada um dos modelos de sistemas de excitação estudados. A compilação em um só documento permite melhor análise comparativa.

Configuração do sistema	DHT _v [%]		
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Sem carga	0,00	0,25	0,04
Com carga	0,71	2,46	2,41

Tabela 4.10: Resumo dos valores das DHTv dos modelos de excitação

Os sistemas descritos na tabela são:

- modelo 1: Sistema de excitação com excitatriz, sem AVR;
- modelo 2: Sistema de excitação sem excitatriz, com AVR alimentado em CA;

- modelo 3: Sistema de excitação com excitatriz, com AVR alimentado em CA.

Na comparação dos resultados, percebe-se que:

- Na configuração sem carga enquanto o modelo 3, apresenta valor de DHT_v muito pequeno, 0,04%, o modelo 2 apresenta um DHT_v de 0,25%. Este não é um valor absoluto elevado, mas relativamente ao modelo 3, sim. Como a diferença básica entre os dois modelos é a presença da excitatriz, conclui-se que a presença desta na regulação inicial da máquina traz resultados mais satisfatórios em relação as distorções harmônicas.
- Na configuração com cargas RLC e não lineares, apenas o modelo 1 mantém-se com um valor baixo de DHT_v 0,71%, os modelos 2 e 3 possuem DHT_v já considerados não tão baixos 2,46 e 2,41% respectivamente. Agora, a diferença que pode-se considerar para explicação dos valores, é que os dois últimos modelos utilizam-se de eletrônica de potência, ponte de tiristores, na regulação da máquina. Assim pode-se entender, que seja a combinação das distorções harmônicas geradas pelo regulador automático de tensão, AVR, com as distorções harmônicas das cargas não lineares responsáveis pela elevação do nível das distorções harmônicas no sistema.

4.3 Medições em campo dos sistemas

São mostrados os resultados obtidos nas medições do nível de harmônicos existentes nas três configurações de sistemas de excitação estudadas. As medições foram realizadas com um aparelho analisador de qualidade de energia, que possui um *software*, no qual é possível gerar gráficos das leituras efetuadas para análises.

Em cada uma das máquinas utilizadas para os estudos são efetuadas as medidas de duas maneiras: uma com a máquina conectada ao sistema elétrico de potência e outra com a máquina desconectada, para verificar a influência na qualidade de energia.

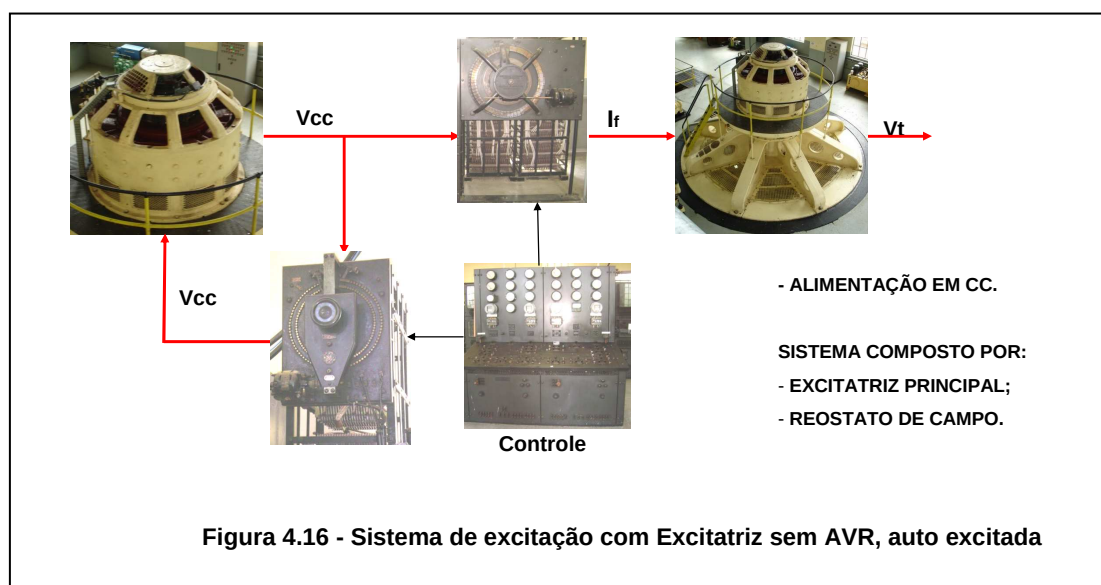
As medições realizadas na saída do gerador, antes do transformador elevador de tensão, devido aos elevados valores de tensão e de corrente, as pontas de prova dos medidores de tensão e de corrente são conectadas a TPs e TCs respectivamente.

As figuras mostram, a forma de onda da tensão gerada, o gráfico com as distorções harmônicas e a lista com os valores da porcentagem de contribuição de cada harmônico, DH_{I_V} , e o valor da distorção total, DHT_V .

4.3.1 Sistema de excitação com Excitatriz sem AVR, auto excitada

4.3.1.1 Descrição do sistema

A Figura 4.16 mostra o esquema de funcionamento de um sistema de excitação com excitatriz de corrente contínua auto-excitada, onde não se tem a utilização do AVR. Aqui é o operador que observa os valores de saída da máquina, tensão e potência reativa, compara com os parâmetros exigidos, ou seja, e efetua a regulação da máquina.



Eletricamente, Figura 4.17 a operação e o controle da máquina ocorre da seguinte forma. A excitatriz é acoplada ao eixo da máquina e gira na mesma velocidade que esta. O enrolamento de campo agora é fixo no estator e a armadura gira no rotor, tendo a função de gerar uma corrente contínua para alimentar o campo da máquina.

Na partida da máquina, o campo magnético remanescente no estator da excitatriz, constituído por pólos magnéticos, induz uma tensão inicial no rotor da excitatriz que agora é formada por bobinas. Esta tensão, embora de pequeno valor, é o suficiente para criar uma corrente e iniciar a geração do campo da máquina, onde surge uma tensão inicial nos terminais da mesma.

À medida que a velocidade do eixo aumenta, a tensão gerada pela excitatriz é controlada por um reostato ligado em série com o seu campo, e vai até atingir os valores nominais, os valores da corrente que serão fornecidos ao campo da máquina são controlados através do reostato de campo, que é ligado em série com este. Todos esses controles são efetuados e supervisionados pelo operador, numa atuação manual.

Após os valores de tensão, ângulo de fase das tensões e frequência da máquina estar dentro de certos limites de tolerância com os mesmos parâmetros do sistema, no qual a máquina será interligada, é o próprio operador que atua na chave que fechará o disjuntor de interligação, e a máquina estará assim, conectada ao sistema elétrico de potência do qual ela faz parte.

Durante todo o tempo em que a máquina estiver em funcionamento, o operador que efetuará todo o controle da máquina, no sentido de mante-la dentro dos parâmetros solicitados pelo sistema elétrico de potência.

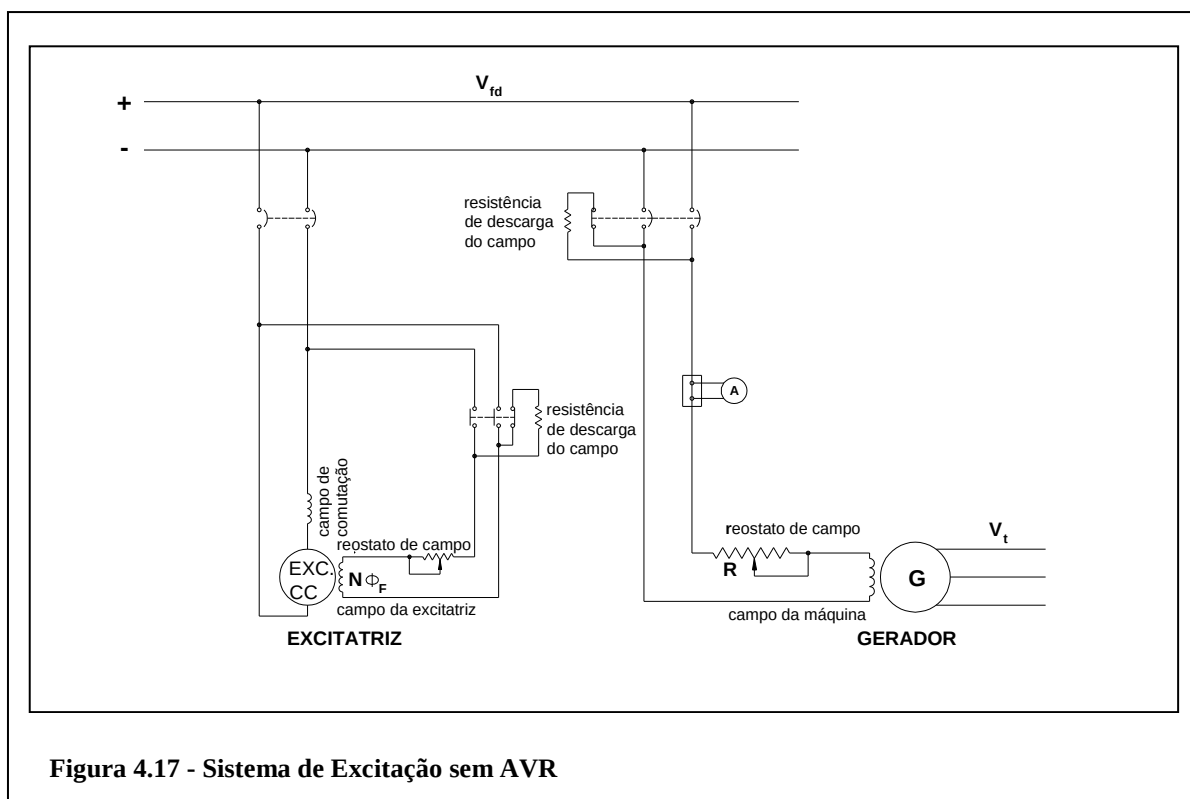


Figura 4.17 - Sistema de Excitação sem AVR

Portanto, na regulação de tensão desse sistema não há a utilização de componentes com características de cargas não lineares. Escolhe-se, dessa forma, esse sistema como referência para o estudo e comparação com os demais sistemas de excitação a serem estudados.

4.3.1.2 Medições Realizadas

Na Figura 4.18 estão as medidas obtidas com o gerador não sincronizado com o sistema elétrico, ou seja, gerador em vazio. O valor da DHTv, medido é de 1,80%, sendo que a maior contribuição deve-se ao 3º harmônico com 1,49%. Contribuem ainda, o 5º, 7º, 9º e 11º harmônicos, porém com valores desprezíveis.

Como a máquina encontra-se operando em vazio as distorções ocorridas são provocadas por detalhes construtivos, sendo a principal deles a distribuição espacial dos enrolamentos, provocando harmônicos espaciais.

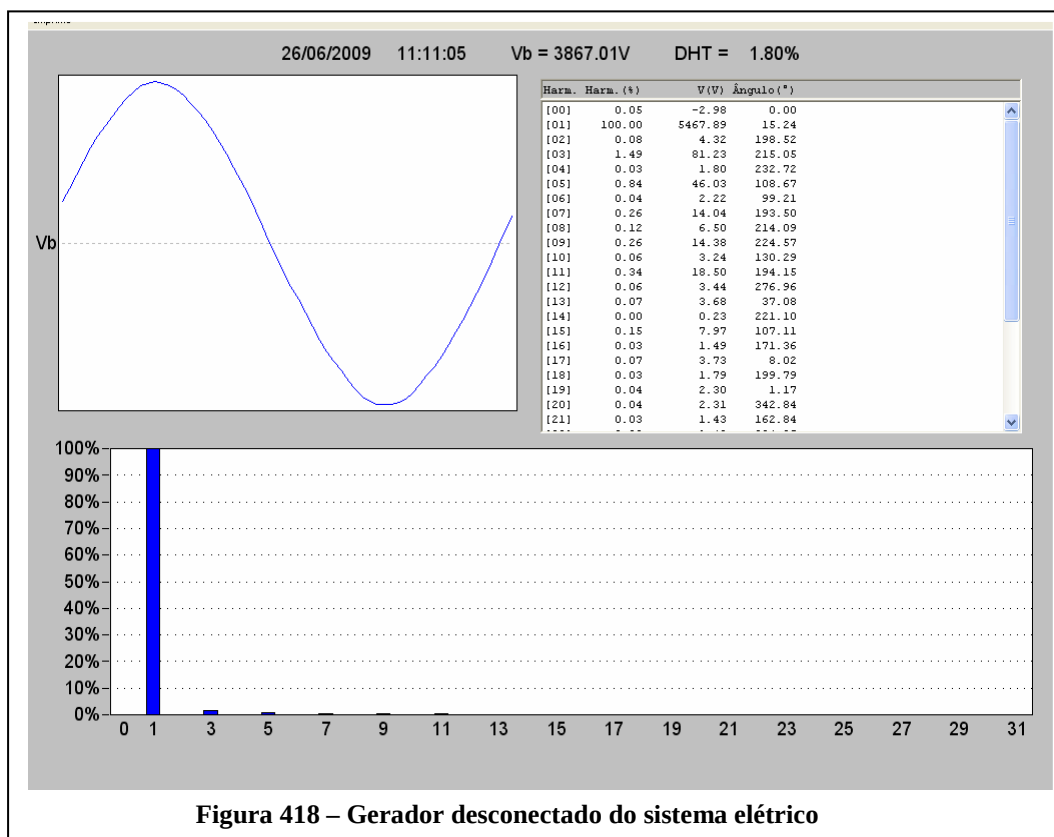
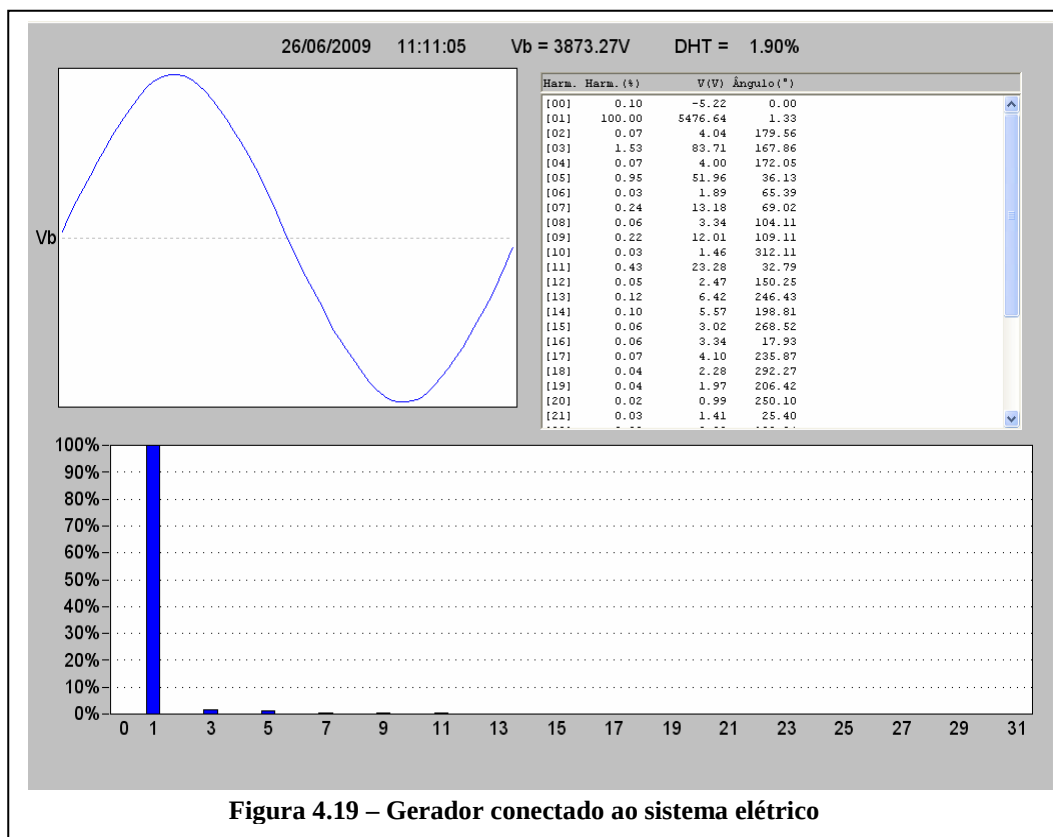


Figura 418 – Gerador desconectado do sistema elétrico

A Figura seguinte, 4.19 refere-se ao mesmo sistema anterior, porém nesse instante o gerador está sincronizado com o sistema elétrico e portanto com carga.

Apesar de estar conectado ao sistema, o valor do DHTv, praticamente não se altera e atinge o valor de 1,90%. A maior contribuição, para a distorção harmônica permanece sendo o do 3º harmônico que se elevou para 1,53%. As demais componentes 5º, 7º, 9º e 11º harmônicos, também aparecem com valores irrisórios.

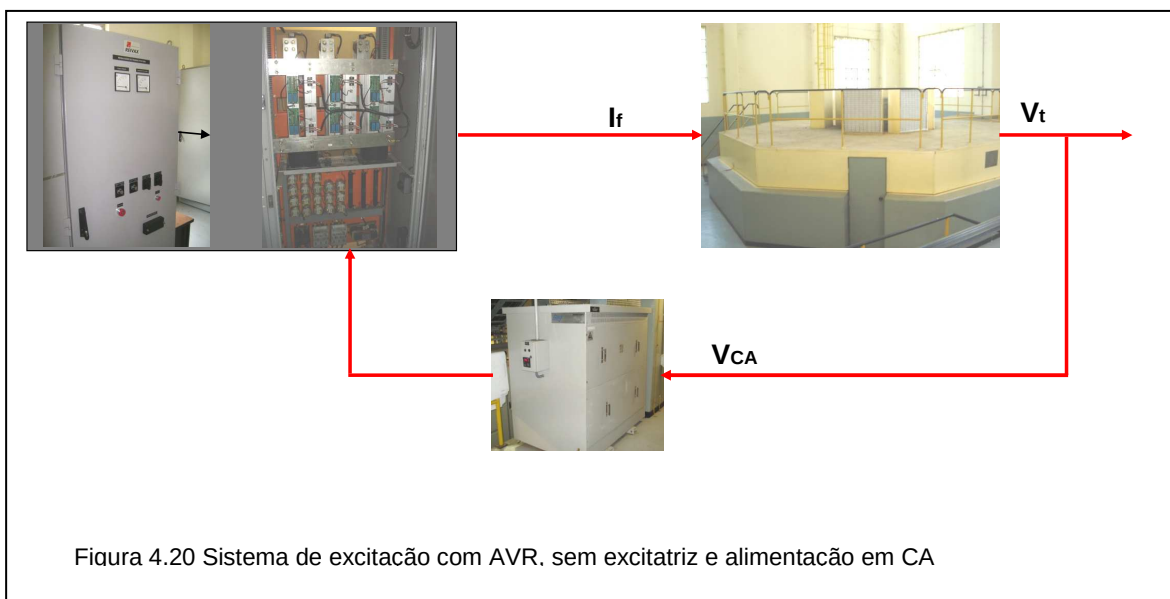
Como o valor DHTv quase não se altera, mesmo com o gerador conectado ao sistema, pode-se dizer, que o sistema alimentado pelo gerador encontra-se com níveis de distorção harmônica muito baixos.



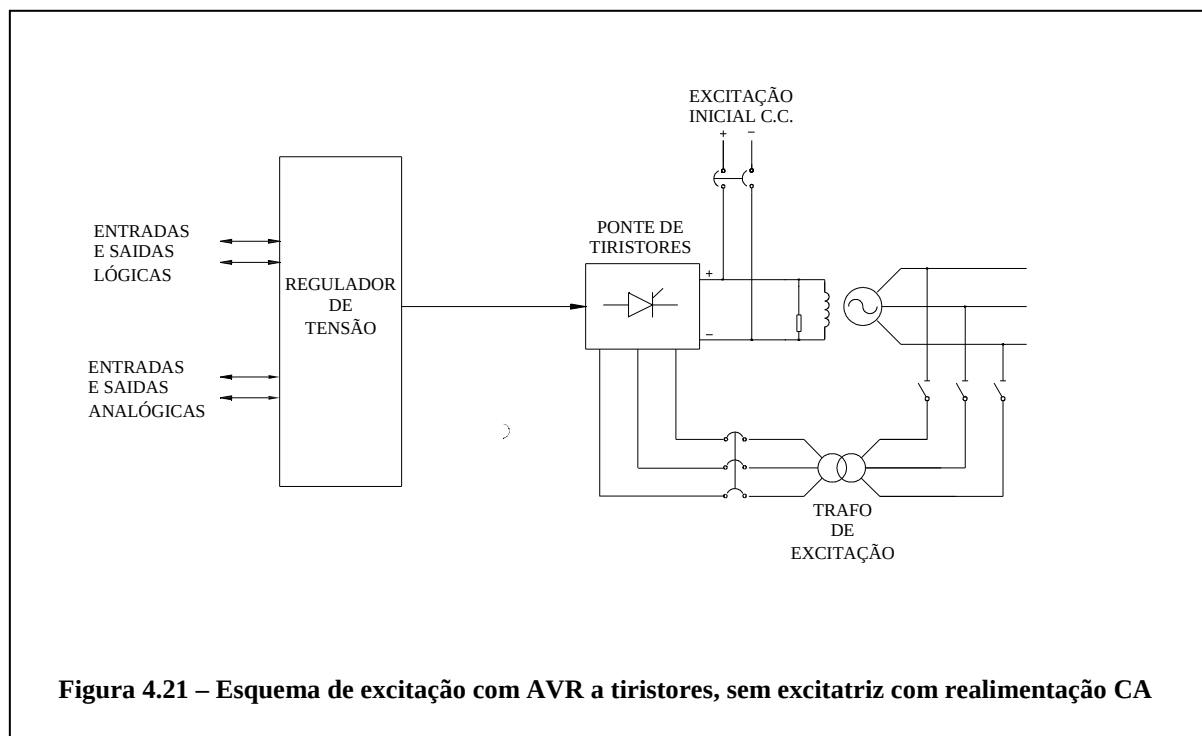
4.3.2 Sistema de excitação com AVR, sem excitatriz e alimentação em CA

4.3.2.1 Descrição do sistema

Nesse sistema a regulação, Figura 4.20, não é mais manual, e sim através do sistema automático de regulação de tensão, o AVR. Também, não se utiliza uma excitatriz para fazer a regulação da máquina. O sistema de regulação, agora, é constituído por um transformador de excitação conectado na saída da máquina, que alimenta uma ponte retificadora a tiristor, que tem a função de fornecer a corrente para o campo da máquina, de modo controlado. O controle de disparo dos tiristores é feito pelo regulador de tensão, que pega o sinal de referência por um TP, também conectado na saída da máquina.



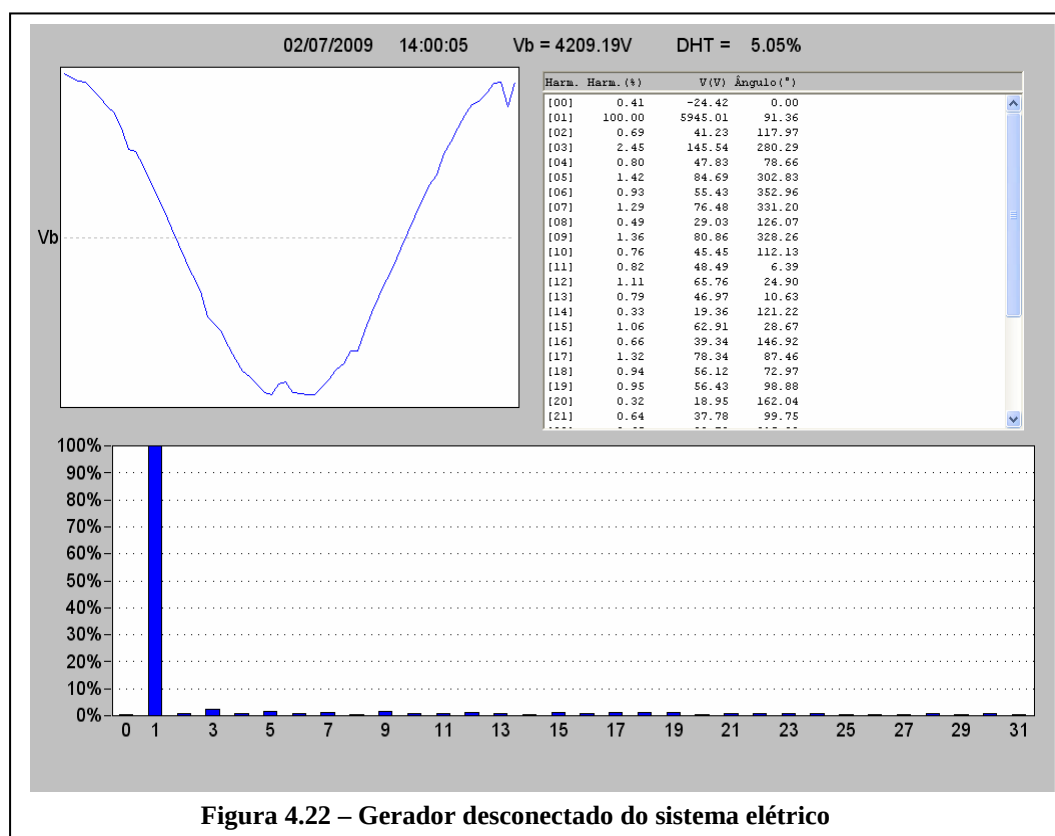
Na Figura 4.21 está representado o esquema elétrico do sistema descrito acima de maneira simplificada, utilizado atualmente em diversas usinas de geração de energia.



4.3.2.2 Medições Realizadas

A Figura 4.22, se refere às medições da configuração do esquema, da figura anterior. Inicialmente as medidas obtidas são do gerador não sincronizado ao sistema elétrico. O valor da DHTv, medido é de 5,05%, que pode ser considerado como alto, novamente, a maior contribuição deve-se ao 3º harmônico com 2,45%. Os valores de DHLv das 5º, 7º, 9º e 11º harmônicos, são: 1,42%; 1,29%; 1,36% e 1,11% respectivamente.

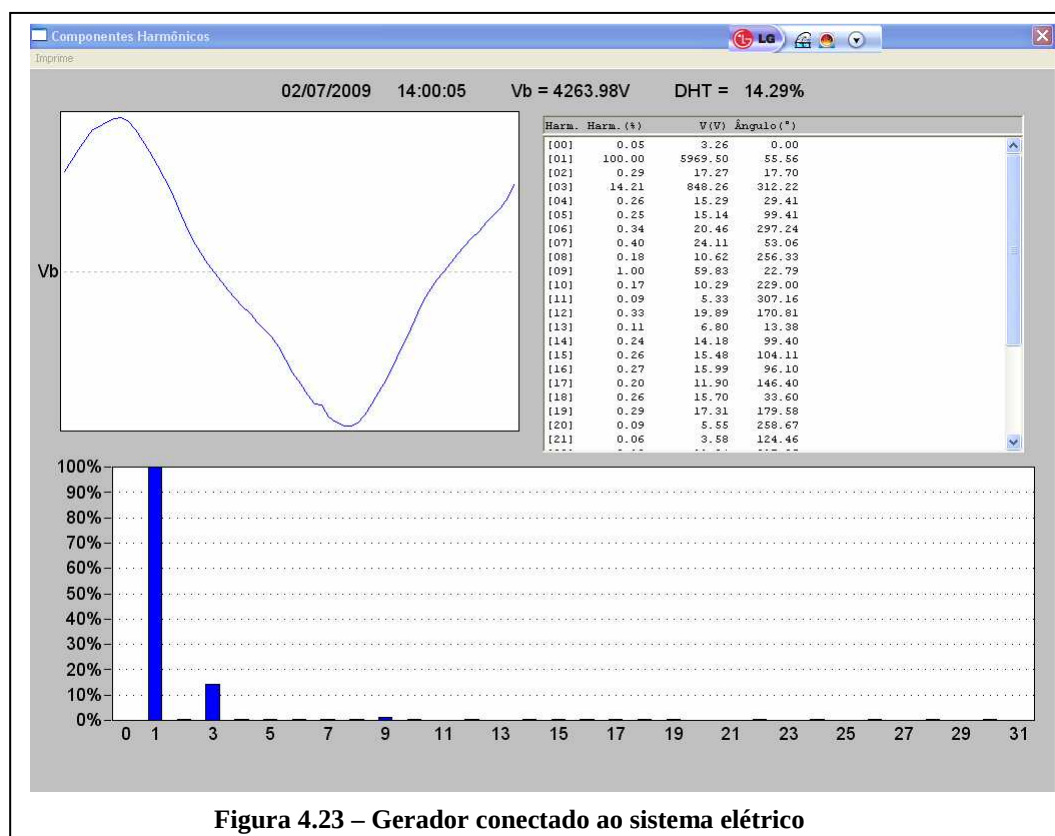
Como a máquina opera em vazio, as distorções ocorridas são provocadas pelo seu próprio sistema de excitação.



Na Figura 4.23 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%. O valor da contribuição do 3º harmônico também se eleva bastante e passa para 14,21%. As demais componentes 5º, 7º, 9º e 11º harmônicos, aparecem com valores que podem ser desprezados.

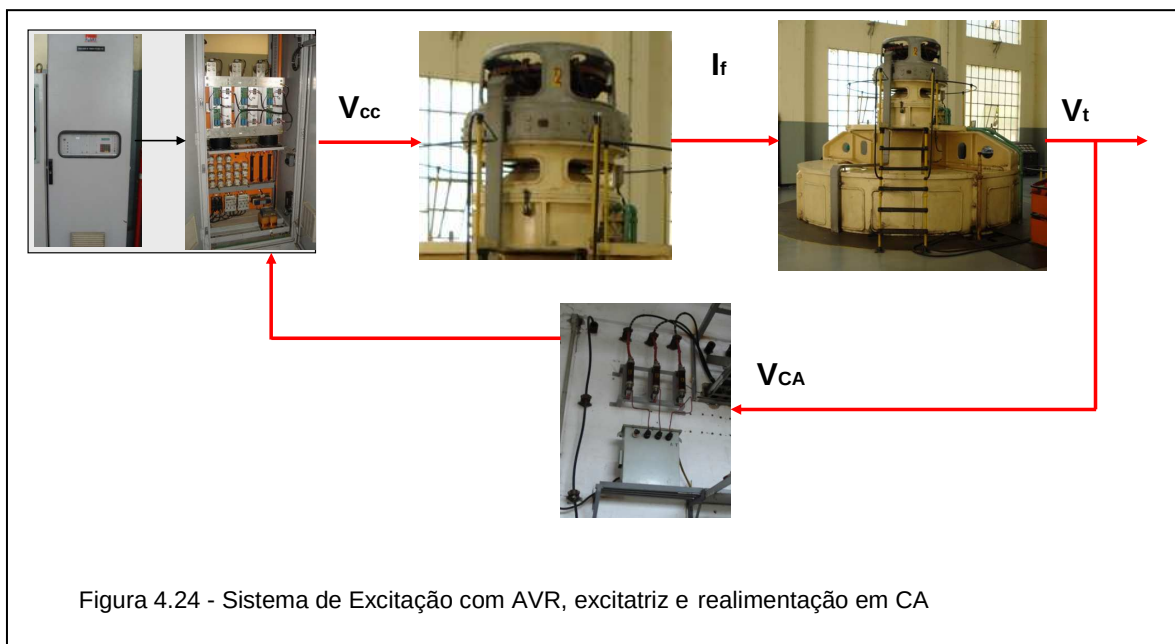
Como o valor da DHTv se altera de forma bem expressiva, e como o sistema sem carga também apresenta valores significativos, deduz-se que o sistema alimentado possui distorções harmônicas que se combinam com a do sistema gerador/excitação.



4.3.3 Sistema de Excitação com AVR, excitatriz e realimentação em CA

4.3.3.1 Descrição do sistema

Nesse terceiro sistema de excitação, Figura 4.24, a regulação é semelhante ao visto no anteriormente, que é feito através do sistema automático de regulação de tensão, AVR.

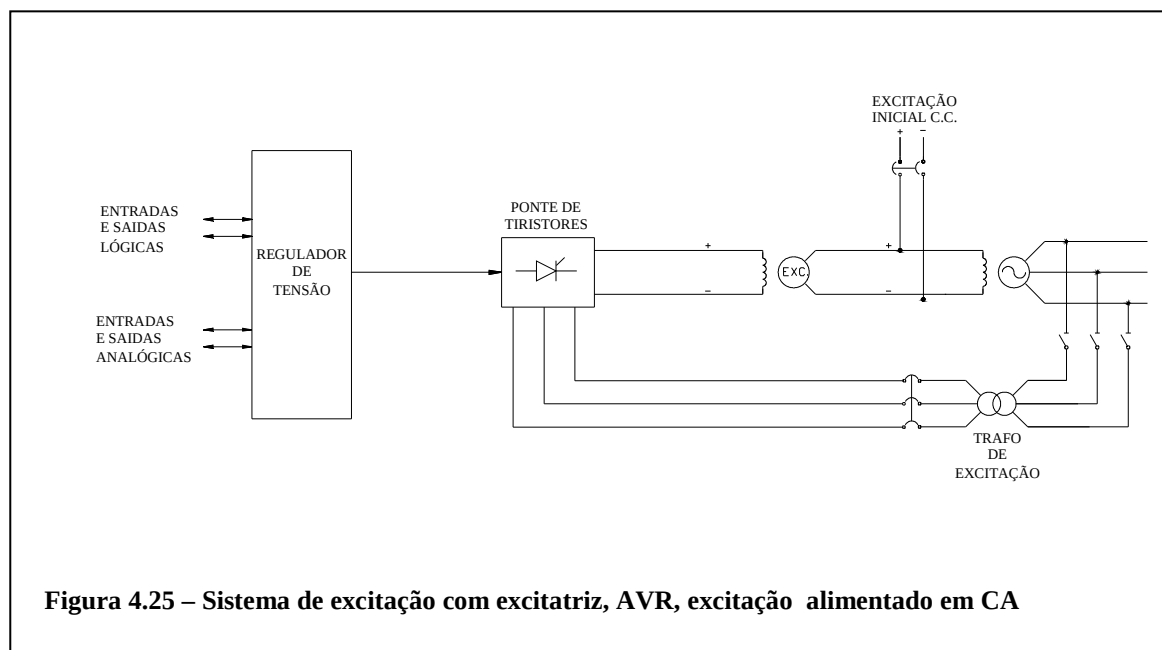


Da mesma forma, utiliza-se uma excitatriz para fazer a regulação de tensão da máquina. O sistema de regulação, também é constituído por um regulador automático de pequeno porte, onde uma ponte de tiristores tem a função de controlar a corrente de campo da excitatriz da máquina. A diferença fundamental é que nesse regulador a realimentação é em CA, por um transformador de excitação conectado na saída da máquina que alimenta a ponte retificadora a tiristor, e é essa que tem a função de fornecer a corrente para o campo da máquina de modo controlado.

Pode-se dizer que esse modelo é um misto dos dois modelos vistos anteriormente, pois apesar de controlar o campo da excitatriz, ele utiliza uma ponte

de tiristores para retificar a corrente, que agora é alternada e obtida nos terminais do gerador.

Na Figura 4.25 há uma representação esquemática elétrico do sistema descrito acima de maneira simplificada.

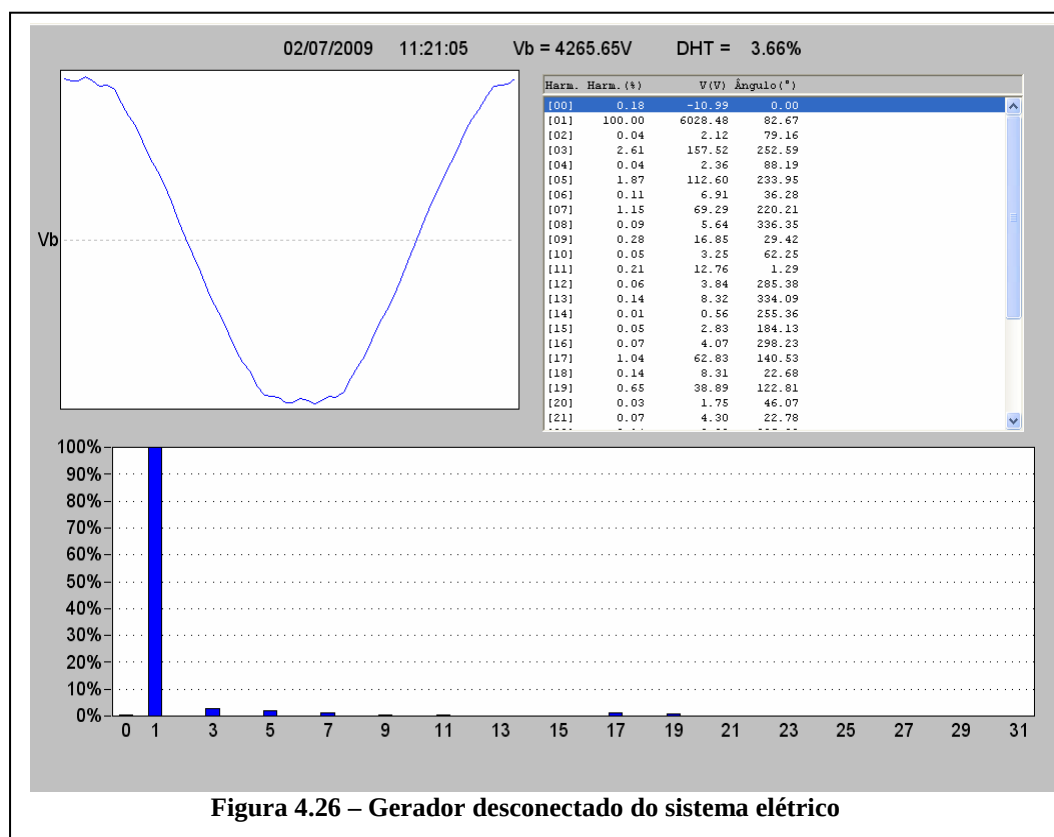


4.3.3.2 Medições Realizadas

Na Figura 4.26, está o resultado das medições do esquema da figura acima, para o instante em que o gerador opera em vazio, não conectado ao sistema elétrico. O valor obtido para DHTv, é de 3,66%, que pode ser considerado razoavelmente alto, para a máquina sem carga. Algumas componentes harmônicas têm valores que merecem destaque:

- 3ª harmônica: 2,61%;
- 5ª harmônica: 1,87%;
- 7ª harmônica: 1,15%;
- 17ª harmônica: 1,09%;
- 19ª harmônica: 0,65%.

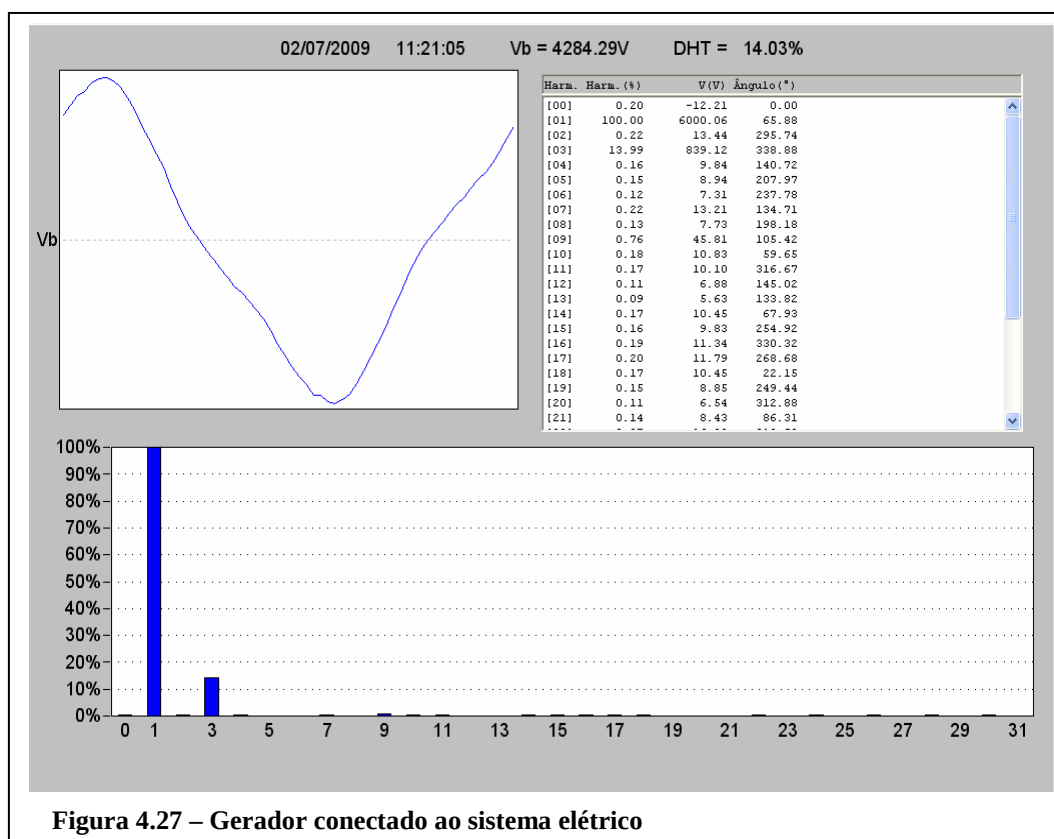
Como a máquina não está sincronizada com o sistema e opera em vazio, as distorções medidas, são devidas ao sistema gerador/excitação.



Na Figura 4.27 estão os valores medidos para o mesmo sistema anterior, mas com o gerador conectado ao sistema elétrico, ou seja, com carga. O valor do DHTv sofre uma grande elevação e atinge o valor de 14,03%.

Novamente valor da contribuição do 3º harmônico também se eleva bastante e passa para 13,99% e as demais componentes harmônicas, contribuem com valores desprezíveis.

Como o valor da DHTv se altera de forma bastante expressiva e como o sistema sem carga também apresenta valores significativos fica confirmado que os valores encontrados se devem à combinação das distorções harmônicas do sistema alimentado com as do sistema gerador/excitação.



4.3.4 Análise dos resultados das medições

A Tabela 4.5 apresenta o resumo dos valores das DHT_v para cada um dos sistemas de excitação estudados para auxiliar na análise.

Configuração do sistema	DHT _v sistema1 [%]	DHT _v sistema2 [%]	DHT _v sistema3 [%]
Sem carga	1,80	5,05	3,66
Com carga	1,90	14,29	14,03

Tabela 4.5: Resumo dos valores das DHT_v para cada sistema.

Onde:

- Sistema 1: Sistema de excitação com excitatriz, sem AVR;
- Sistema 2: Sistema de excitação sem excitatriz, com AVR alimentado em CA;
- Sistema 3: Sistema de excitação com excitatriz, com AVR alimentado em CA.

A comparação dos valores de medição expostos na tabela permite elaborar os seguintes raciocínios sobre os esquemas estudados:

- Na configuração sem carga o sistema 2 possui o maior valor de DHTv. No sistema 3 também é apresentado um valor alto de DHTv;
- Na configuração com as cargas, o maior valor de DHTv também está no sistema 2, mas o sistema 3 possui quase o mesmo valor.

4.4 Conclusão

Na análise dos resultados obtidos nas simulações dos três sistemas e confirmados pelas medições de campo, pode-se verificar que, originalmente, quando a regulação de tensão é realizada pelo operador, sem a utilização do AVR, as distorções harmônicas presentes nos sistemas, tem valores bem menores do que os outros dois que aplicam o AVR na regulação.

Conclui-se então, que são os componentes eletrônicos, como os tiristores, presentes nos AVR os principais responsáveis pelo surgimento das distorções harmônicas nos terminais da máquina.

No próximo capítulo são realizados estudos de um sistema de excitação proposto para diminuir a ocorrência de distorções harmônicas nas máquinas síncronas causadas pelo AVR.

5.1 Introdução

Nesse capítulo estuda-se uma configuração de sistema de excitação como alternativa para diminuição das distorções harmônicas causadas pelos sistemas estudados anteriormente. Trata-se de um sistema com excitatriz e regulador automático de tensão, porém sem utilização da ponte de tiristores.

Inicia-se o estudo pela simulação de um modelo do sistema proposto, e depois completa-se o estudo com análise de medições realizadas em um sistema real montado.

5.2 Simulações

Para a composição do modelo de sistema de excitação proposto, utiliza-se blocos de modelos matemáticos da biblioteca do *SimPowerSystem*, e nas simulações a ferramenta “*Simulink*” ambas do “software” Matlab.

5.2.1 Descrição do sistema

Compõem-se o modelo de simulação com os seguintes blocos:

- um gerador síncrono trifásico;
- um gerador de CC, que faz a função de excitatriz ;
- um regulador automático de tensão, AVR,
- um transformador trifásico elevador de tensão;
- duas carga RLC;
- uma carga não linear;
- três chaves seccionadoras.

Esse modelo é similar ao modelo3 simulado anteriormente, pois possui a excitatriz e o regulador automático de tensão, AVR. Aqui também a corrente de campo do gerador, é fornecida pela excitatriz, porém a sua corrente de armadura é fornecida, inicialmente por uma fonte externa de CC e após o gerador atingir a sua rotação nominal, é fornecida pela própria excitatriz, sendo esta corrente controlada pelo AVR. O transformador elevador alimenta as cargas RLC e não lineares.

5.2.2 Simulações do modelo

Assim como nas simulações anteriores, efetua-se as simulações em duas configurações distintas: com o gerador em vazio, e com cargas formadas por cargas RLC e cargas não lineares, sendo que as medidas são tomadas na saída do gerador.

Lista-se a seguir os parâmetros utilizados para o bloco do gerador escolhido na simulação desse modelo

Parâmetros do estator						
V _{nom} [kV]	P _{nom} [MVA]	F [Hz]	Rs [pu]	LI [pu]	Lmd [pu]	Lmq [pu]
6,6	11,0	60	2,85E-03	0,114	1,19	0,36
Parâmetros do campo				Coeficiente de inércia		Nº de pólos
V _f [pu]	R _f [pu]	LI _f [pu]	H[s]		p	
1	5,79E-04	0,114	3,7		24	
Parâmetros do amortecimento						
Rkd[pu]		Llkd [pu]		Rkd1 [pu]		Llkd1 [pu]
1,17E-02		0,182		1,97E-02		0,384

Tabela 5.1 – Parâmetros utilizados para o gerador do sistema de excitação com excitatriz e AVR alimentado em CC

Na figura 5.1, representa-se o esquema do modelo completo do sistema de excitação simulado. O tempo total de simulação é de 28 segundos, com o sistema em 2 configurações, primeiro com gerador em vazio e depois com o gerador em carga.

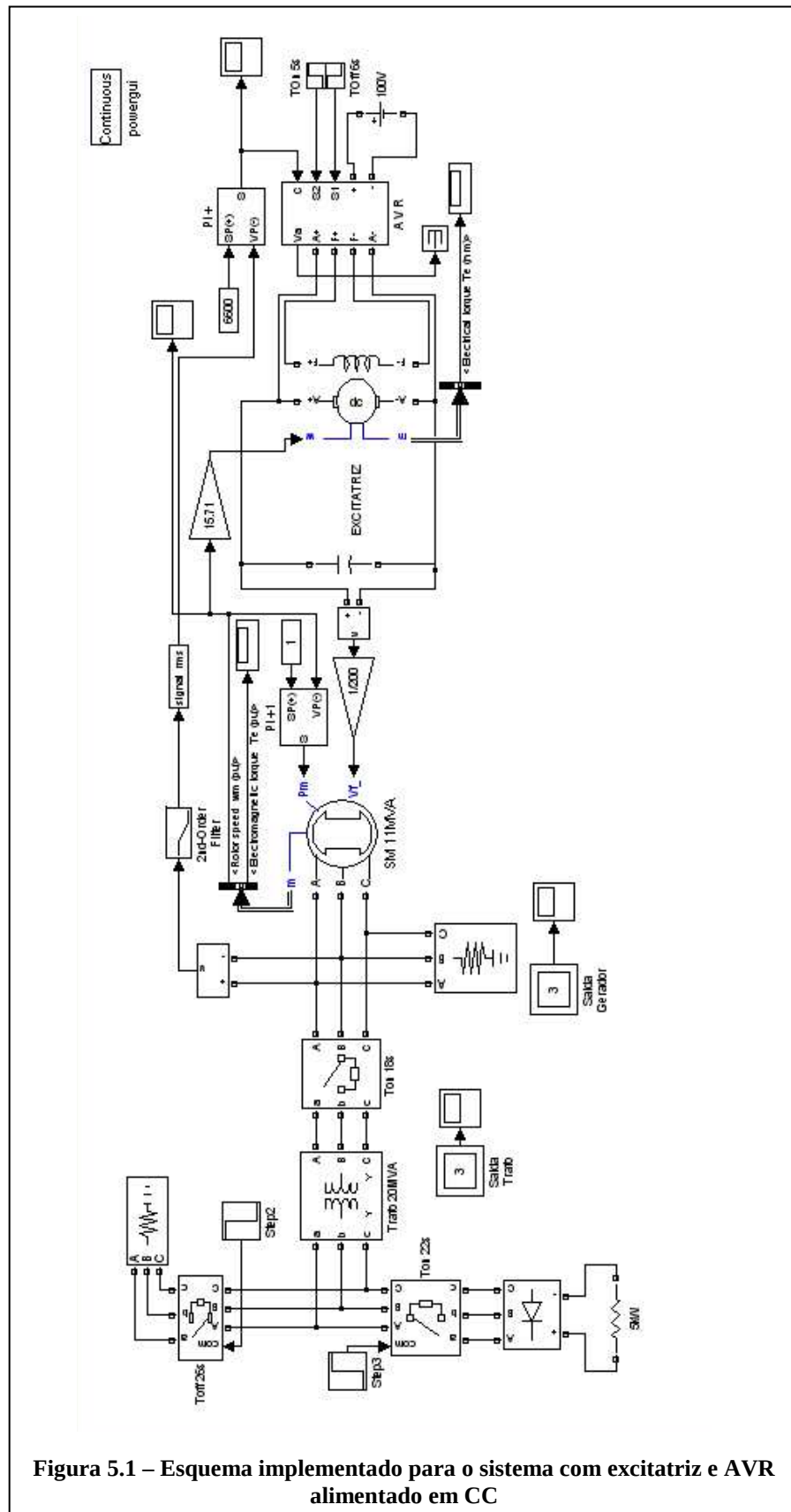


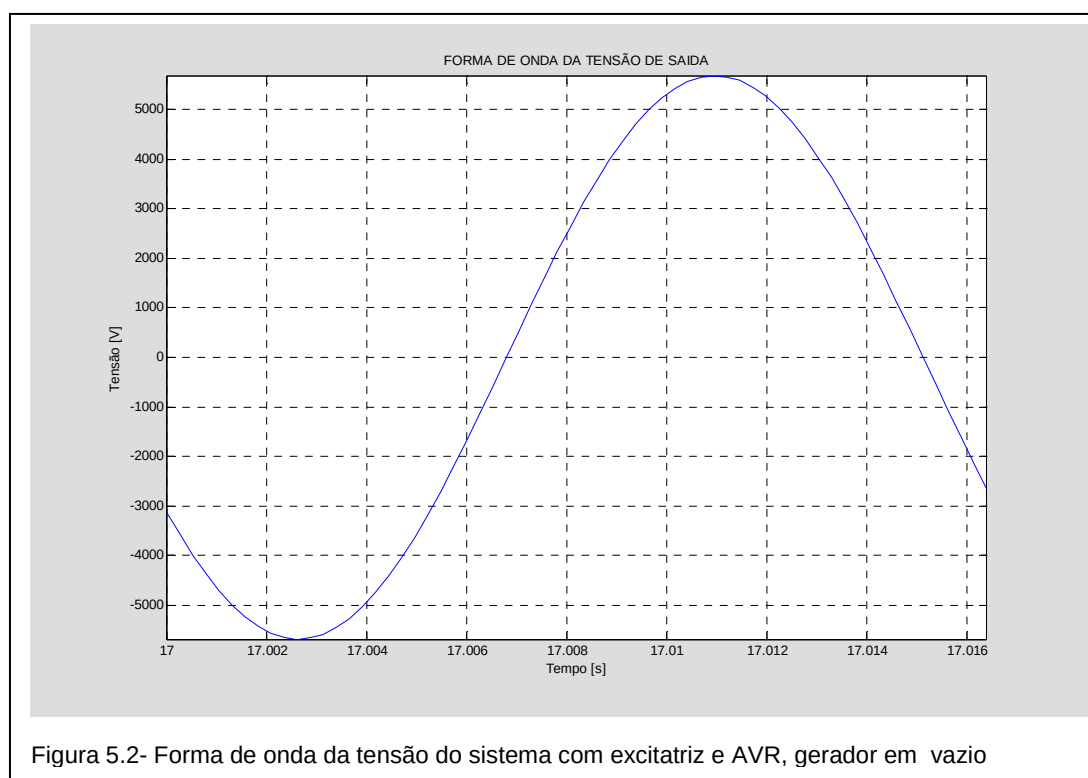
Figura 5.1 – Esquema implementado para o sistema com excitatriz e AVR alimentado em CC

5.2.3 Resultados obtidos na simulação

Os resultados das simulações do modelo de excitação com excitatriz controlado por AVR alimentado em CA são apresentados a seguir em forma de gráficos e listas das transformadas rápidas de Fourier, FFT.

As figuras referem-se a duas configurações do modelo: uma com o gerador em vazio e outra com o gerador alimentado cargas RLC e não lineares.

Na figura 5.2 tem-se a forma de onda da tensão nos terminais de saída do gerador.



Pode-se verificar que as deformações na forma de onda são, devido as distorções harmônicas, são praticamente imperceptíveis. O valor da DHT_V é de apenas 0,04%, um valor considerado muito baixo, assim como ocorreu nos outros modelos simulados, onde a corrente de campo do gerador é fornecida pela excitatriz, que efetua uma boa regulação na fase inicial do processo.

Com a lista dos valores da FFT, da Tabela 5.2, pode-se observar o valor da contribuição de cada componente harmônica para o sistema. Observa-se também que o comportamento das parcelas em termos de contribuição é semelhante ao visto anteriormente, ou seja, o valor de cada ordem é muito pequeno e decrescente, e que tem harmônicos de ordem par, indicando a presença da componente contínua no sistema nesse instante.

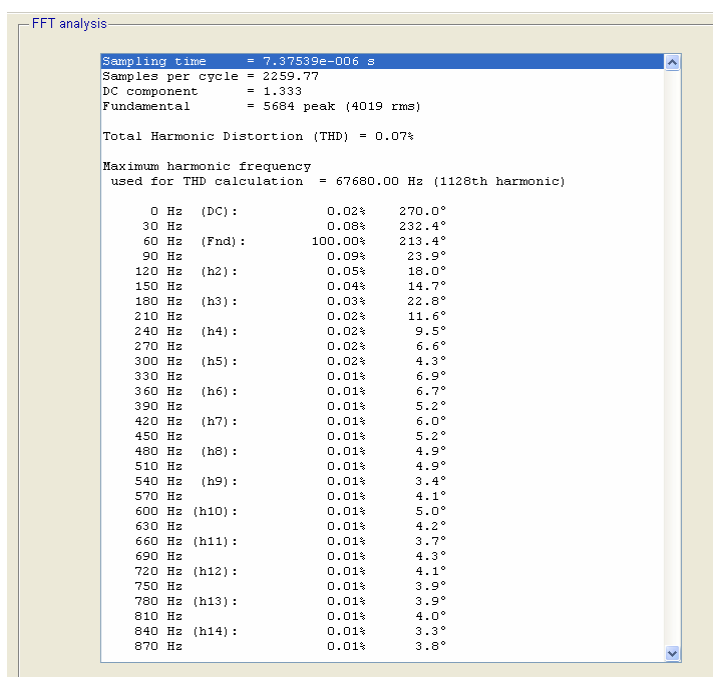


Tabela 5.2 - FFT do sistema com excitatriz e AVR, gerador sem carga

Na Figura 5.3 expõe-se a forma de onda da tensão de saída do gerador em um novo instante, para a configuração do sistema com as cargas RLC e não lineares, ou seja, para o gerador com carga.

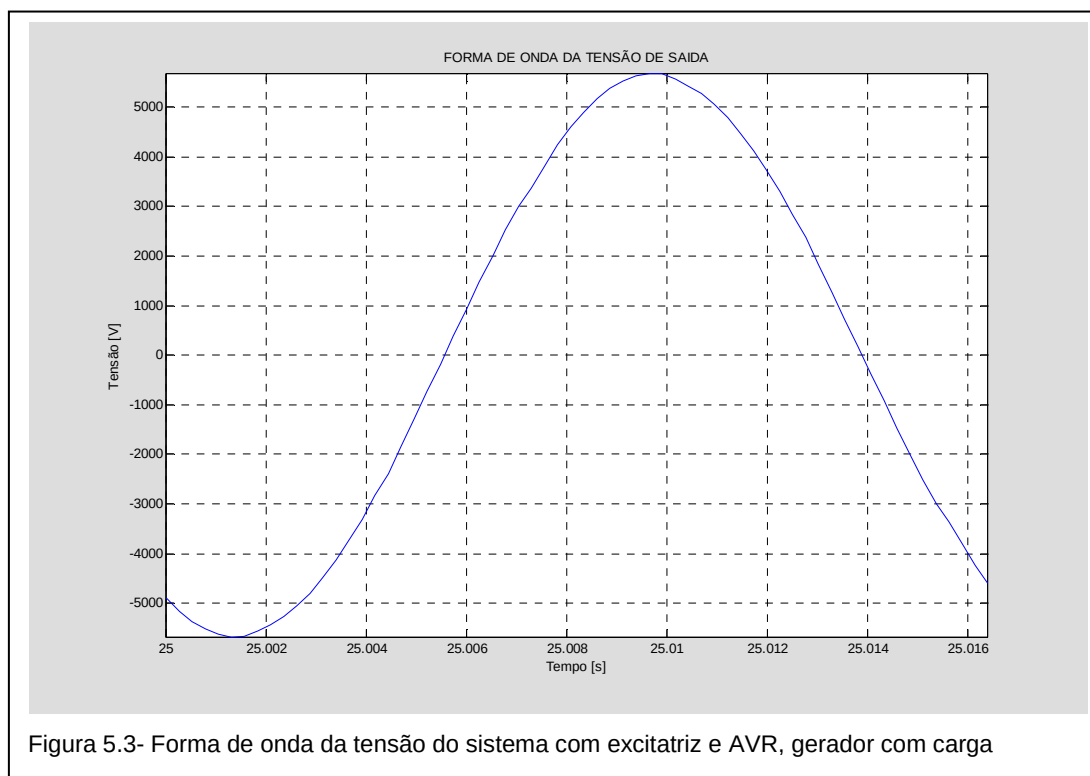


Figura 5.3- Forma de onda da tensão do sistema com excitatriz e AVR, gerador com carga

É possível observar que o valor da DHT_V , 0,64%, apesar de ter aumentado, agora com as cargas, é bastante inferior aos apresentados pela mesma configuração dos modelos 2 e 3 estudados anteriormente.

Fato é, que a utilização de um modelo de excitação onde não tem-se a ponte de tiristores chaveando constantemente, reduz bastante o nível da distorção harmônica na tensão gerada pela máquina, mesmo alimentando cargas não lineares. Outro fato, é o comportamento regular do espectro das componentes, e a presença de uma componente de ordem par, indicando a presença de componente continua no processo.

Com o auxílio da lista da FFT do sistema simulado, da Tabela 5.3, pode-se conferir as contribuições das componentes harmônicas se destacam no processo.

Percebe-se pela da lista, que a maior parcela de distorção harmônica é o de 5ª ordem com 0,41%, seguido pelo 11ª com 0,30% , aparecendo ainda os harmônicos de 7ª e 13ª ordem com valores de 0,11% e 0,10% respectivamente. Mais uma vez não se percebe as parcelas relativas a 3ª ordem e seus múltiplos, evidenciando que as distorções devem-se a carga não linear, composta por retificadores.

FFT analysis		
Sampling time	=	7,37539e-006 s
Samples per cycle	=	2259,77
DC component	=	0,5419
Fundamental	=	5660 peak (4002 rms)
Total Harmonic Distortion (THD) = 0.64%		
Maximum harmonic frequency used for THD calculation = 67680.00 Hz (1128th harmonic)		
0 Hz (DC):	0.01%	270.0°
30 Hz	0.03%	253.4°
60 Hz (Fnd):	100.00%	239.9°
90 Hz	0.02%	49.0°
120 Hz (h2):	0.10%	78.0°
150 Hz	0.01%	32.4°
180 Hz (h3):	0.01%	33.6°
210 Hz	0.00%	20.3°
240 Hz (h4):	0.00%	32.6°
270 Hz	0.00%	25.5°
300 Hz (h5):	0.41%	173.7°
330 Hz	0.00%	13.9°
360 Hz (h6):	0.00%	11.6°
390 Hz	0.00%	12.2°
420 Hz (h7):	0.11%	169.2°
450 Hz	0.00%	8.4°
480 Hz (h8):	0.00%	19.2°
510 Hz	0.00%	7.5°
540 Hz (h9):	0.00%	7.4°
570 Hz	0.00%	2.4°
600 Hz (h10):	0.00%	-32.0°
630 Hz	0.00%	-12.2°
660 Hz (h11):	0.30%	-57.7°
690 Hz	0.00%	48.5°
720 Hz (h12):	0.00%	77.4°
750 Hz	0.00%	24.6°
780 Hz (h13):	0.10%	8.2°
810 Hz	0.00%	30.8°
840 Hz (h14):	0.00%	-47.2°
870 Hz	0.00%	24.8°

Tabela 5.3 – FFT do sistema com excitatriz e AVR, gerador com carga

5.2.4 Análise dos resultados das simulações

Com a análise dos resultados obtidos na simulação do modelo de sistema de excitação proposto pode-se observar que:

- na configuração do modelo sem carga o DHTv de 0,07% um valor quase que desprezível, que demonstra a não geração de distorções harmônicas pelo regulador automático de tensão nessa etapa;
- na configuração do modelo com cargas RLC e não linear, o DHTv de 0,64%, apesar de ter aumentado bastante em relação a etapa anterior da simulação, pode ser considerado muito pequeno, que mostra um desempenho muito satisfatório do regulador automático de tensão em relação a geração de distorções harmônicas nos terminais do gerador.

5.3 Medições realizadas

Nesse sistema de excitação proposto, Figura 5.4, a regulação também é feita através do sistema automático de regulação de voltagem, o AVR, atuando na excitatriz para fazer a regulação da máquina.

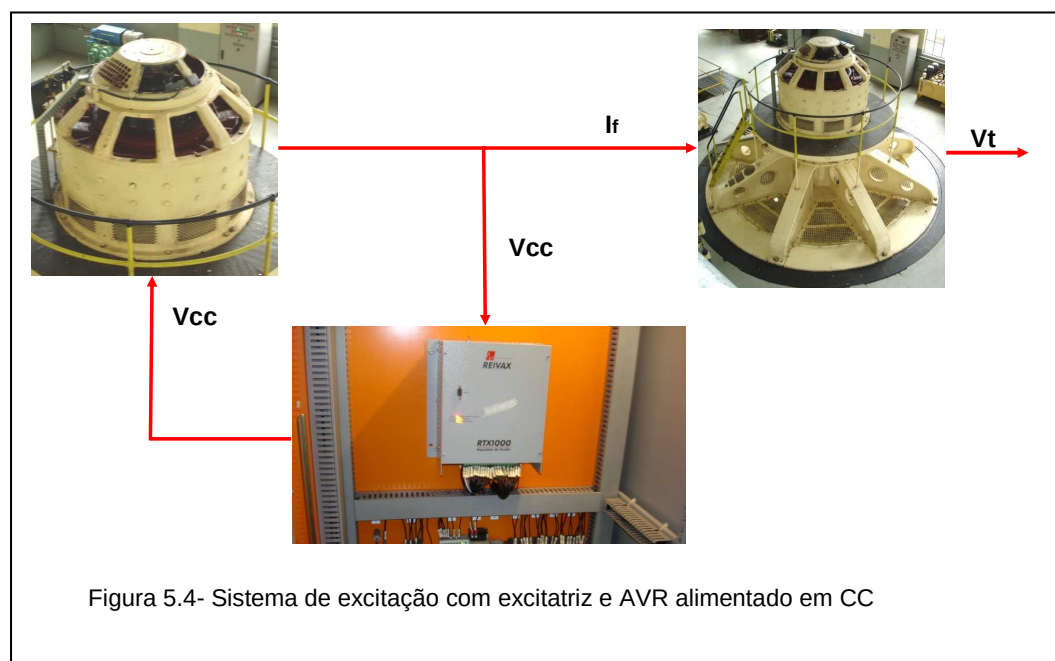
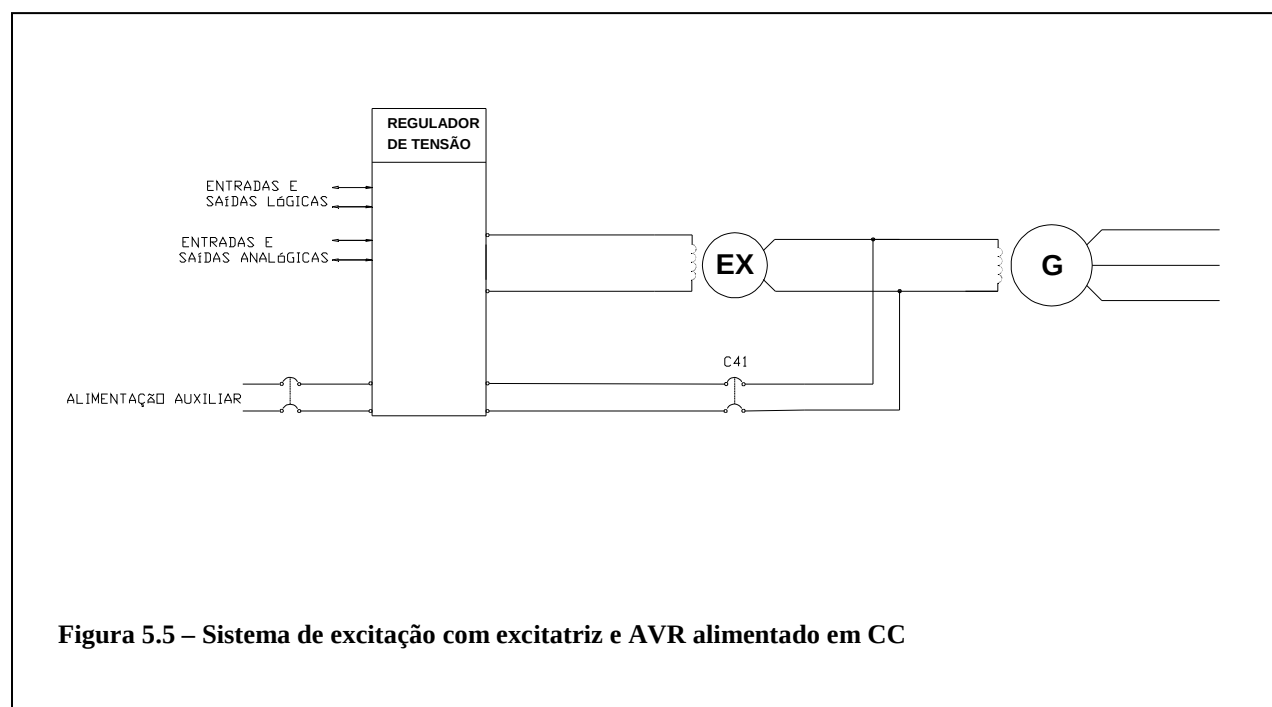


Figura 5.4- Sistema de excitação com excitatriz e AVR alimentado em CC

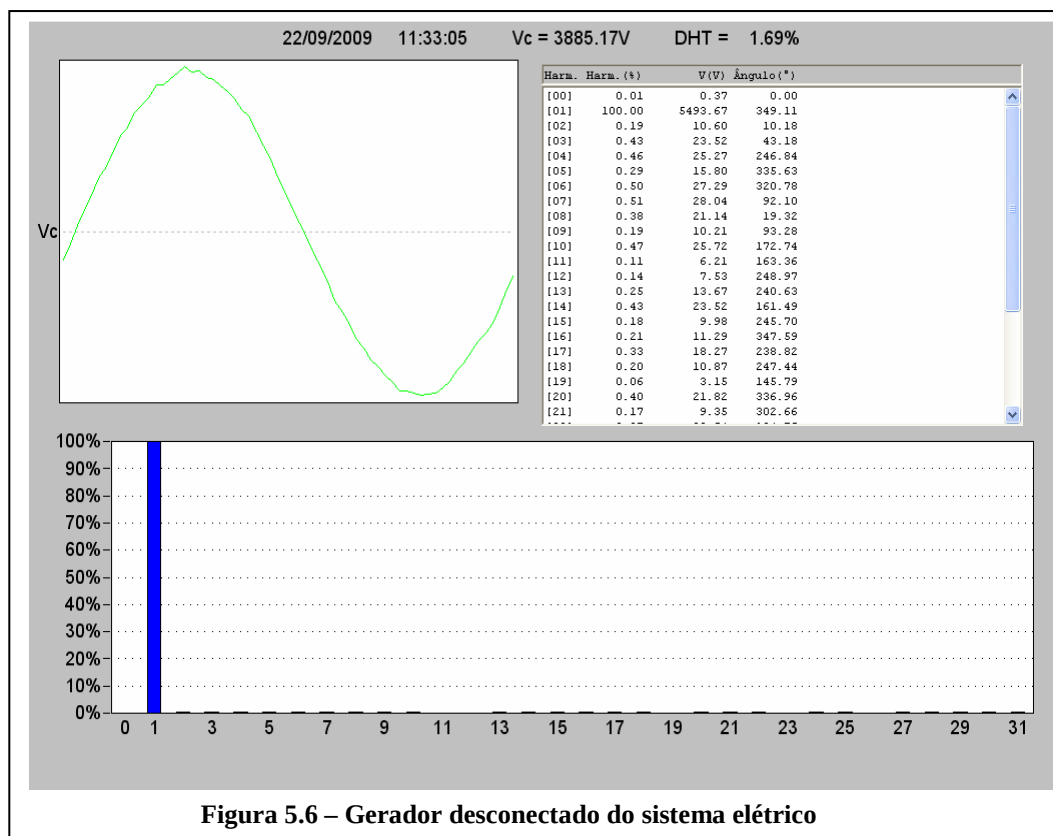
O AVR agora é constituído por um regulador automático de pequeno porte com uma ponte de tiristores que tem a função de controlar a corrente de campo da excitatriz da máquina. A diferença fundamental, é que este regulador é realimentado em CC, com a tensão fornecida pelos terminais de saída da excitatriz.

Esse modelo é chamado de regulador de pequeno porte, devido ao fato de controlar a corrente do campo da excitatriz e não do campo da máquina, os valores dessa corrente são bem menores e assim a ponte de tiristores necessária para controle da tensão também será menor bem como os seus auxiliares.

A Figura 5.5 representa esquematicamente o sistema com AVR, excitatriz e realimentação CC.



A Figura 5.6, apresenta as medições do esquema da Figura 5.6, para o instante em que o gerador está sem carga, ainda não sincronizado com o sistema elétrico.



As medidas obtidas para DHTv têm valores de 1,69%, que pode ser considerado baixo, o menor de medição em campo registrado até o momento.

A Figura 5.7 tem os valores obtidos para o mesmo sistema anterior, no entanto, nesse instante o gerador está conectado ao sistema elétrico, portanto operando com carga.

Nota-se que o valor do DHTv eleva-se ligeiramente e atinge o valor de 2,06%. Merece destaque apenas a contribuição do 3º harmônico com valor de 1,20%. As demais componentes harmônicas aparecem com valores bem menores.

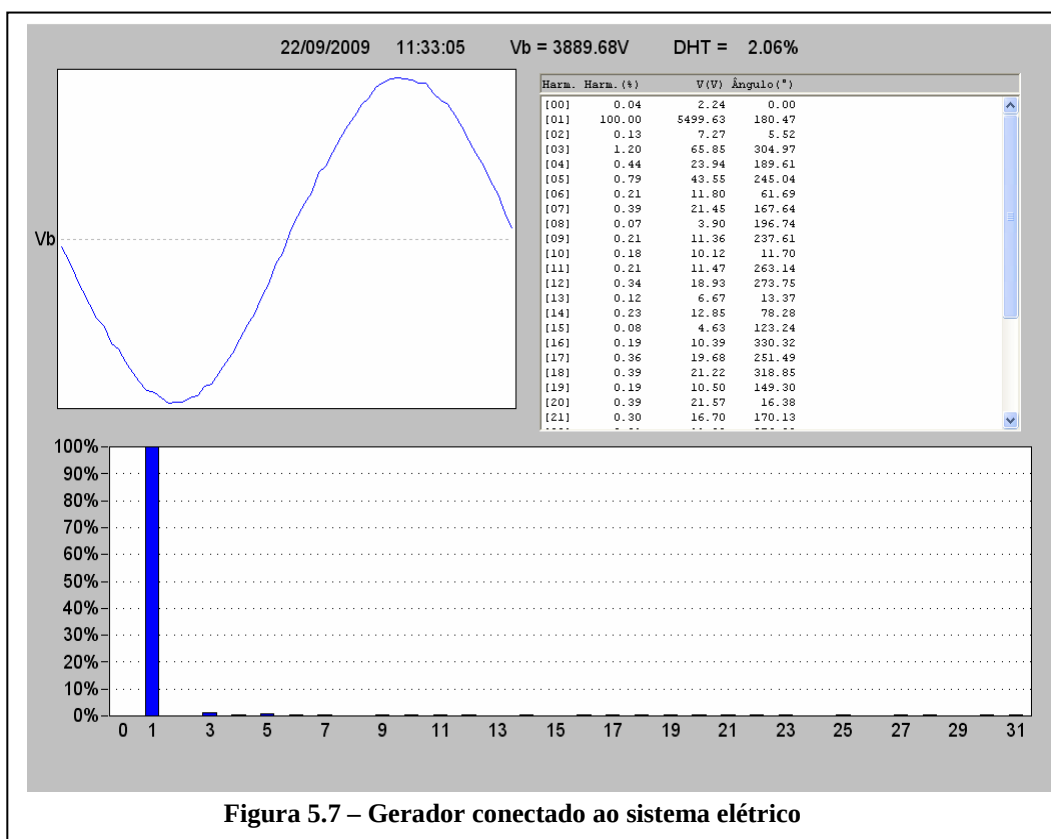


Figura 5.7 – Gerador conectado ao sistema elétrico

5.3.1 Análise dos resultados das medições

A Tabela 5.6 apresenta os valores das DHT_v para os dois momentos medidos do sistema.

Configuração do sistema	DHT _v [%]
Sem carga	1,69
Com carga	2,06

Tabela 5.2: Valores das DHT_v para o sistema.

A comparação dos valores de medição expostos na tabela permite observar que, ao conectar-se o gerador ao sistema ocorre um pequeno acréscimo no valor das distorções harmônicas, porém perfeitamente aceitável para o sistema elétrico de potência.

No próximo capítulo é realizada a análise geral dos resultados e a conclusão final dos estudos realizados.

6.1 Conclusão

Apesar dos valores de DHT_V medidos serem maiores que os valores simulados, devido ao fato dos modelos simulados não contemplar as saturações do gerador, responsáveis pela geração do harmônico de ordem 3. Dentre os quatro sistemas de excitação analisados neste projeto, o sistema de excitação com excitatriz e regulador automático de tensão alimentado em corrente contínua, sistema 4 da Tabela 6, mostrou ser o que apresenta menor nível de distorção harmônica.

A justificativa para a afirmação acima, deve-se ao fato de neste sistema não ocorrer os disparos dos tiristores na alimentação e controle do campo da máquina e também por ele não ser alimentado por um transformador conectado ao sistema, que geralmente possui distorção harmônica em sua corrente.

Configuração do sistema	DHT _V sistema1 [%]		DHT _V sistema2 [%]		DHT _V sistema3 [%]		DHT _V sistema4 [%]	
	Simulado	Medido	Simulado	Medido	Simulado	Medido	Simulado	Medido
Sem carga	0,00	1,8	0,25	5,05	0,04	3,66	0,07	1,69
Com carga	0,71	1,9	2,46	14,29	2,41	14,03	0,64	2,06

Tabela 6 – Comparação dos valores simulados e medidos nos sistemas de excitação.

Pode-se também concluir que o sistema que foi proposto como solução para se obter uma redução das distorções harmônicas, presentes na geração de energia elétrica, é o mais satisfatório, do ponto de vista técnico, para aplicação em PCHs.

Na análise econômica feita no apêndice-C que para a reforma e modernização de máquinas que já possua excitatriz rotativa, a aplicação do sistema⁴ é mais vantajoso economicamente se comparado aos demais sistemas. Devido utilização de menos equipamentos e baixa potência necessárias aos componentes aplicados nos módulos de controle.

6.2 Considerações finais

- A metodologia desenvolvida para o estudo dos sistemas de excitação apresentou resultados satisfatórios, pois as simulações efetuadas com os modelos no *software* Matlab foram comprovadas pelas medições realizadas em campo;
- O Projeto forneceu os dados necessários para a escolha do modelo que causa as menores taxas de distorção harmônica ao sistema entre os modelos de sistemas de excitação estudados e utilizados pelas Usinas da EMAE;
- Este Projeto restringiu-se à contribuição de distorções harmônicas causados pelos sistemas de excitação para o sistema elétrico.

6.3 Sugestões para trabalhos futuros

As distorções harmônicas também são responsáveis por perdas de rendimento em geradores. A análise econômica das perdas não foram contabilizadas, por não ter sido objetivo deste Projeto.

Para projetos futuros, sugere-se estudos sobre outras variáveis e aspectos relativos à sistemas de excitação como velocidade ou tempo de atuação, repotencialização da unidade geradora, níveis de tensão de “*ceiling*”, etc.

Sugere-se também a análise econômica do comparativo das perdas de rendimento pelas interferências das distorções harmônicas nos geradores, segundo os modelos fornecidos neste projeto que podem ser aprimorados.

6.4 Publicações

A seguir são relacionadas as publicações resultantes desse trabalho

1 – Revista IEEE da American Latin – “***Study of harmonics between different excitation systems of synchronous machines***” – Engo M.Sc Manoel Berto Alves, Prof. Dr. Luciano Martins Neto – UFU, e Engo Lucio Aparecido Borba, - Submission de Peper – ID-917- Foi aceito e com ***Publicação na revista IEEE da America Latina*** - Publication Date: Nov. 2010;Volume:7; Issue:2; ISSN: 1548-0992;

2 – Revista IEEE da American Latin – “***Modeling of synchronous machines based on the interference of harmonics on power systems feeding nonlinear loads***” – Engo M.Sc Manoel Berto Alves, Prof. Dr. Luciano Martins Neto – UFU, e Engº Lucio Aparecido Borba, - Submission de Peper – ID-920 - ***A revista IEEE da America Latina solicitou correções;***

3 – CIGRÉ - XIV Eriac Junho 2011- Paraguaio – “***ESTUDO DOS HARMÔNICOS ENTRE DIFERENTES SISTEMAS DE EXCITAÇÃO DE MÁQUINAS SÍNCRONAS***” – Engo M.Sc Manoel Berto Alves, Prof. Dr. Luciano Martins Neto – UFU, e Engo Lucio Aparecido Borba, - Trabalho a ser Apresentado.

APÊNDICE - A**HARMÔNICOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS**

A.1. Descrição

Como neste trabalho o objetivo é o estudo da influência das componentes harmônicas nas máquinas síncronas, este capítulo é dedicado a introdução teórica sobre os harmônicos em sistemas elétricos.

O conceito de harmônico teve suas origens nos estudos do MHS (movimento harmônico simples), da acústica, da eletricidade, e de outros fenômenos do estudo 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 dispositivos 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 senóides recebe o nome de Série de Fourier. [12]

A.3. Distorções Harmônicas Individual, Totais 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: [5]

- Para a tensão:

$$DHI_V(\%) = \frac{V_h}{V_1} \cdot 100$$

- Para a corrente:

$$DHI_I(\%) = \frac{I_h}{I_1} \cdot 100$$

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:

- Para a tensão:

$$DHT_V(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h^2}}{V_1} \cdot 100$$

- Para a corrente:

$$DHT_I(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} I_h^2}}{I_1} \cdot 100$$

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. [5]

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 seguir;

$$V_{ef} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} V_h^2}$$

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. [5]

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 correntes alternadas em regime estacionário.

Para se prevenir contra os efeitos das distorções harmônicas as máquinas síncronas de grande porte têm no seu sistema de proteção relés que atuam com

alarme e desligamento, através da detecção de correntes de sequência negativa, geradas pelos harmônicos de 5ª ordem.

Outro problema nas máquinas síncronas é o aquecimento do rotor devido a interação entre pares de harmônicos de mesma frequência. Os harmônicos de 5ª e 7ª ordem induzem no rotor correntes 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.

Uma análise sobre os efeitos destas componentes harmônicas mostra que a 5ª harmônica, pelo fato de ser uma componente de sequência negativa, induz um fluxo no entreferro em sentido contrário ao sentido de giro do rotor, fazendo com que sejam induzidas correntes circulantes no enrolamento amortecedor.[18]

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

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

. A distorção harmônica é determinada por:

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

a. 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 [15]

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: [15]

- (a) advertência;
- (b) multa.

As multas a serem aplicadas aos agentes de operação são classificadas em 02 (dois) grupos, a saber: [15]

(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.

Abaixo seguem cópias das 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. [15]

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. [15]

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: [15]

$$DTHT = \sqrt{\sum V_h^2} \text{ em \%}$$

e

$$V_h = 100 \frac{V_h}{V_1}$$

b. 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: [15]

- 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.

c. Avaliação de desempenho

B.3.1 - Limites globais

- Os limites globais inferiores correspondentes aos indicadores de tensões harmônicas individuais de ordens 2 a 50, bem como ao indicador DTHTS95% estão apresentados na Tabela B1. [15]

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 B.1 – Limites globais inferiores de tensão em % da tensão fundamental[15]

- 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 ≥ 69 kV são, respectivamente, 8% e 4%. [15]

- 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 [15].

B.3.2 - Limites individuais

- 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 B2. [15]

13,8 kV ≤ V < 69 kV				V ≥ 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%			

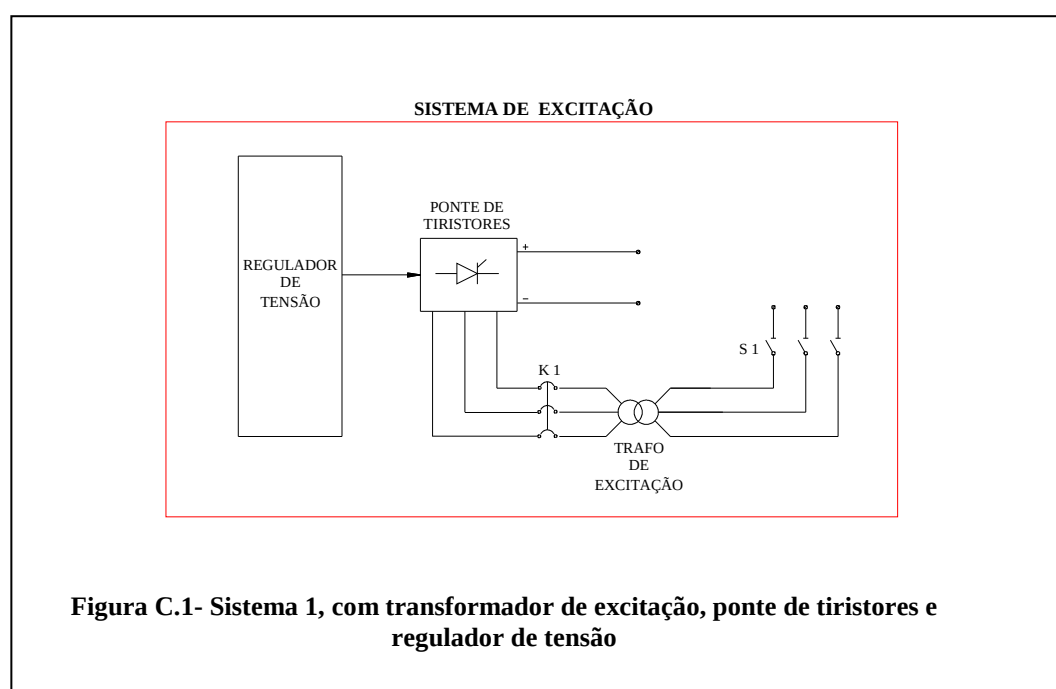
Tabela B.2 – Limites individuais em porcentagem da tensão fundamental

- 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. [15]

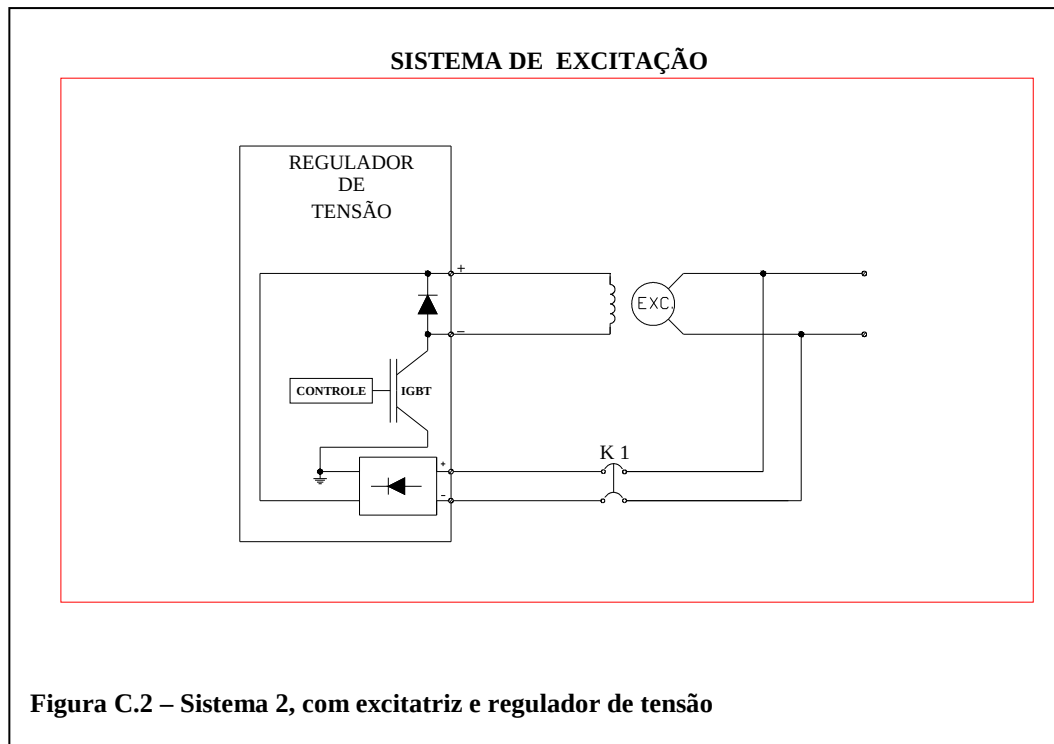
Nesse capítulo realiza-se uma análise econômica dos modelos de sistemas de excitação, avaliados tecnicamente, com a finalidade de se obter alguns parâmetros econômicos que auxiliem na definição de um sistema de excitação para aplicação em geradores síncronos de PCHs.

Os valores são apenas orientativos, mas bem próximo do mercado, podem ser considerados para uma avaliação, no momento de se optar por um modelo que ofereça condições técnicas e econômicas de aplicação num projeto. Obtidos junto a dois fabricantes nacionais que fornecem para várias usinas hidrelétricas do Brasil e do exterior.

Na Figura C.1 consta um dos sistemas estudados. Composto por um transformador de excitação trifásico, uma ponte de tiristores de 6 pulsos e um regulador automático de tensão.



A Figura C.2 mostra o outro sistema cotado e estudado, que é composto por uma excitatriz rotativa acoplada ao eixo do gerador e um regulador automático de tensão controlado por IGBT.



A Tabela C mostra a comparação dos preços dos dois sistemas das Figuras C.1 e C.2, estudados nos capítulos anteriores.

COMPONENTE	PREÇOS DO SISTEMA 1 [R\$]		PREÇOS DO SISTEMA 2 [R\$]	
	Fabricante 1	Fabricante 2	Fabricante 1	Fabricante 2
EXCITATRIZ	Não aplicável	Não aplicável	110.000,00	125.000,00
TRANSFORMADOR	72.000,00	82.000,00	Não aplicável	Não aplicável
REGULADOR DE TENSÃO	40.000,00	60.000,00	51.000,00	43.000,00
PONTE DE TIRISTORES	110.000,00	120.000,00	Não aplicável	Não aplicável
TOTAL	222.000,00	260.000,00	161.000,00	168.000,00

Tabela C: Comparação dos preços dos sistemas 1 e 2.

Pode-se notar que o sistema 2 é economicamente mais vantajoso, pois ambos os fabricantes tomados como consulta, propõem preços menores para esse sistema, com pequena vantagem para o fabricante 1.

CAPÍTULO VII**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

[1]→ ADKINS, B.. Teoria General de las Maquinas Electricas. Bilbao: Ediciones Urmo,–1967 (Tradución: LEÓN L.A, do original The General Theory of Electrical Machines, Londres, Chapman & Hall 1957)

[2]→ ANSI/IEEE Std 1110, Three IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices in Stability Studies, Press IEEE, New York-NY, março, 1991;

[3]→ DEL TORO, V.. Fundamentos de Máquinas Elébricas. São Paulo LTC Editora 1994 - Tradução Onofre de Andrade Martins do original Basic Electric Machines;

[4]→ D.V.GRAFFITHS and I.M. SMITH, Numerical Methods for Engineers – A PROGRAMMING APPROACH, Blackwell Scientific Publications,

[5]→ Eletric Power Qualit Control Techniques; Wilson E., PH.D. Kazibwe Musoke H., PH.D. Sendaula (Livro Voltado para Controle da Qualidade de Energia);

[6]→ ERCEG, G., ERCEG, R., “Specific Applications of the Transistor Converter in Excitation Systems of Synchronous Generators”, Electrical and Computer Engineering, Canadian Conference on, 2001.

[7]→ FITZGERALD, A. E. & KINGSLEY JR,C. & KUSKO A.,. Máquinas Elébricas, McGraw-Hill, 1975 Electric Machinery McGraw-Hill N.Y. 1961 - Tradução: Josafá Neves do original Electric Machinery;

[8]→ INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, IEEE Std 421.5-1992, August, 1992.

[9]→ JAHNS T.M. & DONCKER RW.. Control of Electrical Generators 1996

[10]→ JORDÃO, R.G., Máquinas Síncronas, São Paulo . Editôra da USP Livros Técnicos e Científicos Editôra S.A 1980;

[11]→ MARTINS NETO, L. “Apostila de Fundamentos Eletromagnéticos Associados ao Funcionamento das Máquinas Elétricas”;

[12]→ MURDOCH, A., D’ANTONIO, M.J., “Generator Excitation Systems - Performance Specification to Meet Interconnection Requirements”, IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC, MIT, June 2001.

[13]→ MURPHY, J.M.D. and TURNBULL, F.G. , “Power Electronic Control of AC Motors”, Editora *Pergamon Press* – 1988, Schenectady, New York.

[14]→ OGATA, K., “Engenharia de Controle Moderno”, Pearson Prentice Hall, 4ª edição, 2003, tradução Paulo Álvaro Maya do original Modern Control Engineering;

[15]→ ONS Operador Nacional do Sistema Elétrico Brasileiro.
www.ons.org.br/ons/requerimentos - Acesso em setembro/2009;

[16]→ P. C. Krause et al. Analysis of Electric Machinery and Drive Systems: Wiley.

[17]→ P. KUNDUR, Power System Stability and Control. New York, EUA, McGraw-Hill, 1994.

[18]→ Rocco A. Máquinas Síncronas e Cargas Não-Lineares, Efeitos da Distorção Harmônica, Uma Análise Numérico Experimental. 1998. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade de São Paulo, .

[19]→ SIMÕES COSTA “Sistemas de Excitação de Geradores Síncronos” Universidade Federal de Santa Catarina

[20]→ SUZUKI, K., SUMIDA, T., UDA, S., SHIMOURA, M., TANAKA, S., “The Characteristics of Excitation System”, IEE International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, Vol.2, Issue,

pp.479-484, Hong Kong, November 1991.

[21]→ WEG “ DT-5 Características e Especificações de Geradores”.