

TESE

753

TESE-753

27-06-94

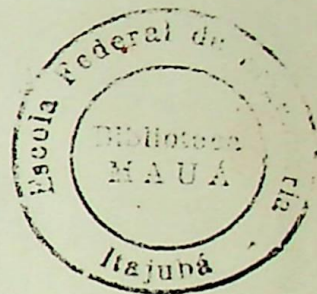
R 4
ECP
ECP

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

"OPERAÇÃO ISOLADA E INTERLIGADA DO GERADOR DE INDUÇÃO"

JOSÉ TARCÍSIO DE RESENDE



ORIENTADOR:

PROF. ÂNGELO JOSÉ JUNQUEIRA REZEK

TRABALHO DE DISSERTAÇÃO APRESENTADO À
COORDENAÇÃO DOS CURSOS DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA DA ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ COMO
PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

621.313.333.004.14
(043.2)

R433o
753

ITAJUBÁ - MG

1994

AGRADECIMENTOS

A DEUS, pois, "Digno és, Senhor, nosso Deus, de receber a glória, a honra e o poder, porque criaste todas as coisas e por tua vontade elas existem e foram criadas" (Ap 4,11);

Agradeço sinceramente ao Professor Ângelo José Junqueira Rezek, orientador desta dissertação, pela amizade, esclarecimento, dedicação a toda prova e pelo estímulo durante a realização deste trabalho;

Aos meus irmãos, pelo apoio e colaboração;

Aos funcionários do Laboratório do Departamento de Eletrotécnica, da Biblioteca Mauá, da Pró-Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação, pela atenção dedicada durante a realização deste trabalho;

Aos professores, pelo aprendizado acadêmico;

A CAPES, pela ajuda financeira na concessão da bolsa;

Ao amigo Carlos Gilberto de Figueiredo, que embora não esteja mais presente nesta vida, meus sinceros agradecimentos pelo grande apoio e estímulo para que este trabalho pudesse ser concluído;

Aos amigos que direta ou indiretamente me ajudaram e apoiaram durante esta caminhada;

A todas as pessoas que no momento passaram pelo esquecimento, mas que sempre serão lembradas;

RESUMO

A máquina de indução apresenta-se como uma alternativa viável para a operação também como gerador, devido a maior simplicidade, maior robustez e menor custo da mesma.

Este trabalho se propõe a desenvolver um estudo, em laboratório, da operação isolada do gerador de indução e de sua interligação ao sistema elétrico.

Na operação isolada, faz-se necessária a utilização de um sistema estático de excitação para fornecer o reativo requerido pela máquina. Este reativo será suprido pela conexão de capacitores em paralelo com os terminais dos enrolamentos do estator.

Na operação interligada, a potência reativa necessária ao seu funcionamento é fornecida pela própria rede. Neste caso, a tensão e a frequência são impostas pelo sistema elétrico.

Porém, quando o gerador de indução é operado isolado da rede elétrica, a tensão e a frequência geradas pela máquina, são variáveis com a rotação e as condições da carga, requerendo assim um sistema capaz de controlar estes valores.

O controle da tensão será feito utilizando-se uma fonte estática de compensação de reativos, implementada com capacitores fixos e indutores com o controle da corrente feito através de retificadores controlados de silício, enquanto o controle de frequência será obtido por meio de um sistema denominado "conexão unitária". Este, constitui-se de uma ponte retificadora trifásica e diodos e de um inversor trifásico em ponte com transistores de potência.

ABSTRACT

The induction machine presents itself as a feasible alternative for operation as a generator due to its simplicity, ruggedness and lower cost.

In this work, a study is purposed to be developed in laboratory for the isolated operation of the induction generator and for its interconnection to the electrical system.

In the isolated operation, the use of an excitation static system is necessary to supply the reactive required by the machine. This reactive will be supplied by connecting the capacitors in parallel to the stator winding terminals.

In the interconnected operation, the reactive power necessary to its functioning is supplied by the network itself. In this case, voltage and frequency are imposed by the electrical system.

However, when the induction generator is operating insulated from the electrical grid, the voltage and frequency generated by the machine vary with rotation and load conditions, this way requiring a system capable of controlling such values.

The voltage control will be made by using a reactive compensation static source, implemented with fixed capacitors and inductors with the current control made through silicon controlled rectifiers, while the frequency control is obtained by means of a system called "unit connection". It is made up of a diode three-phase rectifier bridge and a three-phase inverter bridge with power transistors.

CONTEÚDO

	PÁGINA
DEDICATÓRIA.....	i
AGRADECIMENTOS.....	ii
RESUMO.....	iii
ABSTRACT.....	iv
CONTEÚDO.....	v
LISTA DOS GRÁFICOS E ILUSTRAÇÕES.....	viii
SIMBOLOGIA.....	xi
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	
1.1 - Considerações Iniciais.....	01
1.2 - Estrutura da Dissertação.....	03
CAPÍTULO 2 - OPERAÇÃO DO GERADOR DE INDUÇÃO INTERLIGADO À REDE ELÉTRICA	
2.1 - Considerações Gerais.....	05
2.2 - Diagrama de Ligação do Gerador de Indução Interligado à Rede Elétrica.....	07
2.3 - Resultados e Discussões.....	08
CAPÍTULO 3 - OPERAÇÃO DO GERADOR DE INDUÇÃO ISOLADO DA REDE ELÉTRICA	
3.1 - Considerações Gerais.....	10
3.2 - Determinação dos Parâmetros do Circuito Equivalente....	12
3.3 - Determinação da Curva de Magnetização.....	14
3.4 - O Processo da Auto-Excitação.....	16
3.5 - O Desenvolvimento da Tensão e Freqüência Gerada.....	18
3.6 - Dimensionamento do Banco de Capacitores.....	20
3.7 - Perda e Recuperação do Magnetismo Residual.....	22
3.8 - Característica da Tensão Gerada em Função da Velocidade	23
3.8.1 - Comportamento sob Condições sem carga.....	23
3.8.2 - Comportamento sob Condições de Carga.....	26

3.8.3 - Tensão Gerada a Vazio versus Velocidade para um Valor Fixo de Capacitor.....	27
3.8.4 - Tensão Gerada em Função da Corrente de Carga para um Valor Fixo de Capacitor.....	29
3.8.5 - Rendimento do Gerador quando Excitado por um Capacitor Fixo.....	30

CAPÍTULO 4 - CONTROLE DE TENSÃO DO GERADOR DE INDUÇÃO ISOLADO DA REDE ELÉTRICA

4.1 - Considerações Gerais.....	32
4.2 - Métodos de Controle da Auto-Excitação do Gerador de Indução.....	33
4.2.1 - Método do Capacitor Série.....	33
4.2.2 - Método do Reator Saturável.....	34
4.2.3 - Método dos Capacitores Chaveados.....	34
4.3 - Controle de Tensão pelo Método da Fonte Estática de Compensação de Reativos.....	35
4.4 - Dimensionamento da Fonte Estática de Compensação de Reativos.....	37
4.5 - Resultados Experimentais para a Máquina a Vazio e com Carga.....	38
4.5.1 - Máquina a Vazio.....	38
4.5.2 - Máquina com Carga.....	41
4.6 - Resultados e Discussões.....	48

CAPÍTULO 5 - CONTROLE DA FREQUÊNCIA GERADA

5.1 - Considerações Gerais.....	51
5.2 - Comentários sobre o Método de Controle de Frequência Utilizado.....	53
5.2.1 - Ponte Retificadora Trifásica a Diodos.....	54
5.2.2 - Inversor Trifásico em Ponte a Transistores de Potência.....	54
5.2.3 - Diagrama Trifilar do Método de Controle de Frequência juntamente com o Gerador de Indução, Fonte Estática de Compensação de Reativos e a Carga.....	55

5.3 - Resultados Experimentais com Cargas Resistivas e Indutivas..... 57

5.3.1 - Carga Resistiva..... 57

5.3.2 - Carga Indutiva..... 61

5.4 - Resultados e Discussões..... 63

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES..... 66

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 69

ANEXO A - CONFIGURAÇÃO MOTOR DE INDUÇÃO/GERADOR..... 75

ANEXO B - RESULTADOS OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE..... 82

LISTA DOS GRAFICOS E ILUSTRAÇÕES

	PÁGINA
Fig. 1.1 - Geração de Energia através de um Motor de Indução Trifásico (M.I.T).....	03
Fig. 2.1 - Curva de Conjugado versus Velocidade/Esco- ramento de um Motor de Indução Operando como Motor e como Gerador.....	07
Fig. 2.2 - Ligação do Gerador de Indução Interligado a Rede Elétrica.....	07
Fig. 3.1 - Forma de Onda da Força Eletromotriz Gerada pelo Gerador de Indução.....	11
Fig. 3.2 - Operação do Gerador de Indução Isolado da Rede Elétrica.....	12
Fig. 3.3 - Circuito Equivalente por Fase do Gerador de Indução.....	13
Fig. 3.4 - Gráfico da Curva de Magnetização da Máquina a Vazio.....	14
Fig. 3.5 - Gráfico da Indutância de Magnetização versus Tensão nos Terminais da Máquina para as Freqüências de 50 e 60 Hz.....	15
Fig. 3.6 - Gráfico da Tensão versus Corrente de Magnetização mostrando o ponto onde ocorre a Tensão Gerada a Vazio e a Freqüência de Operação Nominal da Máquina.....	18
Fig. 3.7 - Gráfico da Tensão Gerada versus Corrente de Excitação para Diversos Valores de X_c	20
Fig. 3.8 - Circuito Equivalente por Fase Desprezando-se a Queda de Tensão nas Impedâncias do Estator e Rotor.....	24
Fig. 3.9 - Gráfico da Tensão Gerada versus Velocidade do Rotor.....	26
Fig. 3.10 - Gráfico da Tensão Gerada versus Rotação.....	28
Fig. 3.11 - Gráfico da Tensão versus Corrente de Carga.....	29
Fig. 3.12 - Gráfico do Rendimento versus Potência Elétrica de Saída.....	31

Fig. 4.1 - Diagrama de Blocos mostrando a Configuração Capacitor Série/Paralelo.....	33
Fig. 4.2 - Curva da Capacitância versus Corrente de Carga...	35
Fig. 4.3 - Circuito Equivalente por Fase do Gerador de Indução juntamente com a Fonte Estática de Compensação de Reativos.....	36
Fig. 4.4 - Gráfico da Tensão Gerada e das Correntes no Estator e Capacitor versus o Ângulo de Disparo (α) para uma Velocidade de 1500 RPM.....	39
Fig. 4.5 - Gráfico da Tensão Gerada e das Correntes no Estator e Capacitor versus o Ângulo de Disparo (α) para uma Velocidade de 1400 RPM.....	40
Fig. 4.6 - Gráfico da Tensão Gerada versus Velocidade.....	41
Fig. 4.7 - Tensão Gerada versus Corrente de Carga.....	42
Fig. 4.8 - Gráfico da Tensão Gerada versus Corrente de Carga para uma Impedância Variável.....	43
Fig. 4.9 - Gráfico da Tensão e Freqüência Gerada versus o Ângulo de Disparo (α).....	44
Fig. 4.10 - Gráfico das Correntes versus o Ângulo de Disparo (α).....	45
Fig. 4.11 - Gráfico da Tensão e Freqüência Gerada versus o Ângulo de Disparo (α).....	46
Fig. 4.12 - Gráfico das Correntes versus o Ângulo de Disparo (α).....	47
Fig. 4.13 - Gráfico do Rendimento versus Potência Elétrica de Saída.....	48
Fig. 5.1 - Variação da Freqüência Elétrica Gerada versus Corrente de Magnetização para uma Tensão Gerada Constante...	53
Fig. 5.2 - Diagrama Trifilar do Gerador de Indução juntamente com os Sistemas de Controle de Tensão e Freqüência.....	56
Fig. 5.3 - Forma de Onda da Tensão na Carga para uma Freqüência de 28,08 Hz.....	58
Fig. 5.4 - Forma de Onda da Tensão na Carga para uma Freqüência de 50,25 Hz.....	59
Fig. 5.5 - Forma de Onda da tensão na Carga para uma Freqüência de 77,52 Hz.....	59

Fig. 5.6 - Forma de Onda da Tensão Gerada pela Máquina para uma Freqüência de 49,75 Hz (entrada do varivolt)..... 60

Fig. 5.7 - Forma de Onda da Tensão Gerada pela Máquina para uma Freqüência de 49,26 Hz (saída do varivolt)..... 60

Fig. 5.8 - Formas de Onda da Tensão e Corrente na Carga (motor de indução) para uma Freqüência de 52,75 Hz..... 61

Fig. 5.9 - Formas de Onda da Tensão e Corrente na Carga (motor de indução) para uma Freqüência de 26,87 Hz..... 62

Fig. 5.10 - Formas de Onda da Tensão e Corrente na Carga (motor de indução) para uma Freqüência de 60,26 Hz..... 62

Fig. 5.11 - Formas de Onda da Tensão e Corrente na Carga (motor de indução) para uma Freqüência de 70 Hz..... 63

Fig. B.17 - Formas de Onda da Tensão Gerada e Corrente no Reator Controlado com Retificadores de Silício para $\alpha = 0^\circ$ e a Máquina sem carga..... 92

Fig. B.18 - Formas de Onda da Tensão Gerada e Corrente no Reator Controlado com Retificadores de Silício para $\alpha = 23^\circ$ e a Máquina sem carga..... 93

Fig. B.19 - Formas de Onda da Tensão Gerada e Corrente no Reator Controlado com Retificadores de Silício para $\alpha = 45^\circ$ e a Máquina sem carga..... 93

Fig. B.20 - Formas de Onda da Tensão Gerada e Corrente no Reator Controlado com Retificadores de Silício para $\alpha = 0^\circ$ e a Máquina com Carga..... 94

Fig. B.21 - Formas de Ondas da Tensão Gerada e Corrente no Reator Controlado com Retificadores de Silício para $\alpha = 14^\circ$ e a Máquina com Carga..... 94

Fig. B.22 - Formas de Ondas da Tensão Gerada e Corrente no Reator Controlado com Retificadores de Silício para $\alpha = 28^\circ$ e a Máquina com Carga..... 95

Fig. B.23 - Vista das Máquinas de Corrente Contínua e de Indução Ligadas à Fonte Estática de Compensação de Reativos. 96

Fig. B.24 - Vista da Fonte Estática de Compensação de Reativos Implementada com Capacitores Fixos e Reatores Controlados com Retificadores de Silício..... 96

Fig. B.25 - Vista dos Bancos de Capacitores, Bancos de Indutores e Equipamentos de Medidas..... 97

SIMBOLOGIA

- B.C - banco de capacitores
- C - capacitância [μF]
- E₁ - força eletromotriz induzida no estator [V]
- E₂ - força eletromotriz induzida no rotor [V]
- F₁ - frequência da rede [Hz]
- F₂ - frequência do rotor [Hz]
- I₀ - corrente de magnetização [A]
- I_{0'} - corrente a vazio [A]
- I₁ - corrente no circuito do estator [A]
- I₂ - corrente no circuito do rotor referida ao estator [A]
- I_{dc} - corrente contínua constante [A]
- I_L - corrente na carga indutiva [A]
- I_{LINHA} - corrente de linha na entrada da ponte retificadora [A]
- I_m - corrente absorvida pelo gerador, necessária para a sua excitação e para suprir as suas reatâncias internas e que está defasada de 180° com relação a I₁ [A]
- I_{m1} - corrente no núcleo devido a X_m [A]
- I_N - corrente nominal a plena carga da máquina [A]
- I_R - corrente na carga resistiva [A]
- I_{Rm} - corrente no núcleo devido a R_m [Ω]
- L_m - indutância de magnetização [H]
- L _{α} - indutor controlado a retificador de silício [H]
- M.P - máquina primária
- M.I.T- motor de indução trifásico
- N₁ - rotação síncrona [RPM]
- P - número de polos dos enrolamentos do estator
- P_{L3Ø} - potência ativa trifásica absorvida pela carga [W]
- P_N - potência ativa trifásica dissipada no núcleo [W]
- R₁ - resistência do estator [Ω]
- R₂ - resistência do rotor referida ao estator [Ω]
- R_L - carga resistiva [Ω]

- R_m - resistência de magnetização correspondente as perdas no ferro [Ω]
- S - escorregamento
- V_o - tensão a vazio [V]
- V - tensão gerada [V]
- V_{dc} - tensão em corrente contínua constante [V]
- V_{LINHA} - tensão fase-fase na entrada da ponte retificadora [V]
- ω - frequência angular elétrica [rad/s]
- ω_m - velocidade angular do rotor [rad/s]
- X_1 - reatância do estator [Ω]
- X_2 - reatância do rotor referida ao estator [Ω]
- X_c - reatância capacitiva [Ω]
- X_L - carga indutiva [Ω]
- X_m - reatância de magnetização [Ω]
- Y - admitância [$1/\Omega$]
- η - rendimento [%]

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - Considerações Gerais

Com a crise do petróleo a partir de 1973 e a crescente demanda de energia elétrica, foi necessário buscar outras formas alternativas de geração de energia que até então não tinham sido aproveitadas. Dentre estas fontes geradoras de energia podem-se destacar as pequenas centrais hidrelétricas, a cogeração, a energia eólica, biomassa e outras.

É conhecido o fato de existir uma grande dispersão populacional e uma baixa densidade de consumo, principalmente, no que se refere ao meio rural, no Brasil. Estas localidades são constituídas de pequenos pólos de desenvolvimento como, por exemplo, propriedades agrícolas, vilas, povoados, etc, onde o fornecimento de energia torna-se imprescindível para o desenvolvimento e melhoria do padrão de vida dessas comunidades, aumentando assim a produção e a produtividade agrícola.

Para levar energia elétrica a estes núcleos de consumo poder-se-ia optar por construir extensas redes derivadas das subestações de grandes usinas hidrelétricas, ou pela construção de pequenas centrais hidro ou termoelétricas, dependendo da disponibilidade de energia primária na região. A primeira opção, muitas das vezes, é inviabilizada devido ao custo de implantação e custo operacional do projeto, enquanto que na segunda opção, o custo de um gerador síncrono é relevante.

Neste caso, poderia ser usado um gerador de indução que destaca-se, para este tipo de aplicação, devido às vantagens que ele apresenta frente aos geradores síncronos, e geradores de corrente contínua, tais como; maior simplicidade e robustez, menor custo e menor necessidade de manutenção (especialmente os de rotor em gaiola de esquilo), além de permitir grandes variações de velocidades.

Sabe-se que o motor de indução é a máquina elétrica mais utilizada na indústria brasileira e é fabricado em larga escala. O motor de indução com o rotor em curto, também conhecido como

gaiola de esquilo, é o mais indicado para a utilização em sistemas alternativos de geração de energia elétrica, quer isolado ou interligado à rede elétrica, devido as razões expostas anteriormente, que confiam ao sistema de geração um amplo grau de factibilidade.

Os geradores de indução tem sido bastante utilizados em micro-centrais hidrelétricas de diversos países desenvolvidos para o fornecimento de energia elétrica a pequenos centros de consumo.

A instalação desses geradores em micro-centrais Hidrelétricas constitui-se em uma opção mais segura e confiável do que os geradores síncronos (Smith, N.P.A. et al., 1992).

Enquanto geradores síncronos menores não são fabricados com mais do que quatro polos, as máquinas de indução com seis ou oito polos, são produzidas em larga escala o que as viabiliza para velocidades mais baixas (Smith, N.P.A. et al., 1992).

Para uma mesma potência nominal de até 25 KW as máquinas de indução tem um preço inferior às máquinas síncronas. Acima desta potência as mesmas tornam-se mais caras mas, ainda são competitivas devido as suas diversas vantagens (Smith, N.P.A. et al., 1992). Para uma potência nominal em torno de 5 Kw, incluindo o banco de capacitores, o preço de um gerador de indução é de aproximadamente um terço de um gerador síncrono (Smith, N.P.A. et al., 1990).

14

É também conhecido que existe em torno de 10×10^6 MW de potência que pode ser obtida na atmosfera mundial e, que 10×10^6 MW é a potência que pode ser obtida a partir do vento. Para esse tipo de geração o gerador de indução é também indicado (Watson, D.B. et al., 1979, Raina, G., 1983 e Quazene, L., 1983).

Por outro lado, os geradores de indução apresentam algumas desvantagens, dentre as quais destaca-se: absorção de reativo para a magnetização do núcleo, uma vez que não possuem enrolamentos de campo. Desta forma, o reativo deve ser fornecido por banco de capacitores ou pela própria rede, enquanto, que nas outras máquinas, tal potência é fornecida através da excitação do campo.

Atualmente, com o desenvolvimento da eletrônica de potência, o controle da tensão e frequência, deixou de se constituir em um grande problema.

Este trabalho vem contribuir na continuidade do estudo da máquina de indução, operando como gerador interligado e isolado da rede elétrica, apresentando como pontos fortes as montagens experimentais que confirmam a viabilidade e aprimoramento das técnicas apresentadas pelos pesquisadores da área.

O motor de indução utilizado aqui é um motor 3Ø, 1,86 KW 220 V, 7,5 A, 50/60 Hz, $f.p = 0,82$, tipo rotor bobinado, acionado por um motor de corrente contínua, simulando o comportamento de uma máquina primária, conforme pode ser observado na Figura 1.1.

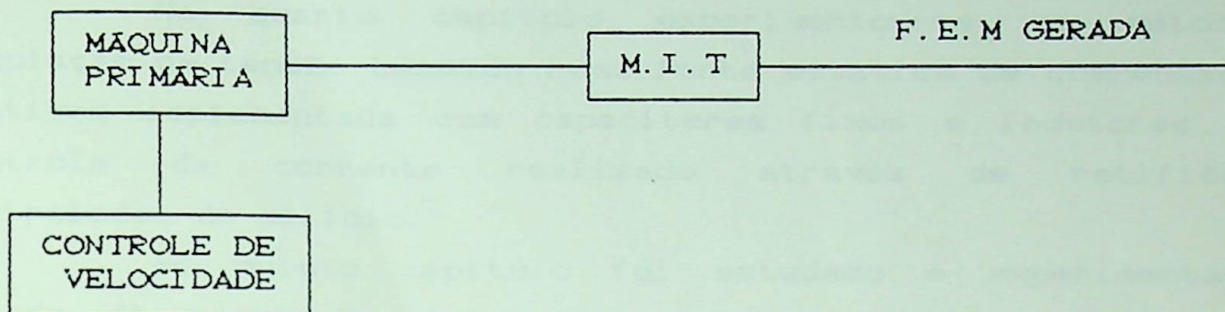


Fig. 1.1 - Geração de Energia através de um Motor de Indução Trifásico (M.I.T)

Os dados técnicos de placa do motor de indução e do motor de corrente contínua são dados no Anexo B.

Na operação interligada à rede elétrica o reativo, necessário para a magnetização da máquina, é fornecido pela própria rede. Neste caso, a tensão e a frequência são impostas pela rede.

Na operação isolada da rede elétrica se faz necessário um sistema estático de excitação para fornecer os reativos necessários para a magnetização da máquina. Este sistema constitui-se de capacitores conectados em paralelo com os enrolamentos do estator da máquina.

1.2 - Estrutura da Dissertação

A abordagem da dissertação constará de seis capítulos e dos anexos julgados necessários para uma completa compreensão do estudo desenvolvido. A seguir será mostrado, de forma sucinta, o

conteúdo de cada capítulo.

No segundo capítulo apresenta-se a operação do gerador de indução interligado à rede elétrica onde, com a conexão de uma carga resistiva em paralela com o mesmo, foi possível verificar o desempenho da máquina quando operada como gerador.

No terceiro capítulo buscou-se um estudo experimental da operação do gerador de indução isolado da rede elétrica. Foram determinados os parâmetros do circuito equivalente e a curva de magnetização da máquina para eventuais estudos da auto-excitação e analisou-se o seu desempenho sob condições sem carga e com carga.

No quarto capítulo experimentou-se um método de regulação de tensão baseado numa fonte estática de compensação de reativos implementada com capacitores fixos e indutores com o controle da corrente realizado através de retificadores controlados de silício.

No quinto capítulo foi estudado e experimentado um método de regulação de frequência que baseia-se num sistema denominado "conexão unitária" que constitui-se, basicamente, de uma ponte a diodos de baixo custo e um inversor controlado com transistores de potência.

No sexto capítulo foram apresentadas as principais conclusões obtidas durante o decorrer do trabalho.

Finalmente, os anexos foram incluídos objetivando complementar os tópicos analisados.

2.1 - Características Gerais

Para se obter o melhor rendimento de funcionamento de um motor de indução, como qualquer outro motor, é necessário que as características operacionais de motor de indução, de se tornarem os enrolamentos do estator, foram ligados a uma rede elétrica de corrente alternada, irá criar um campo rotativo de força por os enrolamentos do estator. Esta corrente, produzida no campo rotativo de força, irá girar o rotor com a velocidade denominada velocidade síncrona. Esta velocidade depende da frequência de rede e do número de polos dos enrolamentos do estator, sendo dada pela equação (2.1):

CAPÍTULO 2

OPERAÇÃO DO GERADOR DE INDUÇÃO INTERLIGADO À REDE ELÉTRICA

Quando de polos dos enrolamentos do estator é P e a frequência de rede f (Hz), a velocidade síncrona n_s (RPM) é dada por:

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{P}$$

A força magnética criada no estator produz um fluxo magnético no entreferro, que induz uma tensão no rotor de indução eletromagnética, dando uma tensão alternada no rotor de força que será utilizada a circulação de uma corrente elétrica, por oposição aos enrolamentos do rotor. Esta corrente, de origem a um campo rotor que interage com o campo do estator de modo a produzir um torque eletromagnético e assim a torque. A velocidade de rotor será sempre inferior à velocidade síncrona para a produção de torque, pois para isso, tem que haver movimento relativo entre o fluxo magnético produzido e o rotor, para a criação de força eletromotriz no rotor (Parsons, J.R., 1961).

CAPÍTULO 2

OPERAÇÃO DO GERADOR DE INDUÇÃO INTERLIGADO À REDE ELÉTRICA

2.1 - Considerações Gerais

Para um melhor entendimento do funcionamento de um motor de indução como gerador, deve-se partir primeiramente das características operacionais do motor de indução. Se os terminais dos enrolamentos do estator forem ligados a uma rede elétrica, em corrente alternada, irá fluir uma corrente reativa da fonte para os enrolamentos do estator. Esta corrente estabelece um campo eletromagnético no estator que gira a uma velocidade denominada velocidade síncrona. Esta velocidade depende da frequência da rede e do número de pólos dos enrolamentos do estator, sendo dada pela equação (2.1).

$$N_s = \frac{120 F_1}{P} \quad (2.1)$$

Onde,

P - número de polos dos enrolamentos do estator

F₁ - frequência da rede [Hz]

N_s - rotação síncrona [RPM]

A força magnetomotriz girante do estator produz um fluxo magnético no entreferro da máquina entre o estator e o rotor. Este fluxo, por indução eletromagnética, induz uma tensão alternada no rotor de forma que será estabelecida a circulação de uma corrente elétrica, por apresentar seus enrolamentos em curto. Esta corrente, dá origem a um campo no rotor que interage com o campo do estator de modo a produzir um conjugado eletromagnético e acionar a carga. A velocidade do rotor deve ser diferente da velocidade síncrona para a produção do conjugado, pois para isto, tem que haver movimento relativo entre o fluxo magnético resultante e o rotor, para a geração de força eletromotriz nas barras deste (Parsons, J.R., 1984).

Quando aumenta-se a carga no eixo, a velocidade do rotor diminui, aumentando assim o movimento relativo entre os dois campos. Com isto, cresce a força eletromotriz induzida nas barras do rotor, assim como a corrente induzida nos mesmos. A interação entre o fluxo resultante e as correntes induzidas produz um maior conjugado para acionar a carga.

As mesmas considerações são feitas para a operação deste motor como gerador. A única diferença é que o escorregamento agora torna-se negativo. Desta forma, com os terminais do estator ligados a rede, a máquina deve ser acionada mecânicamente acima da velocidade síncrona. A potência mecânica, fornecida no eixo pela máquina primária, é convertida em potência elétrica e transferida para o estator através do entreferro, sendo entregue à rede como potência gerada.

A Figura 2.1 representa a curva de conjugado versus escorregamento da máquina de indução nas regiões de funcionamento como gerador e como motor (Fitzgerald, A.E., et al., 1975).

As máquinas de indução quer, operando como motores ou como geradores, terão maiores rendimentos quando operadas com valores mais baixos de escorregamentos. Portanto, como geradores elas devem ser operadas em torno desta região, indicado por A e B, na Figura 2.1.

O rendimento da máquina de indução operando como gerador é um pouco mais baixo que o rendimento da mesma operando como motor. Isto se justifica pelo fato da tensão gerada internamente (tensão no entreferro) ser maior que a tensão terminal. Essa tensão aumenta as perdas no núcleo, embora estas perdas não afetem consideravelmente o rendimento. Maiores detalhes do funcionamento das máquinas de indução como geradores são apresentados no Anexo A.

Quando se utiliza uma máquina de indução para operar exclusivamente como gerador, algumas alterações podem ser feitas para melhorar o rendimento. Por exemplo, o rotor pode ser projetado para uma resistência menor, pois, neste tipo de operação não há necessidade de conjugado de partida conseqüentemente, o rendimento da máquina é melhorado (Parsons, J.R., 1984 e Murthy, S.S., et al., 1982).

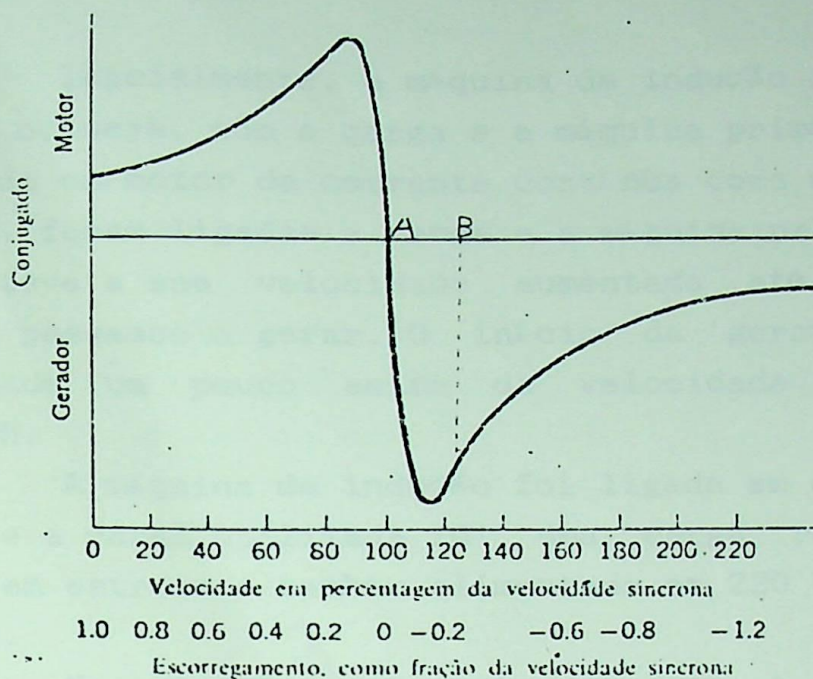


Fig. 2.1 - Curva de Conjugado versus Velocidade/Escorregamento de um Motor de Indução Operando como Motor e como Gerador.

2.2 - Diagrama de Ligação do Gerador de Indução Interligado à Rede Elétrica

Para analisar melhor o desempenho da máquina de indução quando operada como gerador, foram realizados alguns ensaios com carga e foram medidas a potência e a corrente gerada pela mesma, ao variar-se a velocidade como representados no diagrama de blocos da Figura 2.2.

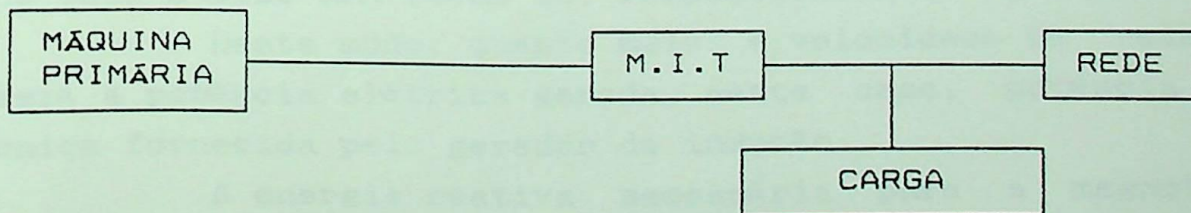


Fig. 2.2 - Ligação do Gerador de Indução Interligado à Rede Elétrica

2.3 - Resultados e Discussões

Inicialmente, a máquina de indução foi ligada a rede sem carga, ou seja, com a carga e a máquina primária desligadas. Foi utilizado um motor de corrente contínua como máquina primária. Em seguida, foram ligadas a carga e a máquina primária, sendo que a última teve a sua velocidade aumentada até que a máquina de indução passasse a gerar. O início da geração ocorreu em uma velocidade um pouco acima da velocidade síncrona que é de 1800 RPM.

A máquina de indução foi ligada em delta, alimentada em 220 V, e a carga utilizada foi uma carga resistiva de $62,5 \Omega$ ligada em estrela e também alimentada em 220 V, ou seja, na tensão da rede.

Na operação como motor e com a carga desligada, a potência ativa absorvida da rede foi de 300 W. Esta é a potência necessária para suprir as perdas uma vez que a máquina estava sem carga. Com a ligação da carga a potência absorvida da rede foi de 900 W, a 220 V, onde os 600 W foi a potência absorvida pela carga como verificado experimentalmente.

Quando operada como gerador (velocidade acima de 1800 RPM), as potências ativas absorvidas da rede foram 530 W e 350 W, respectivamente, nas velocidades de 1810 e 1825 RPM.

Na operação como gerador as perdas internas da máquina são supridas pela potência mecânica recebida no eixo. Esta potência é fornecida através da máquina primária (neste caso, pelo motor de corrente contínua) e convertida em potência elétrica. Portanto, como a carga absorve uma potência ativa de 600 W, as potências ativas fornecidas pelo gerador à carga nas velocidades de 1810 e 1825 RPM foram de, respectivamente, 70 e 250 W, a 220 V.

Deste modo, quanto maior a velocidade de rotação maior será a potência elétrica gerada, neste caso, potência ativa, a única fornecida pelo gerador de indução.

A energia reativa necessária para a magnetização do gerador é fornecida pela rede e caso fosse ligada uma carga indutiva, o reativo desta teria que ser suprido pela rede. Isto constitui-se em uma desvantagem da utilização da máquina de indução como gerador. Além disso, para o mesmo valor de

escorregamento, a máquina absorve mais energia reativa que quando operada como motor. Em alguns casos, a energia reativa absorvida é superior a energia ativa gerada (Willians, J.R., 1984). Também, o rendimento e o fator de potência são mais baixos.

Existem vantagens do gerador de indução em relação ao gerador síncrono para esse tipo de operação, tais como (Parsons J.R., 1985):

- Robustez, simplicidade, menor custo tanto na manutenção quanto na aquisição, boa confiabilidade, principalmente, em se tratando do rotor em gaiola de esquilo;
- Não introduzem tensões harmônicas na rede uma vez que o rotor em gaiola de esquilo amortece estas componentes harmônicas;

CAPÍTULO 3

PROTEÇÃO DO GERADOR DE INDUÇÃO ISOLADO DA REDE ELÉTRICA

OPERAÇÃO DO GERADOR DE INDUÇÃO ISOLADO DA REDE ELÉTRICA

3.1 - Considerações Gerais

O funcionamento de um motor de indução com gerador isolado da rede elétrica é semelhante ao de um motor de indução com rede elétrica. Entretanto, a diferença principal é que, no caso do gerador, a energia elétrica é produzida no rotor e não no estator. Isso ocorre porque o rotor é alimentado por um sistema de energia elétrica externa, enquanto o estator é conectado à rede elétrica. Portanto, a operação do gerador de indução isolado da rede elétrica é semelhante à de um motor de indução com rede elétrica, mas com a diferença de que a energia é produzida no rotor e não no estator.

CAPÍTULO 3

OPERAÇÃO DO GERADOR DE INDUÇÃO ISOLADO DA REDE ELÉTRICA

Para a operação do gerador de indução isolado da rede elétrica, é necessário que o rotor seja alimentado por um sistema de energia elétrica externa. Isso ocorre porque o rotor é alimentado por um sistema de energia elétrica externa, enquanto o estator é conectado à rede elétrica. Portanto, a operação do gerador de indução isolado da rede elétrica é semelhante à de um motor de indução com rede elétrica, mas com a diferença de que a energia é produzida no rotor e não no estator.

Para o funcionamento de um gerador isolado, é necessário que o rotor seja alimentado por um sistema de energia elétrica externa. Isso ocorre porque o rotor é alimentado por um sistema de energia elétrica externa, enquanto o estator é conectado à rede elétrica. Portanto, a operação do gerador de indução isolado da rede elétrica é semelhante à de um motor de indução com rede elétrica, mas com a diferença de que a energia é produzida no rotor e não no estator.

CAPÍTULO 3

OPERAÇÃO DO GERADOR DE INDUÇÃO ISOLADO DA REDE ELÉTRICA

3.1 - Considerações Gerais

O funcionamento de um motor de indução como gerador isolado da rede elétrica é um assunto que vem sendo estudado há vários anos. Observou-se que em instalações industriais, onde eram utilizados bancos de capacitores para correção de fator de potência, aparecia força eletromotriz nos terminais do estator dos motores de indução, mesmo que se encontrassem desligados da rede elétrica, porém ainda em movimento rotórico. Este fato despertou o interesse dos pesquisadores, e que deram início aos estudos da geração de energia através de motores de indução (Wagner, C.F., 1939 e Caldas, F.P., 1980).

Um detalhe importante, que pode ser observado no gerador de indução, é a forma de onda da tensão que apresenta-se, aproximadamente senoidal, conforme comprovado em testes de laboratório, como indicado na Figura 3.1.

Este tipo de operação, vem a contribuir de uma forma importante para o aproveitamento de fontes primárias, a fim de atender regiões onde o custo de uma rede elétrica inviabiliza a sua construção. Estas regiões podem sofrer profundas transformações, caso sejam providas com energia elétrica. Por exemplo, geração de energia eólica para áreas agrícolas promovendo, o processamento de produtos agropecuários próximos às fontes produtoras e pequenos núcleos isolados.

A utilização dos geradores de indução em micro-centrais hidrelétricas, acoplados diretamente às turbinas, tem mostrado que os mesmos são muito mais confiáveis e seguros que os geradores síncronos (Smith, N.P.A., et al., 1990 e 1992).

Para o funcionamento como um gerador isolado, é necessário que se disponha de uma fonte de potência reativa para a magnetização da máquina. Estando o sistema interligado, esta potência é fornecida pelo sistema síncrono sobreexcitado e, no sistema isolado esta potência pode ser suprida por capacitores de valores apropriados ligados em paralelo com os terminais dos

enrolamentos do estator.

Freq **1** = 49.75 Hz

V max **1** = 310 V

V rms **1** = 217.3 V

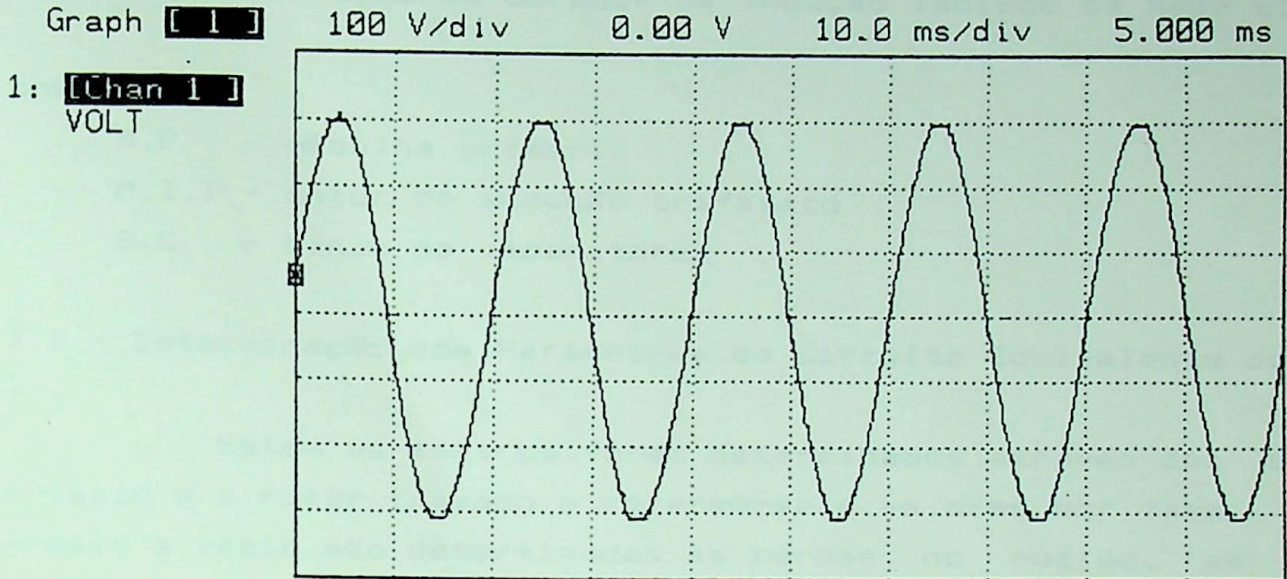


Fig. 3.1 - Forma de Onda da Força Eletromotriz Gerada pelo Gerador de Indução

Na operação do gerador de indução isolado da rede elétrica, a tensão e a frequência geradas variam com a carga e a velocidade de rotação de eixo. Por essas razões, será desenvolvido um estudo em laboratório para o controle da tensão e frequência.

A Figura 3.2, ilustra o processo de operação de um motor de indução operando como gerador isolado da rede, utilizando como máquina primária um motor de corrente contínua.

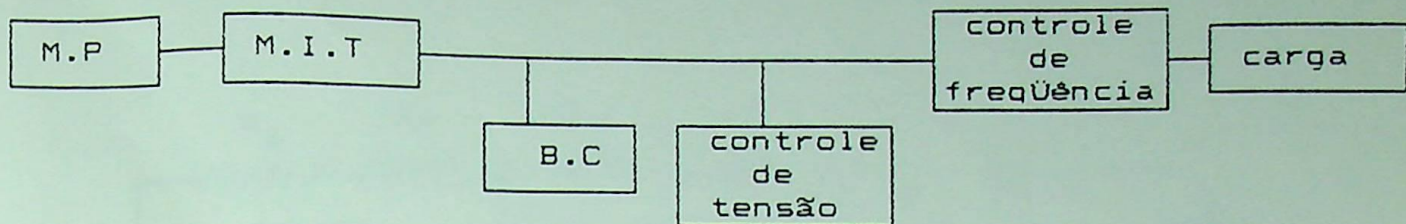


Fig. 3.2 - Operação do Gerador de Indução Isolado da Rede Elétrica

onde,

M.P - máquina primária

M.I.T - motor de indução trifásico

B.C - banco de capacitores

3.2 - Determinação dos Parâmetros do Circuito Equivalente do Motor

Estes parâmetros foram determinados através dos ensaios a vazio e a rotor travado e referem-se a valores por fase. Com o ensaio a vazio são determinadas as perdas no núcleo, as perdas mecânicas e uma pequena perda a vazio no cobre do estator. Deste ensaio obtem-se X_m e R_m que são, respectivamente, a reatância de magnetização e a resistência de magnetização correspondente às perdas no ferro.

A partir do ensaio com o rotor travado determina-se as perdas no cobre do estator e rotor. Deste ensaio, obtem-se a resistência do estator, reatância do estator, resistência do rotor referida ao estator, e a reatância do rotor referida ao estator que são, respectivamente, R_1 , X_1 , R_2 e X_2 .

As resistências (R_1 e R_2) são responsáveis pelas perdas joule nos enrolamentos do estator e rotor, enquanto, as reatâncias (X_1 e X_2) são devidas ao fluxo de dispersão nos mesmos.

Os diagramas de ligação dos ensaios a vazio e com o rotor travado, bem como os parâmetros obtidos, estão apresentados no Anexo A.

O circuito equivalente, por fase, da máquina de indução operando como gerador é mostrado na Figura 3.3. Como pode ser observado, a única diferença, em relação à operação como motor, são os acréscimos dos capacitores e da carga.

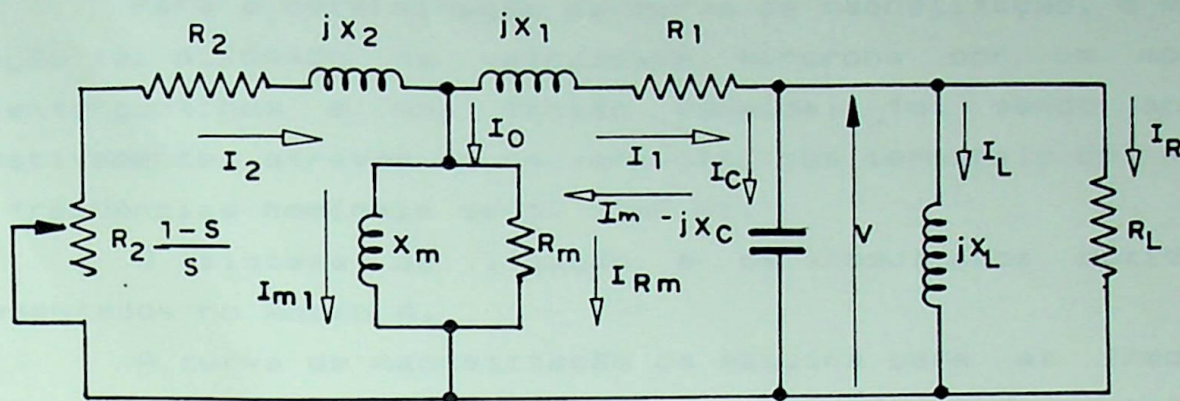


Fig. 3.3 - Circuito Equivalente por Fase do Gerador de Indução

onde,

- R_1 - resistência do estator [Ω]
- R_2 - resistência do rotor referida ao estator [Ω]
- X_1 - reatância do estator [Ω]
- X_2 - reatância do rotor referida ao estator [Ω]
- X_m - reatância de magnetização [Ω]
- I_{Rm} - corrente na resistência R_m [A]
- I_0 - corrente de magnetização [A]
- I_{m1} - corrente no núcleo devido a X_m [A]
- R_m - resistência de magnetização correspondente às perdas no ferro [Ω]
- I_1 - corrente no circuito do estator [A]
- I_2 - corrente no circuito do rotor referida ao estator [A]
- I_m - corrente absorvida pelo gerador, necessária para a sua excitação e para suprir as suas reatâncias internas e que está defasada de 180° com relação a I_1 [A]
- S - escorregamento
- X_c - reatância capacitiva [Ω]
- R_L - carga resistiva [Ω]
- X_L - carga indutiva [Ω]
- V - tensão gerada [V]
- I_L - corrente na carga indutiva [A]
- I_R - corrente na carga resistiva [A]

3.3 - Determinação da Curva de Magnetização

Para a determinação da curva de magnetização, o motor de indução foi acionado na velocidade síncrona por um motor de corrente contínua e uma tensão senoidal foi sendo aplicada, gradativamente, através de um varivolt, nos terminais do estator, nas frequências nominais de 50 e 60 Hz.

O sistema de ligação e os resultados obtidos são apresentados no Anexo A.

A curva de magnetização da máquina para as frequências de 50 e 60 Hz, ou seja, a tensão nos terminais do estator, em função da corrente de magnetização, é representada na Figura 3.4.

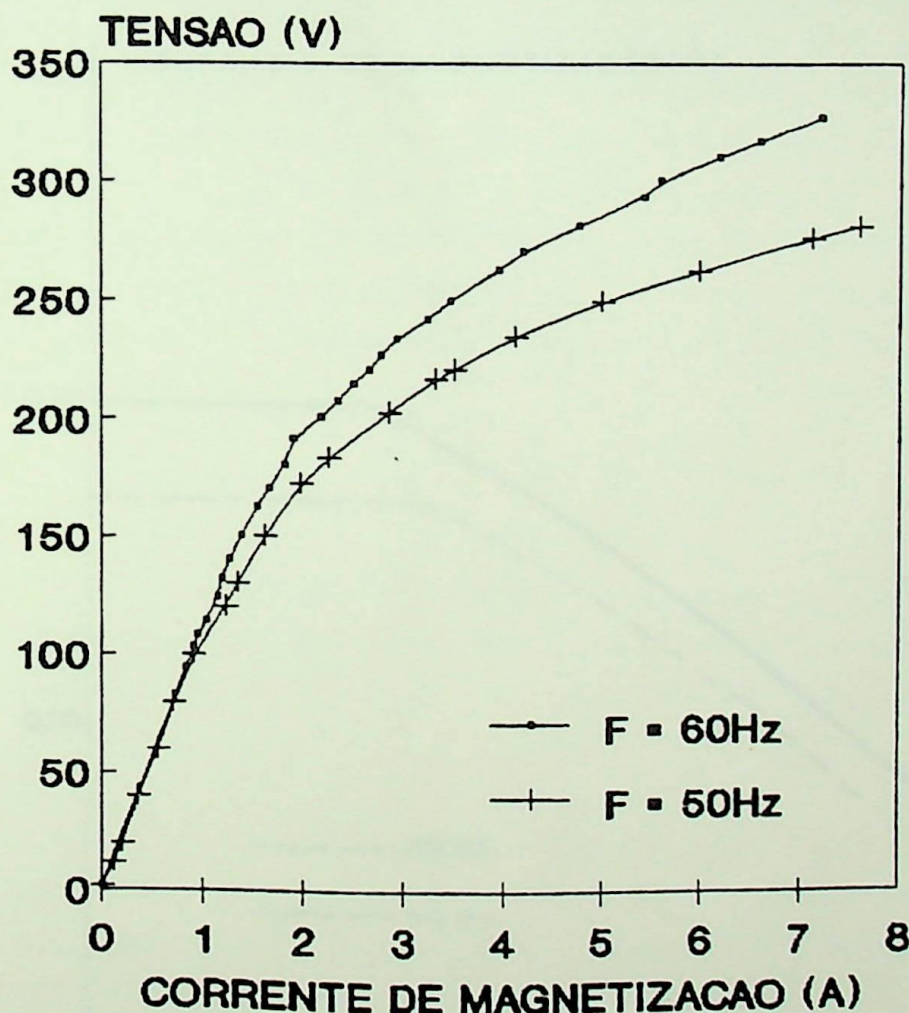


Fig. 3.4 - Gráfico da Curva de Magnetização da Máquina a Vazio

Na velocidade síncrona o escorregamento é igual a zero e portanto, o circuito do rotor comporta-se como uma impedância

infinita. Logo, desprezando-se o efeito da resistência R_m , com relação a X_m , no circuito equivalente da Figura 3.3, tem-se que:

$$I_o = I_m$$

Aplicando os valores de corrente e tensão encontrados na Figura 3.4, na equação 3.1, pode-se obter a curva da indutância de magnetização, em função da tensão gerada, para as frequências de 50 e 60 Hz, conforme indicado na Figura 3.5.

$$L_m = \frac{1}{\omega} \times X_m = \frac{V}{\omega \times I_m} \quad (3.1)$$

onde,

L_m - indutância de magnetização [H]

ω - frequência angular elétrica [rad/s]

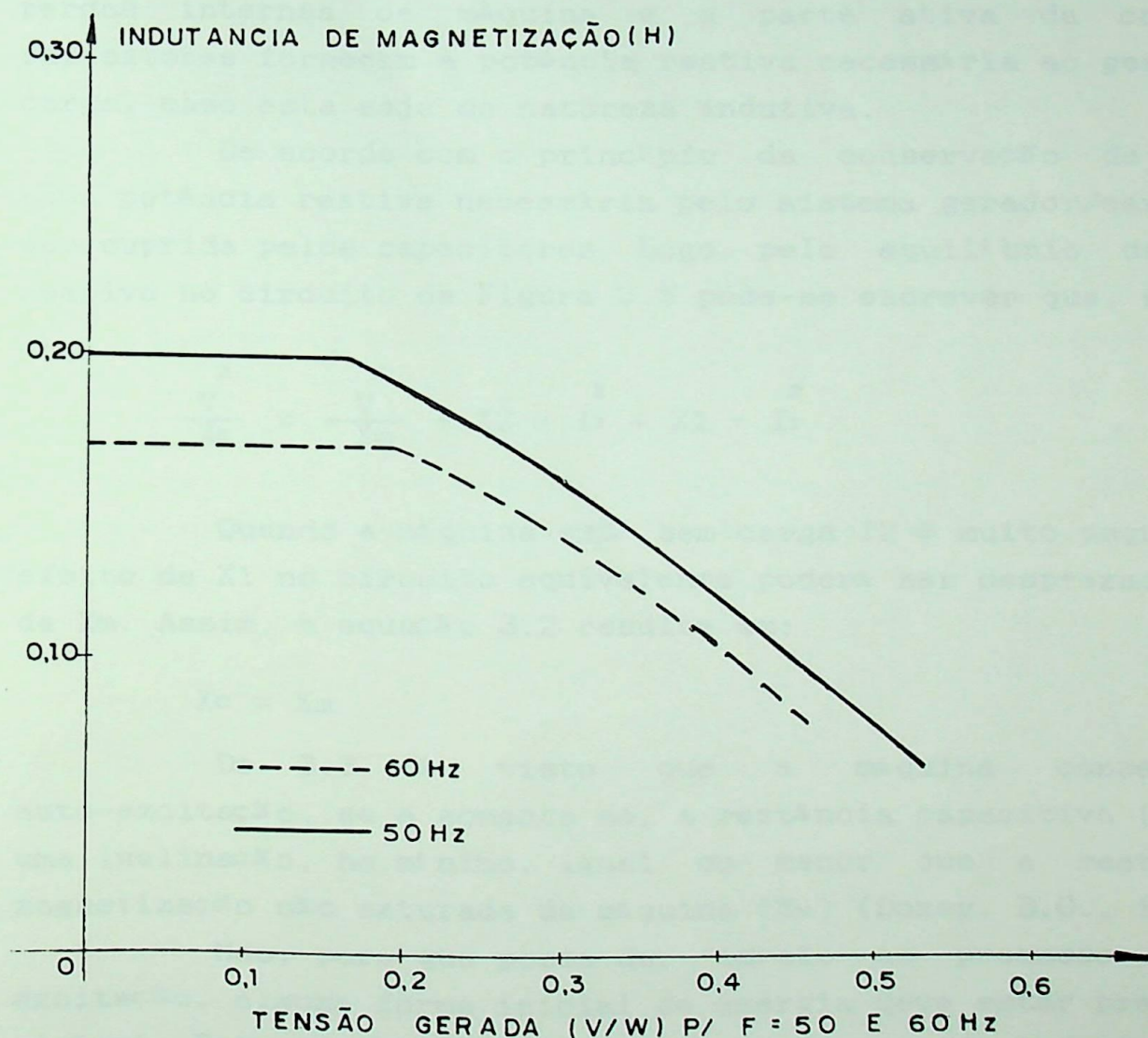


Fig. 3.5 - Gráfico da Indutância de Magnetização versus Tensão nos Terminais da Máquina para as frequências de 50 e 60 Hz

3.4 - O Processo da Auto-Excitação

Quando um motor de indução está operando como gerador e isolado da rede elétrica diante de capacitores, tem-se um fenômeno chamado auto-excitação. Os capacitores apresentam-se como uma fonte de reativos para o gerador, devido ao fato da máquina não gerar energia reativa.

No trabalho aqui realizado, e também em outras aplicações, faz-se necessária a utilização de uma máquina primária para acionar o eixo do gerador. A máquina primária utilizada foi um motor de corrente contínua. Esta fornece uma potência mecânica no eixo do gerador que é convertida em potência elétrica.

A potência elétrica é a potência ativa que vai suprir as perdas internas da máquina e a parte ativa da carga. Os capacitores fornecem a potência reativa necessária ao gerador e a carga, caso esta seja de natureza indutiva.

De acordo com o princípio da conservação de energia toda potência reativa necessária pelo sistema gerador/carga, deve ser suprida pelos capacitores. Logo, pelo equilíbrio de energia reativa no circuito da Figura 3.3 pode-se escrever que, em vazio:

$$\frac{V^2}{X_c} = \frac{V^2}{X_m} + X_2 \times I_2^2 + X_1 \times I_1^2 \quad (3.2)$$

Quando a máquina está sem carga I_2 é muito pequena e o efeito de X_1 no circuito equivalente poderá ser desprezado diante de X_m . Assim, a equação 3.2 resulta em:

$$X_c = X_m \quad (3.3)$$

De 3.3 é visto que a máquina conseguirá a auto-excitação, se e somente se, a reatância capacitiva (X_c) tiver uma inclinação, no mínimo, igual ou menor que a reatância de magnetização não saturada da máquina (X_m) (Doxey, B.C., 1963).

Mas, para que possa dar início ao processo da auto-excitação, alguma forma inicial de energia deve estar presente no sistema. Esta energia provém do magnetismo residual existente no rotor da máquina. Este induz uma pequena tensão alternada nos enrolamentos do estator em uma frequência proporcional a

velocidade do rotor.

Esta tensão, sendo aplicada nos capacitores, estabelece a circulação de uma corrente adiantada no circuito do estator. Esta corrente, circulando nos enrolamentos do estator, produz um fluxo de reação de armadura, que é acrescentado ao fluxo original (magnetismo residual inicial). Um aumento no fluxo, produz um aumento proporcional da tensão induzida e, como consequência disto, uma maior corrente de excitação para a geração do fluxo.

O processo continua, até o ponto onde a reatância capacitiva intercepta a curva de magnetização da máquina. Nesse ponto, é determinado a tensão gerada a vazio e a frequência de operação nominal da máquina.

Este ponto, representado por "H" conforme a Figura 3.6, é o ponto onde ocorreu-se a auto-excitação do gerador de indução, nas condições nominais de tensão e frequência que são, respectivamente, 220 V e 50 Hz. A reta "OH" representa a reatância capacitiva que é igual a $90,94 \Omega$ ou um valor de capacitor de $35 \mu\text{F}$, ou seja, a capacitância necessária para a auto-excitação da máquina.

A tensão obtida experimentalmente foi de 224 V, ao passo que o valor de tensão medida a partir da curva de magnetização é de 238 V. Portanto, existe uma aproximação entre o valor de tensão medido no laboratório e aquele obtido pela curva de magnetização da máquina. Para obter uma frequência de 50 Hz a máquina foi acionada em uma rotação de 1515 RPM e, consequentemente, a mesma opera com um escorregamento negativo.

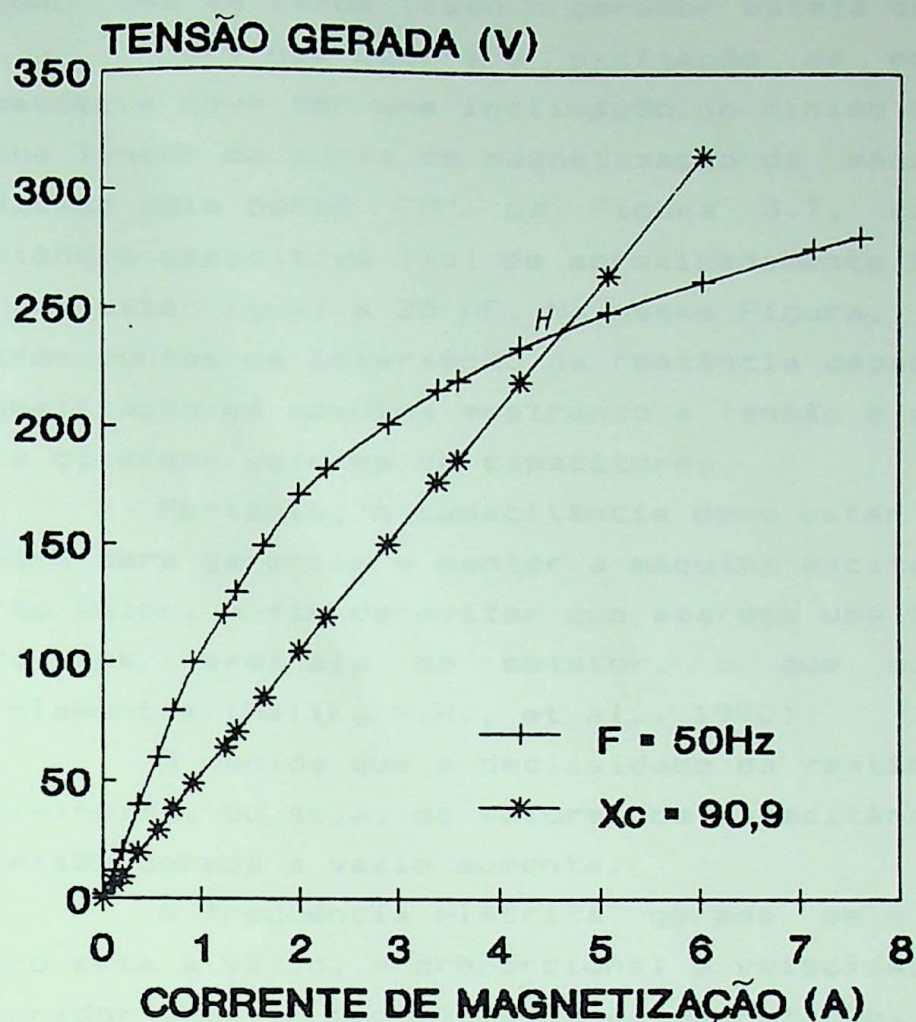


Fig. 3.6 - Gráfico da Tensão versus Corrente de Magnetização, mostrando o ponto onde ocorre a Tensão Gerada a Vazio e a Frequência de Operação Nominal da Máquina.

3.5 - O Desenvolvimento da Tensão e Frequência Gerada

O desenvolvimento da tensão do gerador de indução ocorre de forma semelhante àquela de um gerador shunt em corrente contínua. A reatância capacitiva (X_c) tem um comportamento semelhante à resistência do circuito de campo do gerador de corrente contínua (Bassett, E.D., et al. 1935).

A tensão gerada pela máquina é em função de:

- velocidade de rotação de eixo;

- reatância capacitiva (X_c);
- condições da carga (caso o gerador esteja com carga);

Para que ocorra a excitação da máquina, a reatância capacitiva deve ter uma inclinação no mínimo menor ou igual que a linha linear da curva de magnetização da máquina. Este valor é indicado pelo ponto "M" da Figura 3.7, correspondendo a uma reatância capacitiva (X_c) de aproximadamente $127,3 \Omega$ ou um valor de capacitor igual a $25 \mu F$. Na mesma Figura, estão representados outros pontos de interseção da reatância capacitiva com a curva de magnetização da máquina mostrando a tensão e a frequência geradas para diversos valores de capacitores.

Portanto, a capacitância deve estar acima deste valor mínimo para garantir e manter a máquina excitada e, abaixo de um certo valor, a fim de evitar que apareça uma tensão excessivamente alta nos terminais do estator, o que pode sobreaquecer os enrolamentos (Malik, N.H., et al., 1990).

À medida que a declividade da reatância capacitiva (X_c) é diminuída, ou seja, os valores de capacitâncias são aumentados, a tensão gerada a vazio aumenta.

A frequência elétrica gerada pelo gerador, quando o mesmo está a vazio, é proporcional a velocidade do rotor e quando o gerador estiver com carga, além da rotação, a frequência varia com o escorregamento (Junior, S.C. e Caldas, F.P., 1981). Portanto, mesmo com a rotação fixa, a frequência gerada varia com a carga. Assim, para que a frequência seja constante com o aumento da carga é necessário aumentar a velocidade do rotor.

Para que o gerador de indução gere uma força eletromotriz de frequência nominal, correspondente a frequência de operação como motor, quando isolado da rede elétrica, é necessário que a velocidade de acionamento seja maior que a nominal. Isto foi comprovado em testes de laboratório e constatou-se que para obter uma frequência de operação nominal em 50 Hz (correspondente a frequência de operação como motor) a máquina teve que ser acionada em torno de 1515 RPM.

As limitações na velocidade de operação dependem do efeito que esta velocidade tem sobre o gerador e a carga.

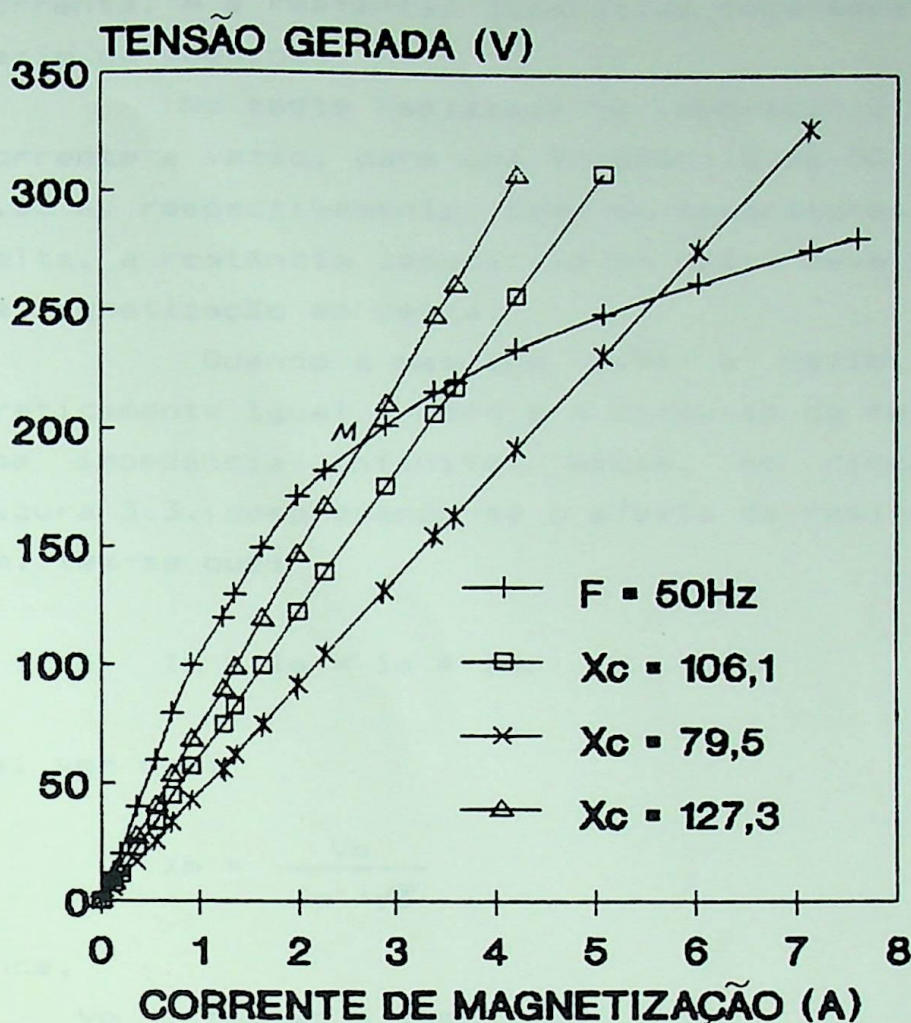


Fig. 3.7 - Gráfico da Tensão Gerada versus Corrente de Excitação para Diversos Valores de X_c .

3.6 - Dimensionamento do Banco de Capacitores

Os capacitores necessários para a excitação da máquina, numa determinada condição da carga, só podem ser bem dimensionados através de um conhecimento preciso dos parâmetros elétricos da máquina, incluindo-se a variação desses parâmetros com a tensão (Smith, N.P.A., et al., 1990).

O mesmo autor propõe dois métodos para um cálculo aproximado do banco de capacitores.

O primeiro, é ligando a máquina de indução a vazio na rede. Dai, mede-se a tensão e a corrente a vazio. A reatância de

magnetização, obtida a partir da relação entre a tensão e a corrente, é a reatância capacitiva necessária para a excitação a vazio da máquina.

No teste realizado no laboratório as medidas de tensão e corrente a vazio, para uma frequência de 50 Hz, foram de 220 V e 3,55 A, respectivamente. Como os capacitores estão conectados em delta, a reatância capacitiva em delta deve ser igual a reatância de magnetização em delta.

Quando a máquina está a vazio, o escorregamento é praticamente igual a zero e o circuito do rotor comporta-se como uma impedância infinita. Assim, no circuito equivalente da Figura 3.3, desprezando-se o efeito da resistência de magnetização R_m , tem-se que:

$$I_m = I_o = I_o' = I_{m1}$$

Daí vem que:

$$X_m = \frac{V_o}{I_o' / \sqrt{3}} \quad (3.4)$$

onde,

V_o - tensão a vazio [V]

I_o' - corrente a vazio [A]

Substituindo-se os valores de V_o e I_o , medidos no laboratório vem que:

$$X_m = 107,3 \Omega$$

Como, $X_c = 1/\omega C$ e fazendo $X_m = X_c$, a capacitância obtida para uma frequência de operação em 50 Hz é de, aproximadamente, 30 μF .

O segundo método, é através de uma estimativa de componente reativa da corrente nominal da máquina e de seu fator de potência a plena carga. A máquina aqui utilizada tem um fator de potência e uma corrente nominal a plena carga de, respectivamente, 0,82 e 7,5 A.

A componente reativa desta corrente é dada por:

$$I_m = I_N \times \text{sen}(\arccos(0,82)) \quad (3.5)$$

onde,

I_m - componente reativa da corrente nominal da máquina [A]

I_N - corrente nominal da máquina a plena carga [A]

Substituindo-se os valores de I_N e do fator de potência na equação 3.5, vem que:

$$I_m = 4,2927 \text{ A}$$

Como os capacitores estão conectados em delta, vem que:

$$X_c = \frac{V}{I_m/\sqrt{3}} \quad (3.6)$$

onde,

V - tensão nominal da máquina de indução [V], ou seja, 220 V

Fazendo as substituições na equação 3.6, resulta que:

$$X_c = 88,7 \Omega$$

Consequentemente, o valor da capacitância para uma frequência de 50 Hz é de aproximadamente 35 μF . A diferença entre os dois valores calculados é devido a utilização de dois métodos aproximados. No laboratório o valor da capacitância necessária para a auto-excitação da máquina foi de 35 μF .

3.7 - Perda e Recuperação do Magnetismo Residual

Uma das dificuldades encontradas na operação isolada de um gerador de indução, é garantir que a máquina tenha magnetismo residual no rotor, quando ligada. Para manter este magnetismo residual é necessário que todos os capacitores e toda a carga sejam desconectados, até que a máquina atinga a velocidade nominal e que a mesma não opere com velocidades muito baixas.

Depois que a máquina torna-se auto-excitada o magnetismo residual pode ser perdido, caso ocorra:

- Aumento da carga com os capacitores fixos;

- retirada de capacitores com a carga ligada;
- Curto-circuito temporário nos terminais da máquina;
- Velocidades excessivamente baixas;

Um detalhe importante é a auto-proteção da máquina contra curto-circuito. Caso ocorra um curto-circuito nos seus terminais, haverá circulação de uma corrente de "in rush" através do curto, de duração extremamente curta, cuja amplitude é determinada pela tensão nos terminais do capacitor, juntamente com a resistência formada pelo curto. O capacitor se descarrega através desse curto e a corrente não flui pelos enrolamentos da máquina (Bassett, E.D., et al., 1935).

Caso ocorra a perda do magnetismo residual, por algum dos motivos mencionados acima, o mesmo pode ser recuperado por um dos seguintes métodos:

- Ligando a máquina como motor à rede durante alguns segundos ou minutos;
- Descarregando um condensador carregado através de dois terminais do estator enquanto a máquina está funcionando;
- Ligando-se uma bateria, temporariamente, através de dois terminais do estator, com a máquina parada;

Por facilidade e conveniência adotou-se o primeiro método, que apresentou resultados satisfatórios. Sem dúvida que este método não poderá ser utilizado quando da operação isolada, pois não haverá a presença da rede elétrica. Neste caso, sugere-se que se adote o método que utiliza a bateria.

3.8 - Características da Tensão Gerada em Função da Velocidade

3.8.1 - Comportamento sob Condições sem carga

A partir do circuito equivalente da máquina de indução, representado na Figura 3.3, e desprezando-se a queda de tensão no ramo série, ou seja, considerando-se desprezível o efeito da resistência do estator e das reatâncias do estator e rotor, diante de R_2/S e X_m , o mesmo pode ser simplificado conforme a Figura 3.8.

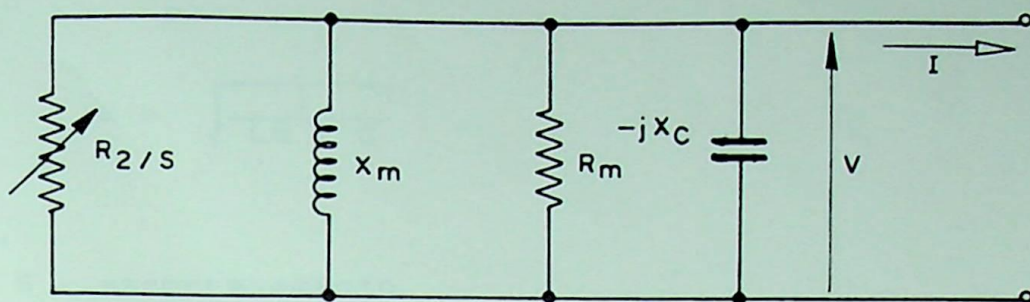


Fig. 3.8 - Circuito Equivalente por Fase Desprezando-se a Queda de Tensão nas Impedâncias do Estator e Rotor

Da Figura 3.8 pode-se escrever que:

$$Y \times V = I \quad (3.7)$$

Onde,

Y - admitância [$1/\Omega$]

V - tensão gerada fase-neutro [V]

I - corrente da carga [A]

A vazios, a corrente da carga (I) é numericamente igual a zero. Como a tensão é diferente de zero, a admitância equivalente total no circuito é zero. Assim, a admitância equivalente total no circuito por fase é dada por:

$$\frac{S}{R_2} + \frac{1}{R_m} + \frac{1}{jX_m} + \frac{1}{-jX_c} = 0$$

ou ainda como:

$$\frac{S}{R_2} + \frac{1}{R_m} + j \left(W \times C - \frac{1}{W \times L_m} \right) = 0 \quad (3.8)$$

Igualando-se as partes reais e imaginárias da equação 3.8 a zero, resulta que:

$$S = - \frac{R_2}{R_m} \quad (3.9)$$

e

$$W = \sqrt{\frac{1}{L_m \times C}} \quad (3.10)$$

onde,

S - escorregamento

W - frequência angular elétrica [rad/s]

Como o valor de R_m é muito maior que R_2 , o escorregamento é pequeno e, desta maneira, a excitação do gerador é estabelecida pela ressonância entre a capacitância e a indutância de magnetização da máquina. O escorregamento é a diferença entre a velocidade do campo girante e a velocidade do rotor e é dado por:

$$S = 1 - \frac{W_m}{\frac{2W}{P}} \quad (3.11)$$

onde,

P - número de polos da máquina

W_m - velocidade do rotor [rad/seg]

Substituindo as equações 3.9 e 3.10 na equação 3.11 resulta que:

$$W_m = \left(1 + \frac{R_2}{R_m}\right) \frac{2}{P} \sqrt{\frac{1}{L_m \times C}} \quad (3.12)$$

Como, $R_m \gg R_2$ a equação 3.12 resulta em:

$$W_m = \frac{2}{P} \sqrt{\frac{1}{L_m \times C}} \quad (3.13)$$

Substituindo os valores da indutância de magnetização da Figura 3.5, na equação 3.13, para um valor de capacitância de $35 \mu\text{F}$, obtém-se a curva da tensão gerada a vazio em função da

velocidade, representada na figura 3.9.

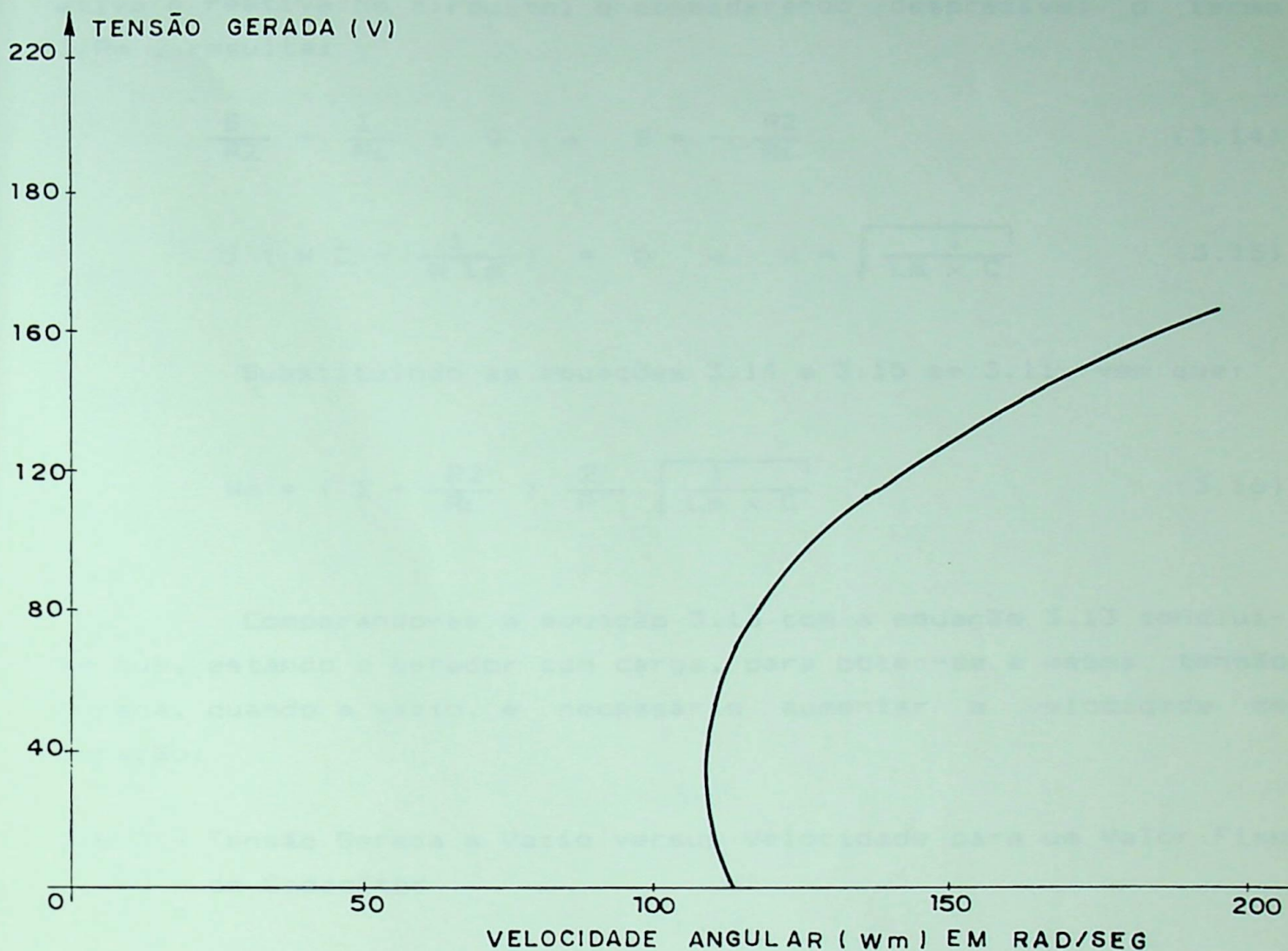


Fig. 3.9 - Gráfico da Tensão Gerada versus Velocidade do Rotor.

Na Figura 3.9 é visto que, aumentando-se gradualmente a velocidade, atingir-se-á um ponto onde aparecerá um aumento repentino da tensão nos terminais da máquina, ou seja, a tensão é muito dependente da rotação de eixo. Observou-se que esse ponto refere-se a velocidade de aproximadamente 114 rad/s. Constatou-se também que, ao diminuir a velocidade abaixo desse valor, a tensão não se anula desde que o seu valor permaneça superior a 110 rad/s.

3.8.2 - Comportamento sob Condições de Carga

Acrescentando-se uma carga resistiva paralela nos

terminais do estator no circuito equivalente da Figura 3.8 e, de forma semelhante para o caso a vazio (pelo equilíbrio da energia ativa e reativa no circuito) e considerando desprezível o termo $1/R_m$, resulta:

$$\frac{S}{R_2} + \frac{1}{R_L} = 0 \Rightarrow S = -\frac{R_2}{R_L} \quad (3.14)$$

$$j \left(W C - \frac{1}{W L_m} \right) = 0 \Rightarrow W = \sqrt{\frac{1}{L_m \times C}} \quad (3.15)$$

Substituindo as equações 3.14 e 3.15 em 3.11, vem que:

$$W_m = \left(1 + \frac{R_2}{R_L} \right) \frac{2}{P} \sqrt{\frac{1}{L_m \times C}} \quad (3.16)$$

Comparando-se a equação 3.16 com a equação 3.13 conclui-se que, estando o gerador com carga, para obter-se a mesma tensão gerada, quando a vazio, é necessário aumentar a velocidade de rotação.

3.8.3 - Tensão Gerada a Vazio versus Velocidade para um Valor Fixo de Capacitor

A Figura 3.10 apresenta os valores da tensão gerada nos terminais do gerador em função da velocidade de rotação, obtidos experimentalmente para três valores de capacitância, ou seja, 30 μF , 40 μF , e 50 μF .

Estes valores foram obtidos com a máquina a vazio aumentando-se gradativamente a velocidade, após fixado um valor de capacitância. É importante observar que, quanto maior for o capacitância, menor é a velocidade em que se tem a mesma tensão gerada e vice-versa.

Em seguida, a velocidade foi diminuída até que a tensão nos terminais do gerador caísse a zero. Se a rotação da máquina for aumentada novamente, a tensão gerada ocorrerá nos mesmos valores de velocidades.

Isto ocorrerá devido ao fato da máquina não perder o seu

magnetismo residual. Foi verificado experimentalmente que, quando é utilizado um valor de reatância capacitiva correspondente a região linear da curva de magnetização, o magnetismo residual é perdido e por isso, deve-se escolher um valor de capacitância um pouco acima do valor mínimo. Tal procedimento é recomendável devido à grande instabilidade nesta região.

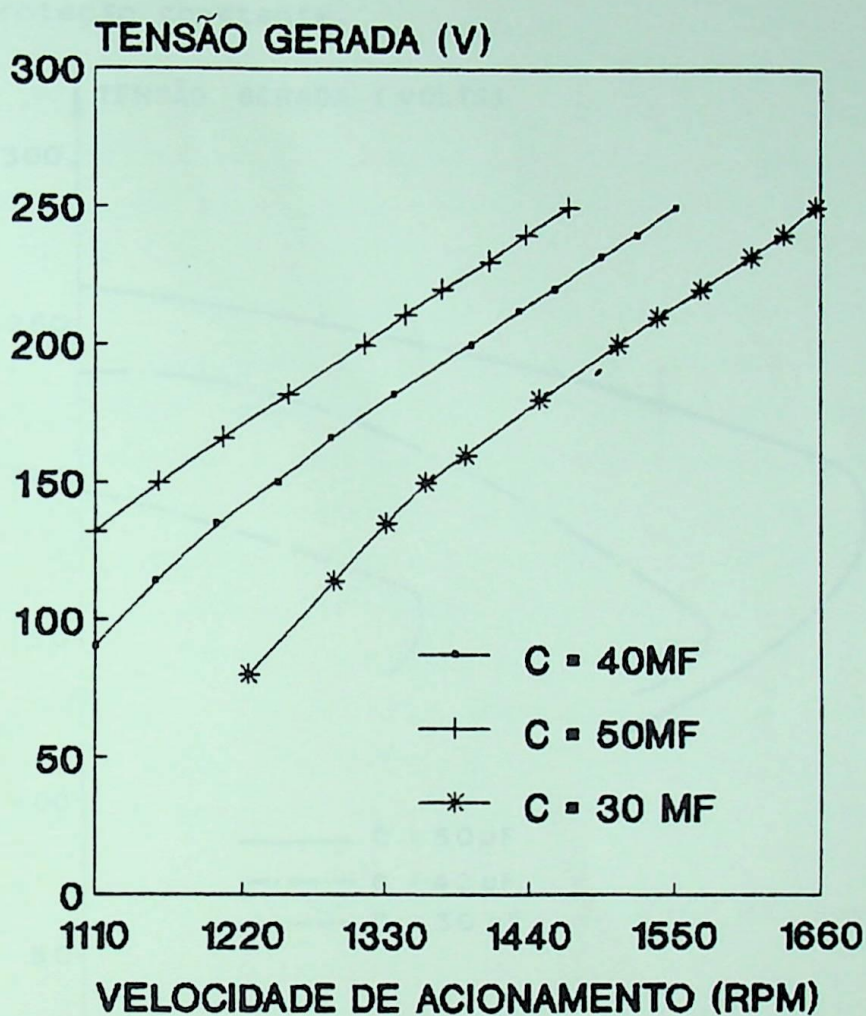


Fig. 3.10 - Gráfico da Tensão Gerada versus Rotação

As velocidades em que surgiram o aparecimento da mesma tensão gerada nos terminais da máquina para os capacitores de 30 μF , 40 μF e 50 μF foram de, respectivamente, 1568 RPM, 1456 RPM e 1372 RPM.

3.8.4 - Tensão Gerada em Função da Corrente de Carga para um Valor Fixo de Capacitor

A Figura 3.11 mostra o comportamento da tensão nos terminais do gerador em função da corrente de carga, para três valores fixos de capacitâncias. Para cada valor de capacitância a carga foi sendo aumentada gradativamente, mantendo em cada caso a rotação constante.

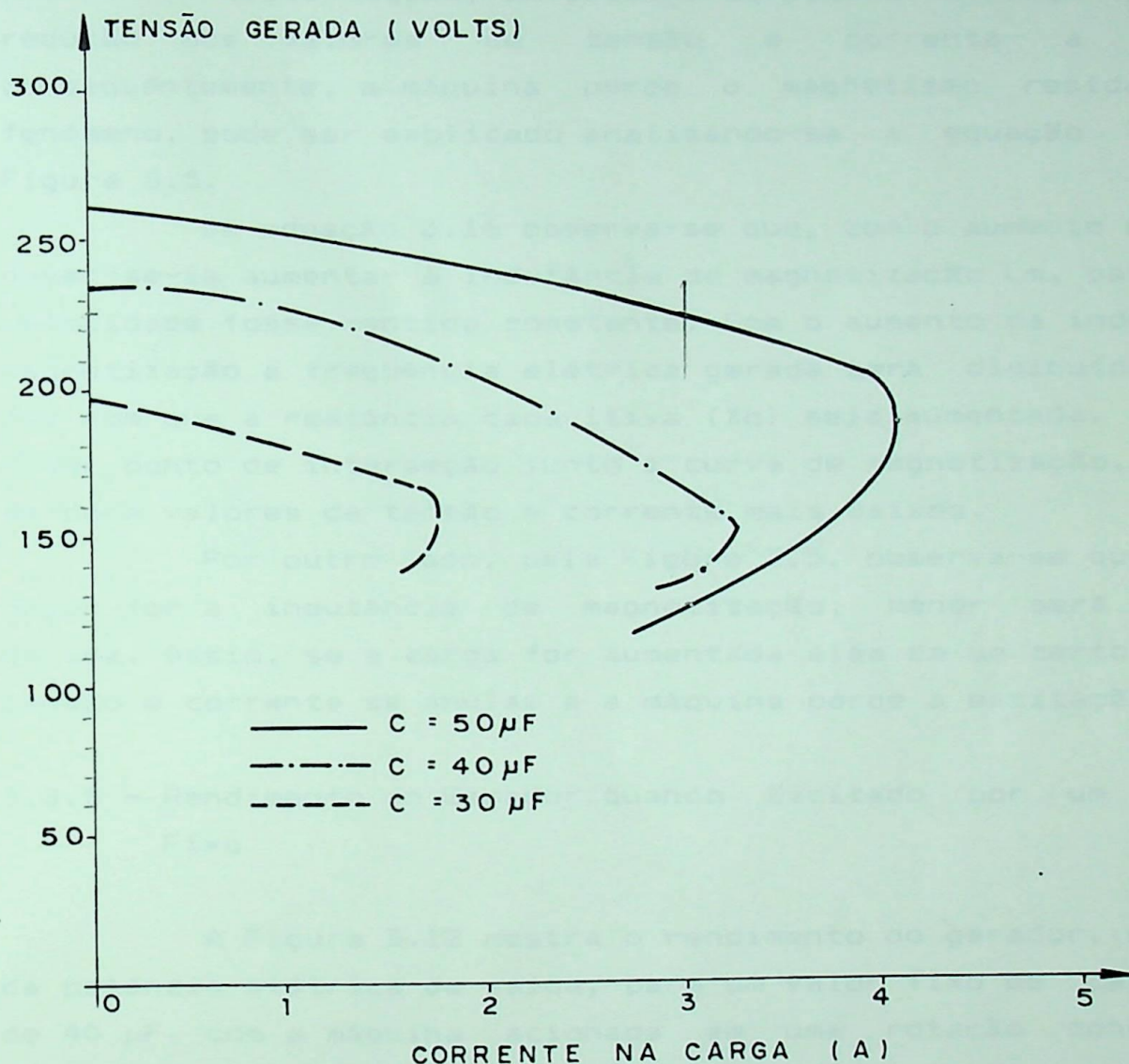


Fig. 3.11 - Gráfico da Tensão versus Corrente de Carga

Conforme pode ser observado na Figura 3.11, à medida que aumenta a carga, a tensão gerada diminui. Conclui-se, então, que o gerador de indução apresenta uma sofrível regulação de tensão, quando excitado por capacitores fixos. Esta regulação de tensão

piora, a medida que as capacitâncias são diminuídas.

Este fenômeno é devido que a tensão gerada desloca-se na curva de magnetização para um valor menor, originando em uma corrente de magnetização menor. À medida que a carga vai sendo aumentada o ponto de operação desloca-se para a parte linear da curva de magnetização e nesta região existem vários pontos de interseção da reatância capacitiva com a mesma curva, ocorrendo então uma instabilidade.

Nesta região, um pequeno acréscimo na carga provoca a redução dos valores de tensão e corrente a zero e, conseqüentemente, a máquina perde o magnetismo residual. Este fenômeno, pode ser explicado analisando-se a equação 3.16 e a Figura 3.5.

Da equação 3.16 observa-se que, com o aumento da carga, dever-se-ia aumentar a indutância de magnetização L_m , para que a velocidade fosse mantida constante. Com o aumento da indutância de magnetização a frequência elétrica gerada será diminuída, o que faz com que a reatância capacitiva (X_c) seja aumentada. Portanto, o seu ponto de interseção junto à curva de magnetização, desloca-se para valores de tensão e corrente mais baixos.

Por outro lado, pela Figura 3.5, observa-se que, quanto maior for a indutância de magnetização, menor será a tensão gerada. Assim, se a carga for aumentada além de um certo valor, a tensão e corrente se anulam e a máquina perde a excitação.

3.8.5 - Rendimento do Gerador quando Excitado por um Capacitor Fixo

A Figura 3.12 mostra o rendimento do gerador, em função da potência elétrica de saída, para um valor fixo de capacitância de $40 \mu F$, com a máquina acionada em uma rotação constante de 1500 RPM e alimentando uma carga resistiva variável.

Pela Figura 3.12, é visto que o gerador de indução tem um baixo rendimento quando excitado por capacitores fixos. Por estas razões, um gerador de indução apresenta um melhor desempenho quando for feito o controle da tensão e frequência, geradas.

A equação do rendimento e da potência elétrica de saída do gerador, assim como a configuração do motor de indução operando

como gerador são mostrados no Anexo A.

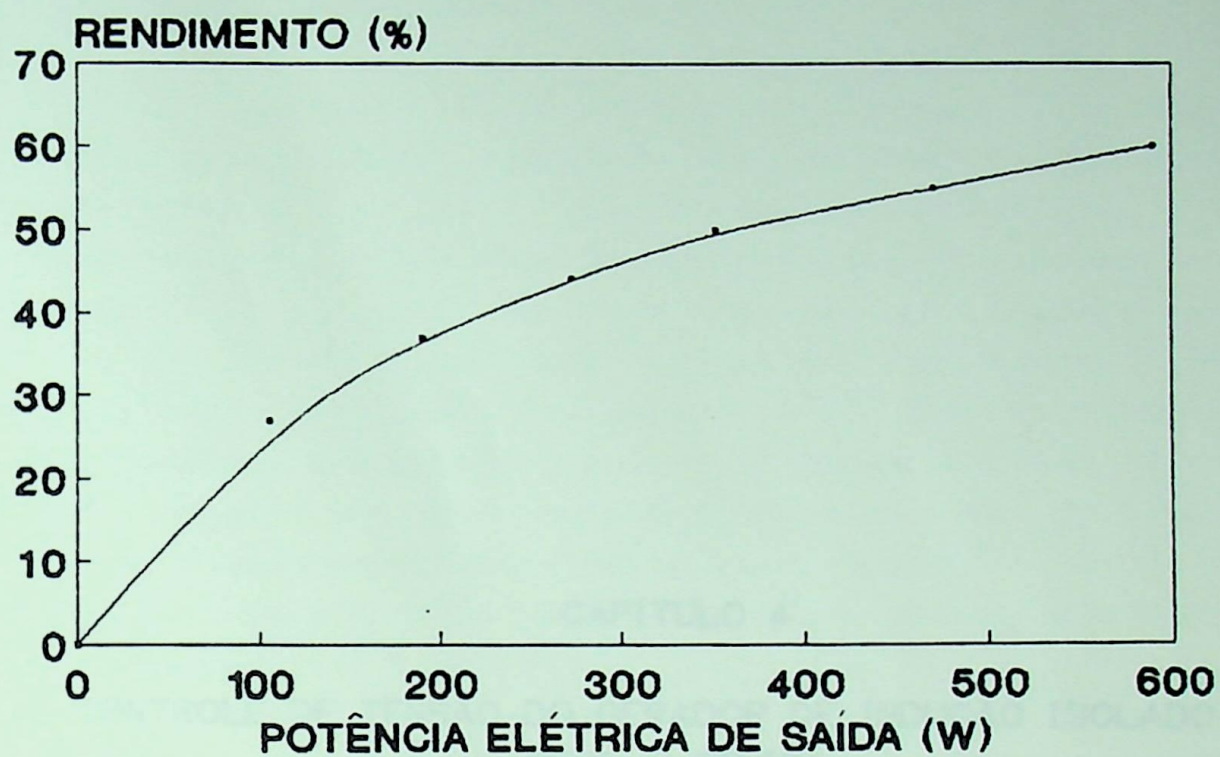


Fig. 3.12 - Gráfico do Rendimento versus Potência Elétrica de Saída

CONTROLE DE TENSÃO DO GERADOR DE INDUÇÃO ISOLADO DA REDE ELÉTRICA

4.1 - Considerações Gerais

Como pode ser verificado pela Figura 4.1, a potência de indução apresenta-se regulada de acordo com a carga por meio de um capacitor fixo. Isso ocorre devido ao fato de que a reatância capacitiva (X_C) é inversamente proporcional à frequência elétrica gerada (f) e portanto, variável com a rotação e com a carga.

Assim, quando uma carga de impedância variável for ligada nos terminais do gerador, a sua rotação diminui, diminuindo a frequência elétrica gerada e, consequentemente, a reatância capacitiva. A diminuição da reatância capacitiva resulta em uma diminuição da tensão de indução e, portanto, a tensão de indução é regulada de acordo com a carga.

CAPÍTULO 4

CONTROLE DE TENSÃO DO GERADOR DE INDUÇÃO ISOLADO DA REDE ELÉTRICA

Para a tensão de indução ser regulada de acordo com a carga, é necessário que a reatância capacitiva seja regulada de acordo com a carga. Isso é feito por meio de um capacitor fixo. A reatância capacitiva é inversamente proporcional à frequência elétrica gerada e, portanto, variável com a rotação e com a carga. Assim, quando uma carga de impedância variável for ligada nos terminais do gerador, a sua rotação diminui, diminuindo a frequência elétrica gerada e, consequentemente, a reatância capacitiva. A diminuição da reatância capacitiva resulta em uma diminuição da tensão de indução e, portanto, a tensão de indução é regulada de acordo com a carga.

Neste caso, a corrente nos capacitores (i_C) é igual à corrente relativa (ou absoluta) pelo circuito de indução, como indicado na Figura 4.2, quando se aplica uma carga indutiva ao gerador. A corrente de indução (i_L) é dada por $i_L = i_C$ e, portanto, a corrente de indução é igual à corrente dos capacitores. Isso ocorre devido ao fato de que a reatância capacitiva é inversamente proporcional à frequência elétrica gerada e, portanto, variável com a rotação e com a carga.

CAPÍTULO 4

CONTROLE DE TENSÃO DO GERADOR DE INDUÇÃO ISOLADO DA REDE ELÉTRICA

4.1 - Considerações Gerais

Como pode ser verificado pela Figura 3.11, o gerador de indução apresenta má regulação de tensão quando excitado por capacitores fixos. Isto ocorre devido ao fato de que a reatância capacitiva (X_c) é inversamente proporcional à frequência elétrica gerada (ω) e portanto, variável com a rotação e com a carga.

Assim, quando uma carga de impedância variável for ligada aos terminais do gerador, a sua rotação diminui, diminuindo-se a frequência gerada e, conseqüentemente, a reatância capacitiva é aumentada originando uma diminuição da tensão gerada. Foi verificado experimentalmente que, quando a carga é indutiva, a queda de tensão é ainda mais pronunciada, principalmente quando o fator de potência é baixo.

Para cargas resistivas, a diminuição da tensão é devida à queda de tensão nas resistências e reatâncias da máquina, enquanto que, para as cargas indutivas, há o fato de que o reativo destas cargas é suprido pelos capacitores. Uma carga de fator de potência atrasado tem o efeito de desmagnetização da máquina.

Os capacitores, se bem dimensionados, fornecem os reativos necessários ao conjunto gerador/carga. Quando o gerador está sem carga, a corrente fornecida pelos capacitores é a própria corrente absorvida pelo gerador (I_m) necessária para a sua excitação (estabelecer o seu campo magnético) e, suprir as suas reatâncias internas.

Neste caso, a corrente nos capacitores (I_c) é igual à corrente reativa (I_m) absorvida pela máquina nos enrolamentos do estator, como indicado na Figura 3.3. Quando é ligado uma carga indutiva de corrente reativa (I_L) aos terminais do gerador, a corrente de magnetização passa a ser reduzida devido ao fato de que, este reativo é suprido pelos capacitores de modo que se tenha:

$$I_m = I_c - I_L \quad (4.1)$$

Pela equação 4.1 é visto que, tem que haver uma fonte de potência reativa capaz de suprir a demanda de energia reativa necessária ao gerador e à carga, ou seja, têm-se que manter a máquina auto-excitada. Se for utilizado um capacitor fixo, a corrente de magnetização da máquina será alterada com relação à variação da carga, levando a mesma à desexcitação. Portanto, para que o gerador permaneça auto-excitado com a variação da impedância da carga, a tensão nos seus terminais deve ser mantida constante.

A seguir é feito um comentário de alguns métodos que podem ser utilizados para o controle da auto-excitação do gerador, ou seja, controle da tensão gerada.

4.2 - Métodos de Controle da Auto-Excitação do Gerador de Indução

4.2.1 - Método do Capacitor Série

Neste método, além do capacitor em paralelo com a máquina, são introduzidos capacitores em série com a carga, como representados no diagrama de blocos da Figura 4.1.

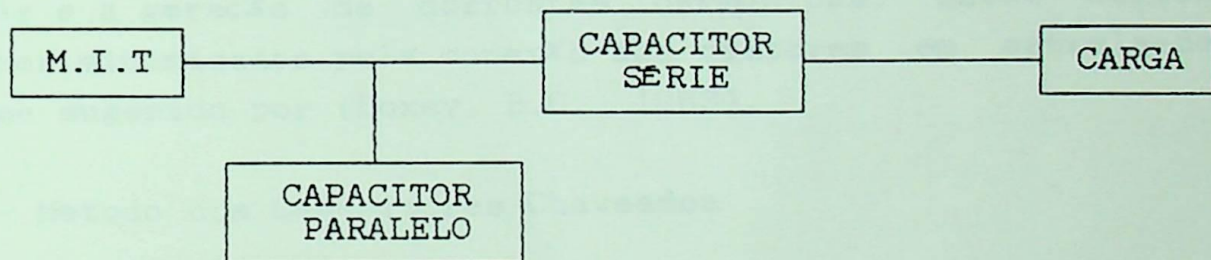


Fig. 4.1- Diagrama de Blocos mostrando a Configuração Capacitor Série/Paralelo

Quando a máquina está sem carga, a capacitância, vista a partir dos terminais do estator, é apenas a do capacitor paralelo e, na ocorrência de um curto-circuito nos terminais da carga, esta capacitância será a soma do capacitor série e do paralelo. Portanto, dependendo dos valores destes capacitores, a tensão nos terminais do estator terá aumento acentuado conforme a carga seja aumentada. Quando o valor da carga é baixo, o efeito do capacitor série sobre o controle de tensão é praticamente desprezível.

Através de conclusões obtidas por Caldas, F.P., 1980 e Bassett, E.D., et al., 1935, verificou-se que esse método tem um bom desempenho somente quando as cargas forem resistivas. Porém, é insatisfatório quando a carga é de fator de potência variável, a não ser que o fator de potência da mesma seja constante e o capacitor série seja ajustado para esta condição.

4.2.2 - Método do Reator Saturável

Neste método, um reator de núcleo saturável com baixas perdas e que tenha características de magnetização bem saturadas, é introduzido em paralelo com os capacitores de excitação (Doxey, B.C., 1963 e Bim, E., et al., 1989).

Assim, a curva de magnetização vista a partir dos terminais da máquina tem uma forma mais nivelada na sua região de saturação, o que melhora a regulação de tensão quando a componente reativa da carga absorve corrente do capacitor reduzindo a corrente de magnetização.

Esse mecanismo é bastante eficiente quanto à regulação de tensão do gerador, mas tem as desvantagens do alto custo dos reatores e a geração de correntes harmônicas. Estas correntes podem ser minimizadas pela conexão dos reatores em estrela-delta conforme sugerido por (Doxey, B.C., 1963).

4.2.3 - Método dos Capacitores Chaveados

A tensão gerada pelo gerador pode ser mantida constante com a variação da carga, através do chaveamento de capacitores em paralelo.

Pela Figura 3.11, observa-se que o valor de capacitor correspondente à região mais saturada da curva de magnetização apresenta melhor regulação de tensão. Assim, se for escolhido um valor de capacitância maior, o gerador pode operar em plena carga com um nível de tensão mais satisfatório.

Porém, quanto maior for o valor do capacitor, maior será a corrente de estator e maiores serão as perdas. Isto constitui-se em uma das desvantagens do chaveamento de capacitores.

A variação da capacitância em função da corrente de

carga, necessária para que a máquina opere numa tensão e velocidade constantes de, respectivamente, 220 V e 1500 RPM é ilustrada na Figura 4.2.

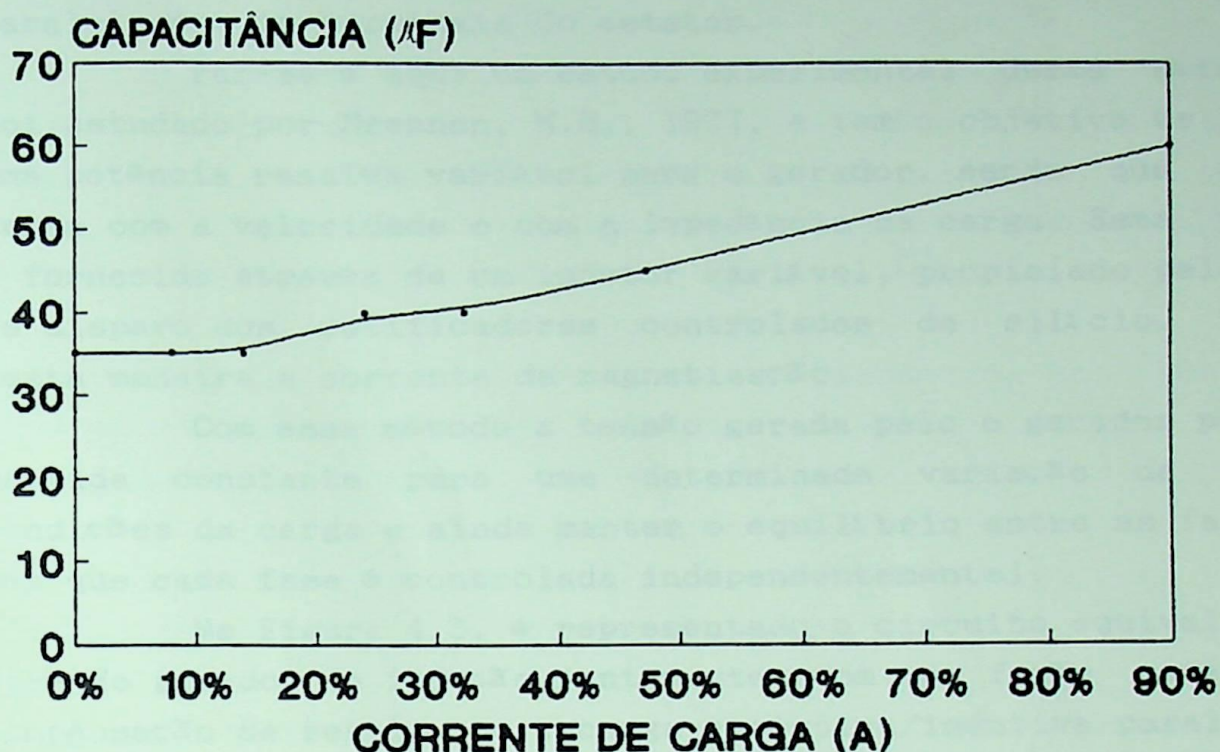


Fig. 4.2 - Curva da Capacitância versus Corrente de Carga

Nesta experiência foi utilizada uma carga resistiva variável, cujos valores em amperes são dados em porcentagens da corrente nominal da máquina. A variação da capacitância desde sem carga até 90% da corrente nominal em plena carga do gerador, necessária para manter a tensão nos terminais do mesmo aproximadamente constante, foi de 30 μF .

Embora, não ilustrada na Figura 4.2 a tensão variou em pequenos degraus, mostrando que o método é inconveniente para estabelecer uma tensão constante na carga. Portanto além de ser um método bastante caro, é impróprio para o controle contínuo da tensão que na prática é tecnicamente desaconselhável.

4.3 - Controle de Tensão pelo Método da Fonte Estática de Compensação de Reativos

A tensão nos terminais do gerador pode ser controlada

sob variação da carga e rotação de eixo, utilizando-se uma fonte estática de compensação de reativos constituída de capacitores fixos e indutores, com o controle da corrente feito por retificadores controlados de silício (SCR's), colocados em paralelo com os terminais do estator.

Far-se-á aqui um estudo experimental deste método que foi estudado por Brennen, M.B., 1977, e tem o objetivo de fornecer uma potência reativa variável para o gerador, sendo que a mesma varia com a velocidade e com a impedância da carga. Esta potência é fornecida através de um indutor variável, propiciado pelo ângulo de disparo dos retificadores controlados de silício. Varia-se desta maneira a corrente de magnetização.

Com esse método a tensão gerada pelo o gerador pode ser mantida constante para uma determinada variação da rotação, condições da carga e ainda manter o equilíbrio entre as fases (uma vez que cada fase é controlada independentemente).

Na Figura 4.3, é representado o circuito equivalente por fase do gerador de indução juntamente com a fonte estática de compensação de reativos e a carga resistiva/indutiva paralela.

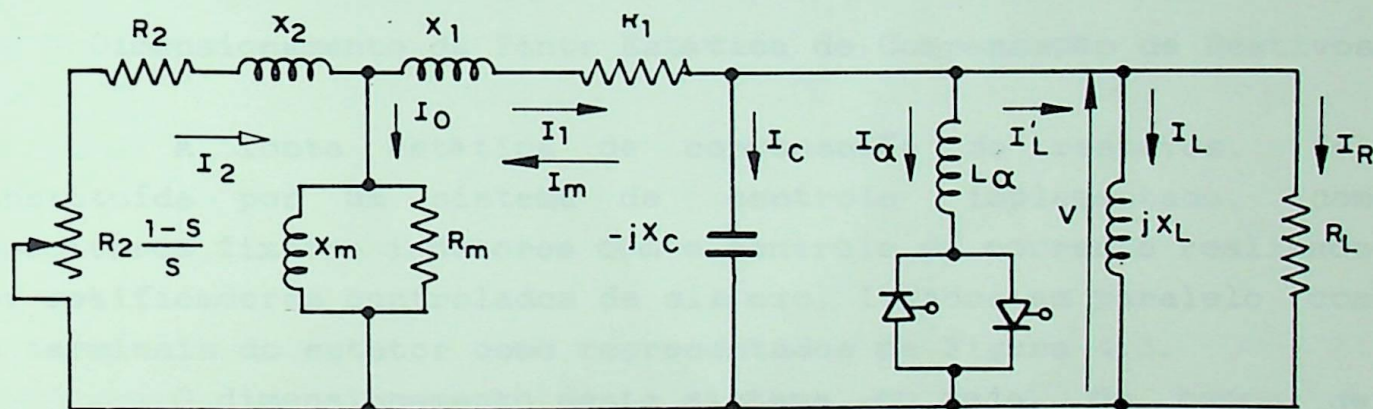


Fig. 4.3- Circuito Equivalente por fase do Gerador de Indução juntamente com a Fonte Estática de Compensação de Reativos.

Quando o gerador está sem carga, os tiristores não bloqueiam a corrente que passa pelo indutor, ou seja, são disparados, neste caso, com $\alpha = 0^\circ$. Porém, quando a carga é aumentada a tensão nos terminais do gerador começa a diminuir, porque os capacitores devem fornecer o reativo solicitado pela carga e, segundo a equação 4.1, a corrente de magnetização

diminui.

Para manter a tensão constante a corrente no indutor (I_{α}) deve ser diminuída, o que é feito através do aumento do ângulo de disparo dos tiristores. Com isto, a corrente no ramo magnetizante é aumentada e há regulação de tensão.

Quando a capacidade de compensação da fonte estática de compensação de reativos atinge o limite máximo, pela qual foi dimensionada para uma determinado fator de potência da carga, o ângulo de disparo dos tiristores (α) atinge o valor máximo ($\alpha = 90^{\circ}$) e a corrente no indutor (I_{α}) é praticamente zero ($I_{\alpha} = 0$).

O capacitor é dimensionado para fornecer a potência reativa máxima necessária ao conjunto gerador/carga, enquanto o indutor é dimensionado para absorver o reativo excedente, de modo que a tensão passa a ser alterada (Willians, T.J., et al., 1984).

Uma das vantagens desse método, além do controle independente por fase, é que, com o aumento da carga ou da velocidade de rotação, a tensão nos terminais do gerador pode ser controlada no nível desejado, sem que hajam correntes excessivamente altas fluindo pelos enrolamentos da máquina.

4.4 - Dimensionamento da Fonte Estática de Compensação de Reativos

A fonte estática de compensação de reativos, foi constituída por um sistema de controle implementado, com capacitores fixos e indutores com o controle da corrente realizado por retificadores controlados de silício, ligados em paralelo com os terminais do estator como representados na Figura 4.3.

O dimensionamento deste sistema, ou seja, do banco de capacitores (C) e do indutor (L_{α}), foi feito com base em testes experimentais.

Procurou-se dimensiona-los, de modo que os mesmos pudessem manter o gerador auto-excitado desde sem carga até quando o gerador alimentasse uma impedância de carga de fator de potência atrasado em 0,707 e ao mesmo tempo permanecer auto-excitado, ou seja, tensão gerada constante.

Os indutores (L_{α}) experimentados para esta condição foram de, 0,3, 0,4 e 0,6 H. Com o indutor de 0,3 H, houve uma instabilidade no disparo dos retificadores, o que inviabilizou a

utilização do mesmo.

Experimentalmente, foram utilizados os indutores ($L\alpha$) e banco de capacitores (C) de, respectivamente, 0,4 H e 45 μ F e (ou) 0,6 H e 55 μ F.

Para a realização desta experiência, foi utilizado um motor de corrente contínua para acionar o gerador de indução. Assim, o gerador pôde ser acionado a uma velocidade variável ou constante mediante o ajuste da corrente no circuito de campo do motor de corrente contínua, por um reostato ligado em série com o mesmo.

4.5 - Resultados Experimentais para a Máquina sem carga e com Carga

Foram obtidos alguns resultados com o gerador de indução sem carga e com carga, para verificar o desempenho do sistema de controle.

Estes ensaios como já dito, foram realizados através da experimentação de vários indutores e capacitores, para verificar aqueles que apresentavam maior desempenho frente à demanda de energia reativa necessária ao gerador e à carga. Quando da utilização das cargas, elas foram ligadas conforme representadas na Figura 4.3.

4.5.1 - Máquina sem carga

Neste teste, o ângulo de disparo dos retificadores controlados de silício foi alterado mediante velocidade de eixo constante ou variável, para observar a variação da tensão gerada, corrente do estator e capacitor.

As Figuras 4.4 e 4.5, mostram as variações da tensão gerada (V), corrente no estator (I_1), corrente no capacitor (I_c), em função do ângulo de disparo dos tiristores para as rotações de eixo de, respectivamente, 1500 e 1400 RPM.

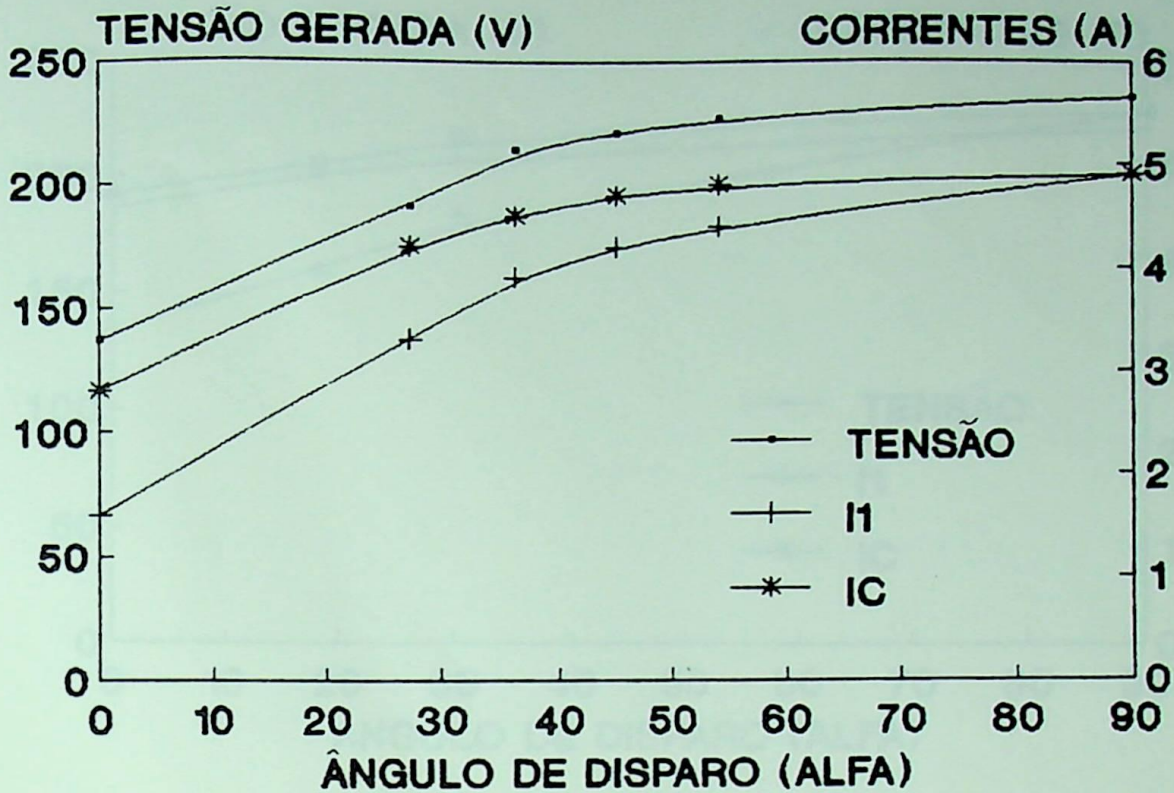


Fig. 4.4- Gráfico da Tensão Gerada e das Correntes no Estator e Capacitor versus o ângulo de disparo (α) para uma Velocidade de 1500 RPM

Os bancos de capacitores e indutores utilizados nestes ensaios foram de, $40 \mu\text{F}$ e $0,6 \text{ H}$.

Para verificar o desempenho desse método, quanto ao controle da tensão gerada com relação à variação da velocidade, foi feita uma experiência fixando-se o valor do capacitor (C) e alterando a velocidade de rotação. Como se observa na Figura 4.6, a tensão gerada pode ser mantida constante, sobre uma ampla faixa de variação da velocidade.

Na mesma Figura, tem-se o valor da frequência gerada em função da velocidade, indicando que a mesma é dependente da rotação. Neste ensaio, foram utilizados um indutor (L_a) e um capacitor (C) de, respectivamente, $0,4 \text{ H}$ e $45 \mu\text{F}$.

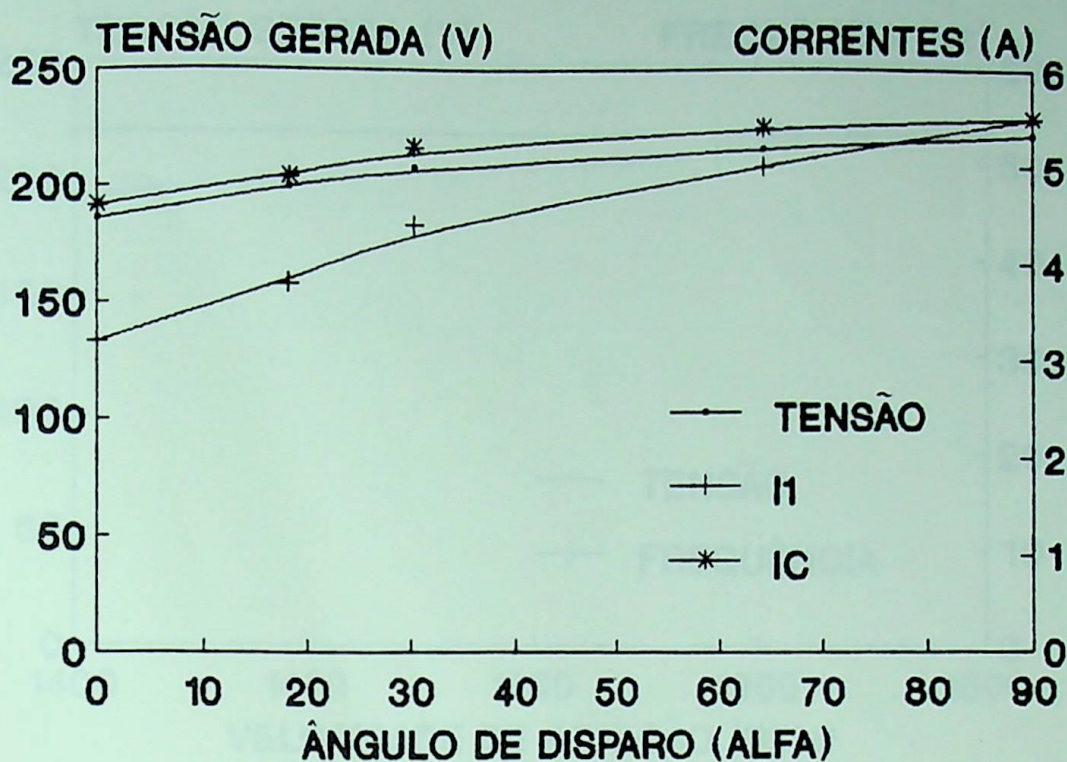


Fig. 4.5- Gráfico da Tensão Gerada e das Correntes no Estator e Capacitor versus o ângulo de disparo (α) para uma Velocidade de 1400 RPM

Os resultados obtidos experimentalmente, correspondentes às Figuras 4.4, 4.5 e 4.6, são apresentados nas tabelas B.1, B.2 e B.3 do Anexo B, respectivamente.

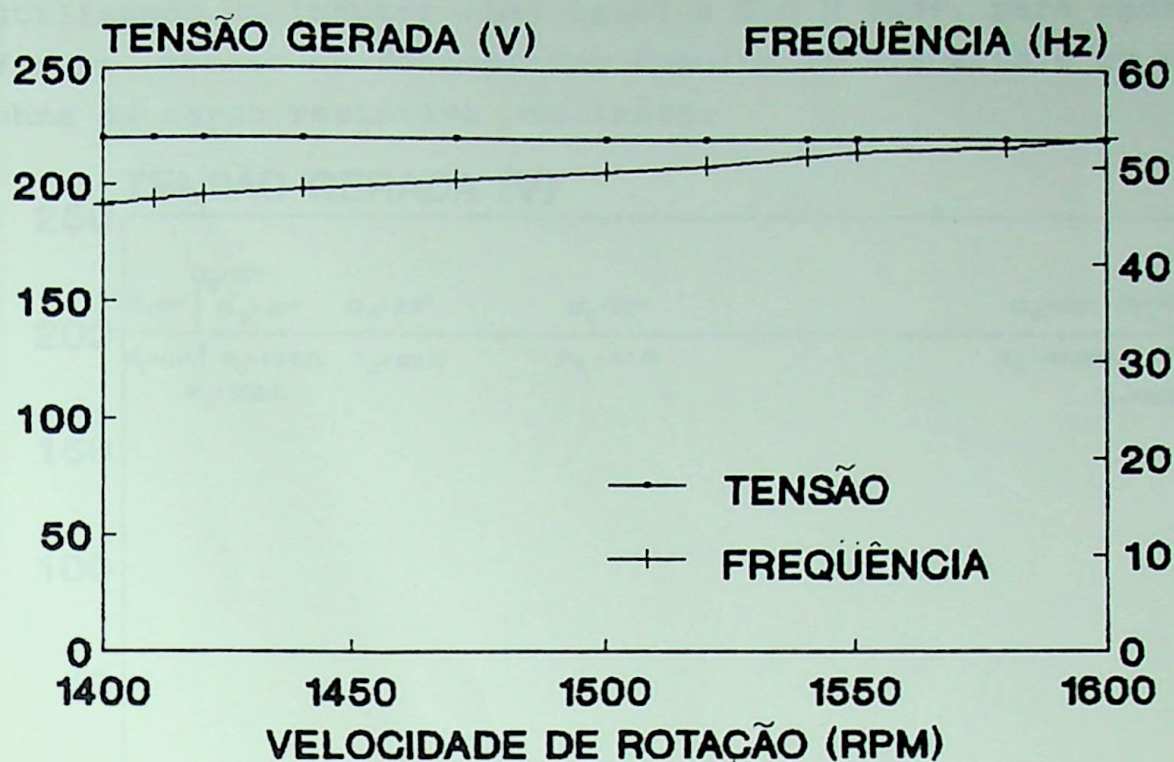


Fig. 4.6- Gráfico da Tensão Gerada versus Velocidade

4.5.2 - Máquina com Carga

Para verificar o desempenho da fonte estática de compensação de reativos frente às cargas resistivas e indutivas, foram feitas várias experiências utilizando-se os bancos de capacitores e indutores dimensionados no item 4.4.

Com o ajuste da velocidade de rotação através da máquina primária, ou deixando a mesma variar com a carga, foram observada a variação da tensão gerada, a corrente no estator, a corrente no capacitor e a corrente na carga, mediante alterações do ângulo de disparo dos tiristores.

Também, com a fonte estática de compensação de reativos, foi possível manter a tensão gerada constante, sob variação das condições da carga, desde que a carga não tivesse um fator de potência atrasado abaixo de 0,707.

A relação entre a tensão gerada e a corrente de carga, para o capacitor de $50 \mu\text{F}$ mostrado na Figura 3.11, é repetida na Figura 4.7, utilizando a fonte estática de compensação de reativos. A máquina foi acionada na mesma velocidade (1500 RPM),

utilizando um indutor ($L\alpha$) igual a 0,6 H onde, para cada ponto da Figura, têm-se os respectivos ângulos de disparos e os valores em ohms da carga resistiva utilizada.

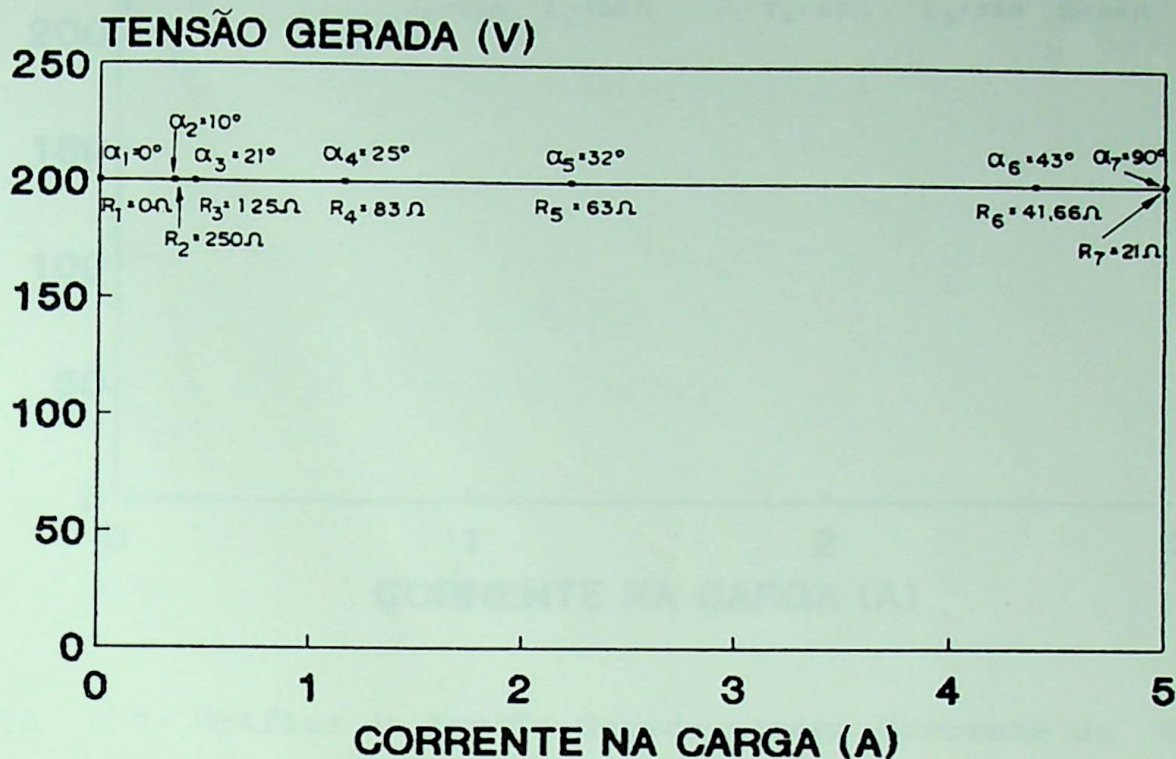


Fig. 4.7- Tensão Gerada versus Corrente de Carga

A tensão gerada para um capacitor fixo varia em função da carga e rotação e, com a utilização desse método, a tensão pode ser controlada em qualquer valor. Querendo-se manter a tensão gerada constante em 220 V basta utilizar o capacitor de $55 \mu\text{F}$.

A relação entre a tensão gerada e a corrente de carga, quando o gerador alimenta uma carga de impedância variável, ou seja, cargas ôhmicas-indutivas em (Ω/fase) ligadas conforme a Figura 4.3, com a utilização dos valores do capacitor (C) e indutor ($L\alpha$) de, respectivamente, $45 \mu\text{F}$ e 0,4 H, é ilustrada na Figura 4.8.

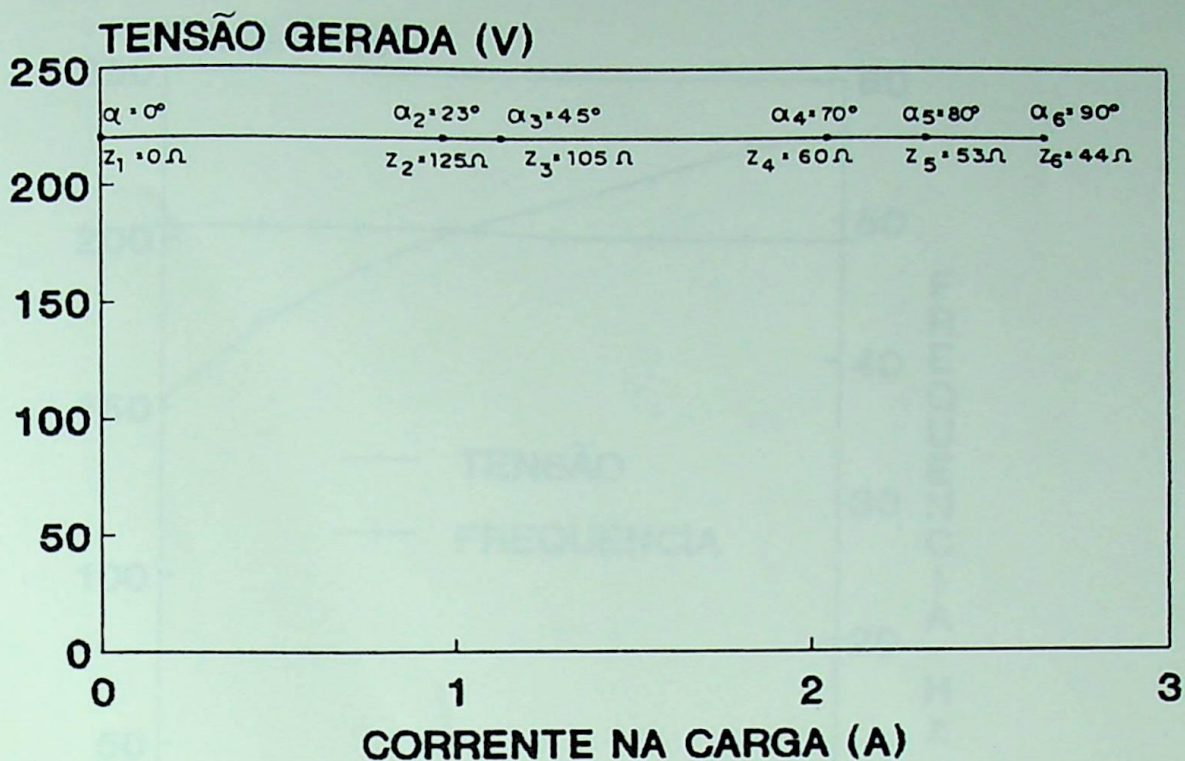


Fig. 4.8- Gráfico da Tensão Gerada versus Corrente de Carga para uma Impedância Variável

Nesta Figura, o ângulo de disparo dos tiristores foi variado de 0 a 90° e a velocidade da máquina foi mantida em 1580 RPM. A tensão gerada pelo gerador permaneceu constante desde sem carga até uma carga correspondente ao fator de potência atrasado de 0,707. Os valores da impedância da carga e dos ângulos de disparo dos tiristores estão indicados na mesma Figura.

As Figuras 4.9 e 4.10 mostram, respectivamente, os valores da tensão gerada (V), e (ou) frequência (F) e das correntes no capacitor (I_c), nos terminais do estator (I_1), na carga (I_R), quando o gerador alimenta uma carga resistiva de 125Ω ligada em estrela, como indicado na Figura 4.3, enquanto acionado em velocidade constante. O ajuste dessa velocidade foi feito manualmente, com um reostato ligado em série com o circuito de campo do motor de corrente contínua.

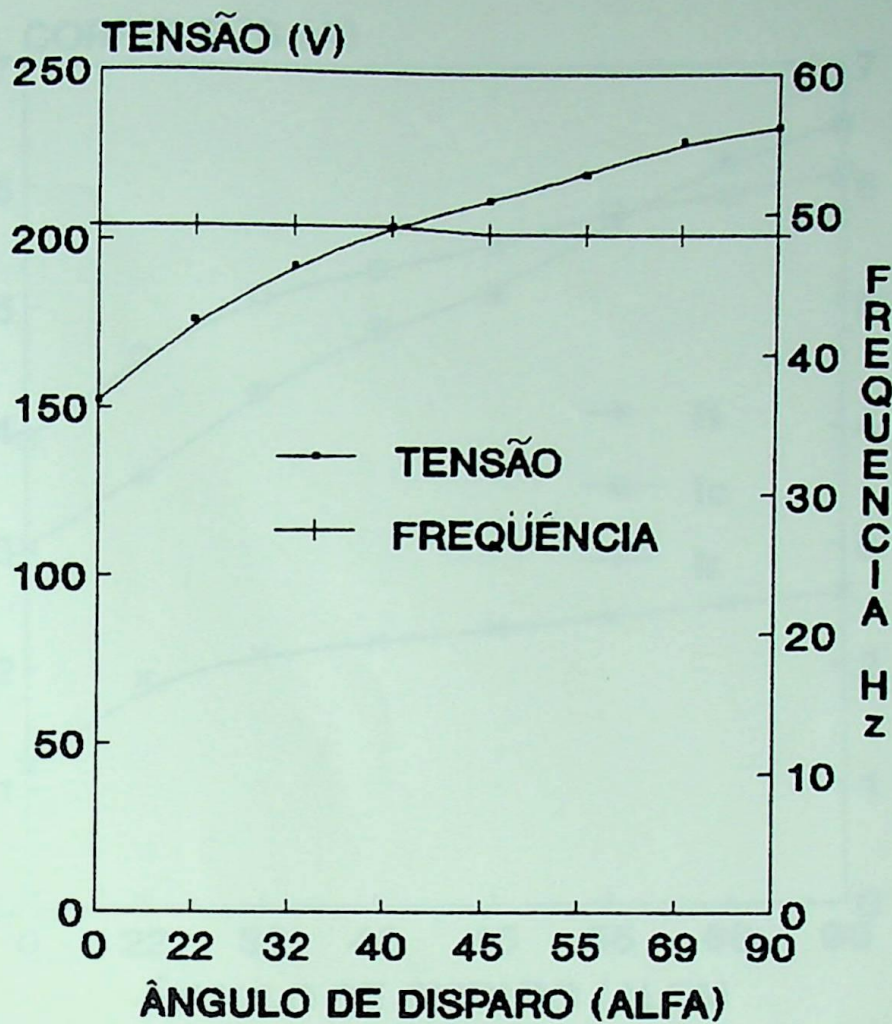


Fig. 4.9- Gráfico da Tensão e Frequência Gerada versus o Ângulo de Disparo (α)

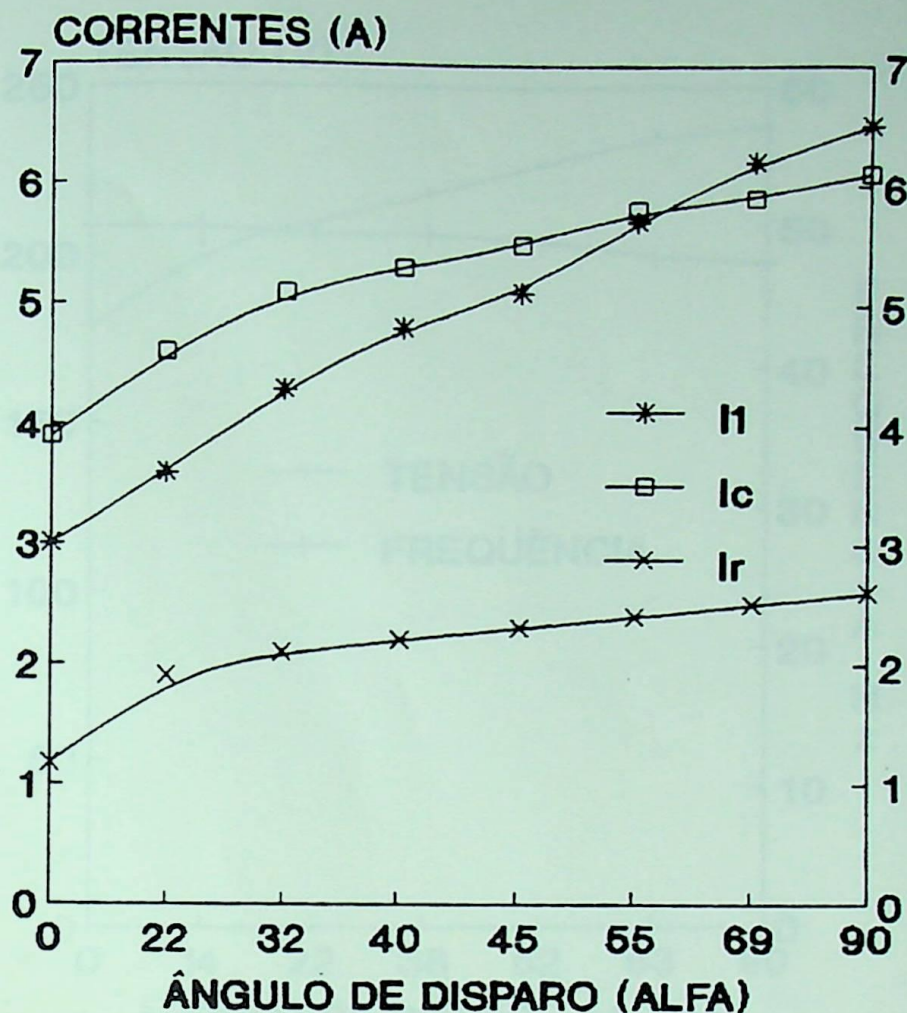


Fig. 4.10- Gráfico das Correntes versus o Ângulo de Disparo (α)

Nas Figuras 4.11 e 4.12, estão representadas as mesmas grandezas anteriores para as mesmas condições, só que deixando a velocidade variar, ou seja, a velocidade variando com a carga. Nestas Figuras (Figuras 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12), foram utilizados um capacitor (C) e um indutor ($L\alpha$) de, respectivamente, $50 \mu\text{F}$ e $0,6 \text{ H}$, enquanto a velocidade inicial foi fixada em 1500 RPM.

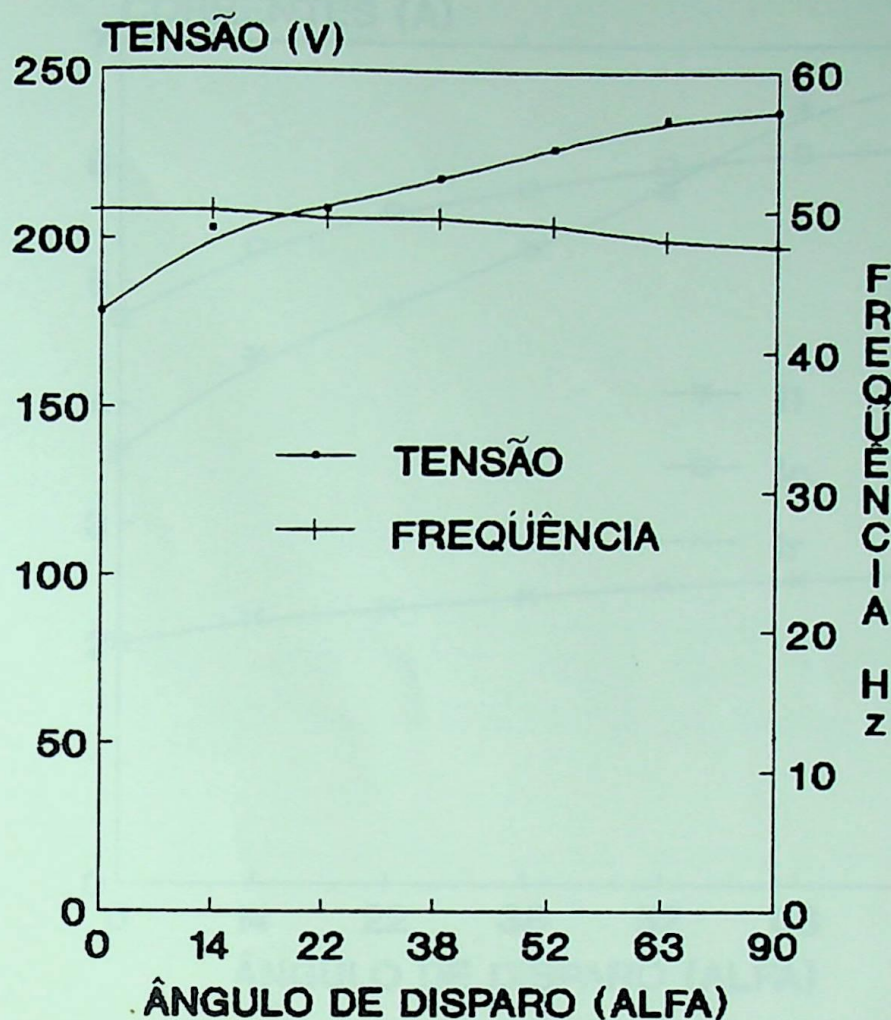


Fig. 4.11- Gráfico da Tensão e Frequência Gerada versus o Ângulo de Disparo (α)

Os resultados experimentais da Figura 4.8 são apresentados na tabela B.4 do Anexo B, enquanto os resultados experimentais das Figuras 4.9, 4.10 e 4.11, 4.12 são apresentados nas tabelas B.5 e B.6 do mesmo Anexo, respectivamente.

Também no Anexo B, estão indicados outros resultados obtidos nas diversas condições de cargas e velocidades. As formas de onda da tensão e da corrente no indutor ($L\alpha$) para as condições sem carga e com carga são mostradas no Anexo B.

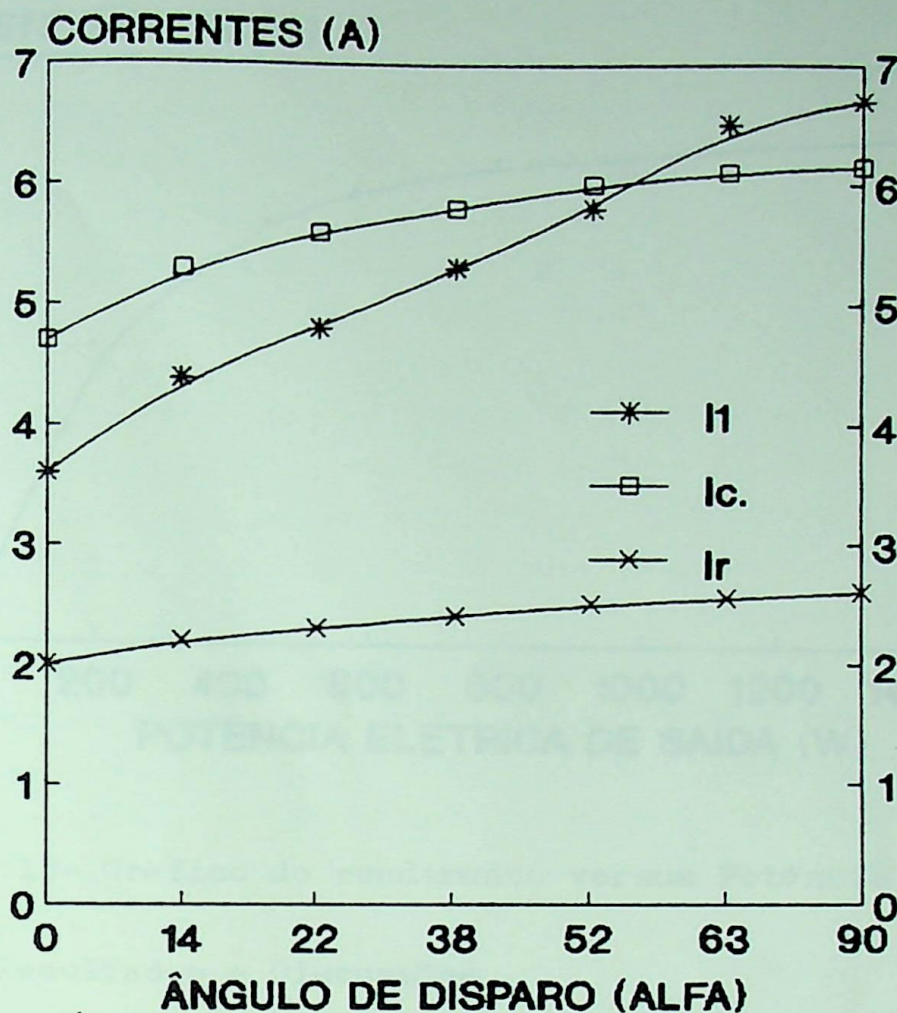


Fig. 4.12- Gráfico das Correntes versus o Ângulo de Disparo (α)

O rendimento do gerador em função da potência elétrica de saída, é representado na Figura 4.13. Pode-se verificar que o gerador apresenta um bom rendimento, quando sua tensão gerada é mantida constante. Para o cálculo desse rendimento foi utilizado um indutor ($L\alpha$) e um capacitor (C) de, respectivamente, 0,6 H e 50 μ F e, a máquina foi acionada em uma rotação constante de 1500 RPM.

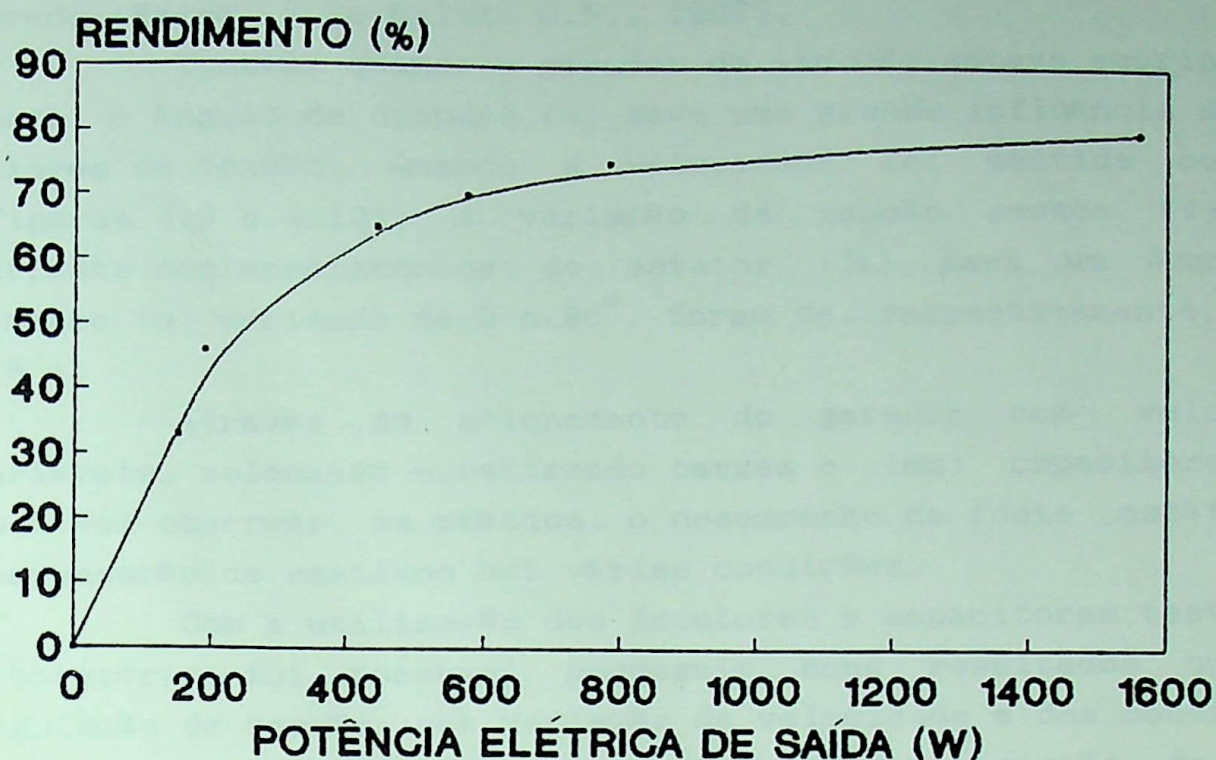


Fig. 4.13- Gráfico do rendimento versus Potência Elétrica de Saída

4.6 - Resultados e Discussões

Através da utilização da fonte estática de compensação de reativos, a tensão gerada e as correntes no estator, no capacitor e na carga, puderam ser controladas e variadas no nível desejado de acordo com o ângulo de disparo dos tiristores.

Com a carga desconectada, ou seja, gerador sem carga, a tensão gerada e as correntes tiveram uma boa faixa de variação estabelecida pelo disparo dos tiristores.

Isto pode ser comprovado pelas Figuras 4.4 e 4.5 onde, para um ângulo de disparo variando de 0 a 90°, as variações das tensões e correntes nos terminais do estator para as respectivas velocidades foram, respectivamente, de 98 V, 36 V, 3,3 A e 2,3 A.

Na Figura 4.6, como pode ser observado, houve uma variação de velocidade de aproximadamente 200 RPM, enquanto alfa (α) variou de 0 a 90°. O gerador de indução tem tido aplicações bastante difundidas em geração de energia eólica e como nestas condições a máquina sempre opera em uma velocidade variável, pode ser utilizado esse método para o controle da tensão

gerada (Raina, G. e Malik, O.P., 1983).

Também, quando o gerador de indução estava suprindo uma carga, o ângulo de disparo (α) teve uma grande influência sobre os valores de tensão. Quando a velocidade foi mantida constante (Figuras 4.9 e 4.10), a variação da tensão gerada (V) e da corrente nos enrolamentos do estator (I_1) para um ângulo de disparo (α) variando de 0 a 90° , foram de, respectivamente, 82 V e 3,5 A.

Através do acionamento do gerador com velocidades variáveis, colocando e retirando cargas e (ou) capacitores, foi possível observar, na prática, o desempenho da fonte estática de compensação de reativos sob várias condições.

Com a utilização dos indutores e capacitores testados no laboratório, foi possível conseguir bons resultados quanto a regulação de tensão, sob variação da velocidade e das condições da carga. Em alguns casos foi possível obter uma variação de tensão de aproximadamente 110 V, como pode ser observado na tabela B.8. As variações da frequência ocorreram devido às variações da carga e da rotação de eixo.

Uma das desvantagens desse método, como pode ser observado pelas formas de onda de tensão e corrente, é a geração de harmônicos, a medida que se aumenta o ângulo de disparo.

Nas Figuras B.17, B.18 e B.19, têm-se as formas de onda da tensão e corrente para ângulos de disparos, respectivamente, de 0° , 23° e 45° , quando o gerador está sem carga. Nas figuras B.20, B.21 e B.22, estão representadas as mesmas formas de onda quando o gerador alimenta uma carga resistiva ligada em paralelo com o mesmo, para ângulos de disparos de, respectivamente, 0° , 14° e 28° .

Quando a velocidade de rotação era inferior à velocidade nominal ou seja, 1500 RPM, obtiveram melhores estabilidades no disparo dos tiristores, no entanto, a frequência elétrica gerada era baixa. Porém, não é conveniente operar o gerador abaixo de suas condições nominais de tensão e frequência, porque, quanto menor for a frequência de operação, maior será a corrente de magnetização e maiores serão as perdas e, conseqüentemente, menor o rendimento (Smith, N.P.A., et al., 1990).

Isto pode ser comprovado pelas curvas de magnetização da

máquina nas frequências de 50 e 60 Hz, como indicadas na Figura 3.4. Pode ser observado por esta Figura que, para uma mesma tensão gerada, a corrente de magnetização diminui, à medida que aumenta a frequência.

O rendimento do gerador operando a plena carga, medindo-se a potência mecânica de eixo de entrada com o método da balança e a potência elétrica de saída com wattímetros, foi de 79%, ao passo que o mesmo rendimento calculado a partir do circuito equivalente foi de 91%. Portanto, conclui-se que o melhor método utilizado para o cálculo do rendimento é o método da balança pois, o rendimento de 91% não é na realidade o rendimento de operação a plena carga do gerador.

CAPÍTULO 5

CONTROLE DA FREQUÊNCIA GERADA

CONTROLE DA FREQUÊNCIA GERADA

CAPÍTULO 5

CONTROLE DA FREQUÊNCIA GERADA

CAPÍTULO 5

CONTROLE DA FREQUÊNCIA GERADA

5.1 - Considerações Gerais

As máquinas de indução, operando como geradores isolados da rede elétrica, apresentam-se como fontes de energia de tensão e frequência variáveis. A tensão e a frequência geradas, ou seja, a auto-excitação e a potência reativa variam em função da velocidade de rotação de eixo, reatância capacitiva, e da potência ativa e reativa absorvida pela carga. Estes valores de tensão e frequência também dependem dos parâmetros elétricos da máquina. Na prática, a variação da frequência com os capacitores de excitação foi insignificante.

Os geradores de indução tem sido muito apropriados para a geração de energia elétrica a partir de sistemas de geração eólica. Nestas fontes de energia, os mesmos apresentam diversas vantagens sobre os geradores síncronos convencionais. Estas vantagens do gerador de indução são citadas nas referências, Raina, G., Malik, O.P., 1983 e Watson, D.B., et al., 1977, em que se verifica a grande aplicação do mesmo.

Entretanto, para obter-se um aproveitamento máximo destas fontes de energia, o gerador deve ser operado em uma velocidade de rotação variável. Nestas condições, além de influência da carga, a frequência e a tensão geradas variam também em função da rotação. O controle da tensão pode ser obtido pelo método da fonte estática de compensação de reativos. No entanto, este sistema não tem efeito sobre o controle da frequência como pode ser visto pela Figura 4.6.

Para que a máquina de indução opere com um fluxo constante no entreferro, há necessidade de se ter o controle de tensão e da frequência, pois, se for controlado exclusivamente a tensão, têm-se uma variação contínua da reatância de magnetização, o que implica variação do fluxo, uma vez que o fluxo é proporcional à reatância de magnetização (Murthy, S.S., et al., 1988).

A frequência gerada é muito influenciada pela velocidade e pelas condições da carga. As variações da velocidade são limitadas por causa da possível sobretensão que pode ocorrer na carga do gerador e também influenciar suas condições de excitação. No caso do gerador, a velocidade de operação é limitada devido a dois fatores;

O primeiro é a velocidade mínima que é necessária para a excitação da máquina devido à temperatura máxima de elevação nos enrolamentos do estator, e o segundo é a velocidade máxima que é determinada pelos limites de geração estável, ou seja, dentro das condições nominais da máquina.

Esses limites de velocidades são impostos devido à variação da corrente de magnetização com a frequência. Como a corrente de magnetização flui através dos enrolamentos do estator sua elevação pode atingir valores que irão sobreaquecer os enrolamentos, podendo danificá-los permanentemente.

As máquinas de indução modernas são altamente saturadas e na tensão e frequência nominais podem suportar uma corrente de magnetização que chegue a 80% da corrente nominal em plena carga da máquina. Desta forma, deve-se evitar a sua operação com valores de tensão e frequência abaixo dos valores nominais, conseguindo-se assim uma garantia contra sobreaquecimento e redução das perdas (Smith, N.P.A., et al., 1992).

Com o aumento da frequência e estando a máquina na sua tensão nominal, a corrente de magnetização é reduzida e conseqüentemente o rendimento é melhorado. Isto foi verificado experimentalmente como pode ser observado na Figura 5.1.

Olhando por este prisma, conclui-se que o ideal seria trabalhar com uma frequência acima da nominal, porém, não se pode esquecer de que para uma operação estável exige-se um certo grau de saturação e, acima de um determinado valor de frequência a máquina não se encontrará saturada na sua tensão nominal (Smith, N.P.A. et al., 1992).

Quando o gerador de indução alimenta uma carga resistiva, não há problemas relativos à variação de frequência, mas, quando se tratar de cargas que possuam transformadores, estes poderão ter seu núcleo saturado e irão se aquecer, se a frequência estiver abaixo do limite mínimo estipulado pelo equipamento e

tensão no seu valor nominal.

Uma característica importante dos geradores de indução, é que eles podem operar com velocidades variáveis e ao mesmo tempo ter um escorregamento baixo, ou seja, um bom rendimento (Quazene, L., et al., 1983).

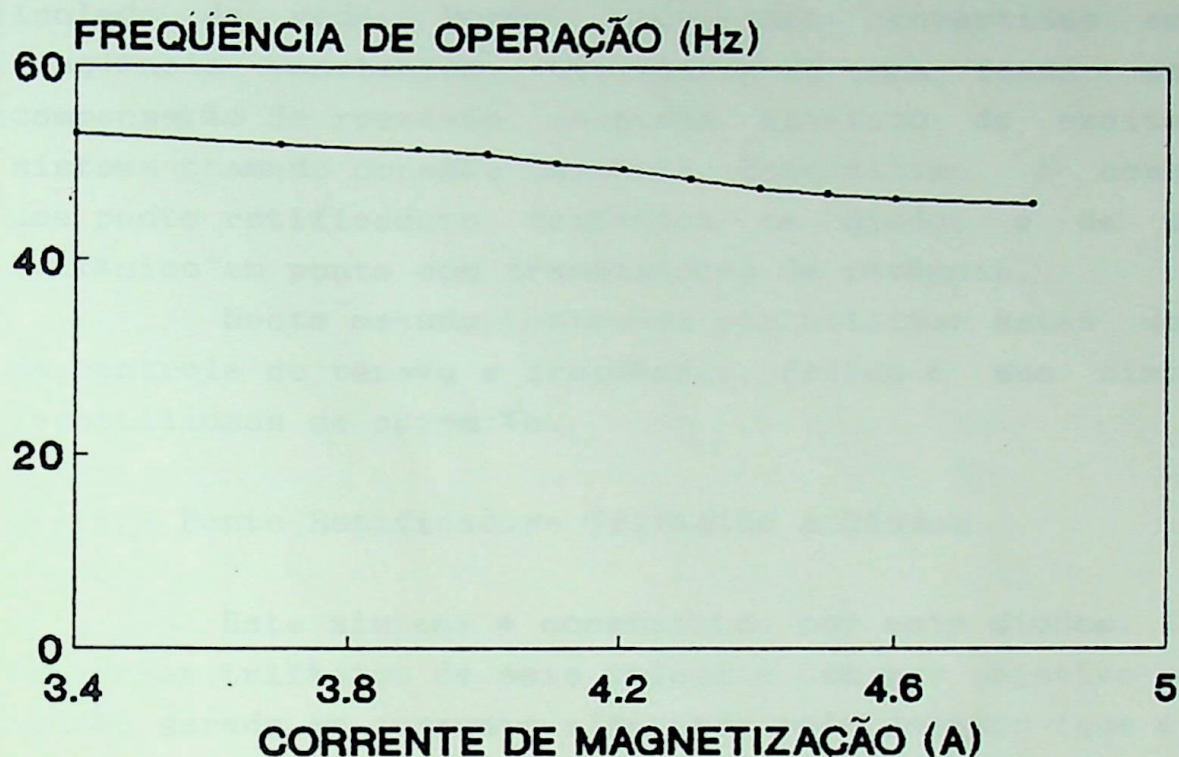


Fig. 5.1- Variação da Frequência elétrica gerada versus Corrente de Magnetização para uma Tensão Gerada Constante.

5.2 - Comentários sobre o Método de Controle de Frequência Utilizado

A energia elétrica fornecida aos consumidores, sejam estes industriais, comerciais ou residenciais, deve estar dentro de um certo padrão de qualidade. Este padrão de qualidade se deve às condições nominais das cargas que são alimentadas por esta energia, ou seja, tensão e frequência nominais.

Assim, a tensão e a frequência devem ser mantidas dentro de certos limites aceitáveis, segundo as condições nominais dos equipamentos. Quando o gerador de indução é utilizado para a geração de energia em regiões isoladas e esses centros de consumo

possuem apenas cargas resistivas, não há problema quanto ao controle da qualidade de energia. Mas, como nem sempre as cargas são constituídas deste tipo, torna-se necessário o controle da tensão e frequência.

A frequência e tensão geradas pelo gerador de indução não possuem valores constantes, devido ao fato do mesmo estar isolado da rede. Porém, podem ser convertidas em tensão e frequência constantes, utilizando-se uma fonte estática de compensação de reativos (sistema estático de excitação) e um sistema chamado conexão unitária. Este último é constituído de uma ponte retificadora trifásica em diodos e de um inversor trifásico em ponte com transistores de potência.

Neste estudo, optou-se por utilizar estes dois métodos de controle de tensão e frequência, devido à sua simplicidade e versatilidade de operação.

5.2.1 - Ponte Retificadora Trifásica a Diodos

Este sistema é constituído por seis diodos, formando um conversor trifásico de seis pulsos e tem por objetivo converter a tensão gerada em corrente alternada pelo gerador (que é constante devido à utilização da fonte estática de compensação de reativos) em uma tensão em corrente contínua constante.

Cada diodo conduz a 120° elétricos, estabelecendo na saída da ponte uma tensão em corrente contínua constante com um pequeno ripple. Porém este foi melhorado utilizando-se um capacitor como filtro.

O sistema desacopla o fluxo de potência reativa fornecida pela fonte estática de compensação de reativos. Portanto, entre este retificador e o inversor tem-se apenas o fluxo de potência ativa. A potência reativa na carga é obtida através do controle na condução dos transistores.

5.2.2 - Inversor Trifásico em Ponte com Transistores de Potência

A tensão em corrente contínua constante na saída do retificador pode ser convertida em uma tensão e frequência constantes em corrente alternada através de um inversor trifásico

em ponte. Este inversor pode ser constituído por tiristores ou transistores de potência.

A condução destes inversores pode ser conseguida por circuitos de disparo relativamente simples. No presente trabalho, foi utilizado um inversor trifásico em ponte composto por transistores de potência. Os transistores são conduzidos e desligados pela injeção e retirada da corrente na base dos mesmos. Neste caso, ao contrário dos tiristores não há necessidade de elementos de comutação.

A desvantagem destes inversores é que eles necessitam de uma injeção contínua de corrente na base durante o período de condução, mas o custo do circuito de controle para tal é compensado devido ao fato de não necessitarem de elementos de comutação (Lander, C.W., 1988).

Os disparos dos transistores foram feitos por um circuito de controle desenvolvido por, Renó Jr, N.B., 1993, que se constitui de um gerador de pulsos para circuitos de disparos de pontes inversoras. O circuito de disparo permite que a frequência na carga seja controlada entre 20 e 70 Hz. Os ajustes de controle da frequência foram feitos manualmente.

5.2.3 - Diagrama Trifilar do Método de Controle de Frequência juntamente com o Gerador de Indução, Fonte Estática de Compensação de Reativos e a Carga.

O diagrama trifilar mostrando o gerador de indução, a fonte estática de compensação de reativos e o sistema de controle de frequência (inversor trifásico em ponte com transistores de potência) é representado na Figura 5.2. O varivolt foi utilizado para permitir a utilização de um motor de indução como carga. Com o varivolt é possível controlar a corrente de partida do motor. Se não utilizado, a tensão nos terminais do gerador cai a zero durante a partida do mesmo.

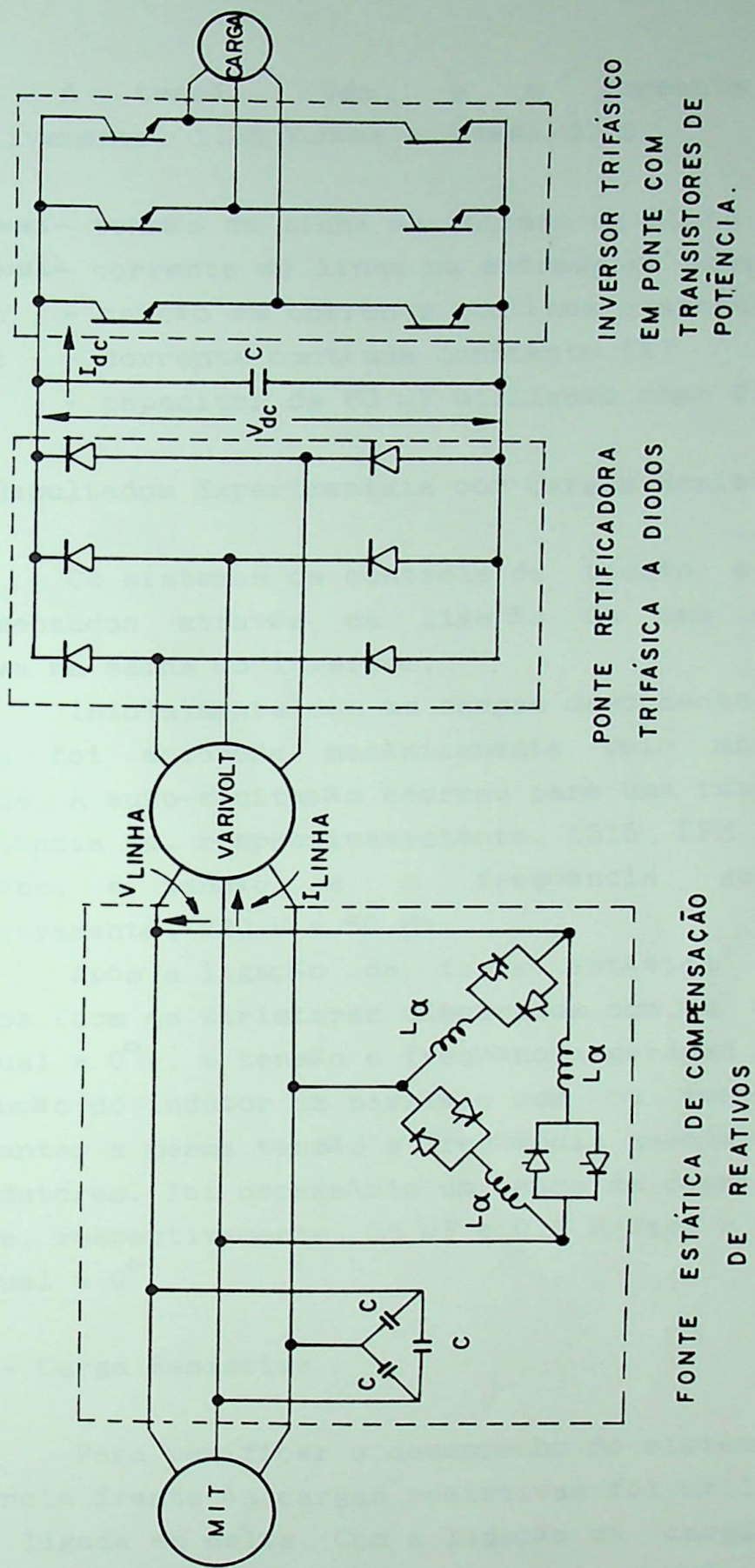


Fig. 5.2- Diagrama Trifilar do Gerador de Indução juntamente com os Sistemas de Controle de Tensão e Freqüência.

A tensão (V_{dc}) e a corrente (I_{dc}) valem, respectivamente, $1,35 V_{LINHA}$ e $I_{LINHA}/0,78$.

onde,

- V_{LINHA} - tensão de linha na entrada da ponte retificadora [V]
- I_{LINHA} - corrente de linha na entrada da ponte retificadora [A]
- V_{dc} - tensão em corrente contínua constante [V]
- I_{dc} - corrente contínua constante [A]
- C - capacitor de $60 \mu F$ utilizado como filtro

5.3 - Resultados Experimentais com Cargas Resistivas e Indutivas

Os sistemas de controle de tensão e frequência foram experimentados através da ligação de uma carga resistiva e indutiva na saída do inversor.

Inicialmente com as cargas desconectadas, a máquina de indução foi acionada mecanicamente pelo motor de corrente contínua. A auto-excitação ocorreu para uma rotação e um valor de capacitância de, respectivamente, 1515 RPM e $35 \mu F$. Nestas condições, a tensão e a frequência geradas foram de, respectivamente, 220 V e 50 Hz.

Após a ligação da fonte estática de compensação de reativos (com os tiristores disparados com um ângulo de disparo (α) igual a 0°), a tensão e frequência geradas diminuíram devido à introdução do indutor em paralelo com os terminais da máquina. Para manter a mesma tensão e frequência geradas antes da ligação dos indutores, foi necessário um banco de capacitores e um indutor (L_α) de, respectivamente, $55 \mu F$ e $0,6 \text{ H/Fase}$ e ângulo de disparo (α) igual a 0° .

5.3.1 - Carga Resistiva

Para verificar o desempenho do sistema de controle de frequência frente às cargas resistivas foi utilizada uma carga de 125Ω , ligada em delta. Com a ligação da carga, a frequência e tensão geradas passaram a ser, respectivamente, 48,5 Hz e 210 V. A tensão foi controlada (mantida constante em 220 V) pela fonte estática de compensação de reativos (aumentando-se o ângulo de disparo dos tiristores) e a frequência pelo inversor, como

mostrado nas Figuras a seguir.

As Figuras 5.3, 5.4, 5.5, e 5.6, 5.7 mostram, respectivamente, as formas de onda da tensão na carga e da tensão gerada pela máquina. As frequências geradas nas Figuras 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 e 5.7 foram de, respectivamente, 28,08, 50,25, 77,52, 49,75 e 49,26 Hz.

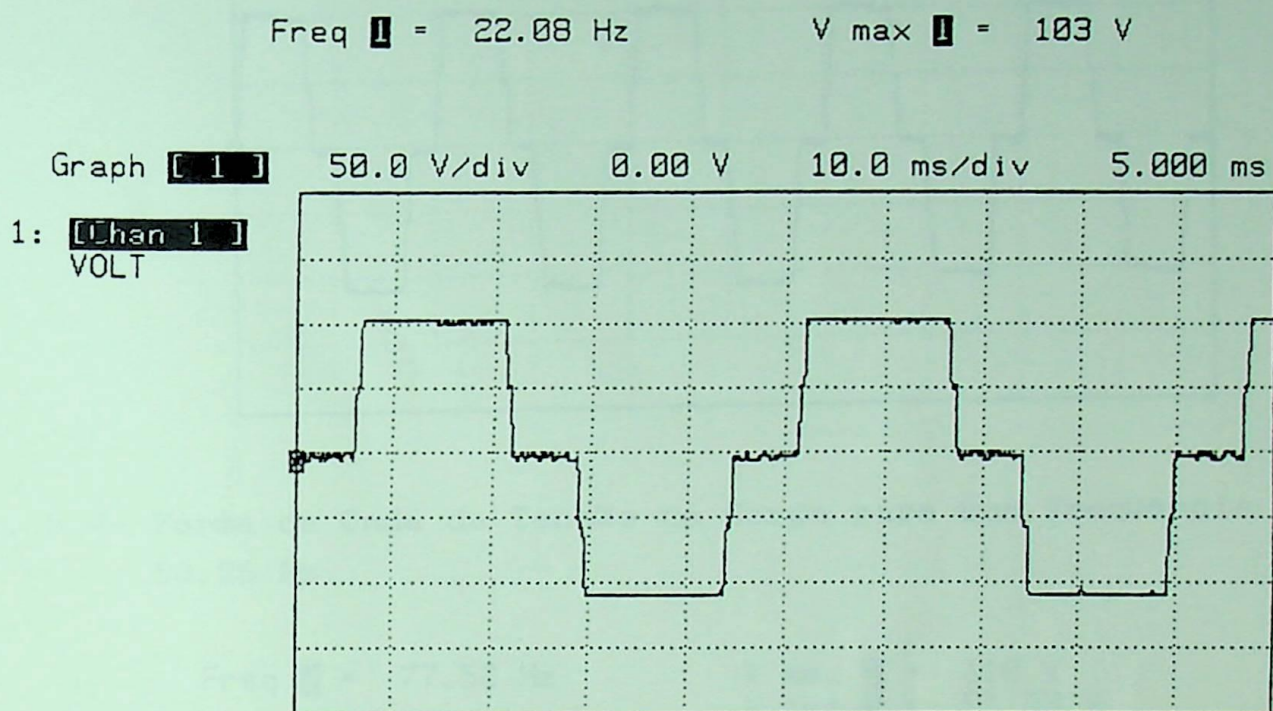


Fig. 5.3- Forma de onda da tensão na carga para uma frequência de 28,08 Hz.

Freq **1** = 50.25 Hz

V max **1** = 103 V

V rms **1** = 83.70 V

Graph **[1]** 50.0 V/div 0.00 V 10.0 ms/div 5.000 ms

1: **[Chan 1]**
VOLT

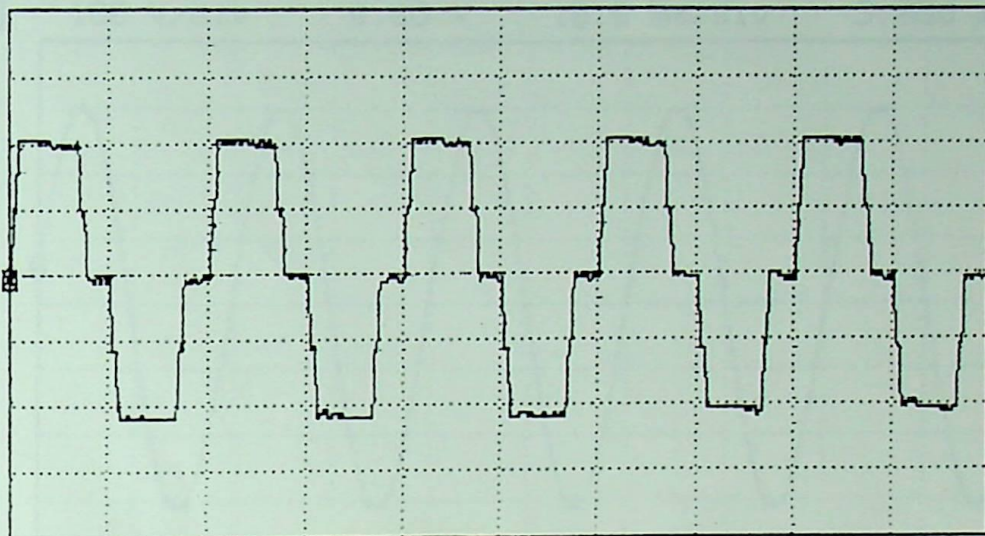


Fig. 5.4- Forma de Onda da Tensão na Carga para uma Frequência de 50,25 Hz.

Freq **1** = 77.52 Hz

V max **1** = 116 V

V rms **1** = 81.93 V

Graph **[1]** 50.0 V/div 0.00 V 10.0 ms/div 5.000 ms

1: **[Chan 1]**
VOLT

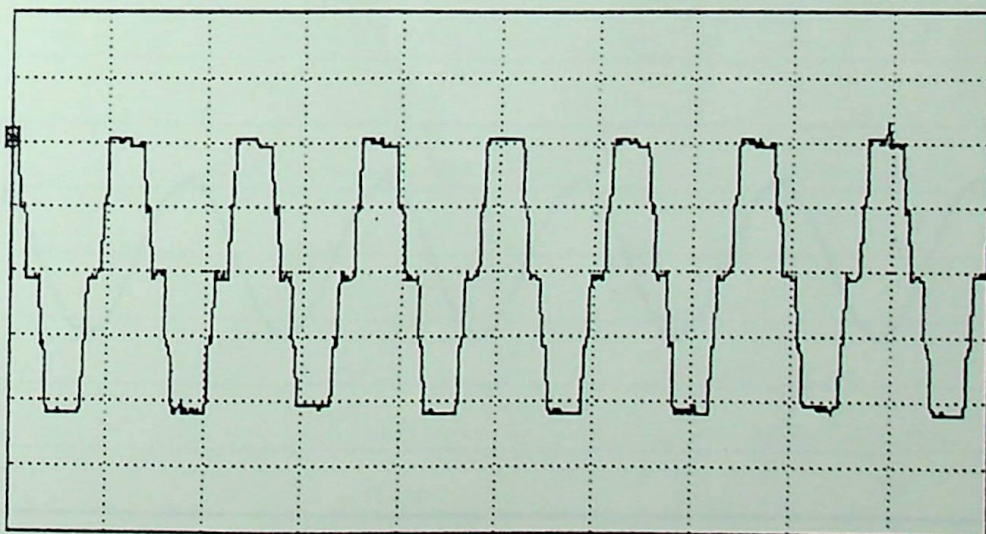


Fig. 5.5- Forma de Onda da Tensão na Carga para uma Frequência de 77,52 Hz.

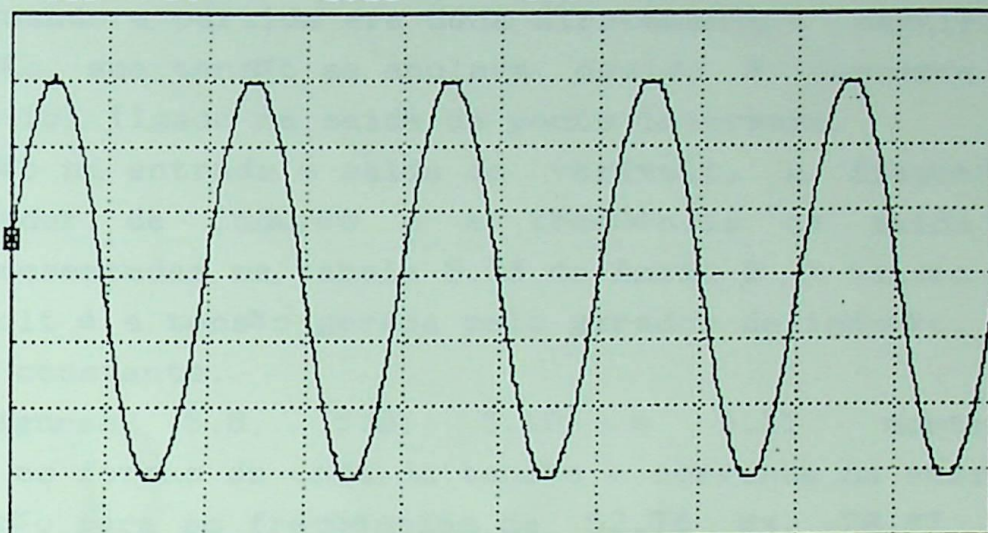
Freq **1** = 49.75 HzV max **1** = 310 VV rms **1** = 217.3 VGraph **[1]** 100 V/div 0.00 V 10.0 ms/div 5.000 ms1: **[Chan 1]**
VOLT

Fig. 5.6- Forma de Onda da Tensão Gerada pela Máquina para uma Frequência de 49,75 Hz (entrada do varivolt).

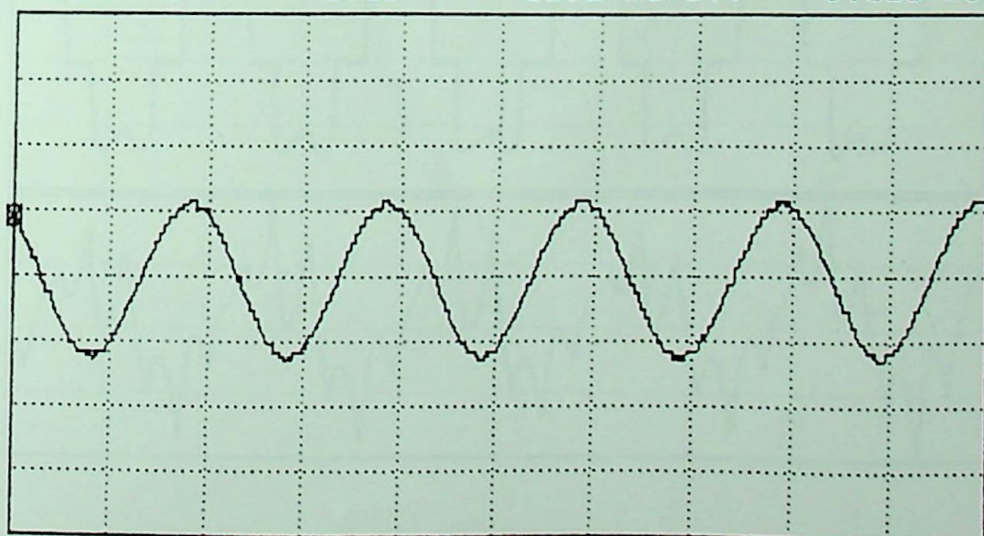
Freq **1** = 49.26 HzV max **1** = 116 VV rms **1** = 82.96 VGraph **[1]** 100 V/div 0.00 V 10.0 ms/div 5.000 ms1: **[Chan 1]**
VOLT

Fig. 5.7- Forma de Onda da Tensão Gerada pela Máquina para uma Frequência de 49,26 Hz (saída do varivolt).

5.3.2 - Carga Indutiva

Nesta experiência foi utilizado como carga indutiva, um motor de indução trifásico ligado em $\Delta\Delta$ de 1 CV, 220 V, 3,8 A, 60 Hz e 1715 RPM. Para a partida deste motor, foi necessário um varivolt pois, quando a partida era dada diretamente a partir do gerador de indução, sua tensão se anulava devido à corrente de partida. O motor foi ligado na saída da ponte inversora.

A tensão na entrada e saída do varivolt, a frequência gerada pelo gerador de indução e a frequência na saída do inversor, são apresentadas na tabela B.16 do Anexo B. A tensão na entrada do varivolt é a tensão gerada pelo gerador de indução, que pode ser mantida constante.

As Figuras 5.8, 5.9, 5.10 e 5.11 mostram, respectivamente, as formas de onda da tensão e corrente na entrada do motor de indução para as frequências de 52,75 Hz, 26,87 Hz, 60,26 Hz e 70 Hz.

Freq **1** = 52.75 Hz

V max **1** = 271 V

V rms **1** = 201.9 V

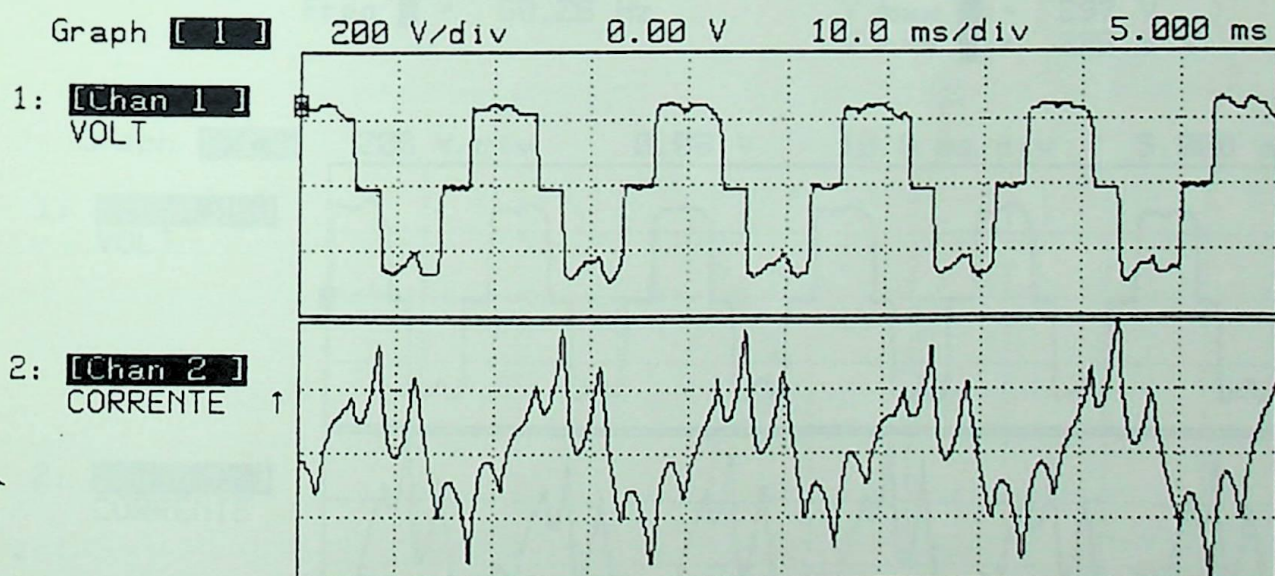


Fig. 5.8- Formas de Onda da Tensão e Corrente na Carga (motor de indução) para uma Frequência de 52,75 Hz.

Freq **1** = 26.87 Hz

V max **1** = 148 V
V rms **1** = 99.43 V

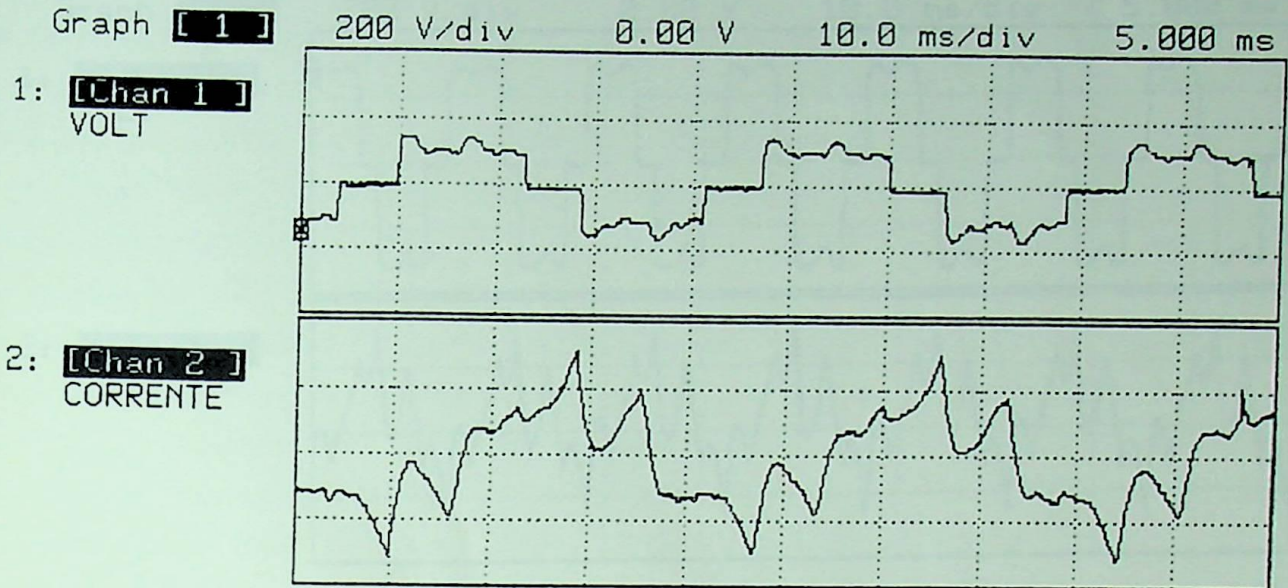


Fig. 5.9- Formas de Onda da Tensão e Corrente na Carga (motor de indução) para uma Freqüência de 26,87 Hz.

Freq **1** = 60.26 Hz

V max **1** = 297 V
V rms **1** = 228.5 V

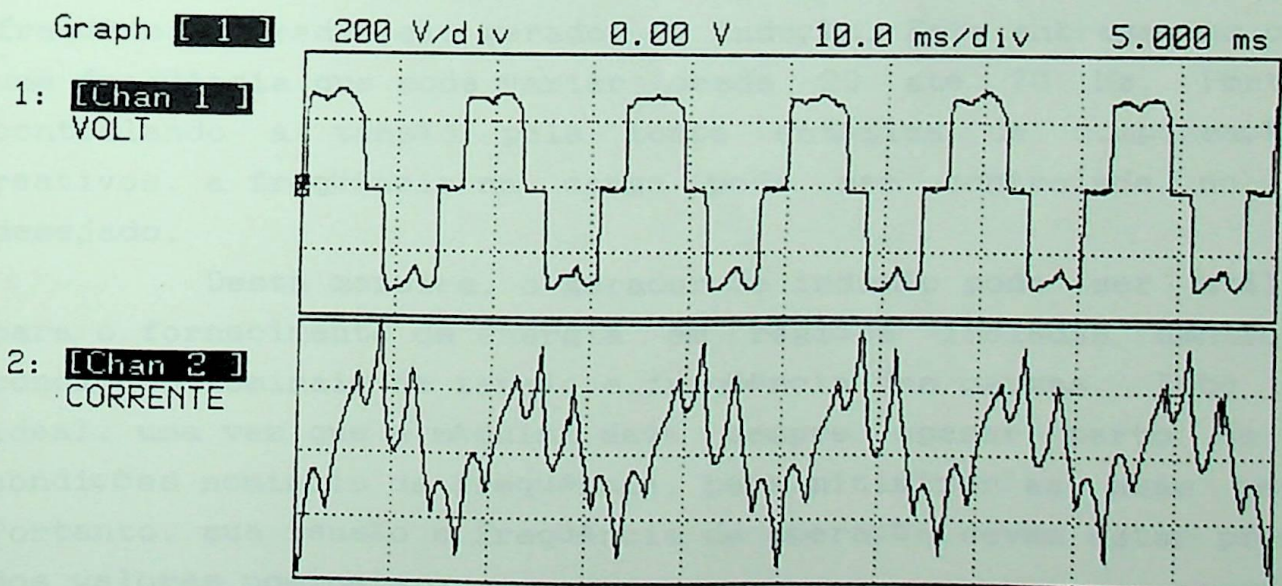


Fig. 5.10- Formas de Onda da Tensão e Corrente na Carga (motor de indução) para uma Freqüência de 60,26 Hz.

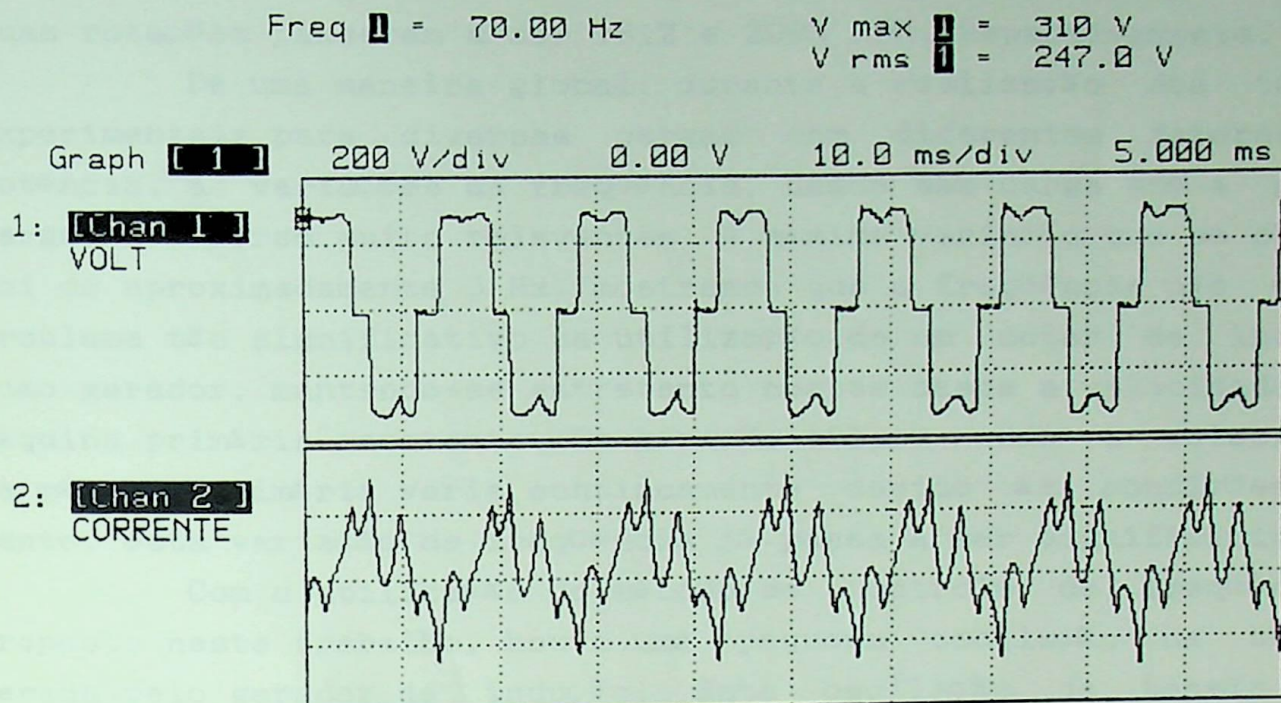


Fig. 5.11- Formas de Onda da Tensão e Corrente na Carga (motor de indução) para uma Freqüência de 70 Hz.

5.4 - Resultados e Discussões

A freqüência gerada pelo inversor é independente da freqüência gerada pelo gerador de indução. Este entrega, na carga, uma freqüência que pode variar desde 20 até 70 Hz. Portanto, controlando a tensão pela fonte estática de compensação de reativos, a freqüência na carga pode ser controlada no valor desejado.

Desta maneira, o gerador de indução pode ser utilizado para o fornecimento de energia em regiões isoladas dentro das condições nominais de tensão e freqüência das cargas. Isto seria ideal, uma vez que a máquina deve sempre operar perto de suas condições nominais de freqüência, para minimizar as suas perdas. Portanto, sua tensão e freqüência de operação devem estar próximas dos valores nominais

O inversor pode ser utilizado para controlar a velocidade de um motor de indução. Isto foi comprovado pelo motor de indução utilizado como carga, neste trabalho. Na freqüência de

60 Hz a sua rotação é de 1715 RPM e nas frequências de 62 e 70 Hz suas rotações passaram a ser 1812 e 2093 RPM, respectivamente.

De uma maneira global, durante a realização dos testes experimentais para diversas cargas com diferentes fatores de potência, as variações da frequência, desde sem carga até a plena carga, não foram muito relevantes. A máxima variação que se obteve foi de aproximadamente 3 Hz, mostrando que a frequência não é um problema tão significativo na utilização de um motor de indução como gerador, mantendo-se entretanto nestes casos a velocidade da máquina primária constante. Em geração eólica, onde a velocidade da máquina primária varia continuamente devido às condições do vento, esta variação de frequência já passa a ser significativa.

Com a utilização do método de controle de frequência, proposto neste trabalho, houve uma pequena oscilação na tensão gerada pelo gerador de indução. Esta oscilação de tensão não ocorreu devido à utilização do método, mas sim devido à utilização do varivolt, que tem o efeito de introduzir uma impedância variável no sistema.

Hoje em dia, além dos métodos de controle de tensão e frequência experimentados neste trabalho, existem vários outros para o controle da tensão e frequência geradas por um gerador de indução isolado da rede elétrica.

Um estudo semelhante a este foi desenvolvido por, Malik, O.P., et al., 1983, onde a tensão e frequência geradas, são controladas utilizando-se, respectivamente, um reator e um inversor controlados com tiristores de potência.

Um sistema constituído por capacitores fixos e chaveados foi desenvolvido por (Willians, T.J., et al., 1985). Este sistema fornece a potência reativa necessária à máquina de indução em qualquer velocidade de operação, desde que esta velocidade não ultrapasse as condições nominais da máquina. Os capacitores fixos são dimensionados para fornecerem a quantidade mínima de energia reativa necessária à máquina de indução (gerador operando sem carga), enquanto, os capacitores chaveados fornecem a quantidade adicional de energia reativa, que varia com a carga e velocidade de rotação de eixo.

Os autores, Bonert, R., et al., 1990, propõem um método para o controle da tensão e frequência geradas por um gerador de

indução acionado por uma turbina hidráulica, o qual chamaram de controlador de impedância terminal. O controle da tensão e frequência é feito pelo equilíbrio da quantidade de energia ativa e reativa produzida e absorvida. Como o gerador de indução é apenas um fonte de energia ativa e as cargas são na maioria das vezes consumidoras de energia ativa e reativa, o sistema de controle é dimensionado para absorver toda energia ativa não necessária à carga e, ao mesmo tempo, fornecer toda energia reativa necessária ao gerador e à carga, mediante o controle do ângulo de disparo de uma ponte tiristorizada.

Também, Smith, N.P.A., et al., 1992, estudaram e experimentaram um método para o controle da tensão e frequência, de um gerador de indução utilizado em micro-centrais hidrelétricas. Este método foi chamado de controlador do gerador de indução. O controlador utiliza um dispositivo de eletrônica de potência chaveado, que controla o fluxo de potência ativa enviado a uma carga chamada "carga de compensação".

Um exemplo típico pode ser observado quando uma carga indutiva é ligada aos terminais do gerador. A tensão e frequência geradas diminuem, o controlador detecta esta alteração de tensão e diminui a potência enviada para a carga de compensação. Isto faz com que a velocidade da turbina hidráulica seja aumentada e, conseqüentemente, a frequência e a tensão geradas voltam aos níveis desejados. Com o aumento da frequência, a reatância capacitiva é diminuída e maior quantidade de reativa é fornecido para a excitação do gerador. Assim, o seu fator de potência que era baixo, devido à introdução da carga indutiva, é melhorado.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

As máquinas de indução, podem operar satisfatoriamente como geradores isolados e interligados à rede elétrica desde que se tenha uma fonte de energia reativa suficiente para fornecer a sua excitação. Esta excitação, pode ser suprida pela própria rede (caso da operação interligada) ou a partir de capacitores conectados em paralelo com os terminais do estator (caso da operação isolada).

Em ambos os tipos de operação, o gerador de indução é constituído apenas de uma fonte de energia ativa. Conseqüentemente, o maior obstáculo a estas máquinas, quando operadas como geradores, é a sua incapacidade para fornecer potência reativa. Também, na operação isolada da rede elétrica, a tensão e a frequência geradas apresentam má regulação, quando o gerador é excitado por capacitores fixos e ao mesmo tempo a sua rotação e impedância da carga são variadas.

Nos testes experimentais relacionados à operação do gerador de indução interligado à rede elétrica, foi visto que o mesmo pode ser utilizado para o fornecimento de potência ativa a uma carga localizada próxima à rede elétrica, onde há disponibilidade suficiente de energia reativa para a sua magnetização.

Existem pequenas cargas distribuídas em grandes áreas isoladas, que podem ser supridas por uma fonte de energia elétrica de custos relativamente baixos e que não necessitam de controle da tensão e frequência geradas. Nestas condições, o gerador de indução, devido a sua simplicidade, robustez e o baixo custo de operação e manutenção, é sem dúvida a máquina elétrica mais apropriada.

Para cargas que necessitam ser alimentadas dentro de suas condições nominais de tensão e frequência, o controle da tensão e da frequência geradas, pode ser obtido com boa precisão através da utilização dos métodos de controle experimentados neste trabalho.

Com a utilização da fonte estática de compensação de

reativos, a tensão gerada pôde ser controlada sobre uma ampla faixa de variação da velocidade e condições da carga. Com o gerador sem carga, foi possível conseguir uma variação de aproximadamente 200 RPM na rotação e ao mesmo tempo manter a tensão gerada constante. Também, a tensão gerada permaneceu constante desde a vazio até a uma carga de fator de potência atrasado em 0.707.

Devido ao chaveamento dos indutores, os mesmos geram correntes harmônicas que podem provocar distorções nas formas de onda da tensão e que são mais acentuadas à medida que se aumenta o ângulo de disparo dos tiristores, como pode ser verificado pelas formas de onda das Figuras do Anexo B.

Através da medição do rendimento do gerador, quando isolado da rede elétrica, pelo método da balança (mantendo-se constante a tensão gerada ou deixando a mesma variar com a carga), constatou-se que o gerador apresenta um baixo rendimento quando a tensão não é controlada. Isto se justifica pelo o fato do gerador não entregar uma potência ativa constante na carga. Portanto, é essencial opera-lo com valores de tensão e frequência constantes.

O inversor com transistores de potência, teve um bom desempenho no controle da frequência na carga onde, com um circuito de controle relativamente simples, esta frequência pôde ser controlada entre 20 e 70 Hz.

Com o controle da tensão e frequência geradas, o gerador de indução é altamente atrativo para a geração de energia elétrica em sistemas alternativos de geração de energia a partir de fontes primárias tais como: micro-centrais hidrelétricas, geração eólica, biomassa, dentre outras, com vantagem de operar em uma velocidade variável.

Em sistemas de gerações micro-hidrelétricas e gerações eólicas, existem restrições quanto ao tipo de máquina a ser utilizada e quanto ao um aproveitamento máximo do potencial elétrico disponível no sistema, quando várias máquinas devem ser operadas em paralelo e a plena carga. Nestas condições, os geradores de indução tem algumas vantagens frente aos geradores síncronos (Watson, D.B. e Wilner, I.P., 1985).

Alguns estudos complementares sobre a utilização das máquinas de indução como geradores são:

- Estudo das correntes harmônicas geradas pelos dois métodos de controle de tensão e frequência experimentados neste trabalho em vista de soluções para minimizar estes harmônicos;
- Em micro centrais hidrelétricas (potências abaixo de 20 KW) geralmente o fornecimento de energia elétrica é monofásico. Por causa do melhor rendimento e menor custo, as máquinas de indução trifásicas devem ser utilizadas. Uma opção portanto, é o estudo da operação das máquinas de indução trifásicas como geradores monofásicos, uma vez que a única alteração no modo de operação é com relação ao circuito externo, mediante a conexão dos capacitores (Smith, J.M., 1987);
- Estudo para o controle automático da tensão e frequência, através de um sinal de realimentação, uma vez que esses controles foram feitos manualmente;
- Utilização do sistema scherbius no rotor para o controle de frequência;

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [11] - ALLAN, G.L.C., et al., Wave-Form-Driven Induction Generators, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 1, p. 100-104, Jan. 1985.
- [12] - Arrillaga, J. & Watson, R.D., Starting Characteristics of Self-Excited Induction Generators, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 1, p. 743-746, Sep. 1985.
- [13] - ROBERT, R. & HENRY, G., Speed-Angle-Regulated Generator with Terminal Impedance Controller and an Automatic Control, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 1, p. 105-110, Jan. 1985.
- [14] - SMITH, E. & HURIAN, P., Voltage Characteristics of an Induction Generator with Load Short Connection, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. EC-3, No. 2, p. 106-110, Apr. 1988.
- [15] -

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [16] -
- [17] -
- [18] -
- [19] -
- [20] -

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - ALLAN, C.L.C., et al., Water-Turbine-Driven Induction Generators, Proc. IEE, 107 A, P. 529-550, Dec. 1960.
- [2] - Arrillaga, J. e Watson, D.B., Static Power Conversion from Self-Excited Induction Generators, Proc IEE, Vol. 125, N^o 8, P. 743-746, Aug. 1978.
- [3] - BONERT, R. e HOOPS, G., Stand Alone Induction Generator with Terminal Impedance Controller and no Turbine controls, IEEE/PES 1989 Summer Meeting, P. 28-31, June 1989.
- [4] - BIM, E. e BURIAN, Y., Voltage Compensation of an Induction Generator With Long-Shunt Connection, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 4, N^o 3, P. 526-529, Sept.1989.
- [5] - Bassett, E.D., e Potter, F.M., Capacitive Excitation for Induction Generators, AIEE Transactions, P. 540-545, May. 1935.
- [6] - Bloomquist, W.C. e Boice, W.K., Application of Capacitors For Power-Factor Improvement of Induction Motors, AIEE Transactions, Vol. 64, P. 274-278, May 1945.
- [7] - Barkle, J.E. e Ferguson, R.W., Induction Generator Theory and Application, AIEE Transactions, Vol. 73, Pt.3-A, P.12-19, Feb. 1954.
- [8] - Brennen, M.B. e Abbondant, A., Static Exciters for Induction Generators, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-13, N^o 5, P. 422-428, Sept. 1977.
- [9] - Conversão de Freqüência. In: Lander, C.W., Eletrônica Industrial; Teoria e Aplicações. São Paulo: McGraw-Hill, 1988, Cap. 5, P. 211-229.
- [10] - CARLSON, R., et al., Aproveitamento de Mini-quebras D'Água

- Utilizando Geradores de Indução Excitados por Compensador Estático. In: II CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA. 1981. Rio de Janeiro. Anais... CBE, 1981. P. 923-934.
- [11] - CALDAS, F.P.. Um estudo do Gerador de Indução Auto-Excitado e Aplicações: Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1980. 191P. Dissertação (Mestrado em ciências) Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1980.
- [12] - Doxey, B.C., Theory and Application of the Capacitor Excited Induction Generator, The engineer, P. 893-897, Nov. 1963.
- [13] - David, R.A., et al., Induction Generator/Synchronous Condenser System for Wind-Turbine Power, Proc. IEE, Vol. 126, N^o 1, P. 69-74, Jan. 1979.
- [14] - Erdelyi, E., et al., The limitations of Induction Generators in Constant-Frequency Aircraft Systems, AIEE Transactions P. 348-358, Nov. 1958.
- [15] - ELDER, J.M., et al., The Process of Self Excitation induction Generators, IEE Proc. Vol. 130, Pt. B, N^o 2, P. 103-108. Mar. 1983.
- [16] - Elder, J.M., et al., Self-Excited Induction Machine as a Small Low-Cost Generator, IEE Proc., Vol.131. Pt.c, N^o 2, P. 33-41, Mar. 1984.
- [17] - Junior, S.C. e Caldas, F.P.. Utilização do Gerador de Indução em Usinas Hidroelétricas de Pequeno Porte. In: VI SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA P. 1-18.
- [18] - Motores de Indução, Regime Permanente. In: Fitzgerald, A.E et al., Máquinas Elétricas. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975, Cap. 7 P. 337-377.

- [19] - Máquinas Assíncronas. In: Kostenko, M. e. Piotrovski, L. Máquinas Elétricas. Porto: Lopes da Silva, 1979, Cap. 18 e 19, P. 437-474.
- [20] - Mello, F.P. e Hannett, L.N., Large Scale Induction Generators for Power Systems, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. Pas-100, N^o 5, May 1981.
- [21] - Milner, I.P. e Watson, D.B., An Autonomous Wind Energy Converter Using a Self-Excited Induction Generator for Heating Purposes, Wind Engineering, Vol. 6, N^o1, P. 19-23 1982.
- [22] - MURTHY, S.S., et al., Analysis of Self-Excited Induction Generators, IEE Proc, Vol. 129, Pt.C, N^o 6, P. 260-265, Nov. 1982.
- [23] - MILNER, I.P. e WATSON, D.B., An Autonomous Wind Energy Converter Using a Self-Excited Induction Generator for Heating Purposes Heating, Wind Engineering, Vol. 6, N^o 1, P. 19-23, 1982.
- [24] - MALIK, N.H. e MAZI, A.A., Capacitance Requirements for Isolated Self-Excited Induction Generators, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. EC-2, N^o 1, P. 62-68, Mar. 1987.
- [25] - MURTHY, S.S. e et al., Design-Based Computation Procedure for Performance Prediction and Analysis of Self-Excited Induction Generators Using Motor Design Packages, IEE Proceedings, Vol. 135, Pt.B, N^o 1, P. 8-16, Jan. 1988.
- [26] - MURTHY, S.S. e et al., Studies on the Use Conventional Induction Motors as Self-Excited Induction Generators, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 3, N^o 4, P. 842-847, Dec. 1988.

- [27] - MALIK, N.H. e AL-BAHRANI, A.H., Steady State Analysis and Performance Characteristics of a Three-Phase Induction Generator Self-Excited With a Single Capacitor, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 5, N^o 4, P. 725-732, Dec. 1990.
- [28] - MALIK N.H. e AL-BAHRANI, A.H., Influence of the Terminal Capacitor on the Performance Characteristics of a Self Excited Induction Generator, IEE Proceedings, Vol. 137, Pt.C, N^o 2, P. 168- 173, Mar. 1990.
- [29] - Murthy, S.S. et al., Analysis of Grid Connected Induction Generators Driven by Hydro/Wind Turbines Under Realistic System Constraints, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 5, N^o 1, P. 1-5, Mar. 1990.
- [30] - MALIK, N.H. e HAQUE, S. E., Steady State Analysis and Performance of an Isolated Self-Excited Induction Generator, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. EC-1, N^o 3, P. 134-139, Sept. 1986.
- [31] - MALIK, N.H. e AL-BAHRANI A.H., Steady-State Analysis of Parallel-Operated Self-Excited Induction Generators, IEE Proceedings, Vol. 140, Pt.c, N^o 1, P. 49-55, Jan. 1993.
- [32] - NATARAJAN, K. et al., Modeling and Control Design for Wind Energy Power Conversion Scheme Using Self-Excited Induction Generator, IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. Ec-2, N^o 3, P. 506-511, Sept. 1987.
- [33] - Nelson, R.J., Circuito de disparo para pontes inversoras PWM, Trabalho de Diploma, EFEI, Dez. 1993.
- [34] - PARSONS, J.R., Cogeneration Application of Induction Generators, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-20, N^o 3, P. 497-503, May/June 1984.

- [35] - PINHEIRO, R.F. et al., Controle de Gerador de Indução por Reator Controlado por Tiristores, In: 7^o CBA, 1989. Anais... São José dos Campos: ITA, 1989, P. 505-510.
- [36]- QUAZENE, L. e et al., Analysis of the Isolated Induction Generator, IEEE Transactions on Power Apparatus and Sytems, Vol. Pas-102, N^o 8, P. 2793-2798, Aug.1983.
- [37]- RAINA, G. e MALIK, O.P., Wind Energy Conversion Using a Self-Excited Induction Generator, IEEE Transactions on Apparatus and Sytems, Vol. Pas-102, N^o 12, P. 3933-3936, Dec.1983.
- [38]- Rahim, Y. H. A. et al., Comparison Between the Steady Performance of Self-Excited Reluctance and Induction Generators, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 5, N^o 3, P. 519-525, Sept. 1990.
- [39]- Smith, J.M., Three-Phase Induction Generator for Single-Phase Line, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. EC-2, N^o 3, P. 382-387, Sept. 1987.
- [40]- SMITH, N.P.A. et al., Directly Coupled Turbine-Induction Generator Systems for Low-Cost Micro-Hydro Power, In: Renewable Energy Congress. Indonesia, 1992.
- [41]- SMITH, N.P.A. et al., Stand-Alone Induction Generators for Realible, Low-Cost Micro-Hydro Instalations, In: Renewable Energy Congress, Indonesia, 1990.
- [42]- Soderholm, L.H., Rural Use of Wind Power to Conserve Energy Resources, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 1A-14, N^o 6, P. 492-497, Nov./Dec. 1978.
- [43]- TANDON, A.K. et al., Steady State Analysis of Capacitor Self-Excited Induction Generators, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. Pas-103, N^o 3, P. 612-617, Mar. 1984.

- [44] - WAGNER, C.F., Self-Excited of Induction Motors, AIEE Transactions, Vol. 58, P. 47-51, Feb. 1939.
- [45] - WATSON, D.B. e MILNER, I.P., Autonomous and Parallel Operation on Self-Excited Induction Generators, Int. J. Elect. Eng. Education, Vol. 22, P. 365-373, 1985.
- [46] - WATSON, D.B. et al., Controllable d.c. Power Supply from Wind-Driven Sel-Excited Induction Machines, Proc. IEE, Vol. 126, N^o 12, P. 1245-1248, Dec. 1979.
- [47] - WILLIAMS, T.J., et al., An Adaptative Power Factor Controller for Three-Phase Induction Generator, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. Pas-104, N^o 7, P. 1825-1831, July. 1984.

Condicionamento

4.1 - Considerações Gerais

O motor de indução é caracterizado por ser um motor a rotor aberto, o rotor sendo ligado a uma rede elétrica, da mesma forma que uma máquina síncrona, como um transformador de potência. O movimento do rotor faz com que o campo magnético girante seja produzido, sendo a frequência a mesma que a da rede elétrica.

Em cada partícula, a velocidade de rotação é dada por $\omega = \omega_s (1 - s)$, onde ω_s é a velocidade síncrona e s o deslizamento. A velocidade de rotação é dada por $n = n_s (1 - s)$.

ANEXOS

5.1

$$R_1 + jX_1 + \frac{R_2}{s} + jX_2$$

onde:

- R_1 - resistência do rotor
- X_1 - reatância do rotor
- R_2 - resistência do rotor
- X_2 - reatância do rotor
- s - deslizamento

A tensão que aparece nos terminais do motor é a tensão de alimentação. A corrente no rotor é dada por $I_2 = \frac{E_2}{R_2/s + jX_2}$. Na velocidade síncrona ($s = 0$), a corrente no rotor é zero. Para $s = 1$, a corrente no rotor é máxima. Para $s > 1$, a corrente no rotor é menor que a máxima.

Para uma velocidade de rotação dada, a corrente no rotor é dada por $I_2 = \frac{E_2}{R_2/s + jX_2}$.

ANEXO A

Configuração Motor de Indução/Gerador.

A.1 - Considerações Gerais

O motor de indução com o rotor bloqueado tem características análogas a um transformador. Portanto, estando o rotor aberto, o motor comporta-se como um transformador sem carga e, da mesma forma estando o rotor bloqueado, o motor comporta-se como um transformador em curto-circuito. Porém, com o rotor em movimento o motor tem as características de um transformador generalizado onde, não apenas a corrente e a tensão variam mas também a frequência e a potência (Kostenko, M. e Piotrovski, L., 1979).

Na partida, a velocidade do rotor (N_2) é igual a zero e o escorregamento (S) é igual a um (1)). Portanto, a frequência do rotor é igual à frequência do estator ($F_2 = F_1$) e a corrente no rotor é dada por:

$$I_2 = \frac{S E_2}{\sqrt{R_2^2 + (S X_2)^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{S}\right)^2 + X_2^2}} \quad (A.1)$$

onde,

I_2 - corrente no rotor [A]

E_2 - força eletromotriz induzida no rotor [V] (parado)

R_2 - resistência do rotor [Ω]

X_2 - reatância do rotor [Ω] (parado)

S - escorregamento

À medida que aumenta a velocidade, a frequência e a corrente no rotor diminuem devido à diminuição do escorregamento. Na velocidade síncrona ($S = 0$ e $I_2 = 0$), a frequência do rotor $F_2 = 0$. Acima dessa velocidade o motor passa a gerar energia. Porém, o sentido da corrente no rotor é invertido e o escorregamento torna-se negativo.

Para uma operação da máquina na velocidade nominal, o

escorregamento é geralmente pequeno, tanto operando como motor, quanto operando como gerador (Malik, N.H., et al., 1986).

Para qualquer valor de escorregamento e de acordo com a equação A.1, e com o circuito equivalente da Figura 3.3, a corrente no circuito do rotor para uma operação como gerador pode ser escrita como:

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{\left(R_2 \frac{(1-S)}{S} \right)^2 + R_2^2 + X_2^2}} \quad (A.2)$$

A parcela $R_2 I_2^2$ representa as perdas por efeito joule no rotor e $R_2 \frac{1-S}{S} I_2^2$, representa a potência mecânica útil recebida no eixo, a qual é convertida em potência elétrica em caso de gerador e potência mecânica para operação como motor.

A potência nominal em KW de um motor é a potência a plena carga que deve ser fornecida continuamente. O eixo e os mancais são projetados para transmitir esta potência. No caso do motor de indução, a potência elétrica recebida da rede a plena carga será maior que a potência mecânica no eixo a plena carga devido às perdas (Smith, N.P.A., et al., 1990).

Assim, quando um motor de indução com uma certa potência nominal é utilizado como gerador, a potência mecânica recebida no eixo não deve ser maior que a potência mecânica no eixo da máquina, quando operada como motor, para que os mancais e o eixo não sejam sobrecarregados. Como as perdas do gerador são supridas pela potência mecânica de entrada, a potência elétrica gerada pela máquina operando como gerador será menor que a potência nominal da mesma operando como motor (Smith, N.P.A., et al., 1990).

A.2 - Determinação do Rendimento

Pelo circuito equivalente da Figura 3.3, tem-se que a corrente no circuito do rotor (I_2) é igual à soma fasorial das correntes nos enrolamentos do estator (I_1), e à corrente no ramo magnetizante (I_0), devido à indutância de magnetização e à parte correspondente a R_m devido às as perdas no ferro.

A corrente no circuito do estator (I_1) tem uma parcela ativa, devido à carga resistiva, e uma reativa que supre o capacitor e a carga suposta indutiva. Esta corrente tem a mesma magnitude da corrente (I_m) e está defasada da mesma de 180° .

Para a determinação do rendimento, a parte ativa da corrente no circuito do rotor é igual à soma das parcelas correspondentes à parte ativa do ramo magnetizante e do circuito do estator.

Daí pode-se escrever que:

$$I_2 = I_{Rm} + I_1 \quad (A.3)$$

A corrente I_{Rm} é dada por:

$$I_{Rm} = \sqrt{\frac{P_N}{3R_m}} \quad (A.4)$$

A potência ativa trifásica na carga resistiva (R_L), é dada pelas equações A.5 e A.6.

$$P_{L3\phi} = 3 R_L I_R^2 \quad (A.5) \quad P_{L3\phi} = \frac{3 V^2}{R_L} \quad (A.6)$$

Como a componente ativa da corrente no circuito do estator (I_1) é igual a corrente ativa absorvida pela carga R_L , tem-se que:

$$I_1 = I_R$$

Tirando o valor de R_L na equação A.6 e levando na equação A.5, tem-se que:

$$I_1 = \frac{P_{L3\phi}}{3V} \quad (A.7)$$

Substituindo-se as equações A.4 e A.7 na equação A.3, resulta que:

$$I_2 = \frac{P_{L3\phi}}{3V} + \sqrt{\frac{P_N}{3R_m}} \quad (A.8)$$

onde,

$P_{L3\phi}$ - potência ativa trifásica absorvida pela carga [W]

V - Tensão fase-neutro gerada [V]

P_N - potência ativa trifásica dissipada no núcleo [W]

R_L - carga equivalente em estrela

A potência ativa trifásica recebida pelo gerador através de seu eixo é:

$$P_1 = 3 \frac{R_2}{S} I_2^2 \quad (A.9)$$

onde,

P_1 - potência na entrada do eixo do gerador [W]

As perdas internas por efeito joule são:

$$\text{Perdas} = 3 R_2 I_2^2 + 3 R_m I_{Rm}^2 + 3 R_1 I_1^2 \quad (A.10)$$

Substituindo-se as equações A.4, A.7 e A.8 na equação A.10, tem-se o rendimento a plena carga do gerador, que é dado por:

$$\eta = \frac{\text{Potência de entrada} - \text{perdas}}{\text{Potência de entrada}} \times 100 \quad (A.11)$$

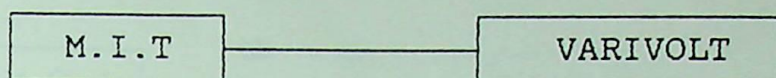
A.3 - Determinação dos Parâmetros da Máquina de Indução

Estes parâmetros foram determinados a partir dos ensaios a vazio e com o rotor bloqueado, nas frequências de 50 e 60 Hz. Com o ensaio a vazio determina-se X_m e R_m e com o rotor travado obtém-se R_1 , X_1 , R_2 e X_2 .

A.3.1 - Ensaio a Vazio

Com o motor sem carga, foi aplicada uma tensão correspondente ao seu valor nominal nos terminais do estator através de um variômetro. Neste caso, a potência de entrada medida representa as perdas no núcleo, as perdas mecânicas (por atrito e ventilação) e pequenas perdas a vazio, nos enrolamentos do estator.

A.3.2 - Diagrama de Ligação

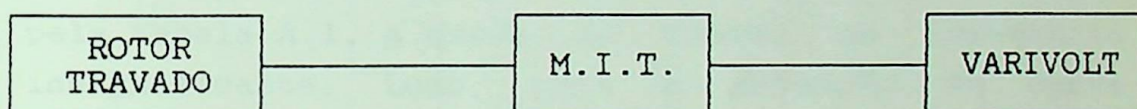


As leituras dos wattímetros, voltímetros e amperímetros nas frequências de 50 e 60 Hz foram $P_0 = 310$ W, $V_0 = 220$ V, $I_0 = 3,55$ A e $P_0 = 380$ W, $V_0 = 220$ V, $I_0 = 2,6$ A, respectivamente.

A.3.3 - Ensaio com o Rotor Bloqueado

Com o rotor bloqueado, através de um varivolt, foi aplicada gradativamente uma tensão alternada nos terminais do estator, até que circulasse uma corrente correspondente à corrente nominal a plena carga da máquina. A potência de entrada medida representa as perdas joule nos enrolamentos do estator e rotor.

A.3.4 - Diagrama de Ligação

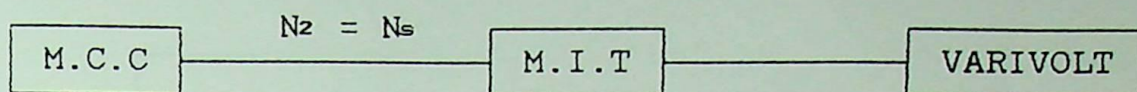


Os parâmetros da máquina obtidos nas frequências de 50 e 60 Hz são, respectivamente, $R_1 = 1,133$, $R_2 = 1,482$, $X_1 = 2,499$, $X_2 = 3,269$, $R_m = 596,977$, $X_m = 32,586$ e $R_1 = 1,132$, $R_2 = 1,645$, $X_1 = 2,785$, $X_2 = 4,0445$, $R_m = 352,202$, $X_m = 46,239$, valores estes dados em (Ω). Os valores de R_2 e X_2 estão em (Ω), referidos ao estator

A.4 - Determinação da Curva de Magnetização do Motor de Indução

O rotor foi acionado na velocidade síncrona por um motor de corrente contínua, enquanto uma tensão alternada foi sendo aplicada gradativamente nos terminais do estator através de um varivolt nas frequências de 50 e 60 Hz.

A.4.1 - Diagrama de Ligação



onde,

N_z - velocidade do rotor (RPM)

N_s - velocidade síncrona (RPM)

As velocidades síncronas nas freqüências de 50 e 60 Hz são, respectivamente, 1500 e 1800 RPM. Na velocidade síncrona o escorregamento é aproximadamente igual a zero, portanto o circuito do rotor comporta-se como uma impedância infinita. Neste caso, desprezando-se a corrente na resistência R_m , a corrente absorvida pelo gerador é a sua própria corrente de magnetização.

Considerando-se (para cada valor de tensão e corrente medidos nos terminais do estator), a queda de tensão na impedância do estator, tem-se a tensão medida no ramo magnetizante. Como pode ser visto pela tabela A.1, a queda de tensão na impedância do estator é insignificante. Logo, para a obtenção da curva de magnetização, este valor foi desprezado.

Os valores da tensão nos terminais do estator (V), no ramo magnetizante e da corrente de magnetização (I_m), para as freqüências de 50 e 60 Hz, são apresentados na tabela A.1.

TABELA A.1 - Tensão terminal (V), tensão no entreferro (E), corrente de magnetização (Im) para as frequências de 50 e 60 Hz.

60 Hz			50 Hz		
V (V)	E (V)	Im (A)	V (V)	E (V)	Im (A)
94	92	0,84	12	11,7	0,12
103	100	0,92	20	19,5	0,18
108	105	0,95	40	38,9	0,37
114	111	1,02	60	58,5	0,55
124	121	1,16	80	77,9	0,73
132	129	1,20	100	97,5	0,93
140	136	1,28	120	117	1,22
150	146	1,42	130	127	1,35
162	158	1,55	150	146	1,63
170	165	1,68	172	167	2,0
180	175	1,82	183	177	2,28
191	185	2,13	202	194	2,87
200	194	2,20	216	207	3,37
207	200	2,37	220	210	3,55
214	207	2,52	234	223	4,18
220	213	2,66	249	235	5,03
226	218	2,80	262	246	6,0
233	225	2,97	276	256	7,12
241	232	3,26	281	260	7,60
249	239	3,50	292	268	
262	251	3,98			
270	258	4,23			
281	268	4,80			
293	278	5,43			
300	290	5,61			

A curva de magnetização do motor de indução para as respectivas frequências é representada na Figura 3.4.

ANEXO B

RESULTADOS OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE

B.1 - Análise sob Condições a Vazio

Mesmo estando o gerador de indução sem carga, obtém-se variações das correntes nos terminais do estator (I_1), no capacitor (I_c) e na tensão gerada (V), atuando no ângulo de disparo dos tiristores como pode ser observado nas tabelas B.1 e B.2.

TABELA B.1 - Variação da Tensão Gerada a Vazio devido ao Ângulo de Disparo dos Tiristores para uma Rotação de 1500 RPM.

N (RPM)	V (VOLTS)	F (Hz)	I_1 (A)	I_c (A)	I_α (A)	α (GRAUS)
1500	235	49,5	4,9	4,9	0	90
1500	227	49,5	4,4	4,8	0,5	54
1496	221	50	4,2	4,7	0,6	45
1492	214	49,5	3,9	4,5	0,8	36
1492	191	49,5	3,3	4,2	1,1	27
1492	137	49,5	1,6	2,8	1,2	0

TABELA B.2 - Variação da Tensão Gerada a Vazio devido ao Ângulo de Disparo dos Tiristores para uma Rotação de 1400 RPM.

N (RPM)	V (VOLTS)	F (Hz)	I_1 (A)	I_c (A)	I_α (A)	α (GRAUS)
1400	222	46	5,5	5,5	0	90
1390	216	46	5,0	5,4	0,2	64
1390	208	46	4,4	5,2	0,4	30
1391	200	46	3,8	4,9	0,6	18
1400	186	46	3,2	4,6	0,8	0

TABELA B.3 - Limite de Variação da Rotação para uma Tensão Gerada pelo gerador, sem carga, constante, devido a Variação do Ângulo de Disparo dos Tiristores.

N (RPM)	V (VOLTS)	F (Hz)	I _l (A)	I _c (A)	I _α (A)	α (GRAUS)
1607	220	53	3,4	5,7	1,25	0
1580	220	52	3,7	5,7	1,10	12
1550	220	51,5	3,9	5,7	0,95	23
1540	220	51	4,0	5,5	0,90	28
1523	220	50	3,9	5,4	0,80	45
1500	220	49,5	4,0	5,3	0,65	50
1470	220	48,5	4,5	5,3	0,45	68
1440	220	47,5	4,4	5,0	0,35	75
1420	220	47	4,5	5,0	0,25	80
1410	220	46,5	4,6	5,3	0,16	85
1400	220	46	4,8	4,9	0,0	90

B.3 - Análise sob Condições de Carga

Estes ensaios foram realizados com a conexão de cargas de impedâncias variáveis ou fixas, em paralelo com os terminais da do gerador, conforme representadas na Figura 4.3.

TABELA B.4 - Tensão Gerada pelo Gerador de Indução para uma Carga de Impedância Variável com $C = 45 \mu\text{F}$ e $L\alpha = 0,4 \text{ H}$.

N (RPM)	V (VOLTS)	F (Hz)	I ₁ (A)	I _c (A)	I _R (A)	I _L (A)	I _α (A)	α (GRAUS)
1580	220	52,5	3,4	5,5	0	0	1,15	0
1580	220	52	3,9	5,5	0,95	0	0,95	23
1580	220	52	4,0	5,6	0,95	0,6	0,6	45
1580	220	51,5	4,6	5,4	1,95	0,6	0,4	70
1580	220	51,5	4,7	5,4	1,95	1,25	0,2	80
1580	220	53,5	4,9	5,6	1,95	1,80	0,0	90

TABELA B.5 - Variação da Tensão Gerada devido ao Ângulo de Disparo dos Tiristores, quando o Gerador Alimentou uma Carga Resistiva fixa com uma Rotação em 1500 RPM.

N (RPM)	V (VOLTS)	F (Hz)	I ₁ (A)	I _c (A)	I _R (A)	I _α (A)	α (GRAUS)
1500	234	48,5	6,5	6,1	2,6	0	90
1500	230	48,5	6,2	5,9	2,5	0,2	69
1497	220	48,5	5,7	5,8	2,4	0,4	55
1502	212	48,5	5,1	5,5	2,3	0,58	45
1500	204	49	4,8	5,3	2,2	0,7	40
1501	192	48,5	4,3	5,1	2,1	0,77	32
1500	176	48,5	3,6	4,6	1,9	0,9	22
1500	152	48,5	3,0	3,9	1,7	0,95	0

TABELA B.6 - Variação da Tensão Gerada devido ao Ângulo de Disparo dos Tiristores, quando o Gerador Alimentou uma Carga Resistiva Fixa com Rotação de Eixo não Controlada

N (RPM)	V (VOLTS)	F (Hz)	I ₁ (A)	I _c (A)	I _R (A)	I _α (A)	α (GRAUS)
1500	238	48,5	6,7	6,2	2,7	0	90
1515	236	49	6,5	6,1	2,6	0,2	63
1518	227	49	5,8	6,0	2,5	0,4	52
1527	218	49,5	5,3	5,8	2,4	0,6	38
1535	209	49,5	4,8	5,6	2,3	0,8	22
1540	203	50	4,4	5,3	2,2	0,9	14
1550	178	50	3,6	4,7	2,0	1,1	0

TABELA B.7 - Variação da Tensão Gerada devido ao Ângulo de Disparo dos Tiristores para C = 60 μF e L_α = 0,4 H.

N (RPM)	V (VOLTS)	F (Hz)	I ₁ (A)	I _c (A)	I _R (A)	I _α (A)	α (GRAUS)
1440	230	47	7,0	6,6	2,6	0	90
1460	228	47	6,8	6,6	2,5	0,2	68
1474	225	47,5	6,3	6,5	2,4	0,3	57
1480	220	48	5,9	6,4	2,3	0,6	41
1490	214	48,5	5,5	6,3	2,2	0,8	25
1500	208	48,5	5,1	6,1	2,1	0,9	13
1500	198	49	4,6	5,9	2,0	1,1	8
1500	190	49	4,2	5,6	1,9	1,2	0

Nestes ensaios, foi utilizada uma carga resistiva de 125 Ω, ligada em delta. Observa-se que houve uma variação da tensão gerada, corrente no estator, frequência e corrente na carga de, respectivamente, 40 V, 2,75 A, 2 Hz e 0,5 A. A variação da frequência foi devido a variação da rotação e da carga.

Foram feitas várias experiências, utilizando os indutores L_α de 0,6 e 0,4 H, para diversas cargas e capacitores

sob velocidade constante ou variável.

As tabelas B.8 e B.9, mostram as variações das diversas grandezas, quando foram utilizados os indutores de 0,6 e 0,4 H.

TABELA B.8 - Variação da Tensão Gerada devido ao Ângulo de Disparo dos Tiristores para $C = 60 \mu F$ e $L\alpha = 0,6 H$.

N (RPM)	V (VOLTS)	F (Hz)	I ₁ (A)	I _c (A)	I _R (A)	I _{α} (A)	α (graus)
1442	194	45,5	6,8	5,3	4,3	0	90
1450	190	46	6,5	5,25	4,2	0,2	57
1470	180	46,5	6,1	5,1	4,0	0,4	49
1490	170	47	5,1	4,8	3,8	0,6	32
1505	158	47,5	4,9	4,4	3,5	0,7	16
1490	141	48	4,4	4,1	3,1	0,8	0

TABELA B.9 - Variação da Tensão Gerada devido ao Ângulo de Disparo dos Tiristores para $C = 60 \mu F$ e $L\alpha = 0,4 H$.

N (RPM)	V (VOLTS)	F (Hz)	I ₁ (A)	I _c (A)	I _R (A)	I _{α} (A)	α (GRAUS)
1442	194	45,5	6,8	5,3	4,3	0	90
1450	190	46	6,5	5,3	4,2	0,20	72
1464	182	46,5	6,1	5,1	4,0	0,40	54
1480	170	47	5,4	4,9	3,8	0,60	39
1490	154	47,5	4,9	4,5	3,5	0,68	32
1506	140	48	4,2	4,0	3,0	0,75	20
1510	137	48,5	4,2	3,9	3,0	0,80	9
1510	137	48,5	4,1	3,9	3,0	0,84	0

Comparando a tabela B.8 com a tabela B.9 verifica-se que as maiores variações da tensão e das correntes, quando o ângulo de disparo dos tiristores foi variado de 0 a 90°, ocorreram para um valor de indutor maior, ou seja, $L\alpha = 0,4 H$. Nestes ensaios, foi utilizada uma carga resistiva de 62,5 Ω , ligada em delta.

A auto-excitação do gerador de indução é controlada

pelos capacitores e com o aumento da rotação, mesmo com os capacitores fixos, a tensão gerada aumenta. Assim, para manter a tensão constante, quando a rotação da máquina é aumentada, será necessário retirar capacitores. Nestas condições, o gerador tende a perder a excitação, quando a sua rotação é diminuída, como verificado experimentalmente.

Por outro lado, a estabilidade no disparo dos tiristores depende dos capacitores, uma vez que é estes que fornecem os reativos para os indutores. Porém, dependendo da rotação a tensão gerada é alta o que aumenta as perdas. Por isso, para manter a tensão em 220 V, evitando assim correntes excessivamente altas pelos enrolamentos da máquina, quando a rotação estiver acima de 1600 RPM, foi necessário retirar capacitores, o que resultou numa instabilidade no disparo dos tiristores.

O rendimento do gerador será melhor, quando o mesmo opera nas suas condições nominais. Por essas razões, o gerador foi operado aproximadamente nas suas condições nominais de tensão, frequência e rotação que são, respectivamente, 220 V, 50 Hz e 1500 RPM. Para obter a frequência de 50 Hz o gerador foi acionado em torno de 1515 RPM. Na operação como motor esta rotação é de 1500 RPM, portanto o mesmo opera com escorregamento negativo.

A variação da tensão gerada e das correntes devido ao ângulo de disparo dos tiristores, quando utilizou-se uma impedância de carga resistiva/indutiva, ligada conforme indicada na Figura 4.3, é apresentado nas tabelas B.10, B.11 e B.12. Nestes testes, foi utilizada uma carga resistiva de 125 Ω , ligada em delta e a carga indutiva foi ligada em estrela

TABELA B.10 - Variação da Tensão Gerada em função do Ângulo de disparo para $C = 60 \mu F$ e $L\alpha = 0,6 H$, quando o Gerador Alimentou uma Carga Resistiva e Indutiva de, respectivamente, 125Ω e $0,6 H$.

N (RPM)	V (VOLTS)	F (Hz)	I ₁ (A)	I _c (A)	I _R (A)	I _L (A)	I _{α} (A)	α (GRAUS)
1434	221	46,5	6,3	6,5	2,7	0,8	0	90
1431	215	46	5,9	6,3	2,6	0,7	0,2	57
1428	200	46	5,2	5,9	2,4	0,64	0,5	40
1424	196	46	4,8	5,7	2,3	0,62	0,58	36
1426	183	46	4,3	5,4	2,2	0,59	0,70	21
1426	150	46	3,1	4,4	1,8	0,46	0,85	0

TABELA B.11 - Variação da Tensão Gerada devido ao Ângulo de Disparo dos Tiristores para $C = 60 \mu F$ e $L\alpha = 0,6 H$, quando o Gerador Alimentou uma Carga Resistiva e Indutiva de, respectivamente, 125Ω e $0,3 H$.

N (RPM)	V (VOLTS)	F (Hz)	I ₁ (A)	I _c (A)	I _R (A)	I _L (A)	I _{α} (A)	α (GRAUS)
1425	203	46	5,2	6,0	2,8	1,3	0	90
1426	195	46	4,8	5,8	2,6	1,2	0,2	60
1426	184	46	4,2	5,4	2,5	1,03	0,35	32
1423	168	46	3,6	4,8	2,3	0,95	0,47	24
1425	113	46	2,3	3,3	1,5	0,66	0,50	0

TABELA B.12 - Variação da Tensão Gerada devido ao Ângulo de Disparo dos Tiristores para $C = 60 \mu F$ e $L\alpha = 0,6 H$, quando o Gerador Alimentou uma Carga Resistiva e Indutiva de, respectivamente, 125Ω e $0,2 H$.

N (RPM)	V (VOLTS)	F (Hz)	I _I (A)	I _c (A)	I _R (A)	I _L (A)	I _{α} (A)	α (GRAUS)
1426	184	46	4,3	5,4	2,8	1,7	0	90
1424	170	46	3,7	4,9	2,7	1,6	0,2	51
1424	162	46	3,4	4,6	2,5	1,5	0,29	43
1426	154	46	3,2	3,6	2,4	1,4	0,32	31
1426	107	46	2,2	3,2	1,0	1,0	0,52	0

Como já descrito nos capítulos referentes ao desenvolvimento da dissertação, o gerador de indução apresenta uma péssima regulação de tensão, quando excitado por capacitores fixos. Quanto menor for o fator de potência atrasado da carga pior será a regulação de tensão. Com a utilização da fonte estática de compensação de reativos, esta tensão pôde ser controlada dentro de limites aceitáveis.

Pode ser observado pelas tabelas B.10, B.11 e B.12, que a tensão gerada teve uma queda bastante acentuada para uma pequena variação do fator de potência da carga.

As tabelas B.13 e B.14, mostram a regulação de tensão nos terminais do gerador, quando o mesmo foi acionado em uma velocidade constante e variável, utilizando a fonte estática de compensação de reativos testada no laboratório.

TABELA B.13 - Tensão Gerada pelo Gerador de Indução para uma Carga Resistiva Variável com $C = 45 \mu\text{F}$ e $L\alpha = 0,4 \text{ H}$, com uma rotação constante.

N (RPM)	V (VOLTS)	F (Hz)	I ₁ (A)	I _c (A)	I _R (A)	I _{α} (A)	α (GRAUS)
1580	220	52,5	3,5	5,5	0	1,15	0
1578	220	52	4,0	5,6	0,95	0,91	23
1577	220	51,5	4,4	5,5	1,45	0,80	34
1578	220	51,5	4,6	5,4	1,85	0,73	41
1577	220	51	5,2	5,3	2,75	0,52	90

TABELA B.14 - Tensão Gerada pelo Gerador de Indução com $C = 45 \mu\text{F}$ e $L\alpha = 0,4 \text{ H}$, para uma Carga Resistiva e rotação de eixo variáveis.

N (RPM)	V (VOLTS)	F (Hz)	I ₁ (A)	I _c (A)	I _R (A)	I _{α} (A)	α (GRAUS)
1580	220	52,5	3,5	5,5	0	1,15	0
1550	220	51	4,2	5,5	0,95	0,76	34
1530	220	50	4,5	5,3	0,45	0,60	45
1515	220	49,5	5,3	5,3	1,90	0,35	68
1488	213	48	5,5	4,9	2,65	0	90

Através das tabelas B.13 e B.14, pode-se observar que a tensão gerada pelo o gerador permaneceu constante, quando o ângulo de disparo dos tiristores foi variado de 0 a 90° , no entanto a corrente nos enrolamentos do estator I₁ variou de aproximadamente 2 A. Esta variação é devida a variação da frequência, uma vez que esta corrente varia com a frequência.

A tabela B.15 mostra a variação da tensão devido ao ângulo de disparo dos tiristores, quando foi utilizado um banco de capacitores e um indutor $L\alpha$ de, respectivamente, $55 \mu\text{F}$ e $0,6 \text{ H}$.

TABELA B.15 - Variação da Tensão Gerada devida ao Ângulo de Disparo dos Tiristores para $C = 55 \mu\text{F}$ e $L\alpha = 0,6 \text{ H}$.

N (RPM)	V (VOLTS)	F (Hz)	I _l (A)	I _c (A)	I _R (A)	I _l (A)	I _α (A)	α (GRAUS)
1498	220	48,5	5,28	6,33	1,9	1,35	0	90
1498	215	49	4,9	6,13	1,85	1,30	0,2	57
1497	210	49	4,62	5,97	1,78	1,25	0,3	47
1497	202	49	4,33	5,85	1,72	1,20	0,4	41
1497	196	49	3,93	5,6	1,67	1,17	0,5	33
1500	186	49	3,73	5,4	1,60	1,10	0,6	25
1500	178	49,5	2,86	4,96	1,50	1,0	0,7	9
1500	138	49,5	2,42	3,93	1,20	0,8	0,75	0

Neste ensaio, foi utilizada uma carga resistiva de $62,5 \Omega$ e uma reatância indutiva de $91,42 \Omega$, ambas ligadas em estrela.

TABELA B.16 - Tensão e Frequência Geradas pelo Gerador de Indução e com a Frequência na carga controlada pelo Inversor.

TENSÃO		FREQUÊNCIA GERADA (Hz)	FREQUÊNCIA NA SAIDA DO INVERSOR (Hz)
ENTRADA DO VARI VOLT (VOLTS)	SAIDA DO VARI VOLT (VOLTS)		
193	182	47,5	52,75
208	183	48,5	26,87
190	200	47,5	62
216	220	47,5	70

Nas Figuras B.17, B.18, B.19, e B.20, B.21, B.22, tem-se, as formas de onda de tensão e corrente para o gerador sem carga e com carga, respectivamente, onde as formas de onda mais elevadas indicam tensão e as inferiores, a corrente.

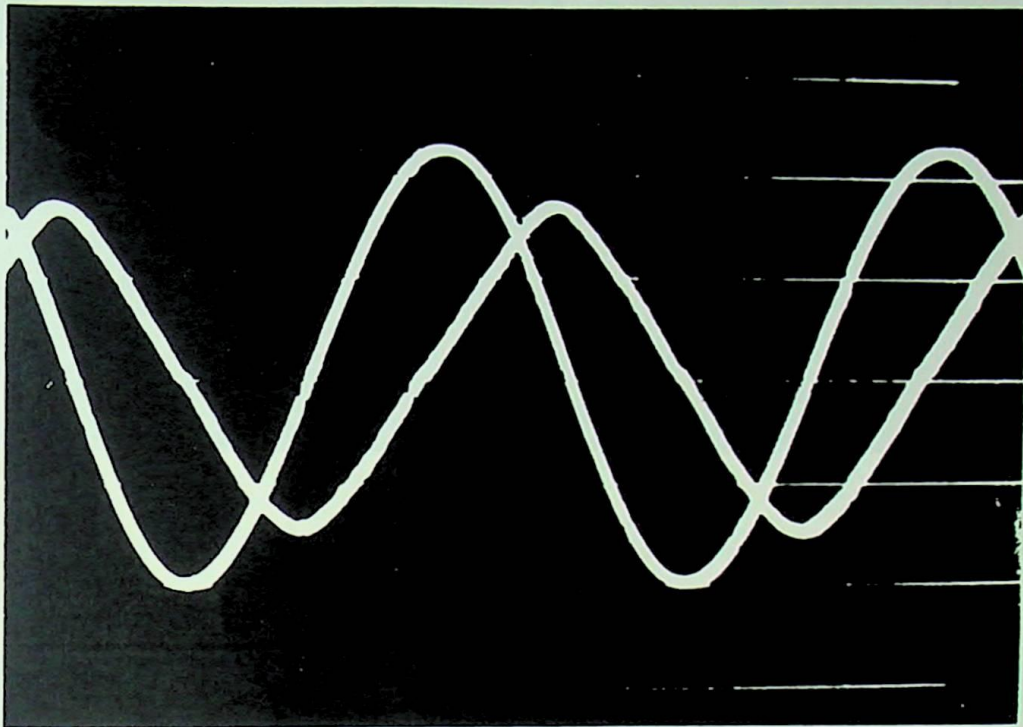


Fig. B.17 - Formas de Ondas da Tensão Gerada e Corrente no Reator Controlado a Tiristores para $\alpha = 0^{\circ}$ e a máquina sem Carga

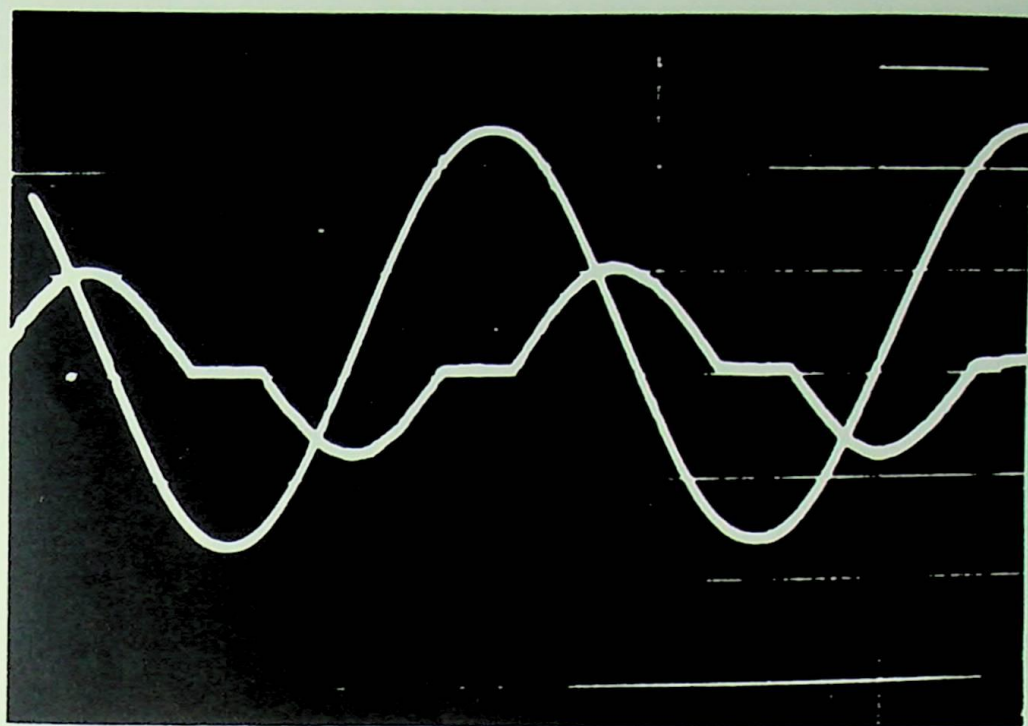


Fig. B.18 - Formas de Ondas da Tensão Gerada e Corrente no Reator Controlado a Tiristores para $\alpha = 23^\circ$ e a Máquina sem

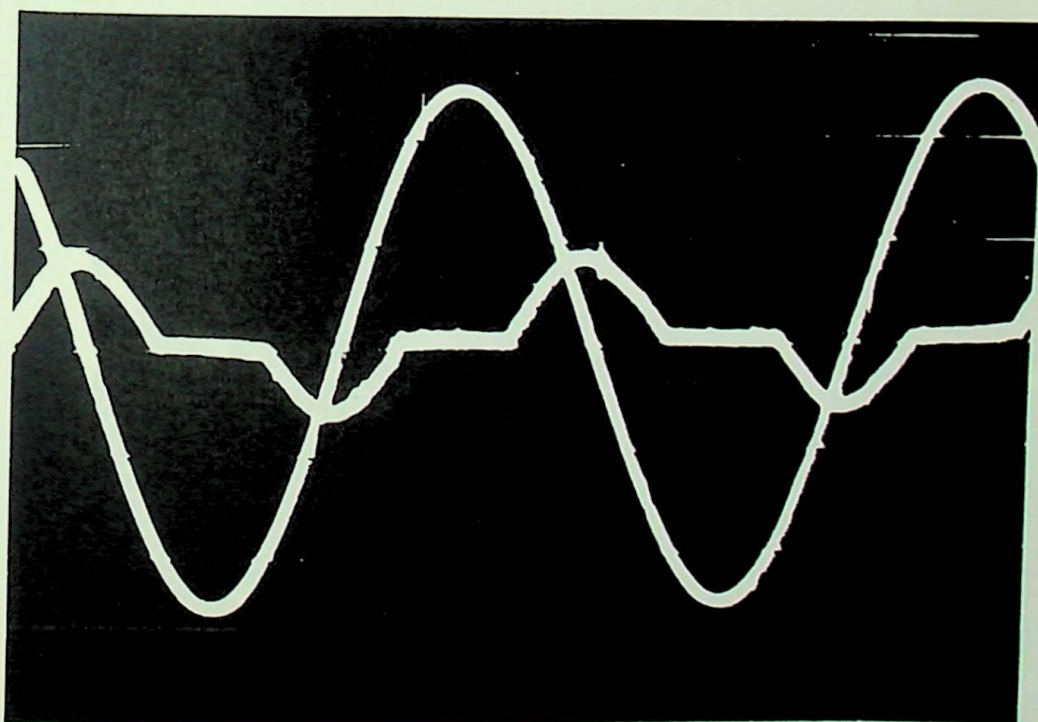


Fig. B.19 - Formas de Ondas da Tensão Gerada e Corrente no Reator Controlado a Tiristores para $\alpha = 45^\circ$ e a Máquina sem Carga.

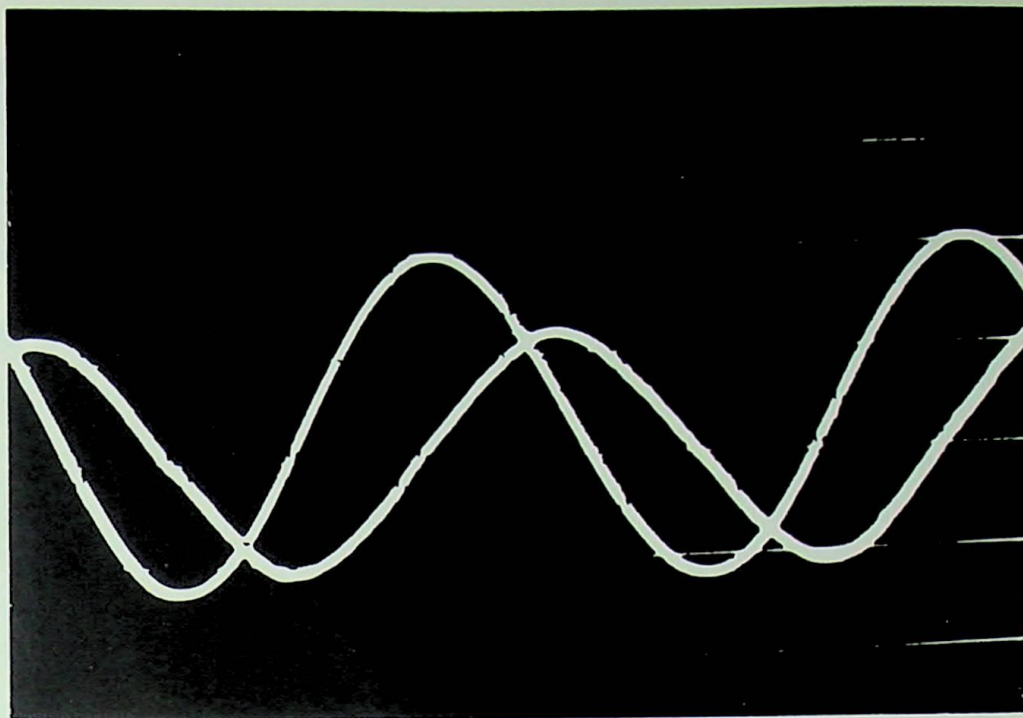


Fig. B.20 - Formas de Ondas da Tensão Gerada e Corrente no Reator para $\alpha = 0^\circ$ e a Máquina com Carga.

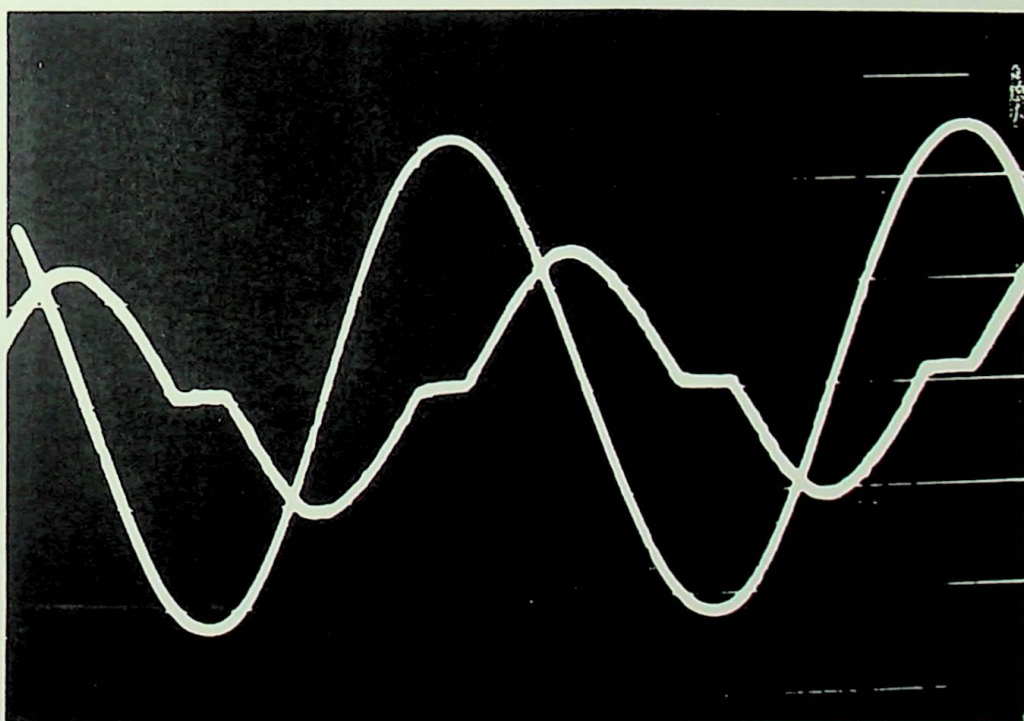


Fig. B.21 - Formas de Ondas da Tensão Gerada e Corrente no Reator Controlado a Tiristores para $\alpha = 14^\circ$ e a Máquina com Carga.

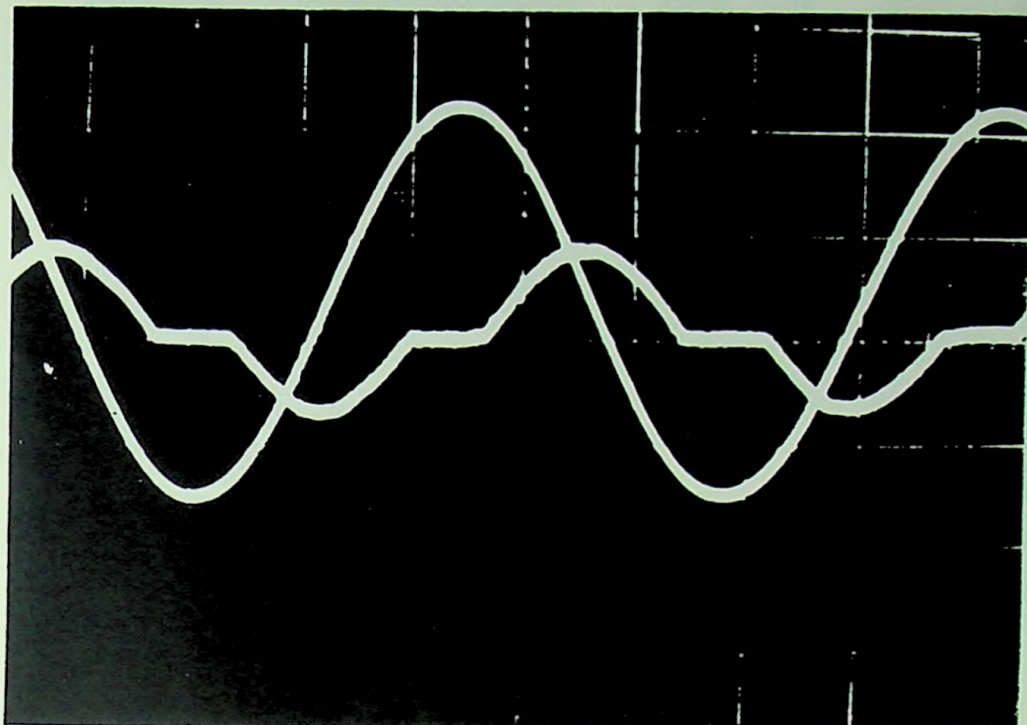


Fig. B.22 - Formas de Ondas da Tensão Gerada e Corrente no Reator Controlado a Tiristores para $\alpha = 28^\circ$ e a Máquina com Carga.

DADOS TÉCNICOS

Dados de Placa do Motor de Indução

- Motor de Indução 3 ϕ , 4 Polos, 1,86 KW, 7,5 A, F.P = 0,82, $\eta = 0,82$
- Eletromáquinas "Anel" S.A, Modelo A4 - 5A - 3314, N^o 25591.
- 25591
- Tensão em Delta 220 V, Tensão em Estrela 380 V.
- Opera em 50/60 Hz

Dados de Placa do Motor de Corrente Contínua

- Motor de Corrente Contínua 3 ϕ , 220 V, 1,7 KW, 1500 RPM, 7,72 A
- Eletromáquinas 'Anel S.A, Modelo GG1 - 4, N^o 9507, Isol A
- Campo Máximo 0.6, Regime Contínuo.

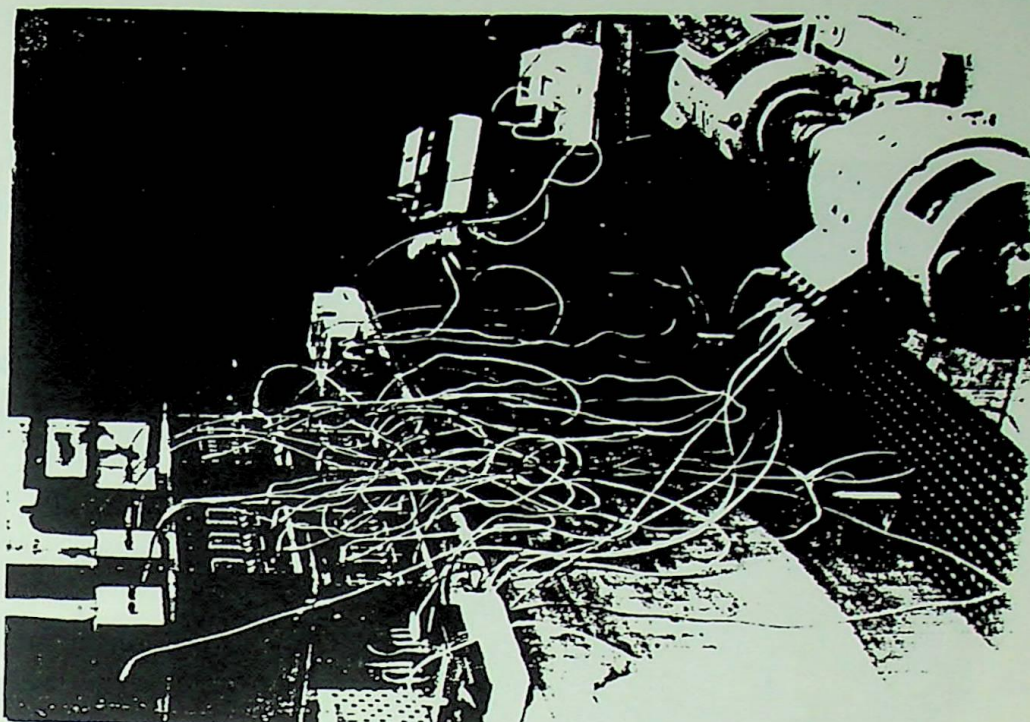


Fig. B.23 - Vista das Máquinas de Corrente Contínua e de Indução Ligadas à Fonte Estática de Compensação de Reativos.

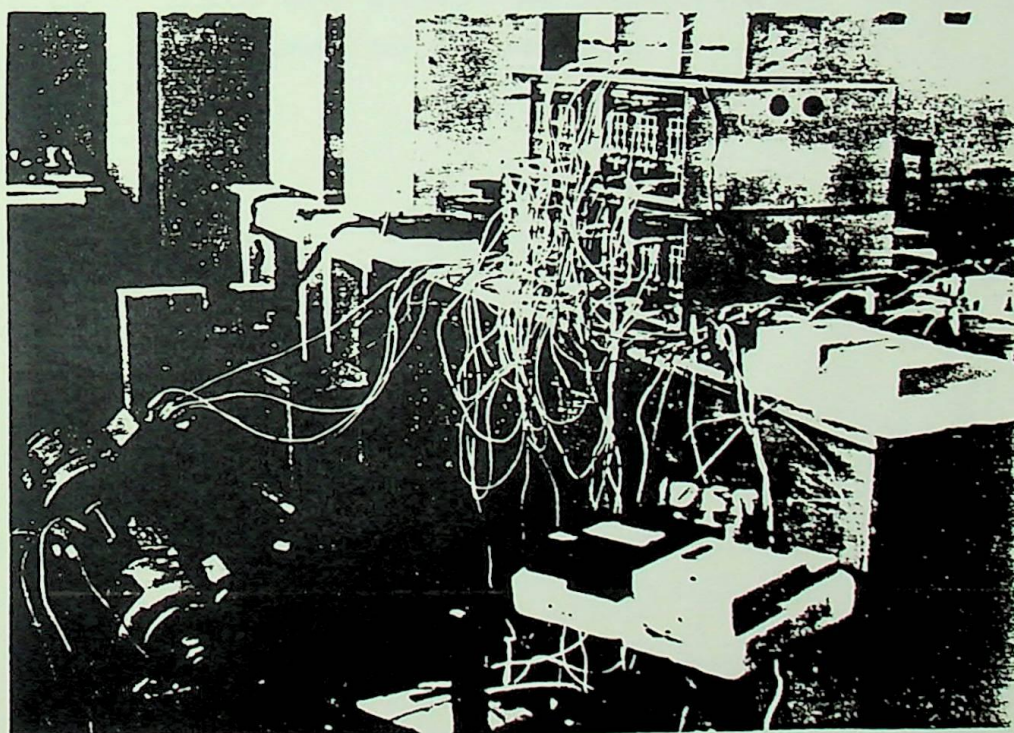


Fig. B.24 - Vista da Fonte Estática de Compensação de Reativos Implementada com Capacitores Fixos e Reatores Controlados com Retificadores de Silício

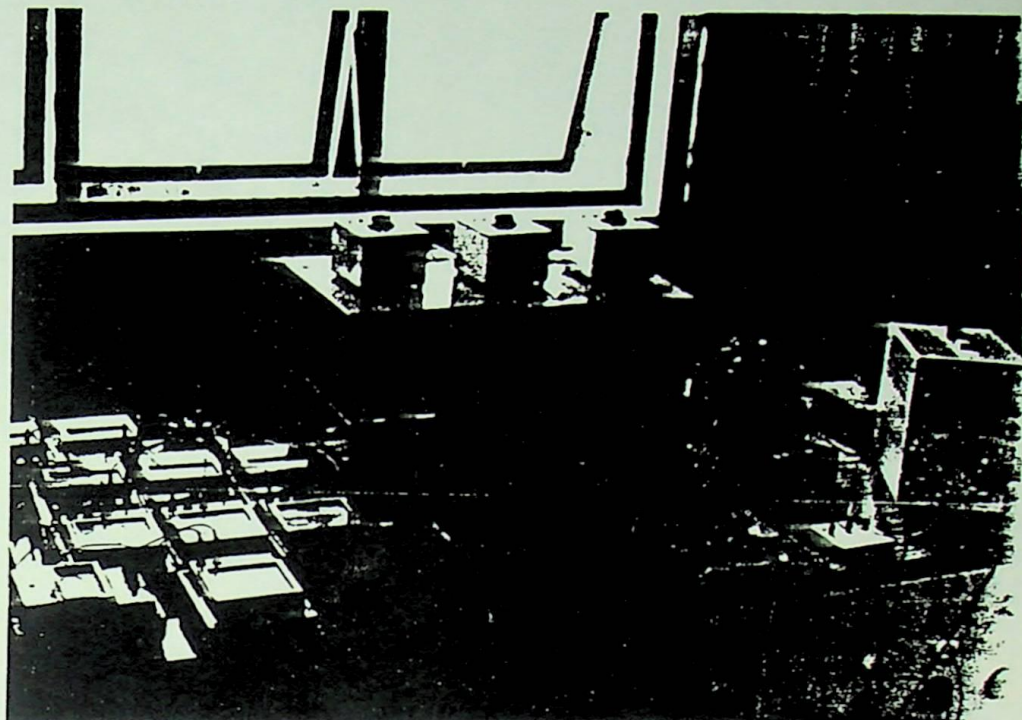


Fig. B.25 - Vista dos Bancos de Capacitores, Bancos de Indutores e Equipamentos de medidas



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
BIBLIOTECA CENTRAL DE DOCUMENTAÇÃO

EFEL - E

8200753



NÃO DANIFIQUE ESTA ETIQUETA