



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE UM GERADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO AUTOEXCITADO POR CAPACITORES

Renato Augusto Derze Valadão

Projeto de Graduação apresentado ao curso
de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica,
Universidade Federal do Rio de Janeiro, como
parte dos requisitos necessários à obtenção do
título de Engenheiro.

Orientador: Sebastião Ércules Melo Oliveira,
D.Sc

Rio de Janeiro

AGOSTO de 2012

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE UM GERADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO
AUTOEXCITADO POR CAPACITORES

Renato Augusto Derze Valadão

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Examinada por:

Prof. Sebastião Ércules Melo Oliveira, D.Sc
(Orientador)

Prof. Antonio Carlos Ferreira, Ph.D.

Prof. Alexandre Coelho, MSc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

AGOSTO de 2012

À minha namorada, Talita, aos meus familiares e
amigos.

Agradecimentos

Aos técnicos André e Sérgio do Laboratório de Máquinas pelo auxílio nos ensaios realizados.

Ao professor Sebastião pela indicação do tema e toda orientação fornecida.

Aos meus familiares, principalmente ao meu irmão Carlos Augusto por incitar a busca pelo conhecimento e ao meu irmão Luís Alberto pelo apoio em momentos difíceis.

Aos meus amigos que aceitaram minha ausência, quase reclusão, com o objetivo de concluir este trabalho.

À minha namorada, Talita, pelo suporte nesses anos de Faculdade e aos meus amigos do curso de Engenharia Elétrica que tornaram esses anos inesquecíveis.

Ao Professor Hugo Roquette que, com seus ensinamentos e motivação, mudou, ainda no ensino médio, a minha maneira de ver a vida.

Finalmente, à instituição UFRJ que, com excelência, proporcionou a minha formação como Engenheiro Eletricista.

Muito Obrigado!

Resumo do Projeto Final em Engenharia Elétrica apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica – UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista:

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE UM GERADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO
AUTOEXCITADO POR CAPACITORES

Renato Augusto Derze Valadão

AGOSTO de 2012

Orientador: Sebastião Ércules Melo Oliveira, D.Sc

Este trabalho tem como objetivo comprovar, com ensaios práticos, a existência do fenômeno da autoexcitação, por meio de capacitores, de um gerador de indução trifásico. Além disso, pretende-se analisar o comportamento dessa máquina, com medidas experimentais e simulação, para diversas condições de operação.

Inicialmente é apresentada a teoria da máquina de indução e do fenômeno da autoexcitação.

Posteriormente são apresentados os resultados dos ensaios preliminares, que permitem a obtenção do modelo da máquina e o cálculo da capacitância a ser utilizada.

Em seguida, são expostos os resultados dos ensaios realizados com o gerador autoexcitado, assim como da simulação da operação.

Por fim, são explicitadas as comparações pertinentes entre a teoria, o que foi medido na experiência prática e o que foi simulado.

Sumário

CAPÍTULO 1	1
1 INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2	3
2 CONCEITOS BÁSICOS	3
2.1 CONCEITOS INTRODUTÓRIOS	3
2.1.1 <i>Máquina elétrica</i>	3
2.1.2 <i>Características da máquina de indução</i>	4
2.1.3 <i>Operação como gerador</i>	5
2.2 DESENVOLVIMENTO DO MODELO TEÓRICO UTILIZADO	6
2.2.1 <i>Análise das frequências</i>	7
2.2.2 <i>Circuito equivalente do gerador de indução</i>	9
CAPÍTULO 3	11
3 FUNCIONAMENTO COMO GERADOR AUTOEXCITADO	11
3.1 DESCRIÇÃO DO FENÔMENO	11
3.2 MODELO DO GERADOR AUTOEXCITADO	14
3.3 ANÁLISE DO CIRCUITO EQUIVALENTE	17
CAPÍTULO 4	19
4 OBTENÇÃO DO MODELO: ENSAIOS EM VAZIO E DE ROTOR BLOQUEADO	19
4.1 MÁQUINA UTILIZADA	19
4.1.1 <i>Esquemas de Ligação</i>	20
4.2 ENSAIOS EM VAZIO	21
4.2.1 <i>Objetivo</i>	21
4.2.2 <i>Material utilizado</i>	21
4.2.3 <i>Experimento</i>	21
4.2.4 <i>Curva de magnetização</i>	25
4.2.5 <i>Determinação da faixa de capacitores necessária para a autoexcitação</i>	26
4.3 ENSAIO DE ROTOR BLOQUEADO	28
4.3.1 <i>Objetivo</i>	28
4.3.2 <i>Material utilizado</i>	28
4.3.3 <i>Experimento</i>	28
4.3.4 <i>Cálculo dos parâmetros</i>	32

CAPÍTULO 5	36
5 ENSAIOS COM GERADOR AUTOEXCITADO	36
5.1 OBJETIVO.....	36
5.2 MATERIAL UTILIZADO	36
5.3 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	37
5.4 EXPERIMENTOS REALIZADOS	37
5.4.1 <i>Esquema experimental – bancada de testes</i>	38
5.4.2 <i>Capacitância mínima para autoexcitação sem carga</i>	39
5.4.3 <i>Carga variável e velocidade constante</i>	40
5.4.4 <i>Carga fixa em 40 W e velocidade variável</i>	45
CAPÍTULO 6	49
6 SIMULAÇÃO DIGITAL DA OPERAÇÃO COMO GERADOR AUTOEXCITADO	49
6.1 MOTIVAÇÃO.....	49
6.2 MÉTODO ITERATIVO.....	49
6.3 FORMA DE CÁLCULO	49
6.3.1 <i>Método de Newton-Raphson</i>	50
6.3.2 <i>Resumo do programa</i>	51
6.4 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO	55
CAPÍTULO 7	56
7 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS E CONCLUSÕES	56
APÊNDICES.....	61
DESENVOLVIMENTO DA IMPEDÂNCIA EQUIVALENTE	61
CÓDIGO EM MATLAB PARA SIMULAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO GERADOR AUTOEXCITADO	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

Capítulo 1

1 Introdução

Este projeto é baseado na verificação experimental do comportamento de uma máquina de indução trifásica com rotor gaiola de esquilo funcionando como gerador, sendo realizada a excitação por meio de capacitores, sendo denominada autoexcitação, devido à ausência de fontes externas.

As etapas realizadas são:

- Através de ensaios em vazio e de rotor bloqueado, determinar os parâmetros da máquina.
- Calcular a capacitância mínima necessária para a autoexcitação do gerador.
- Realizar ensaios que permitam verificar o comportamento da máquina operando como gerador autoexcitado.
- Resolver, por método iterativo, as equações que representam o modelo do gerador autoexcitado.
- Comparar os resultados obtidos experimentalmente com os simulados

Na ausência de outras fontes de energia elétrica, precisa-se prover de outra maneira a potência reativa essencial para seu funcionamento. Portanto, utilizam-se capacitores para fornecer o reativo necessário.

A principal possibilidade de aplicação do gerador de indução autoexcitado consiste de seu uso em localidades remotas, onde não exista rede de distribuição de energia elétrica.

Para o fornecimento da energia mecânica que provoca o movimento do rotor do gerador, podem-se utilizar motores térmicos, ou até mesmo turbinas associadas a quedas d'água. Entretanto, com o intuito de emular, em laboratório, o comportamento dessas fontes de movimento, será utilizada outra máquina de indução acionada por um inversor, o que permite o controle da velocidade do motor.

Capítulo 2

2 Conceitos básicos

2.1 Conceitos Introdutórios

2.1.1 Máquina elétrica

As máquinas elétricas rotativas são equipamentos destinados a converter energia mecânica em elétrica ou vice-versa. No primeiro caso são chamadas de gerador, e, quando transformam energia elétrica em mecânica, são denominadas motor.

O nome máquina de indução advém do fato de o enrolamento do estator criar um campo magnético girante que induz corrente alternada no enrolamento do rotor. O desenho do enrolamento do rotor varia dependendo da necessidade de torque ou controle de velocidade. Duas categorias podem ser distinguidas: o rotor em gaiola de esquilo e o rotor bobinado. A máquina de indução com rotor em gaiola de esquilo é a preferida para ser usada como gerador, devido à fácil e pouco necessária manutenção e à ausência de anéis coletores ou escovas de carbono. Em adição a isso há, por exemplo, a vantagem de ter um entreferro mais regular e melhor resistência a esforços decorrentes de velocidades de disparo.

O rotor em gaiola de esquilo consiste de barras de alumínio ou cobre inseridas nas ranhuras do rotor com todas as barras ligadas em curto-circuito por dois anéis, como mostrado na figura 2.1:

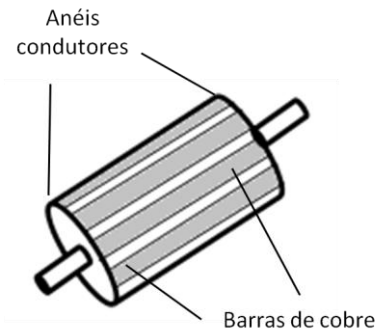


Figura 2.1 – Rotor gaiola de esquilo

Dentre as vantagens da máquina de indução com rotor gaiola, pode-se ressaltar:

- Ausência de contato elétrico entre rotor e estator, como escovas. Devido a isso, apresenta manutenção reduzida.
- O rotor gaiola de esquilo é de fácil fabricação, sendo, portanto, mais barato e rápido de fazer.

A principal desvantagem é a dificuldade no controle da velocidade.

2.1.2 Características da máquina de indução

Quando máquinas elétricas, de uma forma geral, são comparadas, um dos parâmetros mais importantes é a relação conjugado-velocidade. A figura 2.2 mostra uma curva característica típica de uma máquina de indução com rotor em gaiola de esquilo. A faixa de operação da máquina de indução tanto na motorização como na geração representa apenas uma pequena parte da curva característica completa.

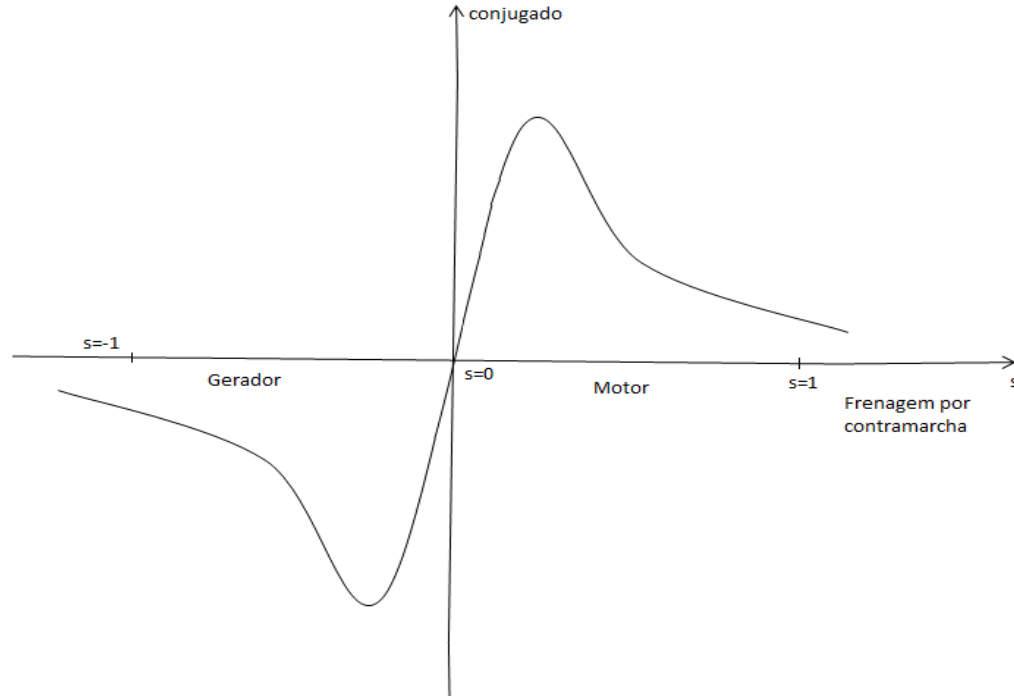


Figura 2.2 – Curva conjugado x escorregamento para máquina de indução.

Faixa de operação para diferentes valores de escorregamento:

- $s > 1$: Frenagem por contramarcha
- $0 < s < 1$: Motor
- $s < 0$: Gerador

2.1.3 Operação como gerador

Quando a máquina de indução é operada como gerador, o seu eixo recebe torque mecânico e, conseqüentemente, potência mecânica através de turbinas, hélices ou, até mesmo, de outras máquinas funcionando como motores, sendo criado, assim, um grupo motor-gerador. As mesmas perdas que ocorrem no funcionamento como motor (como as perdas no cobre do estator e rotor, perdas no ferro do estator, as perdas por atrito e ventilação) ocorrem na geração, entretanto devem ser subtraídas da potência mecânica de entrada.

A figura 2.3 ilustra o fluxo de potência da máquina de indução operando como gerador.

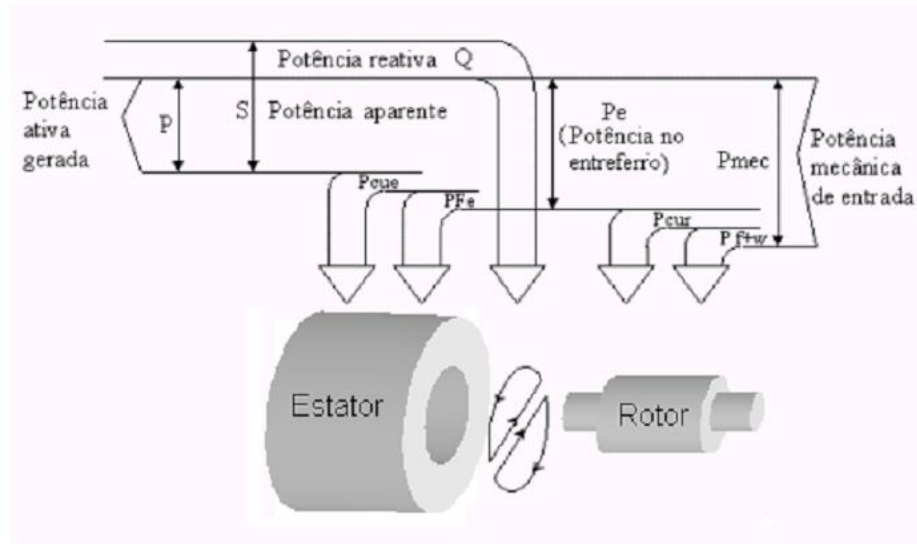


Figura 2.3 – Fluxo de potência no gerador de indução (CHAPALLAZ, 1992).

Portanto, as perdas são representadas da seguinte maneira:

- P_{rot} – Perdas rotacionais: Perdas oriundas do atrito entre os componentes da máquina e devido à ventilação.
- P_{Fe} – Perdas no núcleo: Perdas, principalmente, por histerese e correntes parasitas.
- P_{cuest} e P_{cur} – Perdas no cobre do rotor e do estator: Perdas provocadas pelo Efeito Joule nos enrolamentos da máquina.

2.2 Desenvolvimento do modelo teórico utilizado

Será desenvolvido o modelo por fase de uma máquina de indução trifásica do tipo gaiola de esquilo. Nessa máquina, quando em funcionamento, fluem correntes em ambos os enrolamentos do estator e rotor, que produzem campos magnéticos girantes que interagem

entre si no entreferro. O campo girante produzido pelo estator gira à velocidade síncrona. O campo produzido pelo rotor também é girante à mesma velocidade síncrona do estator, pois o campo do rotor é consequência do campo produzido pelo estator. Os campos citados induzem tensões no estator de frequência igual à de alimentação e produzem tensões no rotor com a frequência de escorregamento, sendo esta a diferença entre a frequência do campo girante do estator e a frequência de rotação do rotor.

É necessário salientar que a indução de tensões no rotor, seja ele bobinado ou de gaiola de esquilo, só ocorre se sua velocidade de rotação for diferente da velocidade síncrona. Caso contrário não haveria variação no enlace de fluxo e, conseqüentemente, indução de tensão no rotor.

2.2.1 Análise das frequências

A frequência de rotação angular, em rotações por minuto, do campo girante produzido pelo estator de uma máquina de indução é dada pela equação (2.1).

$$n_s = \frac{120f_s}{p} \quad (2.1)$$

Onde:

f_s – frequência da rede [Hz]

p – número de polos do estator

n_s – velocidade de rotação do campo girante do estator [rpm]

Logo:

$$\omega_s = \frac{2\pi n_s}{60} \quad (2.2)$$

Onde:

ω_s – velocidade de rotação do campo girante do estator [rd. s⁻¹]

Analogamente, a velocidade de rotação, em rotações por minuto, do campo girante produzido pelo rotor de uma máquina de indução é dada pela equação (2.3).

$$n_r = \frac{120f_r}{p} \quad (2.3)$$

Onde: f_r – frequência induzida no rotor [Hz]
 p – número de polos do estator
 n_r – velocidade de rotação do campo girante do rotor [rpm]

Logo:

$$\omega_r = \frac{2\pi n_r}{60} \quad (2.4)$$

Onde:

ω_r – velocidade de rotação do campo girante do rotor [rd. s⁻¹]

Então, o escorregamento é definido pela equação (2.5).

$$s = \frac{\omega_s - \omega'_r}{\omega_s} \quad (2.5)$$

Onde:

ω'_r - Velocidade de rotação do rotor [rd. s⁻¹]

Sabendo-se que:

$$\omega_r = \omega_s - \omega'_r$$

É possível chegar à equação (2.6).

$$s = \frac{\omega_r}{\omega_s} \quad (2.6)$$

Portanto:

$$f_r = s f_s \quad (2.7)$$

Resumindo:

f_s – frequência da tensão do estator

f_r – frequência da tensão induzida no rotor

f_r' – frequência de rotação do rotor

2.2.2 Circuito equivalente do gerador de indução

A figura 2.4 introduz o circuito equivalente por fase de uma máquina de indução. O modelo utilizado apresenta todos os parâmetros referidos ao estator.

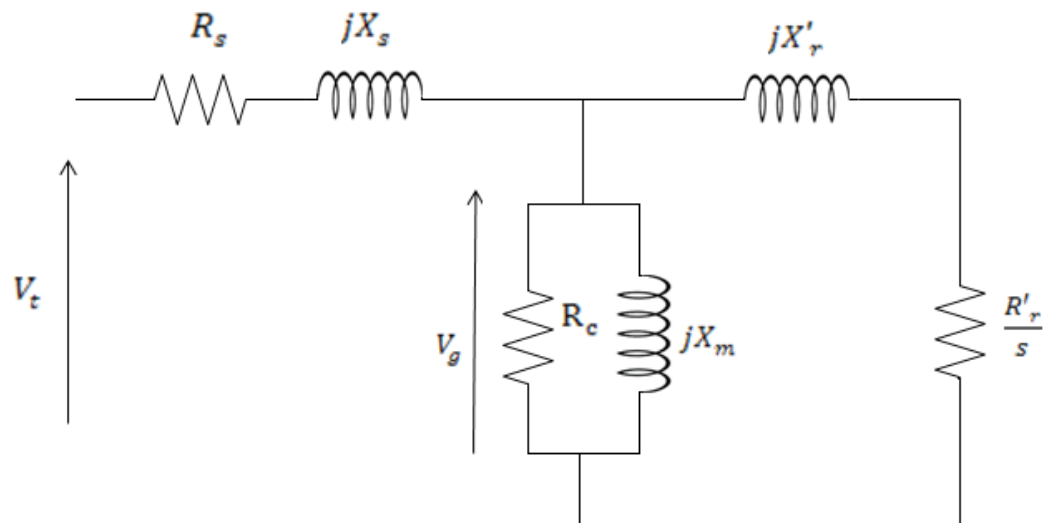


Figura 2.4 – Circuito equivalente por fase de uma máquina de indução trifásico.

Para o qual:

R_s – Resistência do estator

X_s – Reatância de dispersão do estator

R_c – Resistência de perdas no núcleo

X_m – Reatância de magnetização

X'_r – Reatância de dispersão do rotor referida ao estator

R'_r – Resistência do rotor referida ao estator

s – escorregamento

Devido às perdas no núcleo da máquina utilizada serem reduzidas, o circuito apresentado na figura 2.4 pode ser simplificado desconsiderando a resistência R_c .

Capítulo 3

3 Funcionamento como gerador autoexcitado

Neste capítulo será mostrado o funcionamento teórico da máquina de indução funcionando como gerador autoexcitado por capacitores.

3.1 Descrição do fenômeno

Para que o gerador de indução proporcione a conversão de energia mecânica em energia elétrica, é preciso que haja um magnetismo residual em seu rotor, para que em conjunto com sua rotação permita a indução de tensão nos terminais do estator. Entretanto, devido à pequena intensidade do magnetismo remanescente no rotor, proporcionado por operações anteriores como motor ou ligação de baterias, as tensões induzidas serão muito baixas e conseqüentemente insuficientes para a utilização em carga.

Para que o efeito do magnetismo residual seja maximizado, é fundamental que haja o fornecimento de potência reativa à máquina, seja através da rede elétrica, quando ocorre a operação interligada, ou por meio de capacitores, quando a operação isolada é necessária.

O fenômeno da autoexcitação ocorre devido à ligação do banco de capacitores em paralelo aos terminais do estator, que implica em um avanço de fase na corrente de excitação da máquina. Essa corrente, por sua vez, ao passar pelos enrolamentos do estator, produzirá um fluxo magnético de mesmo sentido que o fluxo residual original, aumentando a magnetização da máquina.

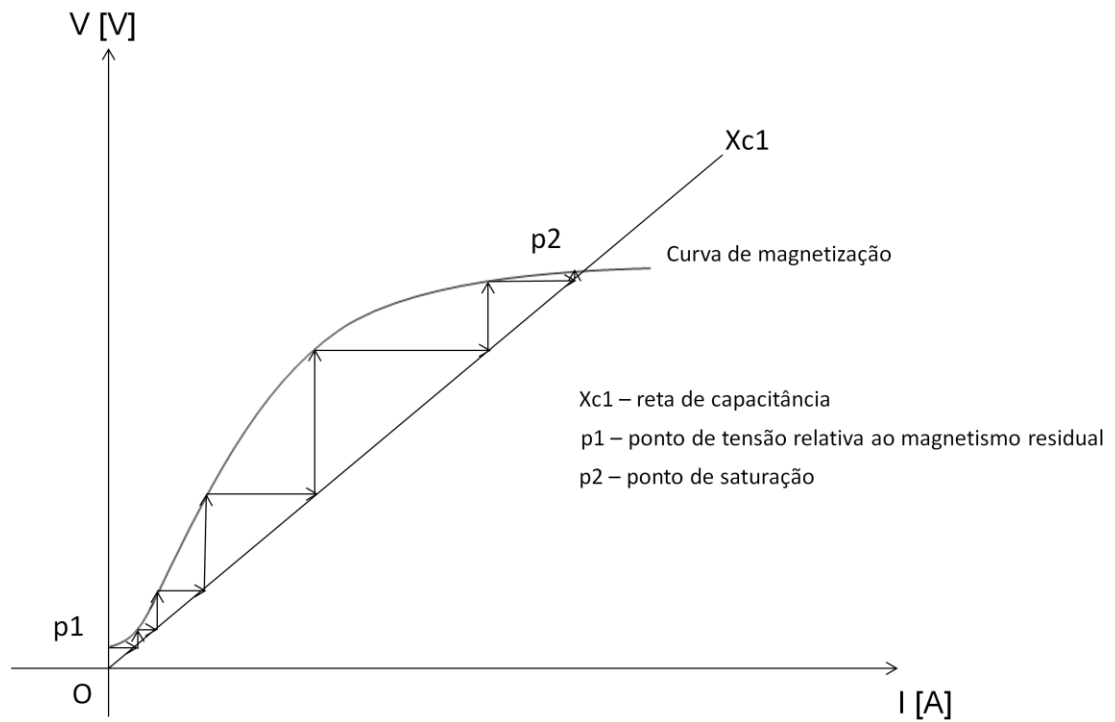


Figura 3.1 – Processo de autoexcitação do gerador de indução trifásico.

A figura 3.1 ilustra a interação entre a corrente proveniente do banco de capacitores e a tensão induzida no estator pelo fluxo residual do entreferro. Pode-se perceber que no instante inicial, representado pelo ponto $p1$, a tensão eficaz residual no gerador é V_i , ao passo que a corrente é igual a zero. Após o início do processo de autoexcitação, uma corrente de magnetização é gerada devido à tensão V_i nos terminais do capacitor. Em consequência dessa corrente, o fluxo aumentará no rotor, criando assim, uma tensão maior que V_i nos terminais do estator. Para essa tensão no estator haverá uma corrente de magnetização maior. O processo irá se repetir até que a curva de magnetização cruze com a reta de carga X_{c1} no ponto de saturação, denominado $p2$.

Portanto, devem-se determinar os possíveis valores de capacitância que promovem o aumento da magnetização.

O funcionamento adequado corresponde à interseção entre a reta de impedância dos capacitores e a curva de magnetização da máquina à velocidade síncrona. Entretanto duas condições devem ser satisfeitas.

A reatância capacitiva deve ser menor ou igual à reatância de magnetização não saturada da máquina. O que indica que a inclinação da reta de impedância dos capacitores deve ser menor que da linha de entreferro.

A capacitância máxima e, conseqüentemente, a reatância mínima do banco de capacitores é limitada por um valor de reatância para a qual a corrente do estator não exceda o seu valor nominal em vazio.

Logo, de acordo com a figura 3.2, nota-se que a região compreendida entre as retas $OP1$ e $OP2$ (faixa P1-P2) corresponde à extensão de possíveis valores de reatância capacitiva que promovem a autoexcitação. Enquanto que a reta ON não produz o efeito desejado, haja vista a inexistência de interseção com a curva de magnetização.

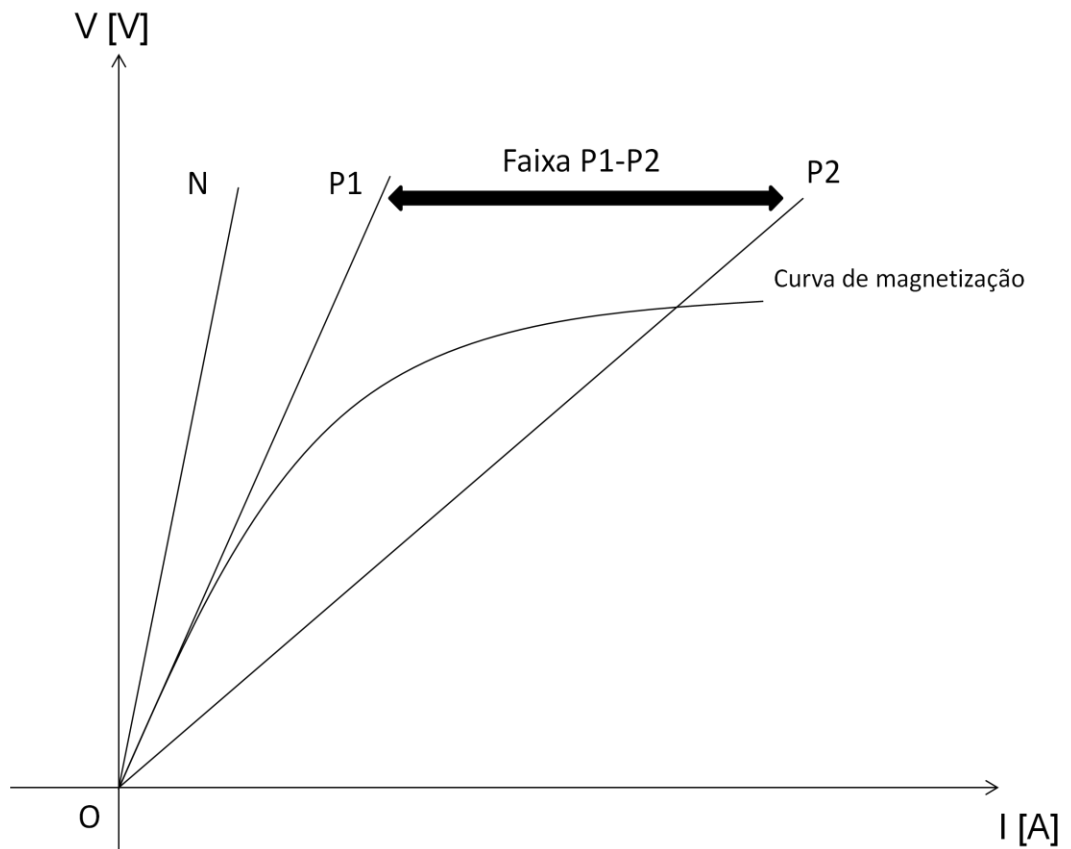


Figura 3.2 – Comportamento da máquina de indução para diferentes reatâncias capacitivas.

É importante que, na prática, a capacitância escolhida não tenha um valor muito próximo da tangente da linha de entreferro, caso contrário uma alteração na carga pode levar a reta de impedância para fora da faixa P1-P2.

3.2 Modelo do gerador Autoexcitado

Na figura 3.3 é mostrado o circuito utilizado com a adição da carga e do banco de capacitores necessário para a autoexcitação.

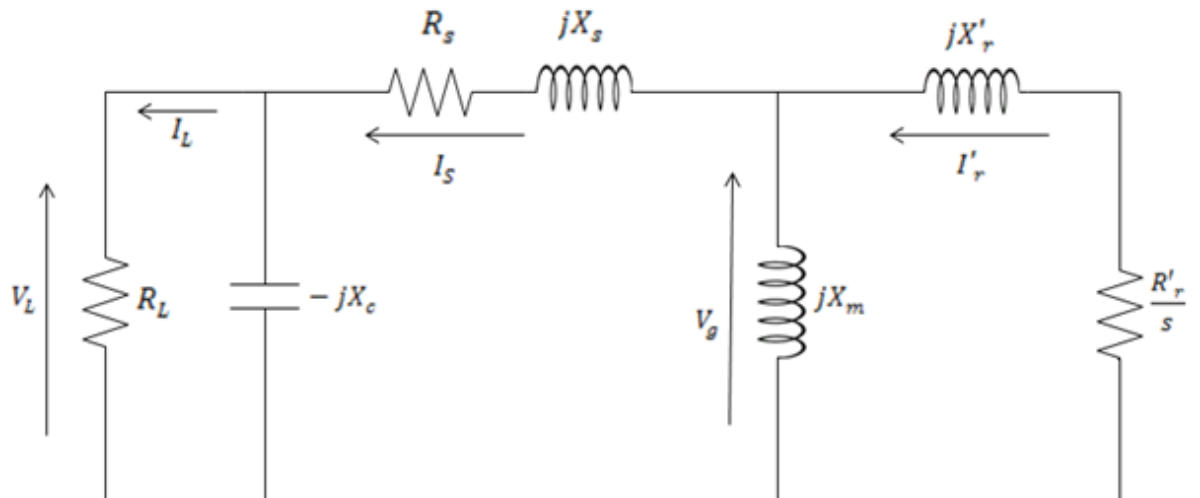


Figura 3.3 – Circuito equivalente por fase de uma máquina de indução com a adição da carga e do banco de capacitores.

Para o qual:

X_c – Reatância do banco de capacitores

R_L – Resistência de carga

O circuito mostrado na figura 3.3 possui todos os parâmetros definidos na frequência síncrona do estator. Todavia, no funcionamento proposto neste trabalho, ou seja, como gerador autoexcitado, a frequência de funcionamento pode se alterar. Portanto, devem-se verificar quais

parâmetros variam com a frequência e em seguida corrigi-los de forma adequada. Para isso, basta adicionar o termo f_{pu} (frequência expressa em p.u.) às respectivas expressões.

Sendo:

$$f_{pu} = \frac{f}{f_s}$$

Para obter uma relação para o escorregamento em p.u., é necessário dividir pela velocidade angular de base, ω_s .

$$s = \frac{\omega - \omega'_r}{\omega} = \frac{\frac{\omega}{\omega_s} - \frac{\omega'_r}{\omega_s}}{\frac{\omega}{\omega_s}}$$

Além disso:

$$\frac{\omega}{\omega_s} = \frac{f}{f_s} = f_{pu}$$

$$\frac{\omega'_r}{\omega_s} = \delta$$

Com isso, o escorregamento assume uma nova expressão:

$$s = \frac{f_{pu} - \delta}{f_{pu}}$$

Logo, chega-se, assim, à equação 3.1.

$$\frac{R'_r}{s} = \frac{R'_r f_{pu}}{f_{pu} - \delta} \quad (3.1)$$

Assim, apresenta-se na figura 3.4 o circuito equivalente do gerador de indução definido na frequência do estator, ou seja, as frequências existentes no sistema serão uma fração da frequência síncrona da máquina, que no caso abordado é igual a 60Hz.

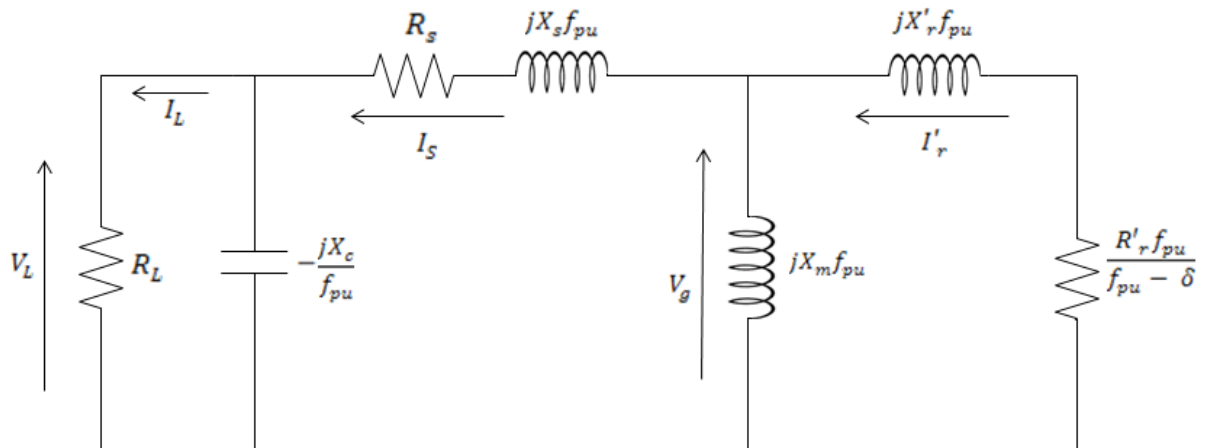


Figura 3.4 – circuito equivalente do gerador de indução definido na frequência do estator.

Para efeito de análise, dividem-se todas as resistências, reatâncias e tensões do circuito equivalente por f_{pu} . Tem-se, portanto, o circuito da figura 3.5.

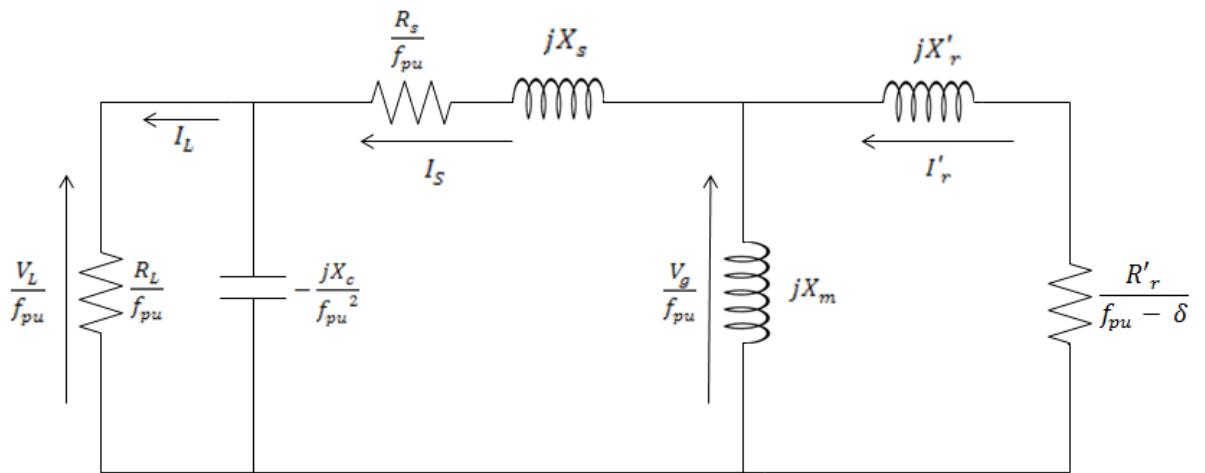


Figura 3.5 – Circuito equivalente do gerador de indução com parâmetros divididos por f_{pu} .

3.3 Análise do circuito equivalente

No circuito mostrado na figura 3.5 não há nenhuma fonte externa aplicada, isso significa que a corrente total multiplicada pela impedância equivalente do circuito deve ser igual a zero, como mostrado na equação 3.2.

$$I_s Z_{eq} = 0 \quad (3.2)$$

Onde, Z_{eq} pode ser obtida pela combinação de $\frac{R'_r}{f_{pu} - \delta} + jX'_r$ em paralelo com jX_m , esse conjunto em série com: $jX_s + \frac{R_s}{f_{pu}}$, tudo isso em paralelo com $\frac{-jX_c}{f_{pu}^2}$ e, também, com R_L .

Ou seja:

$$Z_{eq} = \left(\left(\frac{R'_r}{f_{pu} - \delta} + jX'_r \right) // jX_m + jX_s + \frac{R_s}{f_{pu}} \right) // \left(-\frac{jX_c}{f_{pu}^2} \right) // R_L$$

Logo, como mostrado no apêndice 1:

$$Z_{eq} = \frac{\left(\frac{-jX_c R_L}{f_{pu}^3} \right)}{\left(\frac{R_L}{f_{pu}} - \left(\frac{jX_c}{f_{pu}^2} \right) \right)} + \left(\frac{R_s}{f_{pu}} + jX_s \right) + \frac{jX_m \left(\frac{R'_r}{f_{pu} - \delta} + jX'_r \right)}{\frac{R'_r}{f_{pu} - \delta} + j(X_m + X'_r)} \quad (3.3)$$

Para o modelo utilizado, a corrente I_s é diferente de zero, caso contrário não haveria magnetização da máquina. Logo, através da equação 3.2, conclui-se que a impedância equivalente do circuito Z_{eq} deve ser igual a zero. Assim, a condição de autoexcitação em regime permanente será:

- Parte real de $Z_{eq} = 0$
- Parte imaginária de $Z_{eq} = 0$

Com as seguintes suposições:

$$R_s = R'_r = R$$

$$X_s = X'_r = X$$

Com isso, a partir do anexo A, é possível chegar às expressões 3.4 e 3.5:

$$Re(Z_{eq}) = (-2XR_lX_m - X^2R_L)f_{pu}^3 + (2\delta XR_LX_m + \delta R_LX^2)f_{pu}^2 + \quad (3.4)$$

$$X_c(2R + R_L)X_m + X_cX(2R + R_L) + R_LR^2]f_{pu} + [-\delta X_c(R_L + R)X_m - \delta X_cX(R_L + R)] = 0$$

$$Im(Z_{eq}) = [(2XX_c + 2R_LR)X_m + 2R_LXR + X^2X_c]f_{pu}^2 + \quad (3.5)$$

$$[-\delta(2X_cX + RR_L)X_m - \delta(RR_L + X_cX)X]f_{pu} + X_cR(R_L + R) = 0$$

As equações 3.4 e 3.5 permitem o cálculo dos parâmetros X_m e f_{pu} que serão utilizados com o objetivo de determinar a tensão V_t e as correntes I_L e I_s . A resolução dessas equações pode ser obtida computacionalmente e o desenvolvimento será mostrado no Capítulo 6 – Simulação digital da operação como gerador autoexcitado.

Capítulo 4

4 Obtenção do Modelo: Ensaio em vazio e de rotor bloqueado

A determinação dos parâmetros da máquina de indução trifásica utilizada será imprescindível para a realização das simulações e, do mesmo modo, para a execução do ensaio que promove a autoexcitação.

4.1 Máquina utilizada

A máquina utilizada em todos os ensaios é descrita na tabela 4.1.

Motor de indução trifásico
Fabricante: WEG
Modelo: A56 0297
Potência: 1/3 CV
Possíveis ligações: Δ / Y
Tensão: 220 / 380 V
Corrente: 1,60 / 0,926 A
Velocidade: 1745 rpm
Frequência: 60Hz
Classe de isolamento: B
Fator de sobrecarga: 1,35

Tabela 4.1 – Dados de placa da máquina de indução utilizada.

4.1.1 Esquemas de Ligação

A figura 4.1 ilustra a máquina trifásica operando na configuração Y, enquanto que a figura 4.2 apresenta a configuração Δ .

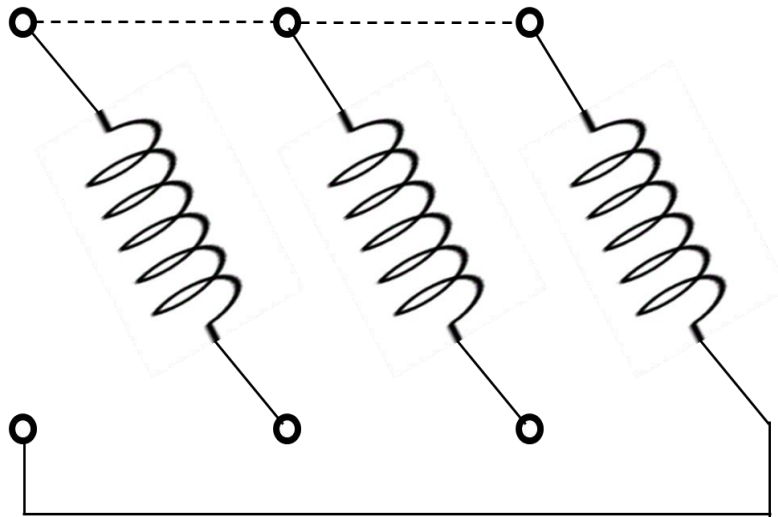


Figura 4.1 – Configuração Y.

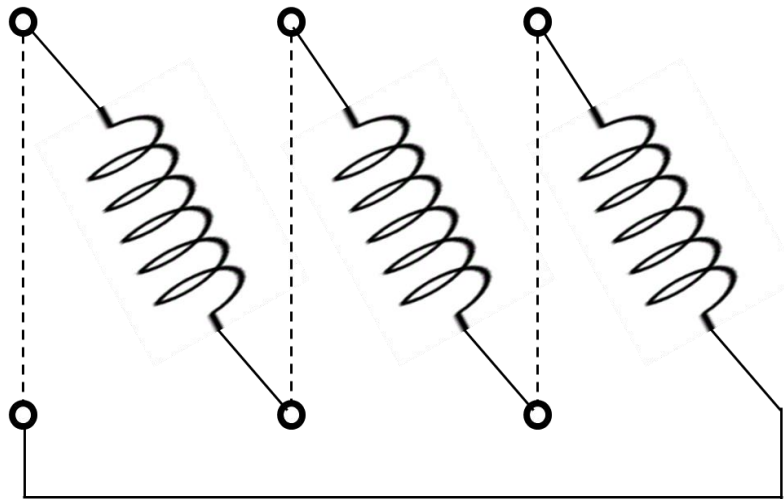


Figura 4.2 – Configuração Δ .

A linha contínua mostra a ligação interna entre as bobinas que representam cada uma das fases. Ao passo que, a linha tracejada é compreendida como a ligação externa, ou seja, conexão através de fios, o que permite os diferentes esquemas.

A configuração utilizada durante os ensaios foi a Y, devido à praticidade da medição e facilidade para realização dos cálculos.

4.2 Ensaios em vazio

4.2.1 Objetivo

O propósito deste ensaio é estimar uma faixa de capacitores que possibilitem a autoexcitação da máquina. Para isso, deve-se obter a curva de magnetização através dos valores de tensão terminal e corrente de excitação.

4.2.2 Material utilizado

- Máquina de indução trifásica ligada em estrela (380V/0,926A)
- Um Multímetro Analyst 2060
- Um Multímetro Fluke 77
- Um Autotransformador variável com tapes (0-440V)
- Uma chave faca trifásica

4.2.3 Experimento

Foram impostas tensões ao estator da máquina, provenientes do autotransformador. Verificou-se que a tensão máxima de fase possível de ser obtida equivale a 120% do valor nominal. Este valor é, possivelmente, admissível para o alcance da região de saturação.

A figura 4.3 ilustra o esquema de montagem e ligações do ensaio.

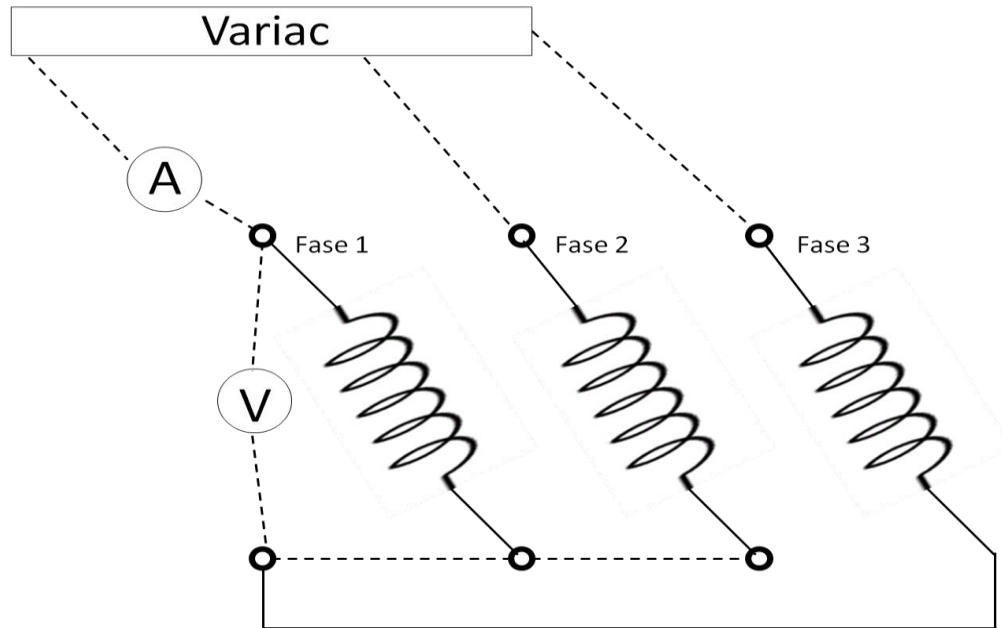


Figura 4.3 – Esquema de ligações.

A obtenção dos dados para as fases 2 e 3 é realizada de forma análoga à mostrada na figura 4.3, diferindo apenas pela mudança de posição dos multímetros.

A tabela 4.2 apresenta as medidas de tensão fase-neutro e corrente de excitação obtida para cada uma das fases.

Ensaio em vazio					
Fase 1		Fase 2		Fase 3	
Tensão [V]	Corrente [A]	Tensão [V]	Corrente [A]	Tensão [V]	Corrente [A]
29,40	0,43	28,60	0,43	28,50	0,43
40,30	0,30	39,70	0,29	39,40	0,30
50,20	0,25	49,60	0,23	49,20	0,22
61,00	0,23	60,10	0,22	59,90	0,20
70,30	0,24	69,30	0,22	68,90	0,21
81,40	0,25	81,00	0,24	80,00	0,23
90,70	0,26	89,80	0,25	89,10	0,24
101,40	0,28	100,70	0,27	99,80	0,25
111,40	0,30	110,10	0,28	109,50	0,27
122,50	0,32	121,60	0,31	120,70	0,29
130,80	0,34	131,20	0,33	128,90	0,32
141,30	0,37	140,00	0,36	138,80	0,34
150,60	0,40	149,80	0,39	149,10	0,38
162,80	0,43	162,00	0,42	160,80	0,40
171,00	0,45	170,20	0,44	169,30	0,43
182,50	0,50	181,50	0,49	179,90	0,46
191,10	0,52	190,20	0,53	188,60	0,50
202,60	0,56	201,60	0,56	199,40	0,53
211,10	0,59	209,80	0,59	208,50	0,57
222,10	0,65	220,80	0,65	219,50	0,63
232,00	0,70	231,00	0,70	229,80	0,68
241,80	0,76	240,50	0,77	239,20	0,73
252,10	0,85	250,30	0,84	248,70	0,82
260,50	0,92	259,30	0,92	257,60	0,89
262,30	0,94	262,00	0,94	260,20	0,93

Tabela 4.2 – Parâmetros do ensaio em vazio.

Os primeiros valores da tabela 4.2 não devem ser utilizados para a elaboração da curva de magnetização, haja vista que o rotor da máquina ainda não possuía rotação e, por isso, as correntes diminuía com a variação positiva de tensão.

A tabela 4.3 expõe as tensões e correntes médias, obtidas da quinta à última linha da tabela 4.2.

Valores médios	
Tensão [V]	Corrente [A]
69,50	0,22
80,80	0,24
89,87	0,25
100,63	0,27
110,33	0,28
121,60	0,31
130,30	0,33
140,03	0,36
149,83	0,39
161,87	0,42
170,17	0,44
181,30	0,48
189,97	0,52
201,20	0,55
209,80	0,58
220,80	0,64
230,93	0,69
240,50	0,75
250,37	0,84
259,13	0,91
261,50	0,94

Tabela 4.3 – Valores médios dos parâmetros do ensaio em vazio.

4.2.4 Curva de magnetização

A curva de magnetização é obtida diretamente dos pontos da tabela 4.2, haja vista que a tensão de entreferro é próxima à tensão terminal. Isso pode ser justificado pela queda de tensão nos enrolamentos do estator ser pequena. A curva citada é apresentada, em pontilhado, na figura 4.4. Os asteriscos representam os pontos da tabela 4.3, enquanto que a linha consiste na curva que realiza a aproximação da função discreta fornecida, por uma função contínua, utilizando interpolação, através do comando polyfit do MATLAB, a partir dos pontos da tabela 4.3.

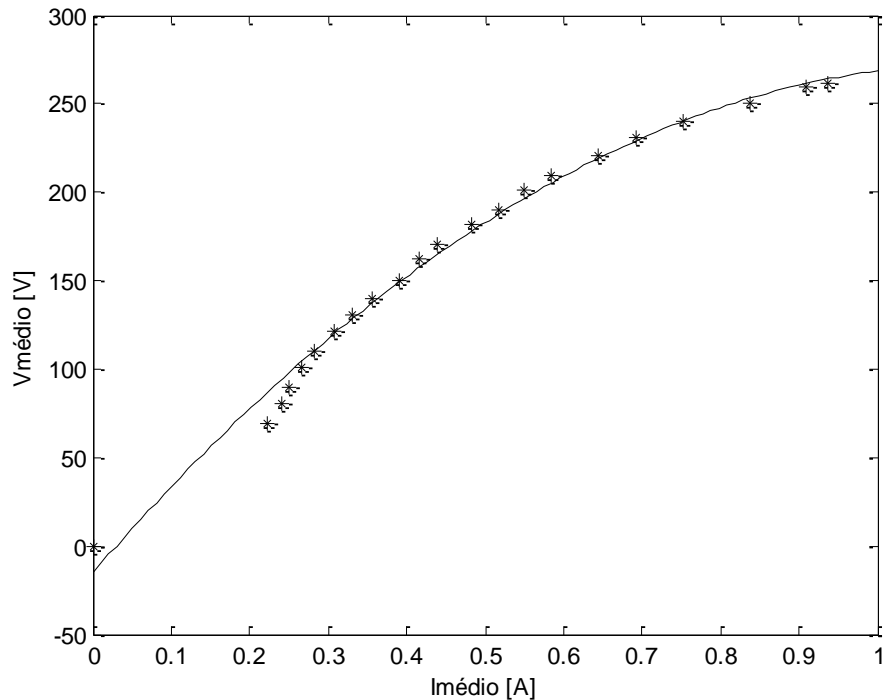


Figura 4.4 – Curva de magnetização.

Os primeiros quatro pontos da tabela foram excluídos devido ao comportamento inicial da máquina, que apenas teve movimento para tensões maiores que 60 V. Portanto, o mais conveniente seria mover o rotor com outra máquina síncrona e, neste caso, toda a curva de magnetização em vazio seria obtida, permitindo a tomada de dados desde a corrente de

magnetização igual a zero, não sendo necessária a retirada dos pontos que ainda não tinham rotação.

4.2.5 Determinação da faixa de capacitores necessária para a autoexcitação

Como visto no item 3.1, a definição do valor mínimo de capacitância é necessária devido à reatância capacitiva ser, obrigatoriamente, menor que a reatância associada à linha de entreferro (região linear da curva de magnetização), caso contrário, a autoexcitação não seria possível. Enquanto que a capacitância máxima é limitada por um valor de reatância para a qual a corrente do estator não exceda o seu valor nominal em vazio.

A figura 4.5 exibe a reta que representa a reatância de magnetização em vazio e, por isso, o valor mínimo de capacitância e máximo de reatância capacitiva, além da curva de magnetização.

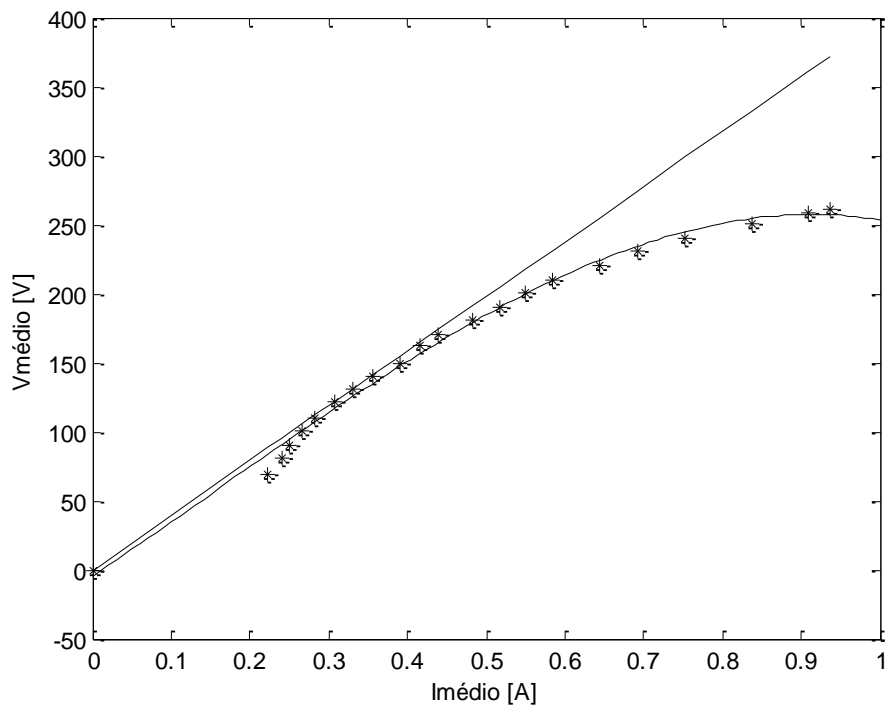


Figura 4.5 – Curva de magnetização e reta que representa o valor mínimo de capacitância.

A figura 4.6 mostra a combinação entre a reta que representa o valor máximo de capacitância e a curva de magnetização. Para efeito de análise, foi adicionada a curva de magnetização.

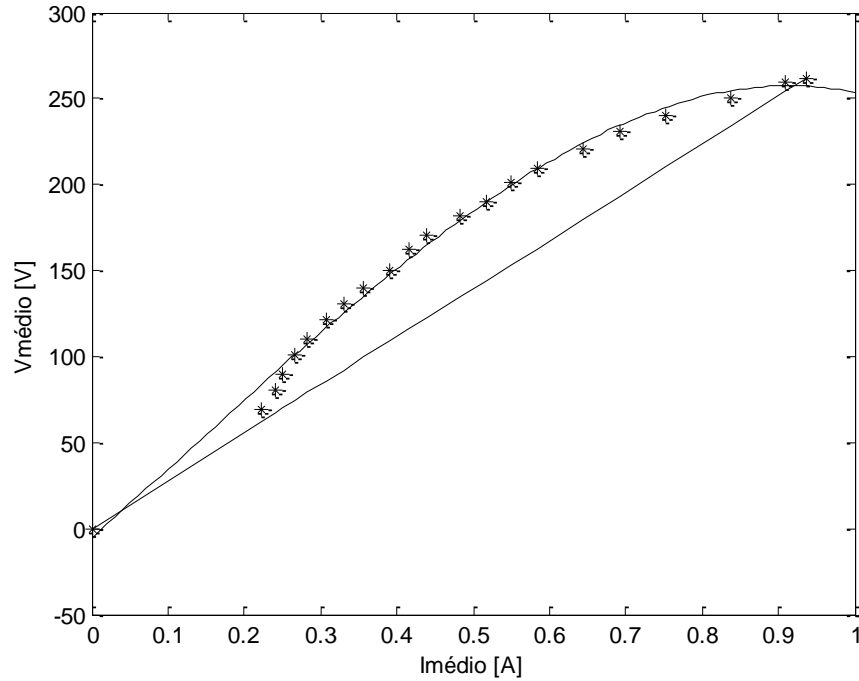


Figura 4.6 – Curva de magnetização e reta que representa o valor máximo de capacitância.

Para a determinação das capacitâncias foi calculado o coeficiente angular das retas que representam as reatâncias mínima e máxima. Com isso, podem-se calcular as capacitâncias limites.

$$X_{Cm\acute{a}x} = 396,52\Omega$$

$$C_{m\acute{i}n} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X_{Cm\acute{a}x}} = \frac{1}{2\pi \cdot 60 \cdot 396,52} = 6,69 \mu F$$

$$X_{Cm\acute{i}n} = 279,18 \Omega$$

$$C_{m\acute{a}x} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X_{Cm\acute{i}n}} = \frac{1}{2\pi \cdot 60 \cdot 279,18} = 9,50 \mu F$$

4.3 Ensaio de rotor bloqueado

4.3.1 Objetivo

O propósito deste ensaio é determinar as reatâncias de dispersão e as resistências estatóricas e rotóricas, com todos os parâmetros referidos ao estator da máquina.

4.3.2 Material utilizado

- Máquina de indução trifásica ligada em estrela (380V/0,926A)
- Um Multímetro Analyst 2060
- Um Autotransformador variável com tapes (0-440V)
- Uma chave faca trifásica
- Diversos cabos para as ligações.

4.3.3 Experimento

Primeiramente, trava-se o rotor da máquina com algum artefato que impeça completamente o movimento. No ensaio descrito, uma chave de grifo foi utilizada.

Em seguida, com o auxílio do autotransformador variável, aplica-se uma pequena tensão nos terminais do estator, aumentando gradativamente até que se alcance a corrente nominal. Com isso, realizam-se medições de tensão, corrente, potência aparente, potência ativa e fator de potência. O esquema de ligações é mostrado na figura 4.7.

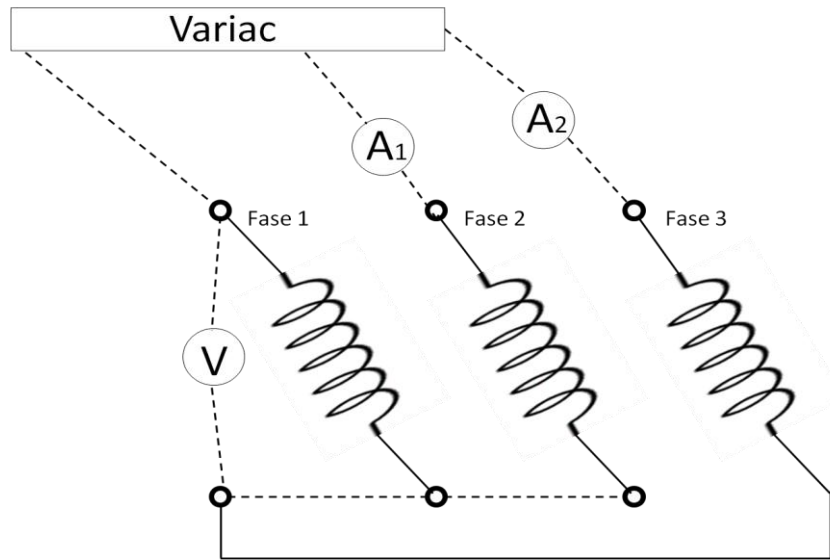


Figura 4.7 – Esquema de ligações do ensaio de rotor bloqueado.

Deve-se salientar que a configuração utilizada é a estrela, o que permite a tomada dos dados de fase, inclusive potência. Entretanto, o multímetro utilizado não permite a leitura de potência diretamente, ou seja, não é possível sua obtenção com as ponteiros conectadas na mesma fase que o alicate amperímetro. A solução encontrada é a seguinte: para cada tomada de tensão fase-neutro – conexão das ponteiros com cada uma das fases, sendo estas coincidentes com os terminais da máquina – o sensor de corrente deve ser colocado em cada uma das outras duas fases, e as informações devem ser lidas para ambas, de modo que os dados encontrados são expostos na tabela 4.4.

Ensaio de rotor bloqueado					
Fase 1		Fase 2		Fase 3	
V_1	58,2 V	V_2	57,3 V	V_3	56,9 V
I_{12}	0,87 A	I_{21}	0,89 A	I_{31}	0,92 A
I_{13}	0,86 A	I_{23}	0,87 A	I_{32}	0,89 A
FP_{12}	0,893	FP_{21}	0,048	FP_{31}	0,842
FP_{13}	0,039	FP_{23}	0,835	FP_{32}	0,074
P_{12}	45 W	P_{21}	2 W	P_{31}	43 W
P_{13}	1 W	P_{23}	41 W	P_{32}	3 W
S_{12}	51 VA	S_{21}	51 VA	S_{31}	52 VA
S_{13}	51 VA	S_{23}	49 VA	S_{32}	51 VA

Tabela 4.4 – Parâmetros do ensaio de rotor bloqueado.

Como o sistema é tido, supostamente, como balanceado, podem-se determinar as seguintes relações:

$$|S_1| = |S_{12}| = |S_{13}| \quad (4.1)$$

$$P_1 = P_{12} + P_{13} \quad (4.2)$$

$$FP_1 = FP_{12} + FP_{13} \quad (4.3)$$

Que podem ser demonstradas:

Tensões e correntes aplicadas:

$$\begin{array}{ll} \dot{V}_1 = V \angle 0^\circ & \dot{I}_1 = I \angle \alpha \\ \dot{V}_2 = V \angle -120^\circ & \longrightarrow \dot{I}_2 = I \angle (\alpha - 120^\circ) \\ \dot{V}_3 = V \angle 120^\circ & \dot{I}_3 = I \angle (\alpha + 120^\circ) \end{array}$$

Potência aparente na fase 1:

$$\begin{array}{l} \dot{S}_1 = \dot{V}_1 \dot{I}_1^* \\ \dot{S}_{12} = \dot{V}_1 \dot{I}_2^* \\ \dot{S}_{13} = \dot{V}_1 \dot{I}_3^* \end{array} \longrightarrow \begin{array}{l} |S_1| = VI \\ |S_{12}| = VI \\ |S_{13}| = VI \end{array}$$

Logo,

$$|S_1| = |S_{12}| = |S_{13}|$$

Potência ativa na fase 1:

$$P_1 = V_1 I_1 \cos -\alpha = VI \cos \alpha$$

Potência medida com a tensão da fase 1 e corrente da fase 2:

$$P_{12} = VI \cos(120^\circ - \alpha)$$

$$P_{12} = VI (\cos 120^\circ \cos \alpha + \text{sen } 120^\circ \text{sen } \alpha)$$

$$P_{12} = VI \left(-\frac{1}{2} \cos \alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} \text{sen } \alpha \right)$$

Potência medida com a tensão da fase 1 e corrente da fase 3:

$$P_{13} = VI \cos(-120^\circ - \alpha)$$

$$P_{13} = VI (\cos(-120^\circ) \cos(-\alpha) - \text{sen}(-120^\circ) \text{sen}(-\alpha))$$

$$P_{13} = VI \left(-\frac{1}{2} \cos \alpha - \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \text{sen}(-\alpha) \right)$$

$$P_{13} = VI \left(-\frac{1}{2} \cos \alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} \text{sen } \alpha \right)$$

Então,

$$P_{12} + P_{13} = -VI \cos \alpha = -P_1$$

Para eliminar o sinal negativo, necessita-se inverter a conexão das ponteiros do multímetro ou do sensor de corrente.

Similarmente:

$$FP_{12} + FP_{13} = FP_1$$

As equações 4.1, 4.2 e 4.3 são análogas para as outras fases.

Com isso, constrói-se a tabela 4.5:

Ensaio de rotor bloqueado					
Fase 1		Fase 2		Fase 3	
V_1	58,2 V	V_2	57,3 V	V_3	56,9 V
I_1	0,90 A	I_2	0,88 A	I_3	0,87 A
S_1	51 VA	S_2	50 VA	S_3	52 VA
P_1	46 W	P_2	43 W	P_3	46 W
FP_1	0,932	FP_2	0,883	FP_3	0,916

Tabela 4.5 – Parâmetros simplificados para o ensaio de rotor bloqueado.

4.3.4 Cálculo dos parâmetros

Neste ensaio, podem-se desprezar os parâmetros transversais da máquina, ou seja, a reatância de magnetização, haja vista que a resistência de perdas no núcleo já foi considerada nula no início do projeto.

O bloqueio do rotor impede que haja movimento, logo a velocidade rotórica é nula, por conseguinte, o escorregamento é unitário, como mostrado a partir da equação 2.5.

$$s = \frac{\omega_s - \omega'_r}{\omega_s} = \frac{\omega_s - 0}{\omega_s}$$

$$s = 1$$

Partindo, então, das considerações citadas, tem-se o circuito apresentado na figura 4.8.

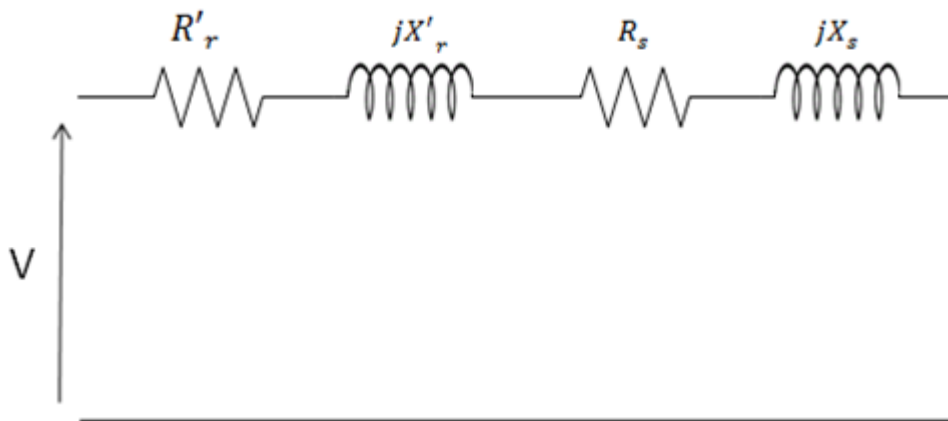


Figura 4.8 – Circuito equivalente relativo ao ensaio de rotor bloqueado.

Os parâmetros longitudinais da máquina podem ser obtidos a partir das medidas realizadas no ensaio, com as seguintes relações:

$$R_{total} = R_s + R'_r \quad (4.4)$$

$$R_{total} = \frac{P}{I^2} \quad (4.5)$$

$$X_{total} = X_s + X'_r \quad (4.6)$$

$$V = ZI \quad (4.7)$$

$$X_{total} = \sqrt{Z^2 - R^2_{total}} \quad (4.8)$$

Desta maneira:

$$(R_{total})_1 = \frac{P_1}{I_1^2} = \frac{46}{0,90^2} = 56,79 \Omega$$

$$(R_{total})_2 = \frac{P_2}{I_2^2} = \frac{43}{0,88^2} = 55,53 \Omega$$

$$(R_{total})_3 = \frac{P_3}{I_3^2} = \frac{46}{0,87^2} = 60,77 \Omega$$

$$(R_{total})_{medio} = \frac{56,79 + 55,53 + 60,77}{3} = 57,70 \Omega$$

$$R_s = R'_r = 28,85 \Omega$$

$$Z_1 = \frac{V_1}{I_1} = \frac{58,2}{0,90} = 64,67 \Omega$$

$$Z_2 = \frac{V_2}{I_2} = \frac{57,3}{0,88} = 65,11 \Omega$$

$$Z_3 = \frac{V_3}{I_3} = \frac{56,9}{0,87} = 65,40 \Omega$$

$$(X_{total})_1 = \sqrt{Z_1^2 - (R_{total})_1^2} = \sqrt{64,67^2 - 56,79^2} = 30,94 \Omega$$

$$(X_{total})_2 = \sqrt{Z_2^2 - (R_{total})_2^2} = \sqrt{65,11^2 - 55,53^2} = 34,00 \Omega$$

$$(X_{total})_3 = \sqrt{Z_3^2 - (R_{total})_3^2} = \sqrt{65,40^2 - 60,77^2} = 24,17 \Omega$$

$$(X_{total})_{medio} = \frac{30,94 + 34,00 + 24,17}{3} = 29,70 \Omega$$

$$X_s = X'_r = 14,85 \Omega$$

Parâmetros de base para a máquina de 1/3 cv, 380 V:

$$S_{base_{1f}} = \frac{1}{3} \times \frac{1}{3} \times 735,5 = 81,72 VA$$

$$V_{base_{fn}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 V$$

$$Z_{base} = \frac{220^2}{81,72} = 592,27 \Omega$$

Valores em p.u.:

$$R_{spu} = R'_{rpu} = \frac{28,85}{592,27} = 0,049 pu$$

$$X_{spu} = X'_{rpu} = \frac{14,85}{592,27} = 0,025 pu$$

Com a determinação dos valores por unidade das resistências e reatâncias, que são variáveis do problema, torna-se possível a solução das equações 3.4 e 3.5, como será apresentada no Capítulo 6 – Simulação digital da operação como gerador autoexcitado.

Capítulo 5

5 Ensaio com gerador autoexcitado

5.1 Objetivo

Comprovar o fenômeno da autoexcitação utilizando diferentes valores de carga e, com a realização de medidas, ilustrar o desempenho da máquina funcionando como gerador.

5.2 Material utilizado

- Máquina de indução trifásica ligada em estrela (380 V / 0,926 A; 1/3 CV), atuando como gerador.
- Máquina de indução trifásica ligada em delta (220 V/6,6 A; 2 CV), atuando como motor.
- Um Multímetro Analyst 2060.
- Um Multímetro Fluke 77.
- Um Multímetro Fluke 75.
- Um tacômetro Minipa MDT-2236A.
- Três réguas para conexão das lâmpadas ao circuito.
- Seis lâmpadas incandescentes de 25 W, 40 W e 60 W, resultando em dezoito lâmpadas no total.
- 3 conjuntos de capacitores, cada um com 5, 10 e 20 μF .
- Um Inversor trifásico Weg CFW 09.
- Diversos cabos para as ligações.

5.3 Considerações iniciais

Para o funcionamento da máquina de indução como gerador, é necessário o fornecimento de energia mecânica para que essa promova a rotação do rotor e, assim, possa ser gerada energia elétrica.

Os motores mais indicados para a aplicação sugerida são os de corrente contínua, haja vista a facilidade na fixação da velocidade. Entretanto, devido à inexistência, em laboratório, de motores desse tipo e que fossem compatíveis à máquina principal, foi utilizado um motor de indução de potência seis vezes maior que a do gerador, o que permite que variações de carga não causem grandes mudanças na velocidade.

Todavia, a ligação direta da rede ao motor de indução impossibilita a operação acima de 1800 rpm, que representa a velocidade síncrona para aplicação de 60 Hz e 4 polos. Ou seja, na ausência de um inversor, o gerador não é capaz de criar tensões com frequência superior ou igual a 60 Hz, devido ao escorregamento maior que zero no funcionamento como motor e, por isso, velocidade inferior a 1800 rpm no rotor do gerador, este com escorregamento negativo.

O ajuste da frequência de saída do inversor foi realizado manualmente, através dos botões acoplados.

5.4 Experimentos realizados

Foram realizados diversos ensaios com o inversor de frequência alimentando o motor de indução, com esse por sua vez acionando o gerador, para que, finalmente, a carga fosse atendida.

Sendo assim, os experimentos realizados foram:

- Verificação da capacitância mínima para a autoexcitação em vazio.

- Análise do comportamento do conjunto para velocidade e capacitância constante com carga variável, tendo sido realizado para duas diferentes associações de capacitores. Foi observada, inclusive, a maior carga suportável, sem perda da excitação.

- Avaliação do desempenho para carga e capacitância fixa e velocidade ajustável.

5.4.1 Esquema experimental - bancada de testes

Todo o sistema, funcionando, pode ser visto na figura 5.1, ao passo que, a figura 5.2 ilustra o esquemático das ligações.



Figura 5.1 – Sistema ensaiado.

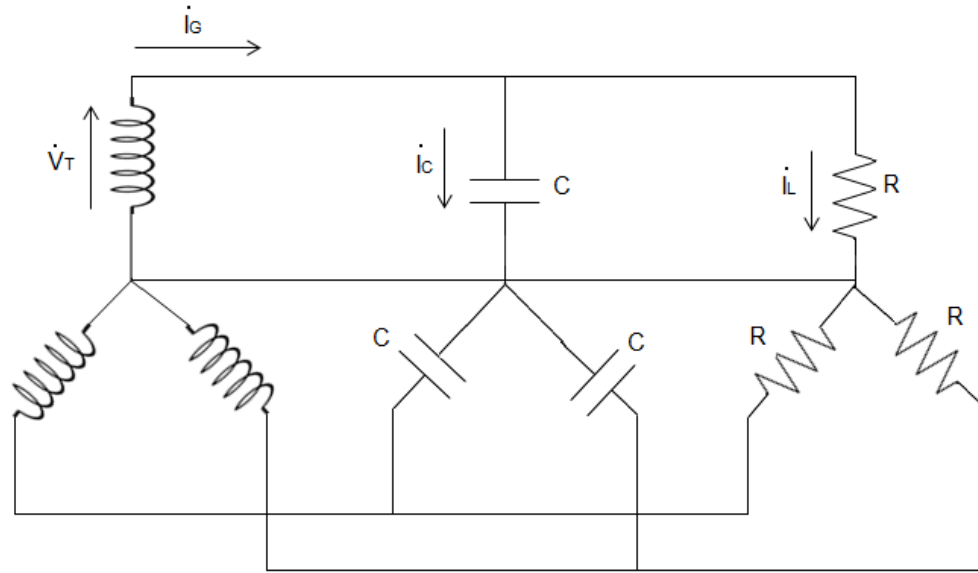


Figura 5.2 – Esquema de ligações referente ao sistema ensaiado.

5.4.2 Capacitância mínima para autoexcitação sem carga

Com o inversor acionando o motor a uma velocidade de 1820 rpm, foram colocados à prova valores decrescentes de capacitância a partir de $9,375 \mu\text{F}$. Ressalta-se, que os valores disponíveis resultam de combinações série e paralelo dos capacitores de 5 , 10 e $20 \mu\text{F}$. Logo, obteve-se:

C [μF]	Condição
$9,375 = ((5+10)//(5+20))$	Mantém magnetização
$7,5 = ((5+10)//(5+10))$	Mantém magnetização
$7,14 = (20+5)//10$	Mantém magnetização
$6,66 = 20//10$	Não mantém magnetização

Tabela 5.1 – Capacitância mínima disponível.

Como previsto no item 4.2.5, não foi possível excitar a máquina com valores de capacitância inferiores a $6,69 \mu\text{F}$.

5.4.3 Carga variável e velocidade constante

Nesta etapa foram utilizados diferentes valores de carga, com rotação fixada pelo inversor, para dois valores diferentes de capacitância.

O cálculo das resistências das cargas é feito pela razão entre o quadrado da tensão terminal e a potência nominal das lâmpadas.

$$R = \frac{V^2}{P}$$

- Capacitância de 9,375 μ F e rotação em torno de 1885 rpm.

Os valores médios, das três fases, obtidos são apresentados na tabela 5.2. Vale ressaltar que as tensões mostradas são medidas entre fase e neutro.

Carga (W)	Carga (Ω)	Tensão de entrada [V]	Corrente do gerador [A]	Corrente nos capacitores [A]	Corrente na carga [A]	fs [Hz]	ω_r [rpm]
vazio	3998,90	261,23	0,95	0,95	0,07	62,2	1888
25	2416,71	245,80	0,87	0,87	0,12	61,7	1885
40	1390,87	235,87	0,84	0,82	0,17	61,4	1884
65	699,49	213,23	0,76	0,72	0,26	60,8	1882

Tabela 5.2 – Dados obtidos para capacitância de 9,375 μ F.

Como, na prática, há o aparecimento de corrente de carga, mesmo para o circuito sem lâmpadas nos terminais, devido às conexões, a carga para esse ponto será considerada, para construção gráfica, como a razão entre a tensão de entrada e a corrente na carga.

Para valores de carga maiores que 65 W a máquina perde a excitação. Com isso, a faixa de valores de carga para a capacitância utilizada ficou muito estreita, fato que pode ser explicado pelas perdas adicionais na montagem, como resistência dos cabos, harmônicos provenientes do inversor e vibração do conjunto que era sustentado por uma mesa.

As figuras 5.3 a 5.7 exibem o comportamento das grandezas medidas em função da resistência de carga conectada.

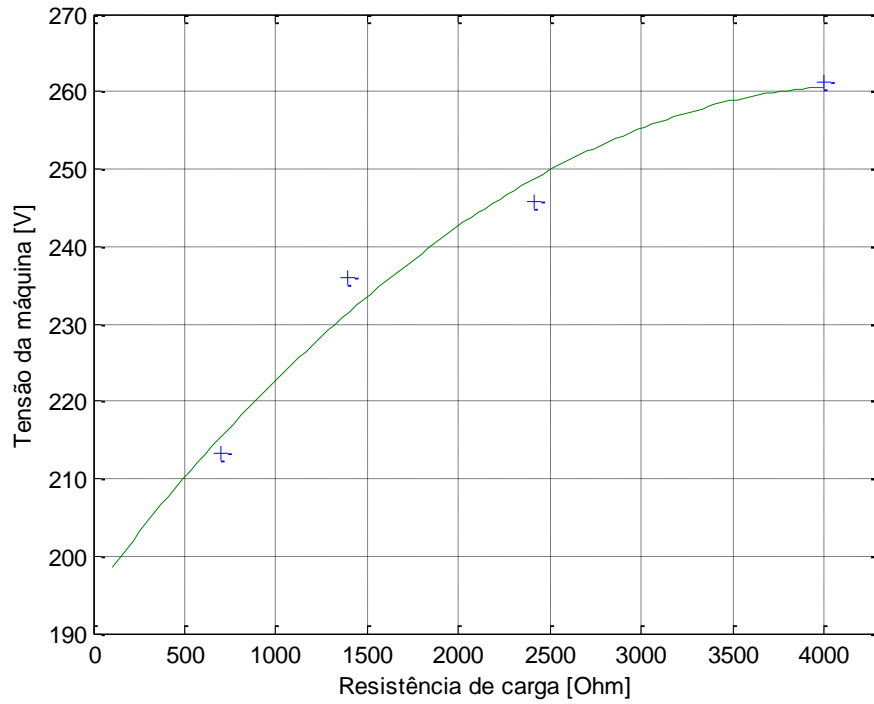


Figura 5.3 – Tensão terminal x Resistência de carga.

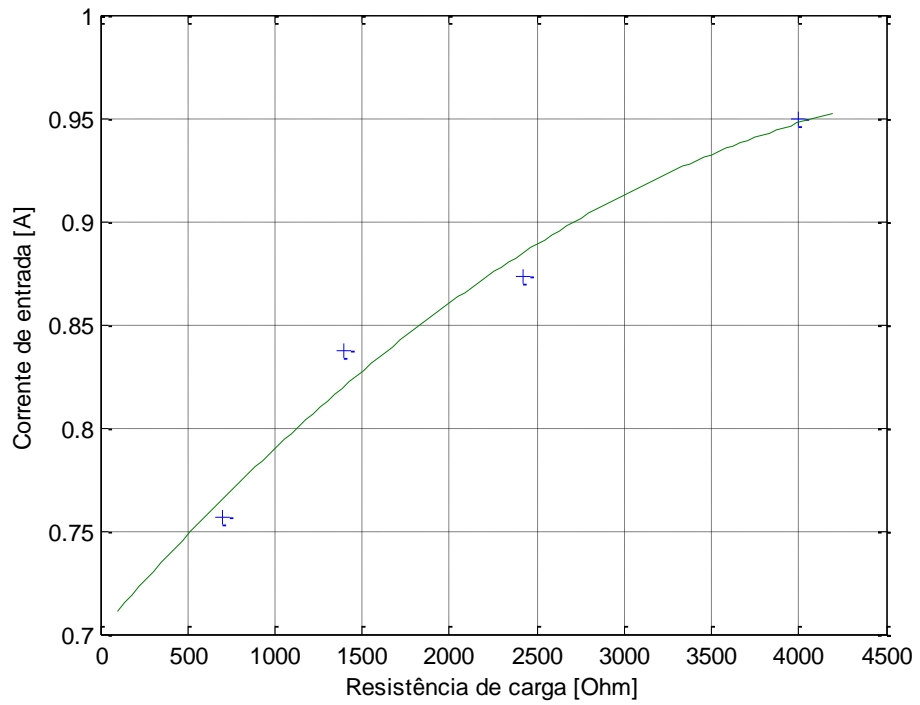


Figura 5.4 – Corrente da máquina x Resistência de carga.

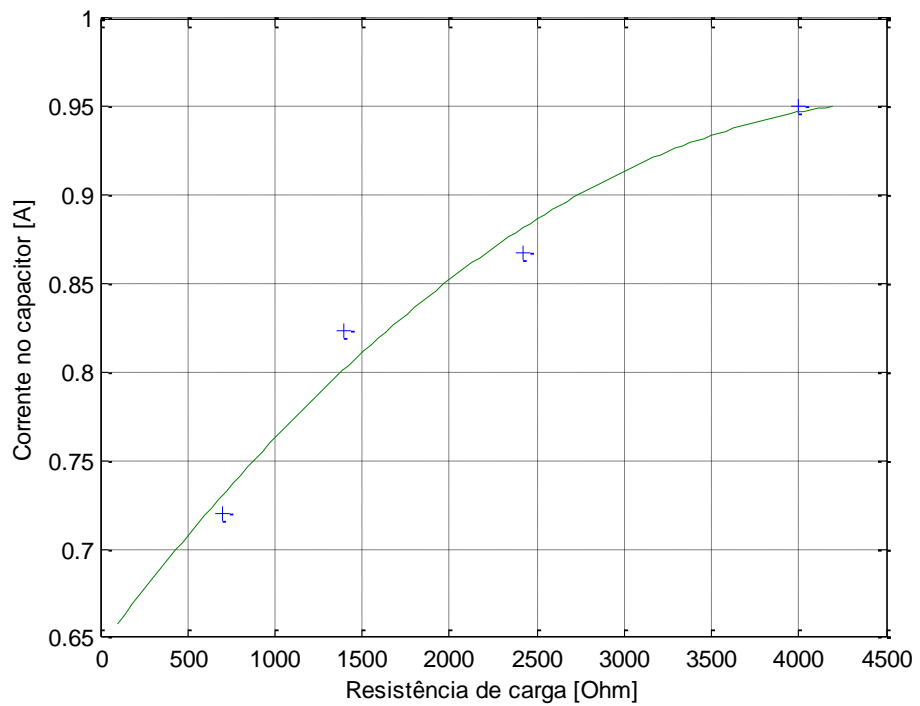


Figura 5.5 – Corrente no capacitor x Resistência de carga.

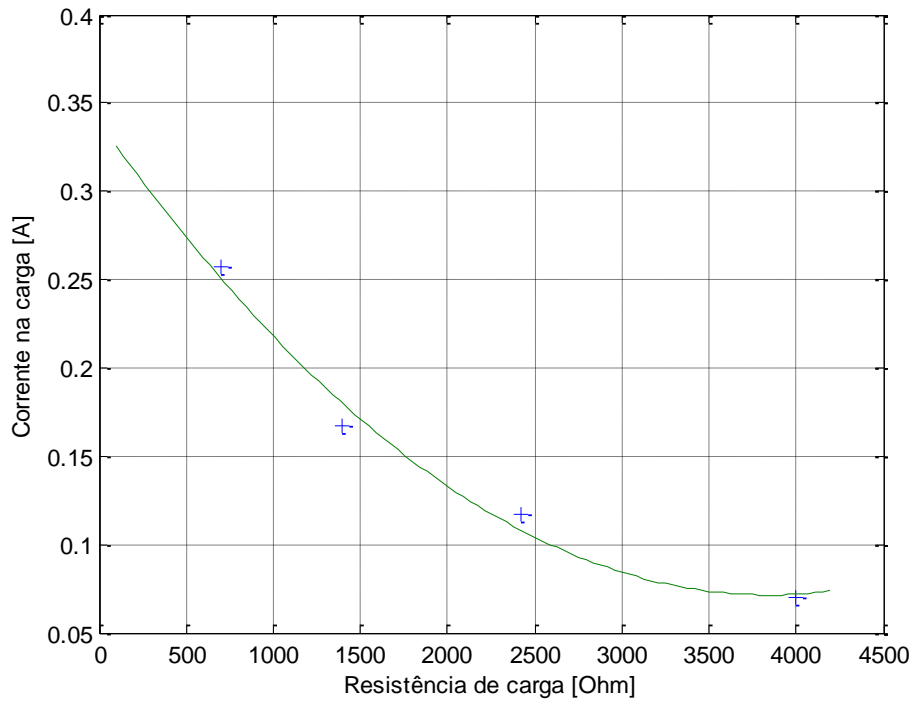


Figura 5.6 – Corrente na carga x Resistência de carga.

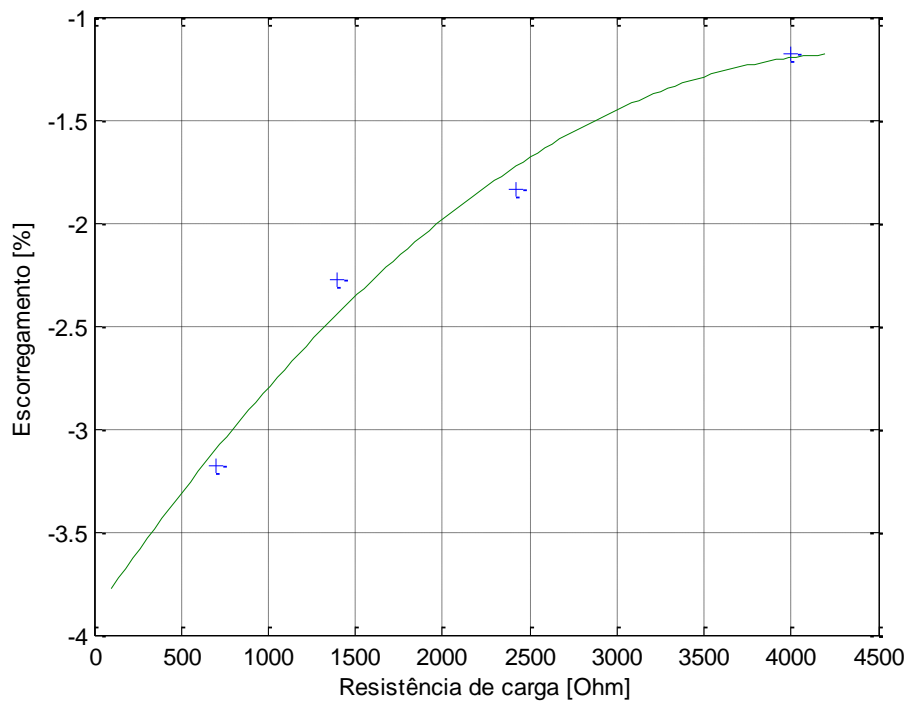


Figura 5.7 – Escorregamento x Resistência de carga.

Ao aumentar a resistência de carga, o que significa menor potência, a corrente na carga diminui, causando uma variação na corrente do gerador, reduzindo o fluxo contrário que interage com o da máquina, diminuindo, em módulo, o escorregamento. Em consequência, há o aumento no módulo das correntes dos capacitores e, devido a isso, a corrente do gerador se estabelece em um valor, em módulo, maior, apesar da menor componente real.

Portanto, o comportamento observado no experimento condiz com o teórico.

- Capacitância de 12,5 μ F e rotação em torno de 1875 rpm.

Com o objetivo de atingir maiores valores de carga, o ensaio foi repetido para um valor de capacitância de 12,5 μ F. Deve-se monitorar a corrente da máquina para que não seja muito elevada, se comparada a corrente nominal.

Carga (W)	Carga (Ω)	Tensão de entrada [V]	Corrente do gerador [A]	Corrente nos capacitores [A]	Corrente na carga [A]	fs [Hz]	ω_r [rpm]
Vazio	6729,53	289,37	1,39	1,39	0,04	61,4	1878
25	3033,14	275,37	1,31	1,29	0,12	60,9	1879
40	1787,57	267,40	1,26	1,25	0,18	60,6	1878
50	1370,47	261,77	1,24	1,21	0,21	60,4	1876
60	1088,86	255,60	1,22	1,17	0,26	60,2	1876
65	975,20	251,77	1,20	1,15	0,27	60,2	1875
80	726,01	241,00	1,16	1,09	0,34	59,8	1874
85	675,78	239,67	1,15	1,08	0,36	59,8	1874
100	512,71	226,43	1,11	1,01	0,43	59,4	1873
110	446,42	221,60	1,12	1,00	0,51	59,3	1872
120	382,60	214,27	1,09	0,94	0,49	59,1	1872
140	253,08	188,23	1,01	0,84	0,57	58,7	1873

Tabela 5.2 – Dados obtidos para ensaio com capacitância de 12,5 μ F.

Os gráficos referentes ao ensaio com capacitância de 12,5 μF serão apresentados em conjunto com os resultados da simulação digital, no capítulo 7 – Comparação entre os resultados.

A máxima carga possível de ser aplicada, para a qual a excitação da máquina fosse mantida, foi a combinação entre duas lâmpadas de 40 W e uma de 60 W, resultando em 140 W.

5.4.4 Carga fixa em 40 W e velocidade variável

O último ensaio proposto visa analisar o desempenho do sistema para variações na rotação e verificar qual a menor velocidade que mantém a excitação da máquina para a carga aplicada.

Carga de 40 W e capacitância de 12,5 μF					
Tensão de entrada [V]	Corrente do gerador [A]	Corrente nos capacitores [A]	Corrente na carga [A]	f_s [Hz]	ω_r [rpm]
228,37	0,91	0,88	0,170	57,9	1782
232,03	0,93	0,92	0,180	58,2	1794
236,30	0,96	0,94	0,170	58,7	1809
241,80	1,00	0,97	0,170	59,3	1828
247,07	1,03	1,01	0,173	59,9	1847
252,27	1,06	1,04	0,180	60,5	1867
259,20	1,11	1,00	0,183	61,3	1892

Tabela 5.3 – Dados obtidos para carga de 40 W, capacitância de 12,5 μF e velocidade variável.

As figuras 5.8 a 5.12 ilustram o comportamento das grandezas medidas em função da rotação imposta ao rotor.

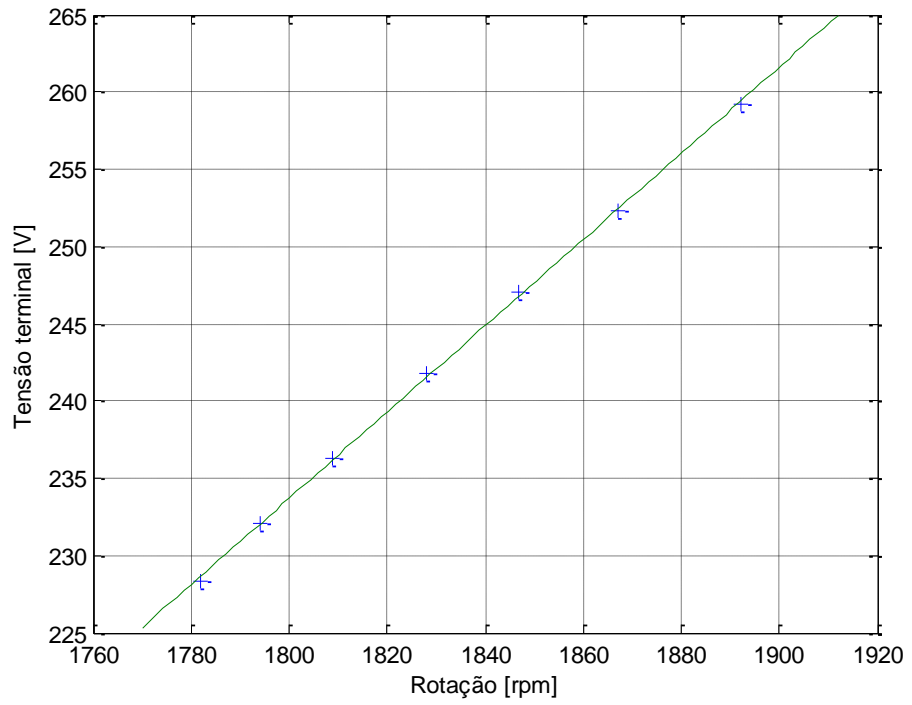


Figura 5.8 – Tensão terminal x Rotação.

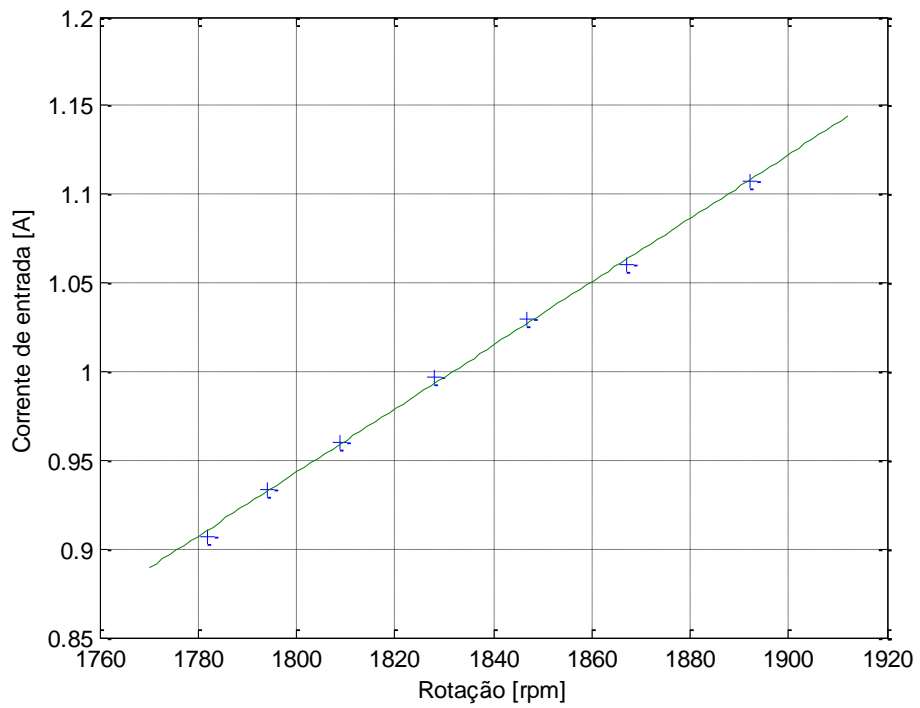


Figura 5.9 – Corrente de entrada x Rotação.

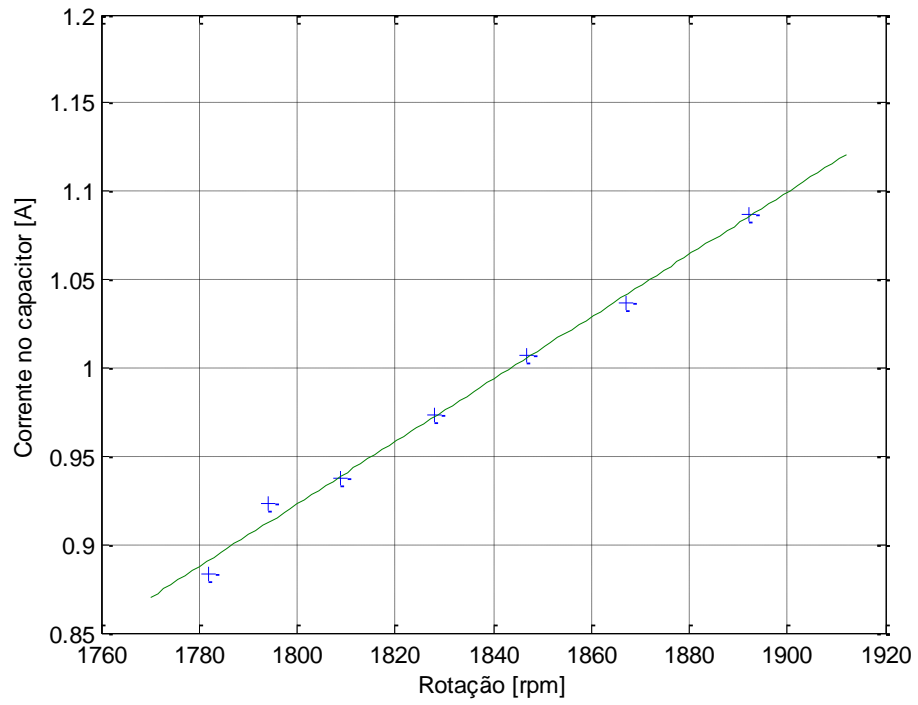


Figura 5.10 – Corrente no capacitor x Rotação.

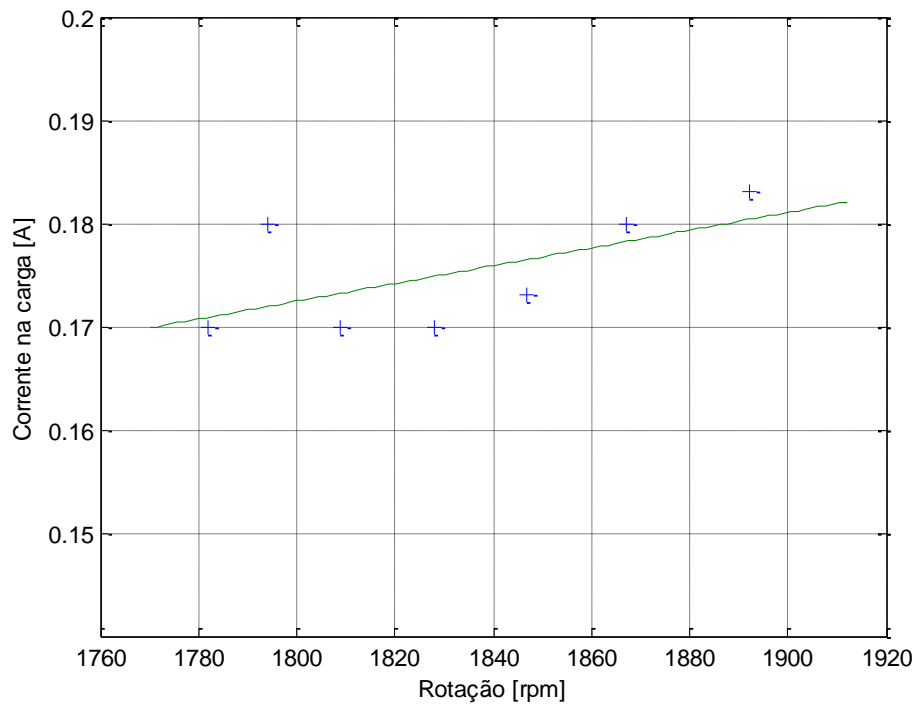


Figura 5.11 – Corrente na carga x Rotação.

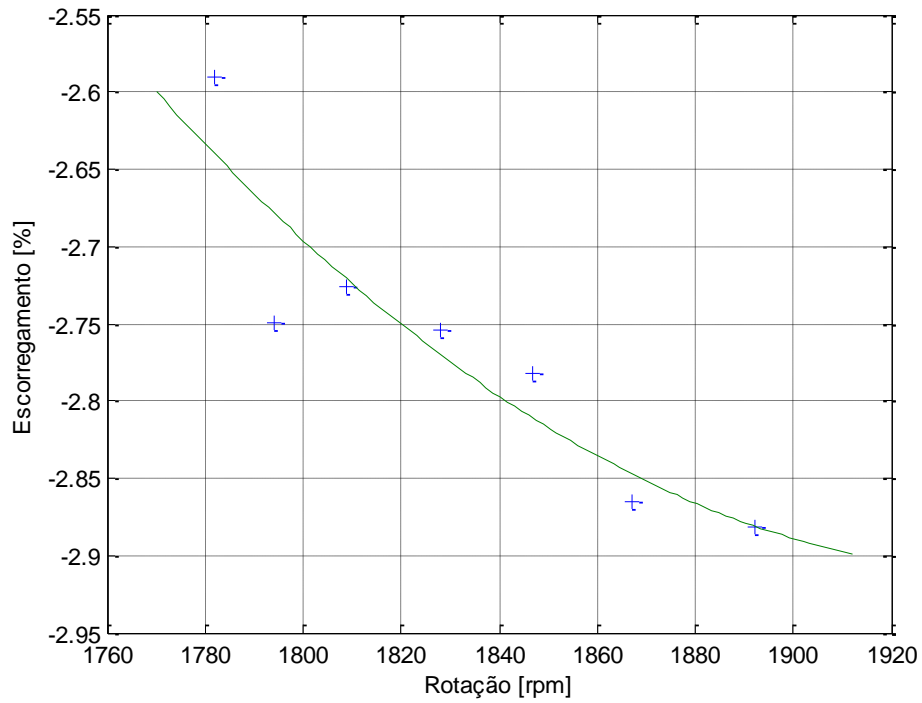


Figura 5.12 – Escorregamento x Rotação.

Devido ao acréscimo na velocidade de rotação, há uma elevação na frequência da tensão de saída e, em consequência, no módulo do escorregamento. O aumento na frequência implica em diminuição da reatância capacitiva, esse efeito causa a elevação da tensão e da corrente da máquina, além da corrente no capacitor e na carga.

Para velocidade angular abaixo de 1780 rpm, os capacitores não foram capazes de manter a excitação da máquina, haja vista o baixo valor de reativo fornecido ao circuito devido à diminuição na frequência.

Capítulo 6

6 Simulação digital da operação como gerador autoexcitado

6.1 Motivação

Resolução das equações 3.4 e 3.5 utilizando os dados obtidos a partir dos ensaios preliminares, tais como parâmetros do circuito equivalente da máquina de indução e capacitâncias utilizadas para a autoexcitação, além dos diferentes valores de carga aplicados. Com isso, é possível comparar a operação real da máquina, obtida por meio do ensaio com capacitores, com os resultados da simulação.

6.2 Método iterativo

Um método iterativo, ou método numérico, tem como objetivo determinar um ou mais valores que são a resolução de um problema, principalmente, quando o cálculo direto é muito longo ou complexo.

Ao contrário de metodologias analíticas, que conduzem a soluções exatas, os métodos iterativos produzem soluções aproximadas. Devido ao exposto, deve-se definir qual a precisão dos cálculos com a qual se pretende obter a solução numérica desejada.

6.3 Forma de cálculo

Devido à complexidade da resolução das equações 3.4 e 3.5, é necessária a utilização de uma solução iterativa, para que a resposta almejada possa ser determinada.

De acordo com o exposto, escolhe-se o método de Newton-Raphson, haja vista sua rápida convergência.

6.3.1 Método de Newton-Raphson

A ideia central no método de Newton-Raphson é a linearização da função a ser calculada via série de Taylor. Como pode ser visto através dos passos a seguir.

1 – Condição inicial – x^i , $i = 0$;

2 – Cálculo do valor da função no ponto x^i : $f(x^i)$

3 – Lineariza-se a função em torno do ponto $(x^i, f(x^i))$ pela série de Taylor, como mostrado:

$$f(x^i + \Delta x^i) = f(x^i) + \left. \frac{df(x)}{dx} \right|_{x^i} \Delta x^i + \dots$$

Para o qual, desprezam-se as derivadas de ordem maior ou igual a dois.

$$f(x^i) + f'(x^i)\Delta x^i = 0$$
$$\Delta x^i = \frac{-f(x^i)}{f'(x^i)}$$

4 – Iteração : $x^{i+1} = x^i + \Delta x^i$ e em seguida volta ao passo 2

O processo deve ser repetido até que $|f(x)| \leq \varepsilon$, sendo ε o valor do erro a ser estipulado. O caso abordado neste trabalho utiliza uma função definida por uma matriz, ou seja, deve-se utilizar a forma multidimensional do método de Newton-Raphson, assim como nos cálculos de fluxo de potência em redes elétricas.

Portanto, emprega-se o seguinte tipo de linearização:

$$f(x^i + \Delta x^i) = f(x^i) + J^i \Delta x^i$$

Onde: $J = [\partial f / \partial x]^{n \times m}$ é chamada de matriz Jacobiana ou Jacobiano.

6.3.2 Resumo do programa

Como foi explicado anteriormente, o objetivo da simulação digital empregada neste trabalho é encontrar a solução das equações 6.1 e 6.2.

$$Re(Z_{eq}) = (-2XR_L X_m - X^2 R_L) f_{pu}^3 + (2\delta X R_L X_m + \delta R_L X^2) f_{pu}^2 + \quad (6.1)$$

$$X_c(2R + R_L)X_m + X_c X(2R + R_L) + R_L R^2] f_{pu} + [-\delta X_c(R_L + R)X_m - \delta X_c X(R_L + R)] = 0$$

$$Im(Z_{eq}) = [(2X X_c + 2R_L R)X_m + 2R_L X R + X^2 X_c] f_{pu}^2 + \quad (6.2)$$

$$[-\delta(2X_c X + R R_L)X_m - \delta(R R_L + X_c X) X] f_{pu} + X_c R(R_L + R) = 0$$

Para que a solução seja obtida é necessária a determinação de alguns parâmetros que servem como dados de entrada, como mostrado na tabela 6.1.

Parâmetro	Obtenção
Reatância de magnetização inicial e capacitância utilizada	Ensaio em vazio
Resistências e reatâncias estatóricas e rotóricas	Ensaio de rotor bloqueado
Resistência de carga e rotação	Ensaio em carga
Tensão de entreferro	Calculada a partir do ensaio em carga

Tabela 6.1 – Parâmetros de entrada da simulação.

Para o cálculo da tensão de entreferro, é utilizada a equação 6.3.

$$\dot{V}_g = \dot{V}_t - \dot{I}_s(R_s + jX_s) \quad (6.3)$$

Com \dot{V}_t e \dot{I}_s determinados pelo ensaio em carga.

O programa soluciona as equações 6.1 e 6.2 para cada valor de carga e tensão fornecidas como entrada, além disso, toma-se como estimativa inicial a frequência de 60 Hz e reatância de magnetização obtida no ensaio em vazio $X_m = 396,52 \Omega$.

Definidos os parâmetros de entrada, é necessário calcular os termos do Jacobiano, para isso, define-se:

$F(X_m, f_{pu})$ corresponde à equação da parte real da impedância equivalente

$G(X_m, f_{pu})$ corresponde à equação da parte imaginária da impedância equivalente

Logo:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial F(X_m, f_{pu})}{\partial X_m} & \frac{\partial F(X_m, f_{pu})}{\partial f} \\ \frac{\partial G(X_m, f_{pu})}{\partial X_m} & \frac{\partial G(X_m, f_{pu})}{\partial f} \end{bmatrix}$$

Definidas as funções $F(X_m, f_{pu})$ e $G(X_m, f_{pu})$, realiza-se o cálculo das derivadas parciais.

$$\frac{\partial F(X_m, f_{pu})}{\partial X_m} = -2 \cdot X \cdot R_L \cdot f_{pu}^3 + 2 \cdot \delta \cdot X \cdot R_L \cdot f_{pu}^2 + X_c(2 \cdot R + R_L)f_{pu} - \delta X_c(R_L + R)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial F(X_m, f_{pu})}{\partial f_{pu}} &= 3(-2 \cdot X \cdot R_L \cdot X_m - R_L \cdot X^2)f_{pu}^2 + 2(2 \cdot \delta \cdot X \cdot R_L \cdot X_m + \delta \cdot R_L \cdot X^2)f_{pu} + \\ &[X_c(2 \cdot R + R_L) \cdot X_m + X_c \cdot X(2R + R_L) + R_L \cdot R^2] \end{aligned}$$

$$\frac{\partial G(X_m, f_{pu})}{\partial X_m} = (2 \cdot X \cdot X_c + 2 \cdot R \cdot R_L)f_{pu}^2 + [-\delta(2 \cdot X_c \cdot X + R_L \cdot R)]f_{pu}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial G(X_m, f_{pu})}{\partial f_{pu}} &= 2[(2 \cdot X \cdot X_c + 2 \cdot R \cdot R_L) \cdot X_m + 2 \cdot R \cdot R_L \cdot X + X_c \cdot X^2]f_{pu} + [-\delta(2 \cdot X \cdot X_c + R \cdot R_L) \cdot X_m \\ &- \delta(X \cdot X_c + R \cdot R_L)X] \end{aligned}$$

Com isso, deve-se resolver, a cada iteração, o sistema 6.4:

$$\begin{bmatrix} H_1(i+1) \\ H_2(i+1) \end{bmatrix} = J^{-1}x \begin{bmatrix} -F(i) \\ -G(i) \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

Então, atualizam-se as variáveis:

$$X_m(i+1) = X_m(i) + H_1(i+1)$$

$$f_{pu}(i + 1) = f_{pu}(i) + H_2(i + 1)$$

A partir dos novos valores de frequência e reatância de magnetização, calculam-se os novos valores das partes real e imaginária da impedância equivalente. Caso o valor encontrado seja menor que a tolerância, então a iteração convergiu e o processo termina com $f_{pu}(i + 1)$ e $X_m(i + 1)$.

Após a convergência é possível determinar os valores das correntes no gerador, na carga e nos capacitores, além da tensão terminal.

$$I_s(i) = \left| \frac{V_g(i)}{R + jX|f_{pu}| - j\left(\frac{X_c}{|f_{pu}|}\right)R_l(i) / \left(R_l(i) - j\left(\frac{X_c}{|f_{pu}|}\right)\right)} \right|$$

$$I_l(i) = \left| -\frac{j\left(\frac{X_c}{|f_{pu}|}\right)I_s(i)}{\left(R_l(i) - j\left(\frac{X_c}{|f_{pu}|}\right)\right)} \right|$$

$$V_t(i) = I_l(i)R_l(i)$$

$$I_c(i) = \frac{V_t(i)}{\left(\frac{X_c}{|f_{pu}|}\right)}$$

6.4 Resultados da simulação

Os resultados obtidos pela simulação para velocidade de 1875 rpm e capacitância de $12,5 \mu\text{F}$ são apresentados na tabela 6.2.

Carga (Ω)	Tensão de entrada [V]	Corrente do gerador [A]	Corrente nos capacitores [A]	Corrente na carga [A]	fs [Hz]
3033,14	268,34	1,28	1,28	0,09	60,58
1787,57	260,56	1,24	1,23	0,15	60,11
1370,47	254,68	1,21	1,20	0,19	60,95
1088,86	248,75	1,19	1,17	0,23	59,78
975,20	244,55	1,17	1,15	0,25	59,67
726,01	233,79	1,13	1,08	0,32	58,90
675,78	232,43	1,13	1,07	0,34	58,75
512,71	218,92	1,09	1,00	0,43	58,07
446,42	214,54	1,09	0,97	0,48	57,67
382,60	205,23	1,07	0,92	0,54	57,17
253,08	176,55	1,04	0,78	0,70	55,92

Tabela 6.2 Resultados da simulação.

Os gráficos e consequentemente a análise dos resultados serão mostrados no capítulo 7– Comparação entre os resultados e conclusões.

Capítulo 7

7 Comparação entre os resultados e conclusões

Neste capítulo são explanados os resultados, tanto do ensaio prático quanto da simulação das equações do circuito equivalente, o que permite a validação do experimento realizado.

As figuras 7.1 a 7.6 elucidam o comportamento das medidas efetuadas em função da resistência de carga conectada, para velocidade de rotação de 1875 rpm e capacitância de $12,5 \mu\text{F}$.

O caractere “*” e o traço contínuo representam o resultado da simulação enquanto que os valores medidos são denotados pelo caractere “+”.

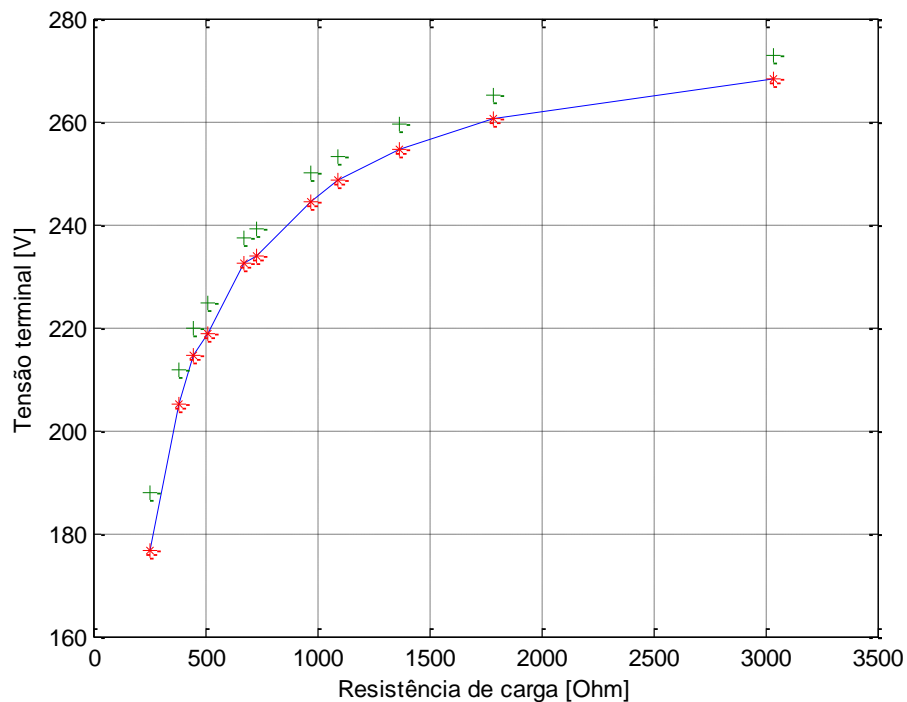


Figura 7.1 – Tensão terminal x Resistência de carga.

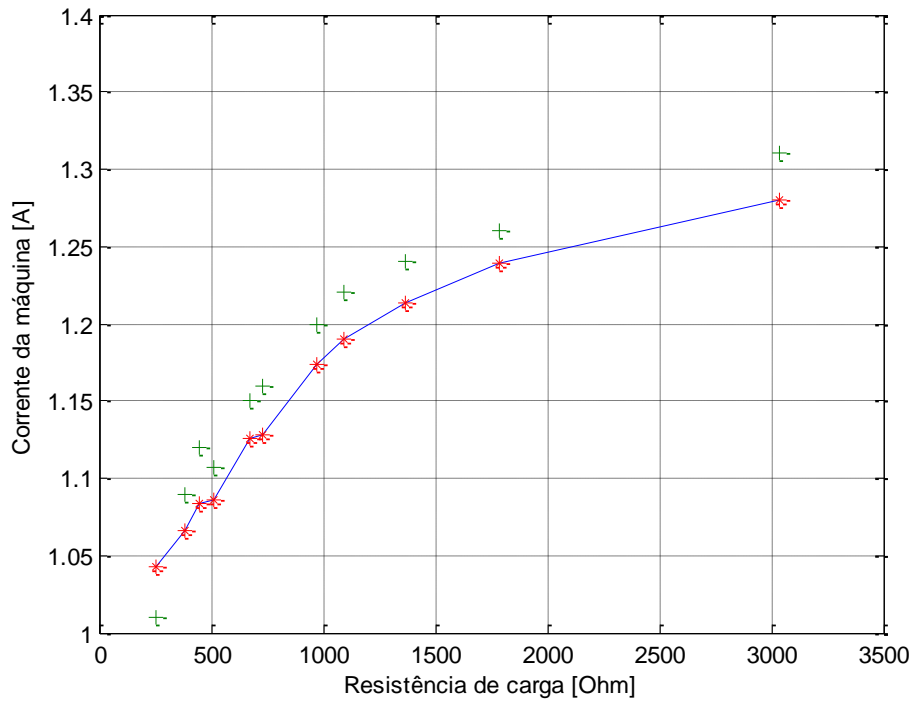


Figura 7.2 – Corrente da máquina x Resistência de carga.

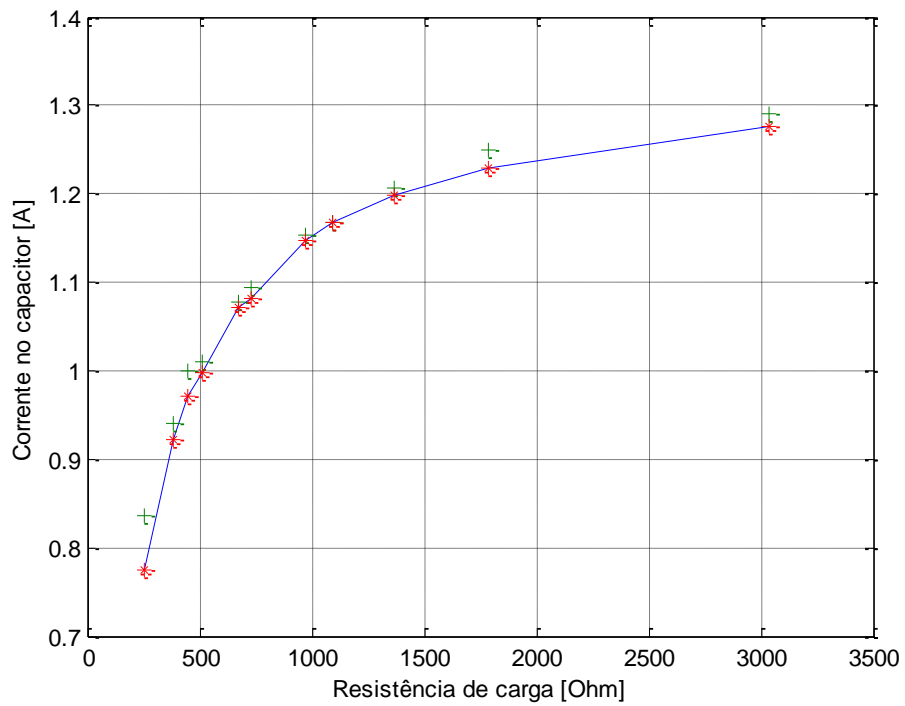


Figura 7.3 – Corrente no capacitor x Resistência de carga.

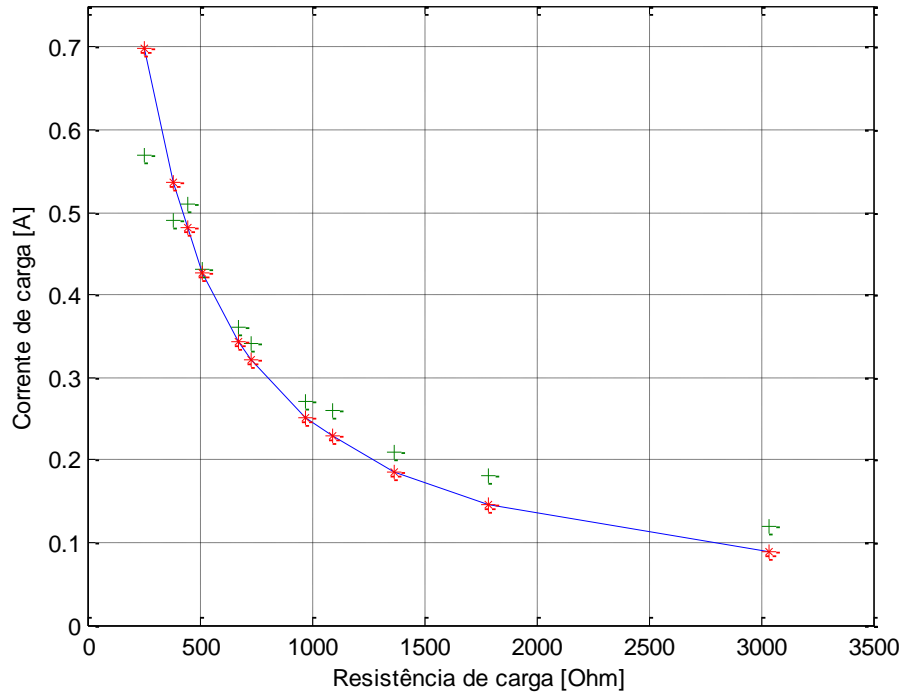


Figura 7.4 – Corrente na carga x Resistência de carga.

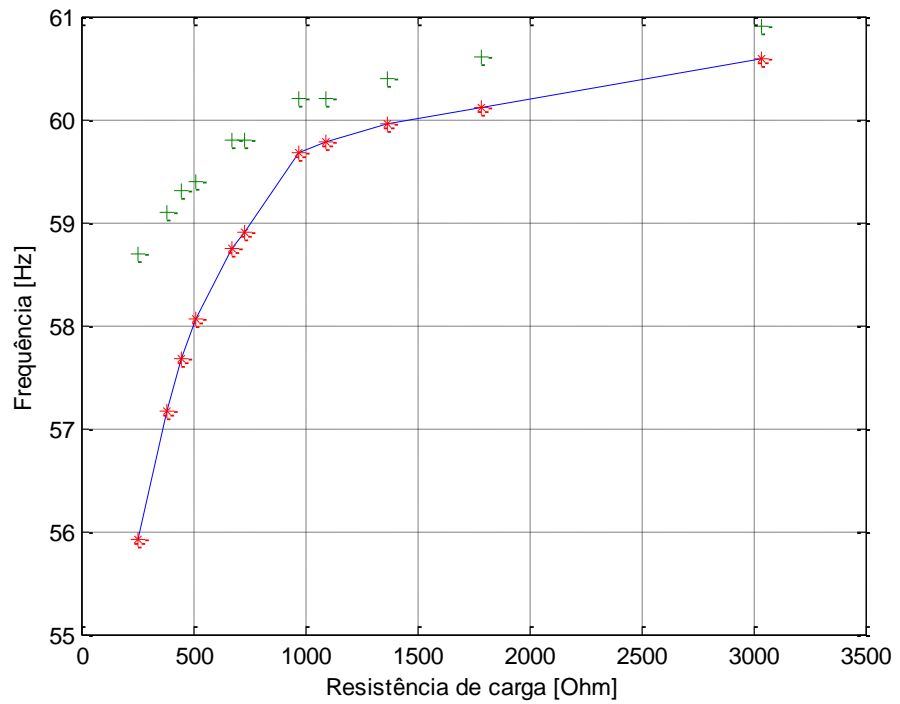


Figura 7.5 – Frequência das tensões geradas x Resistência de carga.

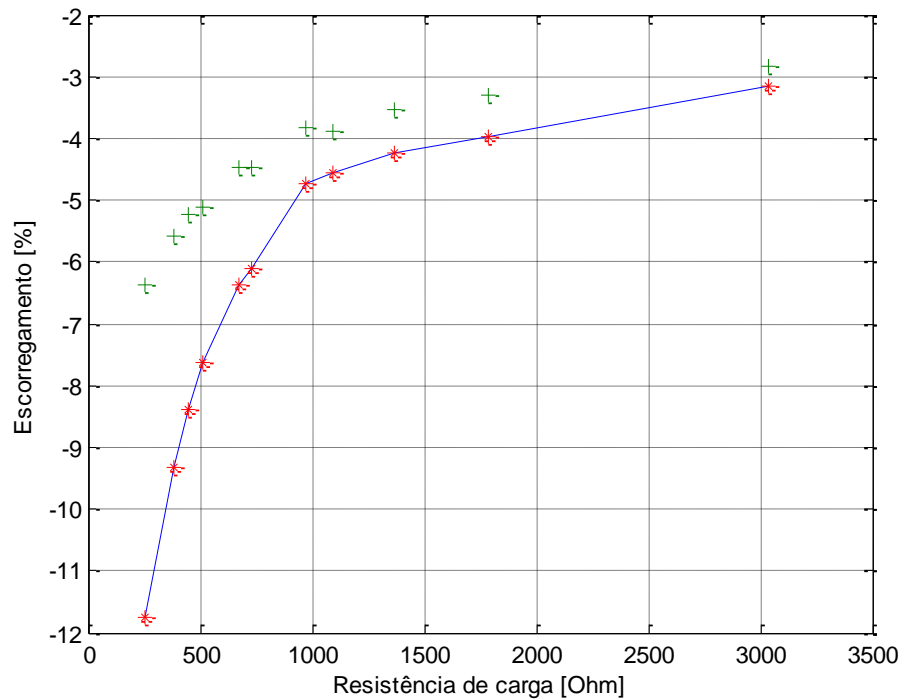


Figura 7.6 – Escoregamento x Resistência de carga.

Os gráficos expostos mostram que os valores de tensão, corrente e frequência encontrados no ensaio para velocidade de rotação de 1875 rpm e capacitância de $12,5 \mu\text{F}$ condizem com o previsto na simulação. As pequenas diferenças existentes foram ocasionadas, principalmente, pelas aproximações realizadas. Portanto, percebe-se que as condições arbitradas tiveram pouca influência no resultado final.

Logo, pode-se fazer a mesma análise do item 5.4.3, ou seja, ao aumentar a resistência de carga, o que significa menor potência, a corrente na carga diminui, causando uma variação na corrente do gerador, reduzindo o fluxo contrário que interage com o da máquina, diminuindo, em módulo, o escoregamento. Em consequência, há o aumento no módulo das correntes dos capacitores e, devido a isso, a corrente do gerador se estabelece em um valor, em módulo, maior, apesar da menor componente real.

Finalmente, como uma análise geral, podem-se ressaltar os seguintes pontos:

- O aumento da capacitância permitiu a utilização de cargas de potências maiores.

Para capacitor e velocidade fixos:

- Diminuição da tensão terminal com o aumento da carga, chegando à perda de excitação para resistências muito baixas.
- A frequência e conseqüentemente o escorregamento são afetados pelo aumento de carga.

Para capacitor e carga fixos:

- O aumento na velocidade de rotação ocasiona acréscimo na frequência e diminuição na relação entre reatância capacitiva e frequência, o que provoca aumento na tensão terminal e na corrente dos capacitores e na carga.

Apêndices

Desenvolvimento da impedância equivalente

Equações que mostram o desenvolvimento da expressão da impedância Z_{eq} :

$$Z_{eq} = \left\{ \left[\left(\frac{R'_R}{f_{pu} - \delta} + jX'_m \right) \parallel jX_m \right] + \left(\frac{R_S}{f_{pu}} + jX_S \right) \right\} + \left(\frac{-jX_C}{f_{pu}^2} \parallel \frac{R_L}{f_{pu}} \right)$$

$$Z_{eq} = \frac{\frac{R'_R}{f_{pu} - \delta} + jX'_R}{\frac{R'_R}{f_{pu} - \delta} + jX'_R + jX_M} jX_m + \frac{R_S}{f_{pu}} + jX_S - \frac{\frac{jX_C R_L}{f_{pu}^3}}{\frac{R_L}{f_{pu}} - \frac{jX_C}{f_{pu}^2}}$$

$$Z_{eq} = \frac{\left(\frac{-jX_C R_L}{f_{pu}^3} \right)}{\frac{R_L}{f_{pu}} - \frac{jX_C}{f_{pu}^2}} + \left(\frac{R_S}{f_{pu}} + jX_S \right) + \frac{\left[jX_M \left(\frac{R'_R}{f_{pu} - \delta} + jX'_R \right) \right]}{\frac{R'_R}{f_{pu} - \delta} + j(X_M + X'_R)}$$

Considerando $X_R = X_S = X$, além de multiplicar numerador e denominador da 1ª parcela por f_{pu}^2 , colocando-se em evidência $1/f_{pu}$ na 1ª e na 2ª parcelas e multiplicando-se o numerador e denominador da 3ª parcela por $(f_{pu} - \delta)$, chega-se a seguinte expressão:

$$Z_{eq} = \frac{1}{f_{pu}} \left(\frac{-jX_C R_L}{R_L f_{pu} - jX_C} \right) + \frac{1}{f_{pu}} (R_S + jX f_{pu}) + \frac{jX_M [R'_R + jX (f_{pu} - \delta)]}{R'_R + j(X_M + X)(f_{pu} - \delta)}$$

Calcula-se o mínimo múltiplo comum e, assim, após algumas manipulações, obtêm-se as expressões:

$$\begin{aligned} \text{Parte real de } Z_{\text{eq}} = & (-2XR_LX_m - X^2R_L)f_{pu}^3 + (2\delta XR_LX_m + \delta R_LX^2)f_{pu}^2 + \\ & X_c(2R + R_L)X_m + X_cX(2R + R_L) + R_LR^2]f_{pu} + [-\delta X_c(R_L + R)X_m - \delta X_cX(R_L + R)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Parte imaginária de } Z_{\text{eq}} = & [(2XX_c + 2R_LR)X_m + 2R_LXR + X^2X_c]f_{pu}^2 + \\ & [-\delta(2X_cX + RR_L)X_m - \delta(RR_L + X_cX)X]f_{pu} + X_cR(R_L + R) \end{aligned}$$

Código em Matlab para simulação do funcionamento do gerador autoexcitado

```
%Algoritmo da simulação digital
```

```
Rl=[3033.14, 1787.57, 1370.47, 1088.86, 975.20, 726.01, 675.78, 512.71,
446.42, 382.60, 253.08];
Vg;
C= 0.0000125;
```

```
% Inicializações
```

```
R=28.85;
X=14.85;
k=length(Rl);
Xm=396.52;
f=60;
v=(1875/30);
```

```
%Calculo das bases
```

```
Zbase=(220^2)/81.72;
fbase=60;
vbase=60;
Ibase=81.72/220;
Xc=1/(2*pi*60*C);
```

```
%Conversão em valores p.u.
```

```
f=f/fbase;
v=v/vbase;
Rl=Rl/Zbase;
X=X/Zbase;
R=R/Zbase;
Xc=Xc/Zbase;
Xm=Xm/Zbase;
Vg=Vg/220;
```

```
for i=1:k
```

```
f=1; %Deve-se setar os parâmetros, para que não
Xm=396.52/Zbase; %interfiram nos outros valores de carga
```

```
%Calculo dos valores inciais de fx, gx e suas derivadas
```

```
fx=(-2*X*Rl(i)*Xm-
Rl(i)*X^2)*f^3+(v*2*X*Rl(i)*Xm+v*Rl(i)*X^2)*f^2+(Xc*(2*R+Rl(i))*Xm+Xc*X*(2*R+R
l(i))+R^2*Rl(i))*f+(-v*Xc*(R+Rl(i))*Xm-v*Xc*X*(R+Rl(i)));
gx=((2*X*Xc+Rl(i)*2*R)*Xm+Rl(i)*X^2*R+Xc*X^2)*f^2+(-v*(2*Xc*X+Rl(i)*R)*Xm-
v*(Rl(i)*R+Xc*X)*X)*f-Xc*R*(R+Rl(i));
```

```

dfXm=-2*X*Rl(i)*f^3+v^2*X*Rl(i)*f^2+Xc*(2*R+Rl(i))*f-v*Xc*(R+Rl(i));
dgXm=(2*X*Xc+R^2*Rl(i))*f^2+(-v*(2*Xc*X+Rl(i)*R))*f;
dff=3*(-2*X*Rl(i)*Xm-
Rl(i)*X^2)*f^2+2*(v^2*X*Rl(i)*Xm+v*Rl(i)*X^2)*f+(Xc*(2*R+Rl(i))*Xm+Xc*X*(2*R+R
l(i))+R^2*Rl(i));
dgf=2*((2*X*Xc+Rl(i)*2*R)*Xm+Rl(i)*X^2*R+Xc*X^2)*f+(-v*(2*Xc*X+Rl(i)*R)*Xm-
v*(Rl(i)*R+Xc*X)*X);

while abs(fx)>=(0.001) || abs(gx)>=(0.001)

    J=[dfXm dff;dgXm dgf]; %matriz jacobiana

    H=(J^-1)*[-fx;-gx]; %Calculo dos incrementos

Xm=Xm+H(1);
f=f+H(2);

fx=(-2*X*Rl(i)*Xm-
Rl(i)*X^2)*f^3+(v^2*X*Rl(i)*Xm+v*Rl(i)*X^2)*f^2+(Xc*(2*R+Rl(i))*Xm+Xc*X*(2*R+R
l(i))+R^2*Rl(i))*f+(-v*Xc*(R+Rl(i))*Xm-v*Xc*X*(R+Rl(i)));
gx=((2*X*Xc+Rl(i)*2*R)*Xm+Rl(i)*X^2*R+Xc*X^2)*f^2+(-v*(2*Xc*X+Rl(i)*R)*Xm-
v*(Rl(i)*R+Xc*X)*X)*f-Xc*R*(R+Rl(i));

dfXm=-2*X*Rl(i)*f^3+v^2*X*Rl(i)*f^2+Xc*(2*R+Rl(i))*f-v*Xc*(R+Rl(i));
dgXm=(2*X*Xc+R^2*Rl(i))*f^2+(-v*(2*Xc*X+Rl(i)*R))*f;
dff=3*(-2*X*Rl(i)*Xm-
Rl(i)*X^2)*f^2+2*(v^2*X*Rl(i)*Xm+v*Rl(i)*X^2)*f+(Xc*(2*R+Rl(i))*Xm+Xc*X*(2*R+R
l(i))+R^2*Rl(i));
dgf=2*((2*X*Xc+Rl(i)*2*R)*Xm+Rl(i)*X^2*R+Xc*X^2)*f+(-v*(2*Xc*X+Rl(i)*R)*Xm-
v*(Rl(i)*R+Xc*X)*X);

end

Gx(i)=Xm;
Gf(i)=f;

Is(i)=abs(Vg(i)/(R+j*X*abs(f)-(j*(Xc/abs(f))*Rl(i))/(Rl(i)-j*(Xc/abs(f)))));
Il(i)=abs((-j*(Xc/abs(f))*Is(i))/(Rl(i)-j*(Xc/abs(f))));
Vt(i)=Il(i)*Rl(i);
Ic(i)=Vt(i)/(Xc/abs(f));

end

Vt=Vt*220;
Gx=Gx*Zbase;
Is=Is*Ibase;
Il=Il*Ibase;
Ic=Ic*Ibase;

```

Referências Bibliográficas

- [1] CHAPALLAZ, J. M.; GHALI, J. D.; EICHENBERGER, P.; FISCHER, G. – Manual on Induction Motors Used As Generators, MHPG Series, 1990.
- [2] WAGNER, C. F. – Self-excitation of induction Motors – Electrical engineering (AIEE Transactions), pp. 47-51, Fevereiro de 1939.
- [3] BASSET, E. D. e POTTER, F. M. – Capacitive Excitation for Induction Generators - Electrical engineering (AIEE Transactions), pp. 540-545, Maio de 1935.
- [4] FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR, C.; KUSKO A. – Máquinas Elétricas, McGraw-Hill, 1977.
- [5] CHAN, T. F.V– Analysis of self-excited induction generators using an iterative method - Electrical engineering (IEEE Transactions on energy conversion), Vol 10, No. 3 pp. 502-507, Setembro de 1995.
- [6] LIMA, N. N., Operação do gerador de indução em conexão assíncrona com a rede monofásica, Dissertação de mestrado, 2010.
- [7] NASCIMENTO, C. S. C., Proposta para implantação de microcentrais de geração à gás com utilização de geradores de indução, Dissertação de mestrado, 2010.
- [8] DAHER, S., Um sistema baseado em gerador de indução trifásico para aproveitamento da energia eólica, Dissertação de mestrado, 1997.