

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ – UTFPR  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA – DAELT  
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM  
AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

GABRIEL VELLOZO MACHADO NEIVA DE MACEDO  
ROBSON SILVA GUEDES

CONTROLE DE REATIVO PARA O CONTROLE DA TENSÃO NO  
GERADOR DE INDUÇÃO AUTO-EXCITADO

CURITIBA  
2015

GABRIEL VELLOZO MACHADO NEIVA DE MACEDO  
ROBSON SILVA GUEDES

CONTROLE DE REATIVO PARA O CONTROLE DA TENSÃO NO  
GERADOR DE INDUÇÃO AUTO-EXCITADO

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Diplomação, do Curso Superior de Tecnologia em Automação Industrial do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica – DAELT – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR.

Orientador: Prof. Dr. Walter Denis Cruz Sanchez

CURITIBA  
2015

**GABRIEL VELLOZO MACHADO NEIVA DE MACEDO  
ROBSON SILVA GUEDES**

**CONTROLE DE REATIVOS PARA O CONTROLE DA TENSÃO  
NO GERADOR DE INDUÇÃO AUTO-EXCITADO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de **Tecnólogo em Eletrotécnica**, Modalidade Automação Industrial, do **Curso Superior de Tecnologia em Eletrotécnica**, da **Universidade Tecnológica Federal do Paraná**.

Curitiba, 20 de fevereiro de 2015.

---

Prof. José da Silva Maia, MSc.  
Coordenador de Curso  
Departamento Acadêmico de Eletrotécnica

---

Prof. Rafael Fontes Souto, MSc  
Responsável pelo Trabalho de Diplomação da Tecnologia  
Departamento Acadêmico de Eletrotécnica

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Jaime Favretto, MSc.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Prof. Walter Denis Cruz Sanchez, DSc.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Orientador

---

Prof. José da Silva Maia, MSc.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Prof. Ubirajara Zoccoli, MSc.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## RESUMO

MACEDO, Gabriel Vellozo M. N. de; GUEDES, Robson. Controle de reativos para o controle da tensão no gerador de indução auto-excitado, 2014. Monografia (Graduação em Tecnologia em Automação Industrial), Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Curitiba, 2014

Este trabalho apresenta a montagem e implementação de um sistema de controle de reativo, visando estabilizar a tensão na saída de um gerador de indução trifásico com rotor gaiola de esquilo auto-excitado por meio de um banco de capacitores. Aborda também conceitos sobre aspectos teóricos da máquina de indução como gerador auto-excitado. Apresenta conceito sobre indutores, capacitores, ponte de tiristores e compensador de reativos. É apresentado coleta de dados dos ensaios realizados para elaboração das curvas referentes aos parâmetros da máquina de indução, curva da tensão gerada em função da velocidade, com carga e sem carga, curva de corrente-tensão do gerador para diferentes valores de capacitância e comportamento do compensador de reativo sob diferentes condições de operação. E traz como resultado do estudo uma opção simples e de baixo custo utilizando a eletrônica de potência para controlar a tensão em motores de indução operando como geradores. Os resultados obtidos são otimistas podendo ser implementados na micro geração de energia a partir de motores de indução.

**Palavras-chave:** Compensador de reativo. Gerador de indução auto-excitado. Controle de tensão. Micro geração de energia.

## ABSTRACT

MACEDO, Gabriel Vellozo M. N. de; GUEDES, Robson. Reactive control for controlling auto-excited, 2014 Monograph (Undergraduate Technology in Industrial Automation), Federal Technological University of Paraná not stress induction generator - UTFPR. Curitiba, 2014

This work presents the design and implementation of a control system responsive, to stabilize the voltage at the output of a generator three phase induction squirrel cage rotor auto-excited by a capacitor bank. Also addresses concepts of theoretical aspects of the induction machine as auto-excited generator. Presents concept of inductors, capacitors, thyristor bridge and reactive compensator. It presented data collection of testing for preparation of curves related to the parameters of the induction machine, voltage curve generated in terms of speed, with load and without load of current-voltage generator curve for different capacitance values and behavior compensator reactive under different operating conditions. And as a result of the study brings a simple and inexpensive option using power electronics to control the voltage induction motors operating as generators. The results are optimistic may be implemented in micro power generation from induction motors.

**Keywords:** Reactive compensator. Auto-excited generator induction. Voltage control. Microwave energy generation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema elétrico de ligação .....	18
Figura 2 - Vista em corte longitudinal de um motor trifásico do tipo gaiola de esquilo .....	23
Figura 3 - Rotor tipo gaiola de esquilo.....	23
Figura 4 - Correntes trifásicas alternadas equilibradas .....	25
Figura 5 - Representação do campo magnético girante em três instantes diferentes de tempo: (a) tempo $t_1$ da Figura 4; (b) tempo $t_3$ ; (c) tempo $t_5$ .....	26
Figura 6 - Distribuição das componentes e do campo resultante correspondente a $t_1$ na Figura 4 .....	27
Figura 7 - Circuito equivalente: (a) seção do enrolamento do estator; (b) circuito real do rotor .....	33
Figura 8 - (a) circuito equivalente do rotor; (b) circuito equivalente do rotor modificado; (c) circuito equivalente do rotor referido ao estator .....	33
Figura 9 - (a) circuito equivalente exato .....	34
Figura 10 - (b) circuito equivalente aproximado .....	34
Figura 11 - Curva característica de circuito aberto típico e linha de entreferro .....	42
Figura 12 - Onda de densidade de fluxo com suas componentes fundamentais e de terceira harmônica.....	43
Figura 13 - Variação da indutância de magnetização referente a tensão .....	49
Figura 14 - Processo de auto-excitação sem sucesso, a velocidade diminui entre os pontos A e B. A tensão gerada se perde. (a) Tensão (b) Velocidade .....	50
Figura 15 - Processo de auto-excitação, a velocidade diminui entre os pontos B e C. A tensão gerada se estabiliza em um novo ponto de operação. (a) Tensão (b) Velocidade.....	50
Figura 16 - Diagrama funcional do compensador.....	56
Figura 17 - Esquema conceitual para chaveamento dos tiristores .....	57
Figura 18 - Esquema do capacitor chaveado .....	58
Figura 19 - Esquema do indutor chaveado .....	59
Figura 20 - Esquema do capacitor fixo e indutor chaveado .....	60
Figura 21 - Diagrama de blocos do TCA785P.....	61
Figura 22 - Diagrama de pulsos do TCA785 .....	62
Figura 23 - Circuito de controle de dois tiristores com o TCA785 .....	63
Figura 24 - Diagrama de blocos de sistema de disparo .....	64
Figura 25 - Detector da ponte conversora com 6 tiristores.....	64
Figura 26 - Esquema de disparo do tiristor.....	65
Figura 27 - Configuração básica do STATCOM.....	67
Figura 28 - Diagrama de blocos do compensador em série do tipo Static .....	67
Figura 29 - Ponte de tiristores, dissipador de calor e fusíveis de proteção .....	70
Figura 30 - Esquema elétrico do módulo de potência .....	70
Figura 31 - Tiristor SEMIKRON SKKT 27/16 E .....	71
Figura 32 - Esquema elétrico do módulo de tiristores. ....	71
Figura 33 - Identificação dos bornes para ligação com a placa de controle.....	72
Figura 34 - Montagem geral da bancada de ensaio .....	72
Figura 35 - Detalhe construtivo do dissipador de Calor.....	74
Figura 36 - Capacitor trifásico de 27,5 $\mu$ F .....	76
Figura 37 - Quadro de comando para acionamento de capacitor, indutor e carga....	76
Figura 38 - Banco de indutores utilizado nos ensaios .....	79

Figura 39 - Esquema de disparo do tiristor.....	81
Figura 40 - Circuito de disparo analógico.....	82
Figura 41 - Placa do controle digital dos tiristores RT380 da SEMIKRON.....	83
Figura 42 - Motor com freio desmontado.....	85
Figura 43 - Motor com freio desmontado e retirado.....	85
Figura 44 - Vista frontal do inversor de frequência.....	87
Figura 45 - Vista geral da ligação do inversor de frequência no motor.....	87
Figura 46 - Motor de indução trifásico 0,25 cv utilizado como carga indutiva.....	89
Figura 47 - Motor de indução trifásico 0,33 cv utilizado como carga indutiva em todos os ensaios.....	91
Figura 48 - Motor de indução trifásico 0,33 cv utilizado como carga indutiva somente no primeiro ensaio.....	91
Figura 49 - Conjunto de lâmpadas 220 V utilizadas como cargas resistivas.....	92
Figura 50 - Dois conjuntos de lâmpadas 220 V utilizadas como cargas resistivas....	93
Figura 51 - Montagem do ensaio a vazio e de rotor bloqueado.....	96
Figura 52 - Esquema de ligação – ensaios a vazio e com rotor e bloqueado.....	97
Figura 53 - Acoplamento mecânico entre as máquinas de indução.....	102
Figura 54 - Exemplo da montagem e ligação dos motores no inversor de frequência.....	102
Figura 55 - Esquema do circuito ensaio de magnetização.....	103
Figura 56 - Curva de magnetização corrente-tensão.....	103
Figura 57 – Variação da indutância de magnetização, tensão-indutância.....	104
Figura 58 - Esquema do circuito ensaio auto-excitação.....	107
Figura 59 - Curva de auto-excitação para diferentes valores de $X_c$ .....	108
Figura 60 - Esquema do circuito - ensaio com carga.....	112
Figura 61 - Curvas com carga somente resistiva e indutiva - resistiva juntas.....	113
Figura 62 - Montagem do ensaio curva com carga.....	113
Figura 63 - Curva sem carga para uma capacitância de 18 $\mu F$ .....	116
Figura 64 - Curva com carga resistiva (três lâmpadas de 60 W ligadas em estrela) para diferentes valores de capacitância.....	120
Figura 65 - Curva com carga resistiva (3 lâmpadas de 60 W em série com 3 de 40 W ligadas em estrela) para diferentes valores de capacitância.....	121
Figura 66 - Curva com carga resistiva (três lâmpadas de 40 W ligadas em estrela) para diferentes valores de capacitância.....	121
Figura 67 - Curva com carga indutiva e resistiva ligadas em paralelo na configuração RL1 para diferentes valores de capacitância.....	122
Figura 68 - Curva com carga indutiva e resistiva ligadas em paralelo na configuração RL2 para diferentes valores de capacitância.....	122
Figura 69 - Curva com carga indutiva e resistiva ligadas em paralelo na configuração RL3 para diferentes valores de capacitância.....	123
Figura 70 - Esquema do circuito - ensaio de auto-excitação com compensador conectado.....	128
Figura 71 - Tensão gerada a partir da variação do ângulo de disparo.....	129
Figura 72 - Corrente no gerador conforme variação do ângulo de disparo.....	130
Figura 73 - Corrente no indutor conforme variação do ângulo de disparo.....	130
Figura 74 - Variação da tensão e corrente conforme variação da carga sem alterar o ângulo de disparo.....	135
Figura 75 - Curva de tensão fixa para cargas variáveis.....	136
Figura 76 - Impedância Variável e tensão fixa regulada pelo ângulo de disparo. ...	137
Figura 77 - Tensão gerada variando o ângulo de disparo.....	138

Figura 78 - Frequência gerada variando o ângulo de disparo .....	139
Figura 79 - Comportamento das correntes geradas com a variação do ângulo de disparo. ....	139



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Medições realizadas para os bancos de indutores .....	80
Tabela 2 - Ensaio de rotor livre em "MOTOR 1" de indução trifásico, alimentado em triângulo .....	97
Tabela 3 - Ensaio de rotor bloqueado em "MOTOR 1" de indução trifásico, alimentado em triângulo .....	97
Tabela 4 - Ensaio de rotor livre em "MOTOR 2" de indução trifásico, alimentado em triângulo .....	98
Tabela 5 - Ensaio de rotor bloqueado em "MOTOR 2" de indução trifásico, alimentado em triângulo .....	98
Tabela 6 - Resumo dos cálculos considerando as médias válidas para o "MOTOR 1" .....	99
Tabela 7 - Resumo dos cálculos considerando as médias válidas para o "MOTOR 2" .....	99
Tabela 8 - Curva de magnetização do gerador de indução trifásico .....	144
Tabela 9 - Curva de indutância de magnetização do gerador de indução trifásico .....	145
Tabela 10 - Curva a vazio para $X_c = 11,65 \mu F$ .....	146
Tabela 11 - Curva a vazio para $X_c = 17,5 \mu F$ .....	146
Tabela 12 - Curva a vazio para $X_c = 18 \mu F$ .....	147
Tabela 13 - Curva a vazio para $X_c = 105 \mu F$ .....	147
Tabela 14 - Ensaio com carga resistiva-indutiva e resistiva .....	148
Tabela 15 - Ensaio sem carga .....	148
Tabela 16 - Ensaio com carga R1 para diferentes $X_c$ .....	149
Tabela 17 - Ensaio com carga R2 para diferentes $X_c$ .....	149
Tabela 18 - Ensaio com carga R3 para diferentes $X_c$ .....	150
Tabela 19 - Ensaio com carga RL 1 para diferentes $X_c$ .....	150
Tabela 20 - Ensaio com carga RL 2 para diferentes $X_c$ .....	151
Tabela 21 - Ensaio com carga RL 3 - para diferentes $X_c$ .....	151
Tabela 22 - Tensão e corrente no gerador e corrente no indutor para rotação fixa de 1779 rpm .....	152
Tabela 23 - Tensão e corrente no gerador e corrente no indutor para rotação fixa de 1850 rpm .....	152
Tabela 24 - Variação da tensão e corrente conforme variação de carga sem alterar o ângulo de disparo .....	152
Tabela 25 - Curva de tensão fixa para cargas variáveis .....	153
Tabela 26 - Impedância variável e tensão fixa regulada pelo ângulo de disparo ....	153
Tabela 27 - Comportamento da tensão, frequência e correntes geradas com a variação do ângulo de disparo .....	153

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Especificação dos tiristores SKKT.....	71
Quadro 2 - Características técnicas dos tiristores .....	73
Quadro 3 - Características técnicas dos tiristores .....	74
Quadro 4 - Características técnicas dos fusíveis .....	75
Quadro 5 - Características técnicas do capacitor.....	77
Quadro 6 - Característica do Indutor .....	79
Quadro 7 - Especificações técnicas dos motores.....	84
Quadro 8 - Características técnicas do inversor de frequência.....	86
Quadro 9 - Características da carga indutiva utilizada .....	89
Quadro 10 - Características da carga utilizada .....	90
Quadro 11 - Especificações das cargas resistivas .....	92
Quadro 12 - Parâmetros da máquina de indução.....	100

## LISTA DE SIGLAS

MP – Máquina Primária  
MI – Máquina de Indução  
MIT – Motor de Indução Trifásico  
GIAE – Gerador de Indução Auto-excitado  
SEP – Sistemas Elétricos de Potência  
UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
CA – Corrente Alternada  
CC – Corrente Contínua  
FP – Fator de Potência  
RPM – Rotações por Minuto  
cv – Cavalo Vapor  
fem – Força Eletromotriz  
fmm – Força Magneto Motriz  
FACTS - Flexible AC Transmission Systems  
DFIG – Gerador de Indução Duplamente Alimentado  
CSI – Fonte Inversora de Corrente (Current Source Inverter)  
CEC - Controlador Eletrônico de Carga  
Lm – Indutância de Magnetização  
Filtro LC – Filtros com arranjos de indutores e capacitores  
SCR – No inglês (*Silicon Controlled Rectifier*), Retificador Controlado de Silício  
IGBT – No inglês (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), Transistor Bipolar de Porta Isolada  
NOR – Porta lógica “OU” (“OR”) e um inversor “NOT”  
CI – Circuito Integrado  
IHM – Interface Homem-Máquina  
GI – Gerador de Indução

## LISTA DE SÍMBOLOS

$V_{BL}$  – Tensão de Rotor Bloqueado  
 $I_{BL}$  – Corrente do Rotor Bloqueado  
 $P_{BL}$  – Potência Ativa de Rotor Bloqueado  
N.m – Newton por metro  
V – Tensão  
I – Corrente  
S – Segundo  
m/s – Metro por Segundo  
W – Potência Ativa  
VA – Potência Aparente  
VAR – Potência Reativa  
Hz – Hertz (unidade de medida para frequência)  
W/kg – Densidade de Potência  
S - Escorregamento  
 $n_s$  - Rotação Síncrona  
 $n_r$  - Velocidade real do motor  
Vcc – Tensão contínua

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	16
1.1	TEMA .....	16
1.1.1	Delimitação do Tema.....	17
1.2	PROBLEMAS E PREMISSAS.....	18
1.3	OBJETIVOS .....	19
1.3.1	Objetivo geral.....	19
1.3.2	Objetivos específicos.....	20
2	ASPECTOS TEÓRICOS DA MÁQUINA DE INDUÇÃO .....	21
2.1	INTRODUÇÃO ÀS MÁQUINAS de corrente alternada (CA) .....	21
2.2	CLASSIFICAÇÃO.....	21
2.3	ASPECTOS CONSTRUTIVOS DA MÁQUINA DE INDUÇÃO TRIFÁSICA COM ROTOR GAIOLA .....	22
2.4	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA MÁQUINA DE INDUÇÃO .....	24
2.5	CONCEITO DE CAMPO GIRANTE E ESCORREGAMENTO DA MÁQUINA DE INDUÇÃO .....	24
2.5.1	Campo girante .....	24
2.5.2	Escorregamento do motor de indução.....	30
2.6	CIRQUITOS EQUIVALENTES DA MÁQUINA DE INDUÇÃO.....	31
2.7	MODELO MATEMÁTICO DA MÁQUINA DE INDUÇÃO.....	36
2.7.1	Equação do Torque .....	36
2.8	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA MÁQUINA DE INDUÇÃO.....	38
2.8.1	Teste de rotor livre.....	38
2.8.2	Teste de rotor travado .....	39
2.8.3	Teste com tensão CC para determinação da resistência do estator .....	40
2.9	CURVA DE MAGNETIZAÇÃO DA MÁQUINA DE INDUÇÃO .....	41
3	ASPECTOS TEÓRICOS DO GERADOR DE INDUÇÃO AUTO-EXCITADO.....	44
3.1	CLASSIFICAÇÃO DO GERADOR DE INDUÇÃO.....	44
3.2	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO GERADOR DE INDUÇÃO AUTO- EXCITADO .....	46
3.3	ANÁLISE DO PROCESSO DE AUTO-EXCITAÇÃO.....	46
3.3.1	A saturação magnética e seu efeito na auto-excitação e estabilidade ..	48
3.3.2	A indutância de magnetização.....	48
3.3.3	O gerador de indução com carga .....	51

3.3.4	Variação da carga e seu efeito .....	52
4	ASPECTOS TEÓRICOS DA COMPENSAÇÃO DE REATIVOS.....	55
4.1	INTRODUÇÃO .....	55
4.2	FUNCIONAMENTO DO COMPENSADOR.....	55
4.3	CAPACITOR FIXO E CAPACITOR CHAVEADO.....	56
4.4	INDUTOR FIXO E INDUTOR CHAVEADO.....	58
4.5	CAPACITOR FIXO E INDUTOR CHAVEADO .....	59
4.6	CIRCUITOS DE DISPARO .....	60
4.7	SUORTE DA TENSÃO PELO COMPENSADOR .....	66
5	DESENVOLVIMENTO: MONTAGEM DA BANCADA DE TESTES .....	68
5.1	INTRODUÇÃO .....	68
5.2	O COMPENSADOR DE REATIVOS.....	69
5.3	PONTE DE TIRISTORES .....	69
5.3.1	Critério de seleção.....	73
5.4	BANCO DE CAPACITORES.....	75
5.4.1	Critério de seleção.....	77
5.5	INDUTORES .....	78
5.5.1	Critério de seleção.....	78
5.6	CIRCUITO DE DISPARO.....	80
5.6.1	Circuito de disparo analógico .....	80
5.6.2	Circuito de disparo digital .....	82
5.7	SELEÇÃO DAS MÁQUINAS DE INDUÇÃO .....	84
5.8	INVERSOR DE FREQUÊNCIA CFW-11 .....	86
5.9	CARGAS .....	88
5.9.1	Carga indutiva.....	88
5.9.2	Carga resistiva.....	91
6	CARACTERÍSTICAS DO GERADOR DE INDUÇÃO ISOLADO DA REDE .....	94
6.1	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA MÁQUINA DE INDUÇÃO – ENSAIO COM ROTOR LIVRE E ROTOR BLOQUEADO.....	94
6.1.1	Introdução.....	94
6.1.2	Objetivo .....	94
6.1.3	Materiais .....	95
6.1.4	Procedimento.....	95
6.1.5	Resultados.....	97
6.2	DETERMINAÇÃO DA CURVA DE MAGNETIZAÇÃO E INDUTÂNCIA DE MAGNETIZAÇÃO .....	100

6.2.1	Introdução.....	100
6.2.2	Objetivo .....	100
6.2.3	Materiais .....	100
6.2.4	Procedimento.....	101
6.2.5	Resultados.....	103
6.3	O MAGNETISMO RESIDUAL E A AUTO-EXCITAÇÃO.....	105
6.3.1	Introdução.....	105
6.3.2	Objetivo .....	105
6.3.3	Materiais .....	105
6.3.4	Procedimento.....	106
6.3.5	Resultados.....	107
6.4	LEVANTAMENTO DA TENSÃO GERADA EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE – ENSAIO COM CARGA .....	109
6.4.1	Introdução.....	109
6.4.2	Objetivo .....	110
6.4.3	Materiais .....	110
6.4.4	Procedimento.....	110
6.4.5	Resultados.....	112
6.5	LEVANTAMENTO DA TENSÃO GERADA EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE – ENSAIO SEM CARGA (À VAZIO) .....	114
6.5.1	Introdução.....	114
6.5.2	Objetivo .....	114
6.5.3	Materiais .....	114
6.5.4	Procedimento.....	114
6.5.5	Resultados.....	115
6.6	TENSÃO E CORRENTE DO GERADOR DE INDUÇÃO COM DIFERENTES CARGAS E DIFERENTES CAPACITORES .....	116
6.6.1	Introdução.....	116
6.6.2	Objetivo .....	117
6.6.3	Materiais .....	117
6.6.4	Procedimento.....	117
6.6.5	Resultados.....	119
7	CONTROLE DA TENSÃO DO GERADOR DE INDUÇÃO.....	124
7.1	INTRODUÇÃO .....	124
7.2	ASPECTOS RELACIONADOS COM O CONTROLE DA TENSÃO.....	124

7.3	PROCESSO DE AUTO-EXCITAÇÃO COM COMPENSADOR CONECTADO AO GERADOR .....	126
7.3.1	Introdução.....	126
7.3.2	Objetivo .....	127
7.3.3	Materiais .....	127
7.3.4	Procedimento.....	127
7.3.5	Resultados.....	128
7.4	RESPOSTA DO COMPENSADOR SOB CONDIÇÕES DE CARGA .....	131
7.4.1	Introdução.....	131
7.4.2	Objetivo .....	131
7.4.3	Materiais .....	131
7.4.4	Procedimento.....	132
7.4.5	Resultados.....	134
8	CONCLUSÃO .....	140
9	TRABALHOS FUTUROS .....	142
	REFERÊNCIAS.....	143
	APÊNDICE A – Resultados obtidos nos ensaios realizados.....	144
	ANEXO A – Placa digital de disparo dos tiristores: SEMIKRON RT380T 230/400 PCB RoHS .....	154



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 TEMA

O gerador de indução tem sido usado desde o início do século 20. No entanto, a abundante produção de combustíveis fósseis, levou à sua inutilização quase completa na década de 60. Com o dramático aumento de preço do petróleo nos anos 70, o gerador de indução voltou à cena. Diante dos altos custos de energia, a recuperação de energia tornou-se parte importante da economia da maioria dos processos industriais. O gerador de indução é ideal para tal aplicação, pois, necessita do mínimo controle e manutenção. No final dos anos 80, a grande distribuição da população em todo o mundo, melhorou o transporte e a comunicação, permitindo as pessoas se afastarem das grandes concentrações urbanas, e fazendo crescer a demanda de energia elétrica de muitas comunidades isoladas. Nos anos 90, ideias como geração distribuída começaram a ser discutidas pelas companhias fornecedoras e centros de investigação. Uma consciência geral sobre as fontes de energia limitadas e finitas do planeta e as disputas internacionais acerca do meio ambiente, a segurança global e qualidade de vida, criaram uma oportunidade para novas instalações mais eficientes, com menos contaminação do meio ambiente, com tecnologias de controle avançadas, robustas e modulares.

Neste novo milênio, o gerador de indução com seus requisitos mínimos de manutenção e controle simples, parece ser uma solução para tais aplicações. Devido a sua simplicidade, robustez e menor tamanho por kW gerado, o gerador de indução é o candidato adequado para instalações de pequenas hidrelétricas e para geração eólica. Recentemente, com o uso extensivo da eletrônica de potência, computadores, e microcontroladores eletrônicos, tornou-se mais acessível o uso dos geradores de indução, os quais são mais eficientes com valores maiores que 500 kVA.

O gerador de indução encontra-se sempre associado a fontes alternativas de energia. Particularmente para pequenas instalações de geração, já que tem uma grande atratividade econômica. Funcionando isolado, sua potência máxima não excede 15 kW. Por outro lado, se um gerador de indução é conectado à rede elétrica ou outras fontes, facilmente pode alcançar 100 kW. Esquemas mais especializados com máquina de rotor bobinado e fabricados para aplicações específicas podem atingir potências bem maiores. Mais recentemente, a eletrônica de potência e a tecnologia de microcontroladores vêm dando impulso decisivo aos geradores de indução porque permitem controles mais avançados e baratos, novas tecnologias de compensação de potência reativa e de injeção de potência à rede, entre outras características.

O trabalho é estruturado em uma ampla pesquisa bibliográfica nos diversos assuntos que norteiam os geradores de indução auto-excitado: aspectos teóricos da máquina de indução, do gerador de indução auto-excitado, da compensação de reativos e por fim implementação do sistema de compensação de reativo, com testes empíricos.

### 1.1.1 Delimitação do Tema

A proposta do presente trabalho será estudar, montar e implementar um sistema de controle de reativo, visando estabilizar a tensão e corrente na saída de um gerador de indução trifásico com rotor gaiola de esquilo.

A geração de energia através da máquina de indução produz uma grande variação da tensão o que dificulta sua utilização para o aproveitamento energético.

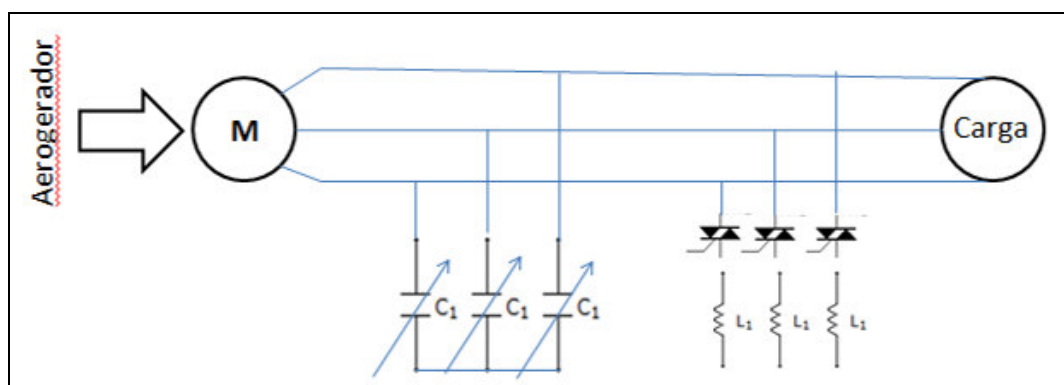
Assim, para que essa energia possa ser utilizada, torna-se necessária a utilização de um sistema de geração de potência reativa, de maneira que permita minimizar a oscilação da tensão, tornando a energia gerada viável para consumo. Os reativos da carga e do banco

de capacitores utilizados para a excitação do gerador aumentam a complexidade de estabilização do sistema, pois são duas variáveis distintas.

Desta forma, este projeto deve apresentar como solução o circuito capaz de melhorar esses fatores críticos, a fim de controlar os reativos permitindo assim o controle da tensão e gerando a condição necessária para a utilização do sistema como fonte de geração de energia.

O controle da energia reativa será realizado com a montagem e instalação de um banco de capacitores, para fornecimento de reativo e excitação do gerador, quando necessário. Já para o consumo excedente de reativo, serão instalados indutores trifásicos ligados em paralelo, sendo estes, chaveados por tiristores.

Uma máquina primária será acoplada ao gerador fornecendo assim, rotação acima da nominal para proporcionar a auto-excitação e fornecimento de energia na saída do gerador. Serão realizados testes de variação da carga, sendo acoplados motores na saída do gerador.



**Figura 1 - Esquema elétrico de ligação**  
Fonte: Os autores, 2014.

## 1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

Este trabalho de pesquisa tem como grandes problemas a serem resolvidos os seguintes pontos: como obter uma tensão estável na saída do gerador de indução. Tornar a estabilidade da energia viável

para o consumo e gerenciar a potência reativa do sistema proposto neste trabalho.

Para resolução dos problemas, foi necessário estabelecer as seguintes premissas: Utilizar um banco de capacitores para gerar a energia reativa necessária ao sistema, utilizar um banco de indutores chaveados por tiristores para consumir de forma controlada o excesso de energia reativa no sistema.

Ao utilizar as máquinas de indução na geração de energia, encontram-se alguns problemas que precisam ser solucionados para que o sistema forneça tensões trifásicas equilibradas, com frequência constante e com qualidade suficiente para alimentar cargas sensíveis. Desta forma, segue abaixo os principais problemas encontrados:

- Regulação de tensão insatisfatória e a variação da frequência síncrona, mesmo quando acionada sob velocidade constante no rotor e alimentando cargas com potência totalmente ativa (Basset e Potter, 1935; Wagner, 1939);
- Dependência da carga acoplada ao gerador, ocasionando variação na amplitude das tensões de saída de um gerador de indução auto-excitado (GIAE) (Simões e Farret, 2008).

Várias soluções têm sido apresentadas para regular as tensões de saída de geradores de indução em sistemas isolados. Entre as alternativas existentes na atualidade, será implementado e montado um sistema eletrônico para controlar a energia reativa do motor-gerador.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo geral

Implementar um sistema de fornecimento de potência reativa visando estabilizar a tensão na saída do gerador de indução. Utilizando banco de capacitores e indutores chaveados por tiristores.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Estudar a máquina de indução como gerador;
- Levantar os parâmetros da máquina de indução;
- Dimensionar o banco de capacitores e seleção dos indutores para o fornecimento de potência reativa;
- Montar o circuito de controle;
- Montar indutores chaveados por tiristores;
- Montar o circuito de disparo com tiristores;
- Executar ensaios e medições da tensão gerada com e sem compensação de reativos;
- Analisar e medir os parâmetros elétricos em todas as etapas de geração.

## 2 ASPECTOS TEÓRICOS DA MÁQUINA DE INDUÇÃO

### 2.1 INTRODUÇÃO ÀS MÁQUINAS DE CORRENTE ALTERNADA (CA)

O objetivo deste capítulo é introduzir o princípio de funcionamento das máquinas rotativas de corrente alternada. Será dada ênfase a máquina de indução trifásica com rotor tipo gaiola de esquilo, iniciando seu estudo como motor e posteriormente como gerador.

### 2.2 CLASSIFICAÇÃO

As máquinas CA normalmente são classificadas em: síncronas e de indução.

Nas máquinas síncronas, as correntes do enrolamento do rotor são fornecidas através de contatos rotativos fixados diretamente na parte estacionária do motor. Sendo sua frequência em ciclos por segundo (Hz) é a mesma que a velocidade do rotor em rotações por segundo: a frequência elétrica da tensão gerada está sincronizada com a velocidade mecânica; por tanto, essa a razão para a expressão máquina “síncrona”. Desta forma, uma máquina síncrona de dois pólos deve girar a 3600 rotações por minuto para produzir uma tensão de 60 Hz.

Já as máquinas de indução ou assíncronas, são assim chamadas em razão da diferença entre as velocidades do estator (parte estacionária) e do rotor (parte móvel), que gira a partir de uma corrente que circula em seus enrolamentos por meio de indução da corrente alternada aplicada diretamente no estator, ou seja, por ação de transformador. Assim sendo, a máquina de indução pode ser vista como um transformador generalizado em que potência elétrica é

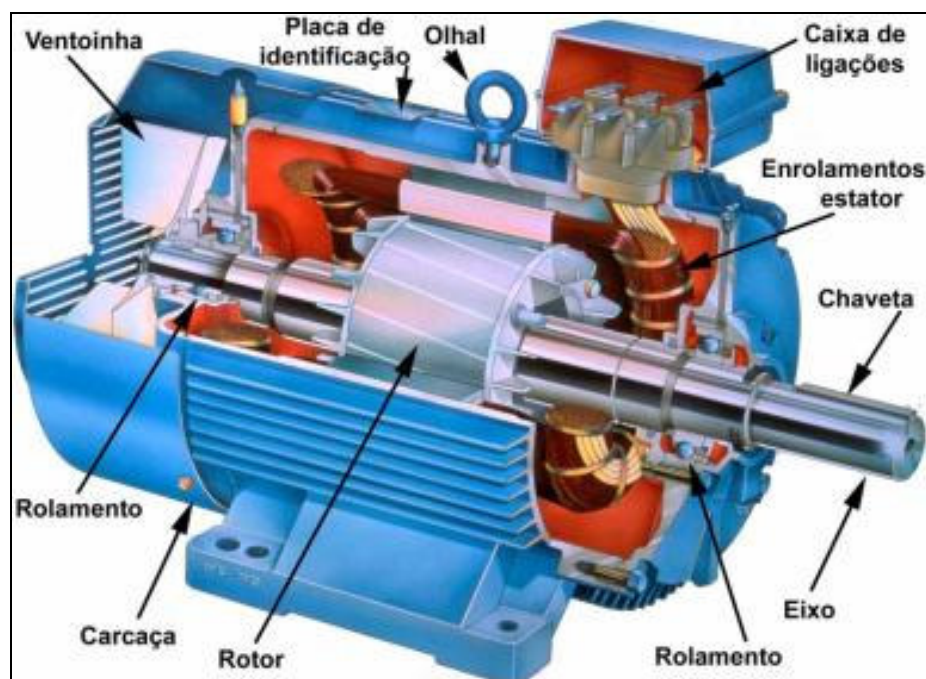
transformada entre o rotor e o estator juntamente com uma mudança de frequência e um fluxo de frequência e um fluxo de potência mecânica. (Fitzgerald *et al*, 2006).

O motor de indução trifásico (MIT) pode ser subdividido conforme a característica do rotor: tipo rotor de gaiola ou do tipo rotor enrolado, o qual somente é utilizado quando é necessário o controle de velocidade. Pois o MIT com rotor do tipo gaiola é uma das máquinas mais robustas e mais amplamente usadas na indústria, são de fácil manutenção, baixo custo, autoproteção contra sobrecarga, ampla faixa de torque (até sua velocidade síncrona) e possuem uma elevada densidade de potência (W/kg).

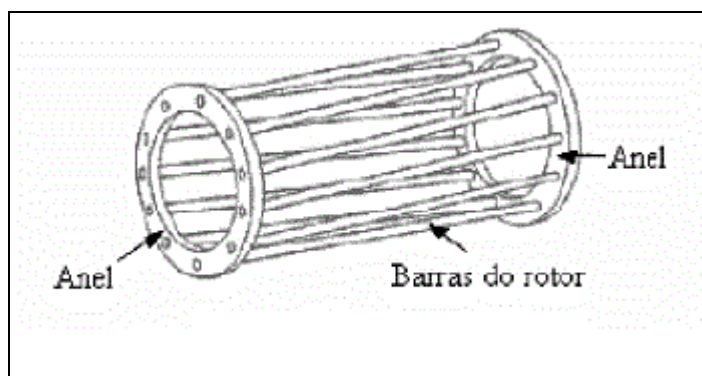
### 2.3 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DA MÁQUINA DE INDUÇÃO TRIFÁSICA COM ROTOR GAIOLA

O MIT com rotor tipo gaiola, conforme mostra a Figura 2, é constituído basicamente de um estator com enrolamento trifásico e um rotor, que se assemelha a uma gaiola de esquilo, podendo ser visto na Figura 3. No qual, o enrolamento trifásico do estator é responsável pelo campo girante, o rotor gaiola sofre indução do campo e tenta acompanhar o campo girante.

O estator é formado por chapas de aço de alta qualidade. A superfície interna tem ranhuras para acomodar um enrolamento trifásico, o qual é representado por três bobinas, cujos eixos estão defasados de 120 graus elétricos. Quando uma das extremidades de cada fase são ligadas entre si, o enrolamento do estator trifásico é dito como conectado em estrela. Este enrolamento é chamado de enrolamento trifásico porque as tensões induzidas em cada uma das três fases por um campo girante de densidade de fluxo estão defasados de 120 graus elétricos, característica esta, que diferencia o sistema trifásico simétrico.



**Figura 2 - Vista em corte longitudinal de um motor trifásico do tipo gaiola de esquilo**  
**Fonte: Página Comandos elétricos<sup>1</sup>**



**Figura 3 - Rotor tipo gaiola de esquilo**  
**Fonte: Página O engenheiro eletricista<sup>2</sup>**

O rotor também é formado de chapas de material ferromagnético com ranhuras, no entanto, o enrolamento do rotor pode ser do tipo gaiola ou tipo rotor enrolado (conforme mencionado na seção anterior).

<sup>1</sup> Disponível em:  
[http://comandoseletricosii.blogspot.com.br/2013\\_09\\_01\\_archive.html](http://comandoseletricosii.blogspot.com.br/2013_09_01_archive.html). Acesso em: 11 dez. 2014.

<sup>2</sup> Disponível em: <http://oengeletricista.blogspot.com.br/2013/01/principio-de-funcionamento-da-maquina.html>. Acesso em: 11 dez. 2014



O enrolamento de gaiola consiste simplesmente num determinado número de barras de cobre imersas nas ranhuras do rotor e conectadas, nas duas menores extremidades, por meio de anéis de cobre, podendo ser de alumínio para alguns modelos de pequeno porte. Este tipo de enrolamento, não somente é de construção mais simples e mais econômica como também é mais robusto e não possui anéis coletores nem escovas de carvão. (Del Toro, 2011).

## 2.4 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA MÁQUINA DE INDUÇÃO

Ao se aplicar uma tensão trifásica ao enrolamento trifásico no estator do motor de indução, cria-se um campo magnético girante que por efeito de transformador, induz uma força eletromotriz (*fem*) de trabalho no enrolamento do rotor. A *fem* induzida no rotor é chamada de *fem* de trabalho porque faz uma corrente circular através dos condutores do enrolamento de armadura. Esta se associa com a onda de densidade de fluxo girante para produzir torque. Conseqüentemente, podemos considerar o campo girante como a chave para a operação do motor de indução. O campo magnético girante é produzido por contribuições de enrolamentos de fase deslocados no espaço conduzindo correntes apropriadas deslocadas no tempo. (Del Toro, 2011).

## 2.5 CONCEITO DE CAMPO GIRANTE E ESCORREGAMENTO DA MÁQUINA DE INDUÇÃO

### 2.5.1 Campo girante

Para compreender como o campo magnético girante é produzido, pode-se observar as Figuras 4 e 5. Onde temos, na Figura 4, as

correntes trifásicas que são supostas como circulando nas fases **a**, **b** e **c**, respectivamente. Nota-se que estas correntes estão deslocadas no tempo pelo equivalente a 120 graus elétricos. Na Figura 5 estão representados a estrutura do estator e o enrolamento trifásico. Observa-se que cada fase (normalmente distribuída a cada 60 graus elétricos) está representada, por conveniência, por uma única bobina. Desta forma, a bobina **a-a'** representa o enrolamento completo da fase **a**, tendo seu eixo do fluxo dirigido ao longo da vertical. Isso significa que sempre que a fase **a** conduz uma corrente, ela produz um campo de fluxo direcionado ao longo do eixo vertical, para cima ou para baixo. A regra da mão direita prontamente verifica essa afirmativa. De modo similar, o eixo do fluxo da fase **b** está deslocado de 120 graus elétrico da fase **a** e o da fase **c** está deslocado de 120 graus elétricos da fase **b**. As letras sem a notação primo se referem ao terminal inicial de cada fase.

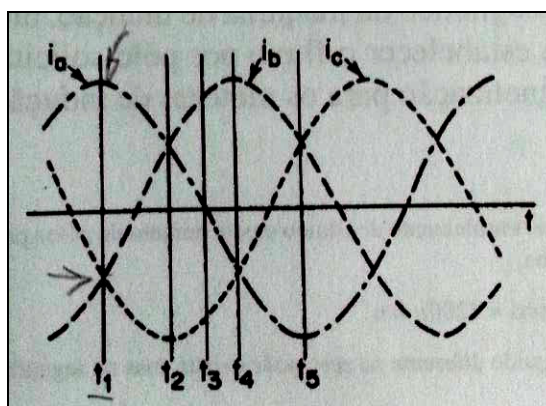


Figura 4 - Correntes trifásicas alternadas equilibradas

Fonte: Del Toro, 2011.

Observando a Figura 4 no instante de tempo  $t_1$ , a corrente na fase **a** está no seu valor positivo máximo, enquanto as correntes das fases **b** e **c** estão na metade do seu valor negativo máximo. Já na Figura 5, é suposto arbitrariamente que, quando a corrente numa determinada fase é positiva, ela circula para fora do papel, com relação aos condutores sem primo. Desta forma, visto que, no tempo  $t_1$ ,  $i_a$  é positiva, um ponto é usado no condutor **a**. (ver Figura 5(a).) Evidentemente, uma cruz é

usada para  $a'$ , porque ela representa a conexão de retorno. Então, pela regra da mão direita, segue-se que a fase  $a$  produz uma contribuição de fluxo direcionada para cima, ao longo da vertical. Além disso, o módulo desta contribuição é o valor máximo, porque a corrente está no máximo. Portanto,  $\phi_a = \Phi_m$ , onde  $\Phi_m$  é o fluxo máximo por pólo da fase  $a$ . É importante entender que a fase  $a$  produz na realidade um campo de fluxo senoidal com amplitude sobre o eixo da fase  $a$ , como indicado na Figura 6. De qualquer modo, na Figura 5 (a) essa distribuição senoidal é representada convenientemente pelo vetor  $\phi_a$ .

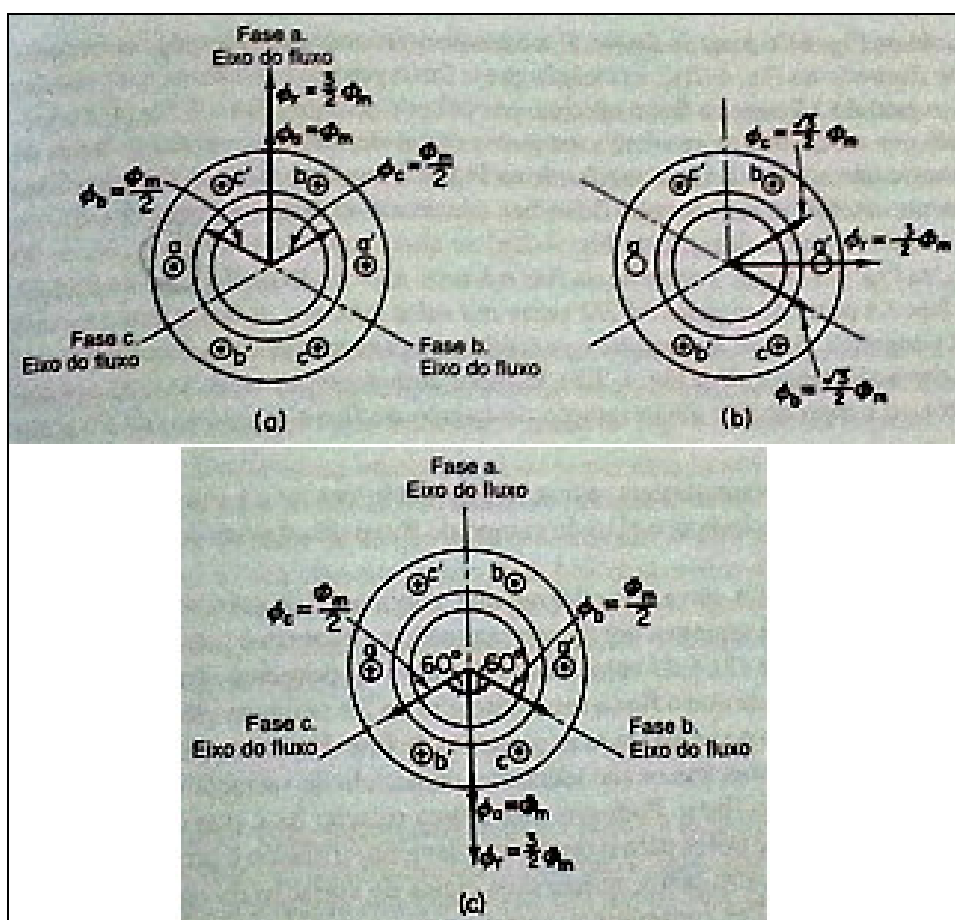


Figura 5 - Representação do campo magnético girante em três instantes diferentes de tempo: (a) tempo  $t_1$  da Figura 4; (b) tempo  $t_3$ ; (c) tempo  $t_5$

Fonte: Del Toro, 2011.

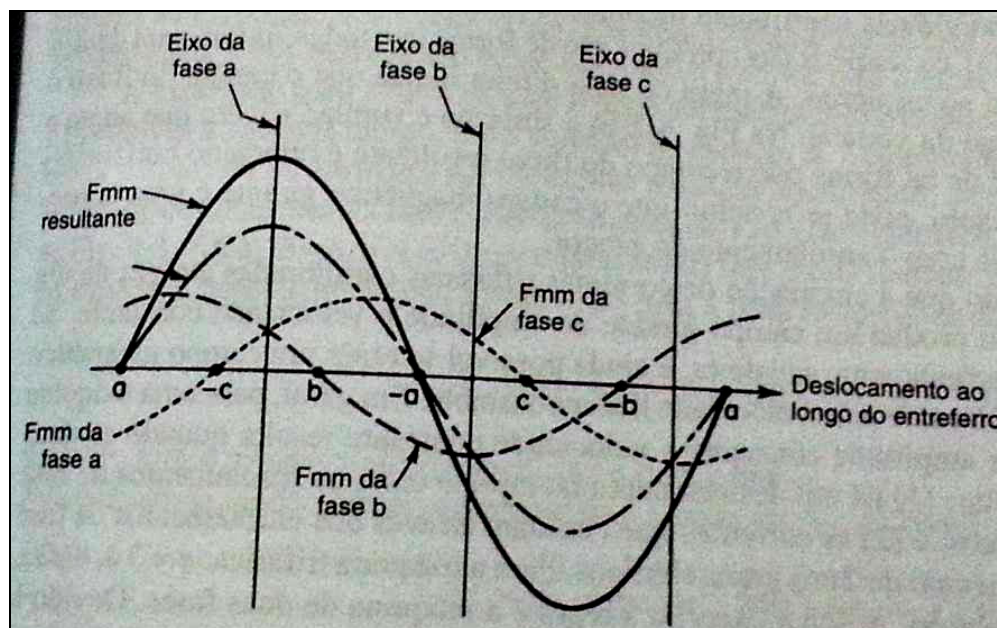


Figura 6 - Distribuição das componentes e do campo resultante correspondente a  $t_1$  na Figura 4

Fonte: Del Toro, 2011.

Para se determinar o sentido e o módulo da contribuição do campo da fase **b** no tempo  $t_1$ , observamos inicialmente que a corrente na fase **b** é negativa com relação à fase **a**. Portanto, o condutor que representa o início da fase **b** deve receber a cruz, ao passo que **b'** recebe o ponto. Por isso, a contribuição de fluxo instantânea da fase **b** é dirigida para cima ao longo do seu eixo de fluxo e o módulo do fluxo da fase **b** é metade do máximo porque a corrente está na metade do seu valor máximo. Raciocínio similar leva ao resultado indicado na Figura 5 (a) para a fase **c**. O exame da representação no espaço correspondente ao tempo  $t_1$ , como ilustrado na Figura 5 (a), evidencia que o fluxo por pólo resultante está direcionado para cima e tem um módulo 3/2 vezes o fluxo máximo por pólo de qualquer fase.

A Figura 6 representa o mesmo resultado que a Figura 5 (a), mas em termos das ondas de fluxo senoidais, ao invés de vetores de fluxo. Observa-se que o vetor de fluxo resultante na Figura 5 mostra o sentido em que o fluxo cruza o entreferro. Uma vez cruzado o entreferro, o fluxo fica confinado ao ferro, no modo usual.

Já quando o tempo passa de 90 graus elétricos, de  $t_1$  a  $t_3$ , na Figura 4, a corrente da fase **a** é zero, não dando nenhuma contribuição

do fluxo. A corrente na fase **b** é positiva e igual  $\sqrt{3}/2$  vezes seu valor máximo. A fase **c** tem o mesmo módulo da corrente, mas é negativa. Juntas, as fases **b** e **c** se combinam para produzir um fluxo resultante tendo o mesmo módulo que no instante  $t_1$ , como mostra a Figura 5 (b). É importante observar, também, que a passagem de 90 graus elétricos no tempo resulta numa rotação do campo de fluxo magnético de 90 graus elétricos. Um espaço adicional de tempo equivalente a outros 90 graus elétricos leva à situação representada na Figura 5 (c). Observa-se que, novamente, o eixo do campo do fluxo gira outros 90 graus elétricos.

Portanto, a aplicação de correntes trifásicas em enrolamentos trifásico equilibrados dá origem a um campo magnético girante que possui duas características: a primeira - é de amplitude constante e a segunda - é de velocidade constante. A primeira característica já foi demonstrada. A segunda segue do fato de que o fluxo resultante gira de  $2\pi$  radianos elétricos no espaço a cada  $2\pi$  radianos elétricos de variação no tempo para as correntes de fase. Consequentemente, para uma máquina de dois pólos, onde os graus elétricos e mecânicos são idênticos, cada ciclo de variação da corrente produz uma rotação completa do campo do fluxo. Dessa forma, esta é uma relação fixa, que é dependente da frequência das correntes e do número de pólos para o qual o enrolamento trifásico é projetado. No caso onde o enrolamento é projetado para quatro pólos, requer dois ciclos de variação da corrente para produzir uma rotação do campo do fluxo. Assim sendo, segue-se que para uma máquina de  $p$  pólos a relação é:

$$f = p/2 \times rps = p/2 * n/60 \quad (1)$$

onde  $f$  está em ciclos por segundo e rps representa rotações por segundo.

Uma inspeção da distribuição ampère-condutor do enrolamento do estator nos diversos instantes de tempo mostra que as fases individuais contribuem de modo a produzir um efeito de solenoide no

estator. Desta forma na Figura 5 (a), os sentidos das correntes são de forma que todas entram para dentro da página no lado direito e saem no esquerdo. A regra da mão direita indica que o campo do fluxo é então dirigido para cima, ao longo da vertical. Na Figura 5 (b), a situação é similar, exceto que agora a distribuição de cruces e pontos é de tal forma que o campo do fluxo resultante é orientado horizontalmente em direção à direita. Portanto, pode-se concluir que o campo magnético girante é uma consequência da Força magneto motriz (*fmm*) girante associada com o enrolamento do estator.

É possível, também, se obter um campo magnético girante, mesmo se nenhuma das condições de produção de campo girante de amplitude e velocidade constantes forem perfeitamente satisfeitas, mas não terá amplitude constante nem velocidade linear constante. Em geral, para uma máquina de  $q$  fases, um campo girante de amplitude constante e velocidade constante resulta quando as duas condições a seguir forem satisfeitas: 1 – há um deslocamento no espaço entre os enrolamentos de fase equilibrados de  $2\pi/q$  graus elétricos, e 2 – as correntes que circulam através dos enrolamentos de fase são equilibradas e deslocadas no tempo de  $2\pi/q$  graus elétricos. Para a máquina trifásica,  $q = 3$  e, então, o agora familiar  $120^\circ$  é obtido. A única exceção à regra é a máquina de duas fases. Devido à situação de duas fases ser um caso especial do sistema de quatro fases, o valor de  $q$  é igual a 4 deve ser usado.

Uma última observação deve ser feita, a velocidade de rotação do campo, como descrito pela equação (1), é sempre dada em relação aos enrolamentos de fase que conduzem as correntes variáveis no tempo. Consequentemente, se ocorre uma situação onde o enrolamento também gira, então a velocidade de rotação do campo em relação ao espaço inercial é diferente em relação ao enrolamento. (Del Toro, 2011).

## 2.5.2 Escorregamento do motor de indução

O motor de indução parado tem características de um transformador em que o enrolamento do estator é o do primário e o enrolamento do rotor é o do secundário. Para produzir um torque de partida (e a seguir, um torque de funcionamento), é necessário ter uma corrente circulando através do enrolamento do rotor. Inicialmente, a *fem* induzida  $E_2$  gera uma corrente no rotor,  $I_2$ , por fase, que circula através do curto-circuito, produzindo uma distribuição ampère-condutor que atua com o campo do fluxo para produzir o torque de partida. O sentido deste torque é sempre fazer com que o rotor gire na mesma direção do campo girante. Considera-se que o campo do fluxo está girando no sentido dos ponteiros do relógio numa velocidade correspondente à frequência aplicada no estator e ao número de polos do enrolamento do estator. Essa velocidade é chamada de *velocidade síncrona* e é descrita pela Equação (2), desta forma:

$$n_s = (120 \cdot f_e) / p \text{ [rpm]} \quad (2)$$

onde  $p$  é o número de pólos do motor,  $f_e$  é a frequência elétrica e  $n_s$  é a rotação síncrona em rotações por minuto (rpm).

Ainda segundo Del Toro, 2011, desta forma o rotor se move numa direção em que tenta se alinhar com o campo do estator. E à medida que o rotor aumenta sua velocidade, a relação na qual o campo do estator corta as bobinas do rotor diminui. Isso reduz a *fem* induzida resultante por fase, diminuindo, por sua vez, o módulo da distribuição ampère-condutor e fornecendo menos torque. Na realidade, este processo continua até que o rotor atinge uma velocidade tal que fornece *fem* suficiente para produzir apenas a corrente necessária para desenvolver um torque igual aos torques contrários. Se não há carga no eixo, o torque contrário consiste principalmente em perdas por atrito. É importante compreender que, enquanto houver um torque

contrário a ser vencido, ainda que pequeno ou qualquer que seja sua origem, a velocidade do rotor não pode nunca ser igual à velocidade síncrona. Isso é característico de dispositivos eletromecânicos de conversão de energia com excitação única. Visto que a corrente do enrolamento do rotor (ou do secundário) é produzida por indução, deve sempre existir uma diferença em velocidade entre o campo do estator (ou do primário) e o enrolamento do rotor (ou do secundário).

Essa diferença de velocidade, ou *escorregamento*, é uma variável muito importante para o motor de indução. Em forma de uma equação, podemos escrever:  $escorregamento \equiv n_s - n$  [rpm], onde  $n$  representa a velocidade real do rotor, em rpm. O termo *escorregamento* é usado porque descreve o que um observador acavalado no campo do estator vê olhando para o rotor, ele parece ter escorregado para trás. Uma forma mais útil da grandeza *escorregamento* resulta quando ela é expressa numa base por unidade, usando a velocidade síncrona como referência. Desta forma, o *escorregamento por unidade* é dado na equação (3):

$$s = (n_s - n_r) / n_s \quad (3)$$

Onde  $S$  é o *escorregamento*,  $n_s$  é a rotação síncrona e  $n_r$  velocidade real do motor.

Para os motores de indução convencionais, os valores de  $s$  ficam entre zero e a unidade. (Del Toro, 2011).

## 2.6 CIRQUITOS EQUIVALENTES DA MÁQUINA DE INDUÇÃO

É desejável ter um circuito equivalente do motor de indução trifásico, de forma a conduzir a análise da operação e facilitar o cálculo do desempenho.



Todos os parâmetros do circuito equivalente são expressos numa base por fase. Isso se aplica independentemente do enrolamento do estator ser conectado em estrela ou triângulo. Neste último caso os valores se referem à conexão estrela equivalente. Na Figura 7 (a) está indicada a parte do circuito equivalente que tem relação com o enrolamento do estator, observa-se que ela consiste na resistência do enrolamento de fase do estator,  $r_1$ , numa reatância de dispersão do enrolamento de fase do estator,  $x_1$  e numa impedância de magnetização, constituída do resistor de perdas no núcleo,  $r_c$  e da reatância de magnetização,  $x_\phi$ . A corrente de magnetização do motor de indução é aproximadamente 25 a 40% da corrente nominal, dependendo do tamanho do motor. Além disso, a reatância de dispersão do estator para o motor de indução também é alta por causa do entreferro, assim como os enrolamentos do estator e do rotor são distribuídos ao longo da periferia do entreferro e não concentrados em um núcleo. Os efeitos das ações que ocorrem no enrolamento do rotor devem refletir a si próprias no nível de tensão equivalente adequado nos terminais  $a-b$  na Figura 7 (a).

Para qualquer condição de carga especificada que exige um valor particular do escorregamento  $s$ , a corrente do rotor por fase pode ser expressa como:

$$\bar{I}_2 = (s\bar{E}_2) / (r_2 + jsx_2) \quad (4)$$

Onde  $\bar{E}_2$  e  $x_2$  são os valores em repouso. A interpretação do circuito da equação (4) está representada na Figura 7 (b). Mostra que  $\bar{I}_2$  é uma corrente na frequência de escorregamento produzida pela *fem* induzida na frequência de escorregamento,  $sE_2$ , atuando num circuito do rotor que tem uma impedância por fase de  $r_2 + jsx_2$ . Em outras palavras, essa é a corrente que seria vista por um observador do enrolamento do rotor. Todavia, a quantidade de potência real envolvida neste circuito do rotor é a corrente ao quadrado vezes a parte real da impedância do

rotor. Na realidade, essa potência representa as perdas no cobre do rotor por fase. Portanto, a perda total no cobre do rotor pode ser expressa como:

$$P_{cu2} = q_2 I_2^2 r_2 \quad (5)$$

onde  $q_2$  representa o número de fases do rotor.

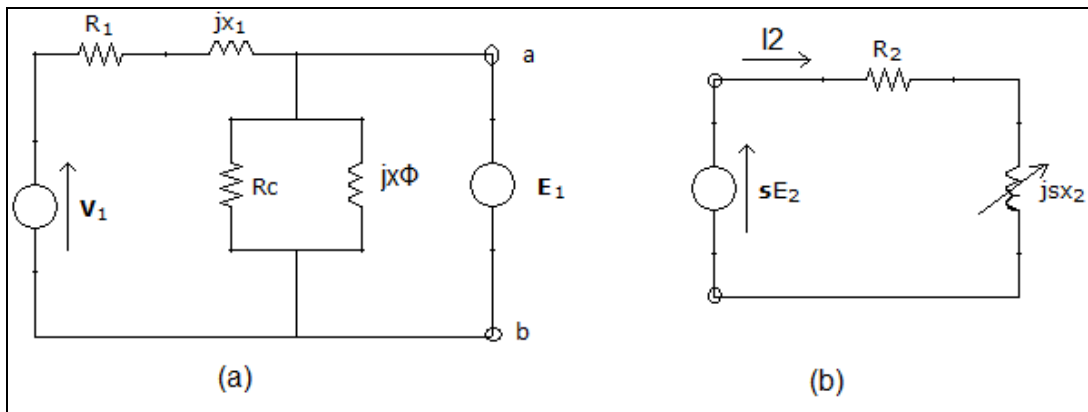


Figura 7 - Circuito equivalente: (a) seção do enrolamento do estator; (b) circuito real do rotor  
Fonte: Del Toro, 2011.

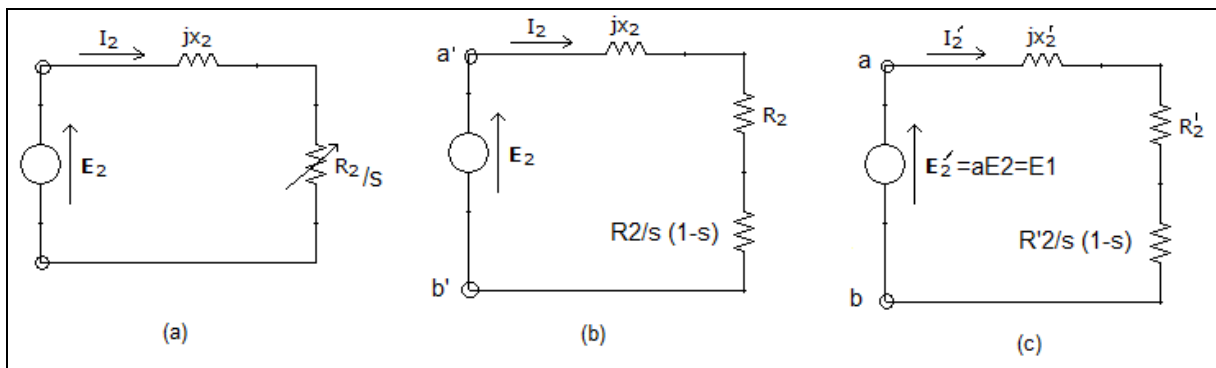


Figura 8 - (a) circuito equivalente do rotor; (b) circuito equivalente do rotor modificado; (c) circuito equivalente do rotor referido ao estator  
Fonte: Del Toro, 2011.

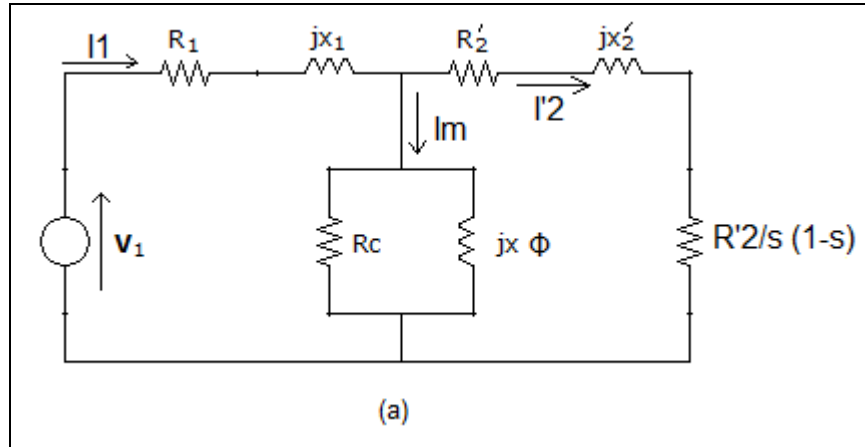


Figura 9 - (a) circuito equivalente exato  
Fonte: Del Toro, 2011.

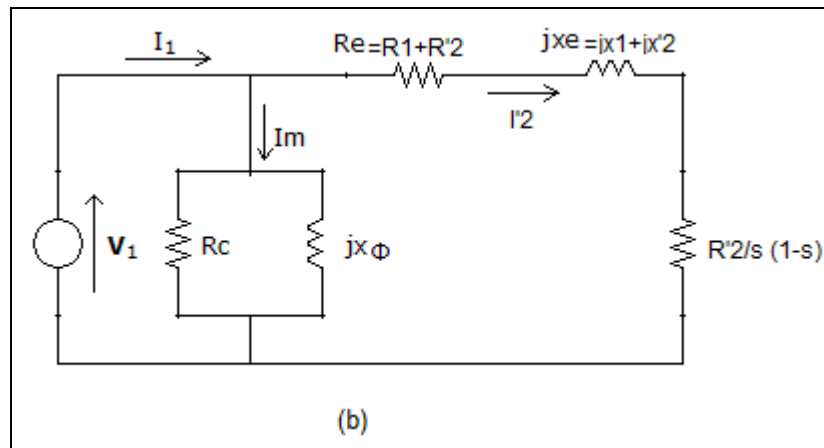


Figura 10 - (b) circuito equivalente aproximado  
Fonte: Del Toro, 2011.

Dividindo tanto o numerador como o denominador da equação (4), pelo escorregamento  $s$ , obtemos:

$$\bar{I}_2 = \bar{E}_2 / [(r_2/s) + jx_2] \quad (6)$$

A interpretação de circuito correspondente desta expressão aparece na Figura 8 (a). Observa-se que o módulo e o ângulo de fase de  $\bar{I}_2$  permanecem inalterados por esta operação. Contudo, há uma diferença significativa entre as equações (4) e (6). No último caso,  $\bar{I}_2$  é considerada como produzida por uma tensão na frequência da rede,  $\bar{E}_2$ , atuando em um circuito do rotor que tem uma impedância por fase de

$r_2/s + jx_2$ . Portanto,  $\bar{I}_2$  na equação (6) é uma corrente na frequência da rede, ao passo que  $I_2$  na equação (4) é uma corrente na *frequência de escorregamento*. É importante que esta diferença seja atendida.

A manipulação da equação (4) por  $s$  nos possibilitou passar de um circuito real do rotor caracterizado por resistência constante e reatância de dispersão variável, conforme Figura 7 (b), para um caracterizado por resistência variável e reatância de dispersão constante, conforme Figura 8 (a). Além disso, a potência real associada com o circuito equivalente do rotor da Figura 8 (a) é, evidentemente,

$$P = I_2^2 \cdot (r_2/s) \quad (7)$$

Portanto, a potência total para  $q_2$  fases é:

$$P_g = q_2 I_2^2 \cdot (r_2/s) \quad (8)$$

A resistência variável da Figura 8 (a) pode ser substituída pela resistência real do enrolamento do rotor,  $r_2$ , e uma resistência variável,  $R_m$ , que representa a carga mecânica no eixo. Ou seja,

$$R_m \equiv (r_2/s) \cdot (1-s) \quad (9)$$

Essa expressão é útil na análise, porque permite que qualquer carga mecânica seja representada no circuito equivalente por um resistor. A Figura 8 (b) representa a versão modificada do circuito equivalente do rotor. Finalmente, fica evidente, com base nas observações precedentes, que o circuito equivalente do rotor é equivalente apenas no que diz respeito ao módulo e ângulo de fase da corrente do rotor por fase.

A tensão que aparece nos terminais a-b na Figura 7 (a), é uma grandeza na frequência da rede, tendo  $N_1 K_{wl}$  espiras efetivas. A tensão que aparece nos terminais a` - b` na Figura 8 (b) também é uma

grandeza na frequência da rede, mas tem  $N_2 K_{w2}$  espiras efetivas. Em geral,  $E_1 \neq E_2$ , de forma que a`- b` na Figura 8 (b) não podem ser ligados a **a – b** (a) para se obter um circuito unifilar equivalente. Para se obter isso, é necessário substituir o enrolamento real do rotor por um enrolamento equivalente tendo  $N_1 K_{w1}$  espiras efetivas. Em outras palavras, todas as grandezas do rotor devem ser referidas ao estator do modo representado na Figura 8 (c). A notação primo é usada para representar grandezas do rotor referidas ao estator.

A tensão que aparece nos terminais a –b na Figura 8 (c) é a mesma que aparece entre os terminais a – b na Figura 7 (a). Portanto, estes terminais podem ser ligados para dar um circuito equivalente completo, como aparece na Figura 9 (a).

Considerável simplificação nos cálculos com pequena perda na precisão pode ser obtida passando o ramo de magnetização para os terminais da máquina, como ilustrado na Figura 10 (b). Essa modificação é baseada essencialmente na hipótese de que  $\bar{V}_1 \approx \bar{E}_1 = \bar{E}_2$ . Todos os cálculos de desempenho serão efetuados usando o circuito equivalente aproximado. (Del Toro, 2011).

## 2.7 MODELO MATEMÁTICO DA MÁQUINA DE INDUÇÃO

### 2.7.1 Equação do Torque

A variação do torque com a velocidade (ou escorregamento) é uma característica importante do motor de indução trifásico. O formato geral desta curva pode ser obtido em termos da equação básica de torque, equação (11), e do conhecimento do procedimento de cálculo do desempenho. Quando o motor opera com um escorregamento muito pequeno, como quando a vazio, a equação (4) indica que a corrente do rotor é muito pequena, apenas suficiente para desenvolver um torque

capaz de suprir as perdas rotacionais. Além disso, o ângulo do fator de potência da corrente do rotor é praticamente zero. Ou seja,

$$\theta_2 = \tan^{-1}(sx_2 / r_2) \approx 0^\circ \quad (10)$$

para  $s$  muito pequeno.

$$T = \pi / 8 \cdot p^2 \Phi J_m \cos \Psi \quad N - m \quad (11)$$

$$T = 0,177 p \Phi (Z_2 K_{w2} I_2) \cdot \cos \Psi \quad N - m \quad (12)$$

Devido à existência de duas formas da equação básica do torque eletromagnético, duas interpretações são possíveis. Considerando-se primeiramente a última forma da equação (11), notamos novamente que o torque depende da presença de um campo do fluxo  $\phi$ , de uma distribuição ampère-condutor (ou lâmina de corrente), como insinuado por  $J_m$  e um ângulo de deslocamento espacial,  $\Psi$ .

Na segunda interpretação, o rotor é tratado como um solenoide. Que novamente confirma a existência de um padrão ótimo de campo para a produção do torque.

Quando uma carga mecânica é aplicada ao eixo do motor a reação imediata é uma pequena redução na velocidade do motor, o que aumenta o escorregamento. Assim, produzindo um aumento quase direto na corrente do rotor, porque para valores de escorregamento abaixo de 10%, o termo  $sx_2$  na equação (4) é desprezível. Quando a potência nominal é entregue, o escorregamento fica entre 3 e 5%, para a maioria dos motores de indução, e o valor do ângulo do fator de potência do rotor fica nas vizinhanças de  $10^\circ$ . Apesar disso, contudo, e por conveniência da apresentação gráfica, vamos assumir que, na carga nominal, o escorregamento é tal que a equação (10) dá um ângulo de fator de potência do rotor de  $36^\circ$ .

No motor de indução polifásico, o ângulo de deslocamento espacial  $\Psi$  é igual ao ângulo do fator de potência do enrolamento da armadura, isto é:

$$\psi = \theta_2 = \tan^{-1}(sx_2 / r_2) \quad (13)$$

Ainda com relação ao desenvolvimento do torque no motor de indução polifásico, deve-se fazer um comentário final. As equações do torque (11) e (12) são válidas com a condição de que o campo do fluxo e as distribuições de ampère-condutor sejam estacionárias entre si. Sabemos que a velocidade do campo do fluxo do estator, relativa à carcaça do estator, é  $\omega_s$ . Contudo porque as barras do rotor estão imersas no ferro do rotor, que por sua vez, gira na velocidade  $\omega_m = \omega_s(1-s)$  com relação à carcaça do estator, segue-se que a velocidade de rotação total as distribuição ampère-condutor do rotor é a soma de  $s\omega_s$  com  $\omega_s(1-s)$ . Evidentemente, isso é  $\omega_s$ . Portanto, a distribuição ampère-condutor do rotor e a distribuição do campo do fluxo são estacionárias em relação uma à outra. Na realidade, essa condição é satisfeita para todos os valores de escorregamento, e é uma consequência da característica de energização única do motor de indução. (Del Toro, 2011).

## 2.8 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA MÁQUINA DE INDUÇÃO

### 2.8.1 Teste de rotor livre

O teste de rotor livre determina as perdas rotacionais relacionadas ao rotor, que seria a potência mecânica dissipada nos enrolamentos de acoplamento, apoio e ventilação da máquina, como: atritos com mancais e rolamentos; e atrito da ventoinha.

O ensaio a vazio consiste em energizar o motor com tensão nominal, a fim de garantir produção nominal de campo magnético. Nessa situação, as perdas magnéticas serão nominais. O rotor deve estar livre para girar à vazio, sem carga, a fim de garantir que a energia elétrica consumida pelo motor seja utilizada para compensar as perdas magnéticas e rotacionais.

A partir do ensaio é possível determinar os parâmetros elétricos que compõem a circuito elétrico equivalente que representa cada uma das fases do motor de indução trifásico, operando à vazio.

### 2.8.2 Teste de rotor travado

A parcela de energia dissipada sob a forma de aquecimento, produzida sobre as resistências ôhmicas dos enrolamentos do estator e do circuito do rotor. Por serem proporcionais ao quadrado da corrente, são perdas que variam com a carga. Devem ser determinadas adotando-se uma situação de carga normalmente a nominal. São levantadas a partir do ensaio de rotor bloqueado.

O ensaio com rotor travado determina as perdas ôhmicas em um motor de indução trifásico operando a plena carga e consiste em: aplicar tensão ao estator, com o rotor bloqueado, suficiente para produzir a circulação de correntes nominais a fim de produzir sobre os circuitos do rotor e do estator, aquecimento proporcional a essa corrente (perdas no cobre). Nesta situação deve-se avaliar a tensão de rotor bloqueado ( $V_{BL}$ ) necessária para produzir corrente nominal; avaliar corrente do rotor bloqueado ( $I_{BL}$ ) igual à corrente nominal; avaliar a potência ativa consumida como rotor bloqueado ( $P_{BL}$ ) que é igual às perdas no cobre. Nessa situação pode-se desprezar a corrente de magnetização.



### 2.8.3 Teste com tensão CC para determinação da resistência do estator

A resistência do rotor desempenha um papel extremamente crítico no funcionamento de um motor de indução. Entre outras coisas, a resistência do rotor determina a forma da curva de conjugado X velocidade, determinando a velocidade na qual o conjugado máximo ocorre. Um ensaio mencionado acima na seção 2.8.2 – teste de rotor travado pode ser usado para determinar a resistência total do circuito do motor. Entretanto, esse teste encontra apenas a resistência total. Para obter com exatidão a resistência do rotor, é necessário conhecer a resistência do estator para que ela seja subtraída do total.

Há um teste para determinar a resistência do estator que independe da resistência do rotor, e das reatâncias indutiva do estator e rotor. Esse teste é denominado: ensaio CC, que consiste na aplicação de uma tensão contínua aos enrolamentos do estator de um motor de indução. Como a corrente é contínua, não haverá tensão induzida no circuito do rotor e fluxo resultante de corrente no rotor. Além disso, a reatância do motor é zero com corrente contínua. Portanto, a única grandeza que limita o fluxo de corrente no motor é a resistência de estator, a qual pode ser determinada.

Para realizar o ensaio, a corrente nos enrolamentos do estator é ajustada para o valor nominal e em seguida, a tensão entre os terminais é medida. A corrente nos enrolamentos do estator é ajustada para o valor nominal como uma tentativa de aquecer os enrolamentos com a mesma temperatura que eles teriam durante o funcionamento normal. Com o valor da resistência do estator, as perdas no cobre do estator a vazio podem ser determinadas. As perdas rotacionais podem ser encontradas pela diferença entre a potência de entrada a vazio e as perdas no cobre do estator.

O valor da resistência do estator calculado, desse modo não é completamente exato porque ignora o efeito pelicular que ocorre quando uma tensão alternada é aplicada aos enrolamentos.

## 2.9 CURVA DE MAGNETIZAÇÃO DA MÁQUINA DE INDUÇÃO

As características das máquinas elétricas dependem muito do uso de materiais magnéticos. Esses materiais são necessários para formar o circuito magnético e são usados pelos projetistas de máquinas para obter as características específicas das máquinas. Como se sabe, os materiais magnéticos estão abaixo do ideal. À medida que o fluxo magnético é aumentado, eles começam a saturar, com o resultado de que suas permeabilidades magnéticas começam a diminuir assim como a sua efetividade em contribuir à densidade de fluxo total da máquina.

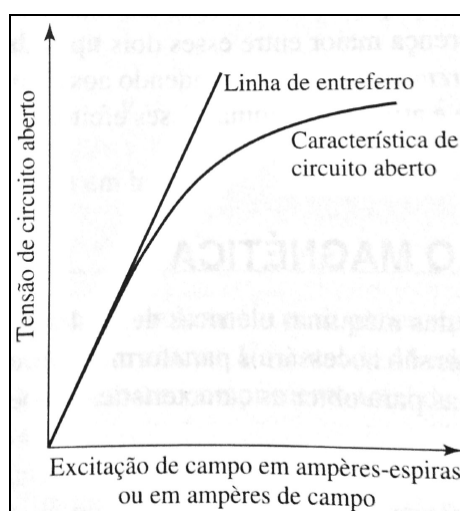
O conjugado eletromecânico e a tensão gerada em todas as máquinas dependem dos fluxos concatenados em seus enrolamentos. Para forças magneto motriz (fmm) específicas nos enrolamentos, os fluxos dependem das relutâncias das partes de ferro dos circuitos magnéticos e das relutâncias dos entreferros. Portanto, a saturação pode influenciar apreciavelmente as características das máquinas.

Outro aspecto da saturação, mais sutil e difícil de ser avaliado sem comparações experimentais e teóricas, relaciona-se com a influência da saturação sobre as premissas básicas a partir das quais a abordagem analítica das máquinas é desenvolvida. Especificamente, as relações envolvendo a fmm de entreferro baseiam-se tipicamente na suposição de que a relutância do ferro é desprezível. Quando essas aplicações são aplicadas às máquinas na prática, com graus variados de saturação no ferro, erros significativos nos resultados das análises podem ser esperados. Por essas razões, para aperfeiçoar tais relações analíticas, a máquina real pode ser substituída por uma máquina equivalente, uma cujo ferro tem relutância desprezível, mas cujo entreferro é aumentado de um valor suficiente para absorver a queda de potencial magnético no ferro da máquina real.

Do mesmo modo, os efeitos não uniformes, tais como as ranhuras e os condutos de ventilação, também podem ser incorporados aumentando-se o comprimento efetivo do entreferro. No final, essas diversas técnicas de aproximação devem ser verificadas e confirmadas

experimentalmente. Nos casos em que se constatar que essas técnicas simples são inadequadas, análises detalhadas, com as que empregam elementos finitos ou outras técnicas numéricas, podem ser usadas. No entanto, deve-se ter em mente que o uso dessas técnicas representam um aumento significativo da complexidade de modelagem.

As características de saturação das máquinas rotativas são apresentadas tipicamente na forma de uma característica de circuito aberto ou a vazio, também chamada curva de magnetização ou curva de saturação. Um exemplo está mostrado na Figura 11.



**Figura 11 - Curva característica de circuito aberto típico e linha de entreferro**

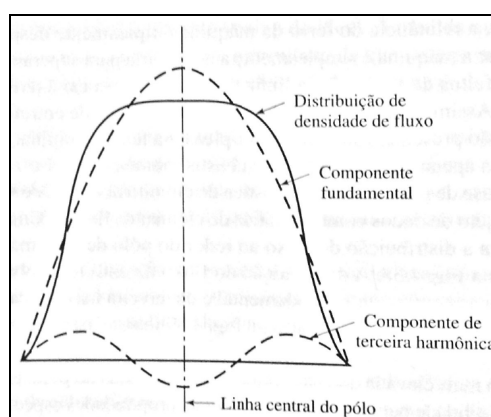
**Fonte: Fitzgerald *et al.*, 2006.**

Essas características representam a curva de magnetização para a geometria de ferro e do ar. A linha reta tangente à porção inferior da curva é a linha de entreferro, correspondendo aos níveis baixos de fluxo dentro da máquina. Sob essas condições, a relutância do ferro da máquina é tipicamente desprezível, e a fmm necessária para excitar a máquina é simplesmente a necessária para superar a relutância do ar. Se não fosse pelos efeitos da saturação, a linha de entreferro e a característica de circuito aberto iriam coincidir. Assim, o afastamento entre a curva e a linha de entreferro é uma indicação do grau de saturação presente. Em máquinas típicas, na tensão nominal, a razão entre a fmm total e a requerida apenas pelo entreferro está usualmente entre 1,1 e 1,25.

Na fase de projeto, a característica de circuito aberto pode ser calculada a partir de técnicas de projeto de dados como a análise de elementos finitos. A distribuição do fluxo de entreferro obtida com essa solução, juntamente com as componentes fundamental e a terceira harmônica, está mostrada na Figura 12.

Além dos efeitos de saturação, a Figura 12 ilustra claramente o efeito de um entreferro não uniforme. Como esperado, a densidade de fluxo ao redor da face polar, onde o entreferro é pequeno, é muito mais elevada que nas regiões mais afastadas do pólo. Esse tipo de análise detalhada é de grande utilidade para um projetista obter as propriedades específicas de uma máquina.

Para um motor de indução, a máquina é operada na velocidade síncrona ou próxima dela (caso em que uma corrente muito baixa será induzida nos enrolamentos do rotor), e valores de corrente de magnetização são obtidos para uma série de valores aplicados de tensão de estator. Deve ser enfatizado, no entanto, que a saturação em uma máquina totalmente sob carga ocorre como resultado da fmm total que atua no circuito magnético. Como a distribuição de fluxo sob carga é diferente em geral de quando não há carga, os detalhes das características de saturação da máquina podem ser diferentes da curva de circuito aberto da Figura 11. (Fitzgerald *et. al.*, 2006).



**Figura 12 - Onda de densidade de fluxo com suas componentes fundamentais e de terceira harmônica**

**Fonte: Fitzgerald *et al.*, 2006.**

### 3 ASPECTOS TEÓRICOS DO GERADOR DE INDUÇÃO AUTO-EXCITADO

Estudos sobre o gerador de indução iniciaram-se na década de 30 como pode ser visto nos trabalhos de Basset *et all*, (1935) e Wagner (1939). O gerador de indução não é propriamente um gerador, mas um motor de indução utilizado para gerar energia.

#### 3.1 CLASSIFICAÇÃO DO GERADOR DE INDUÇÃO

Basicamente existem dois tipos de motores de indução que podem ser utilizados como gerador. O primeiro tipo possui um rotor bobinado e anéis coletores que podem interligar o circuito do rotor a um circuito qualquer localizado no exterior da máquina. Já o segundo tipo possui um rotor denominado rotor em gaiola de esquilo, o qual foi utilizado no presente trabalho e descrito em detalhes na seção 2.3.

Dependendo da máquina primária utilizada (velocidade constante ou velocidade variável) e da sua localização (perto da rede elétrica ou em lugares isolados afastados da rede) os esquemas de geração podem ser classificados de maneira geral como:

- **Velocidade constante – Frequência constante**

Neste esquema a velocidade da máquina primária se mantém constante ou por um ajuste contínuo da rotação no seu eixo, e ou, das características do gerador. Um gerador de indução pode operar em uma barra infinita com um deslizamento de 1% a 5% acima da velocidade síncrona. Os geradores de indução são mais simples que os geradores síncronos. São mais fáceis de operar, controlar e manter, não tem problemas de sincronização e são econômicos.

- **Velocidade variável – Frequência constante**

Os esquemas para obter uma frequência constante são mencionados abaixo:

- *Ligações CA-CC-CA*

Com a utilização de tiristores de alta potência, a saída de CA de um alternador trifásico é retificada por meio de uma ponte retificadora e depois é convertida novamente para CA utilizando inversores. Devido à frequência ser determinada pela frequência da rede, são também conhecidos como inversores síncronos. (Singh *et al.*, 2006).

- *Gerador de indução duplamente alimentado*

O gerador de indução duplamente alimentado (GIDA) é uma máquina de indução de rotor enrolado acoplado a uma máquina primária. Os terminais do estator estão conectados a uma rede elétrica com tensão e frequência constante. A frequência de saída variável é alimentada à rede elétrica por meio de um conversor de *link* CA-CC-CA que consiste numa ponte retificadora de onda completa e uma combinação de inversor a base de tiristores, ou de uma fonte inversora de corrente (CSI – *Current Source Inverter*) e conversor a base de tiristores. (Singh *et al.*, 2006).

Uma das maiores vantagens do GIDA em sistemas de geração é o único esquema no qual a potência gerada é maior que a potência nominal da máquina. No entanto, devido às desvantagens operacionais o esquema GIDA não pode ser amplamente usado. Os requisitos de manutenção são grandes, e o fator de potência é baixo, a confiabilidade é pequena sob condições de muito pó ou anormal devido ao desgaste do anel de deslizamento disposta sobre o eixo do rotor. Este esquema não é apropriado para geração de energia elétrica em zonas isoladas e remotas, pois requer o fornecimento da rede elétrica para manter a excitação e gerar campo magnético no entreferro.

- **Velocidade variável – Frequência variável**

Se a velocidade da máquina primária varia continuamente, o funcionamento do gerador síncrono pode ser afetado. Para situações de velocidade variável o gerador de indução auto-excitado pode utilizar, por exemplo, no aquecimento de cargas resistivas as quais são essencialmente insensíveis à variação.

### 3.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO GERADOR DE INDUÇÃO AUTO-EXCITADO

As máquinas de indução podem gerar energia quando a velocidade do rotor é maior que a velocidade do campo magnético girante produzido pelo estator, e quando são conectadas a uma fonte externa de energia reativa. O que determina a forma de operação da máquina é o sinal do conjugado mecânico, o qual deve ser negativo para representação de gerador.

Em sistemas isolados, a energia reativa necessária para criar o campo magnético do estator pode ser fornecida por um banco de capacitores segundo Basset e Potter, 1935. Devido às características apresentadas na seção 2.2 de classificação das máquinas de indução, deste trabalho, as máquinas de indução com rotor gaiola de esquilo tornam-se interessantes para sistemas de geração de baixa e média potência. No entanto, a amplitude e a frequência das tensões de saída de um gerador de indução auto-excitado depende da carga. (Simões e Farret, 2008).

Várias soluções têm sido apresentadas para regular as tensões de saída de geradores de indução em sistemas isolados. Entre as alternativas existentes, o presente trabalho contempla a implementação de um compensador estático de reativos, que absorve ou injeta reativo no sistema de acordo com a variação da carga acoplada ou variação da velocidade da máquina primária.

### 3.3 ANÁLISE DO PROCESSO DE AUTO-EXCITAÇÃO

O fenômeno de auto-excitação da máquina de indução pode ou não ocorrer. Isto significa que mesmo conectado a capacitores nos terminais do estator da máquina e girar o rotor, pode ou não aparecer tensão nos terminais do gerador. Quatro são os fatores que determinam o processo de auto-excitação:

- **Parâmetros da máquina:** estes são determinados pelo tipo de material dos enrolamentos do estator, tipo de rotor (bobinado, tipo gaiola, dupla gaiola, barras profundas), classe de fabricação (NEMA, IEC), etc...;

- **Indutância de magnetização:** é o principal fator para o estabelecimento, crescimento e estabilização da tensão nos terminais em condições a vazio e com carga e está determinada pelo grau de saturação do material magnético;

- **Velocidade do motor principal:** quando o gerador de indução trabalha em vazio existe uma velocidade mínima para que o processo de auto-excitação seja bem sucedido. Enquanto em condições com carga existe uma velocidade mínima e uma velocidade máxima. Portanto é necessário determinar, no caso geral, a velocidade mínima necessária para que o fenômeno de auto-excitação ocorra;

- **Banco de capacitores:** Junto com a velocidade do motor principal, o tamanho do banco de capacitores, é um fator que pode ser manipulado para obter uma tensão necessária em condições a vazio e com carga. No entanto, para uma velocidade selecionada, existe também um valor mínimo dos capacitores para que se estabilize uma tensão nos terminais do gerador;

- **Campo magnético residual:** Também é necessário existir o magnetismo residual ou fluxo magnético remanescente no gerador, para a elevação da tensão à medida que a velocidade da máquina primária aumenta. Pois, mesmo com o banco de capacitores dimensionados corretamente e conectados ao gerador, e este girando a uma velocidade acima da velocidade síncrona, pode ser necessário à energização inicial das bobinas do gerador com aplicação de tensão nominal por alguns segundos (no caso utilizamos em torno de 30s) sendo o procedimento visto em detalhes na seção 6.4.



### 3.3.1 A saturação magnética e seu efeito na auto-excitação e estabilidade

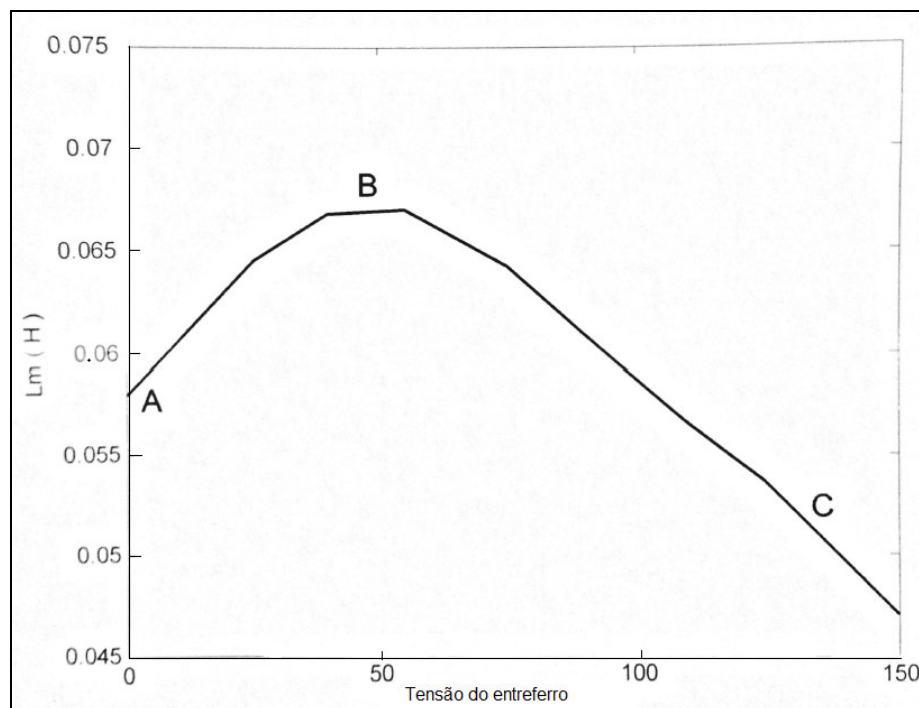
Quando se modela a máquina de indução como motor, é importante se determinar a indutância de magnetização na tensão nominal. No entanto, quando a máquina de indução funciona como gerador auto-excitado, a variação da indutância de magnetização é o principal fator na dinâmica da tensão e sua estabilização. A saturação magnética é responsável para que a tensão gerada nos terminais atinja um valor de estado estacionário.

### 3.3.2 A indutância de magnetização

Várias investigações publicadas demonstram que o valor da indutância de magnetização, refere-se à tensão de entreferro para valores pequenos de tensão (região não saturada), é dada por uma constante que diminui quando a máquina se satura. No entanto, essa representação não reflete verdadeiramente a variação da indutância de magnetização, e como consequência não mostra o fenômeno real que ocorre no início da auto-excitação.

A indutância de magnetização deve representar de tal forma que mostre o valor correspondente para cada valor de tensão. A Figura 13 permite analisar da melhor forma a característica da indutância de magnetização. (Singh, 2006).

Observando a Figura 13, no início da auto-excitação no ponto **A**, onde a tensão é próximo de zero, o valor de  $L_m$  é em torno de 57.9mH. Uma vez que a auto-excitação começa, a tensão gerada aumenta, e  $L_m$  também irá alcançar seu valor máximo no ponto **B**. Após o ponto **B** temos o ponto **C**, onde  $L_m$  diminui enquanto a tensão continua aumentando até atingir seu valor no estado de equilíbrio.



**Figura 13 - Variação da indutância de magnetização referente a tensão**  
**Fonte: Montalvo (2006, p. 38).**

Entre os pontos **A** e **B** se encontra a *região instável*. Se a máquina começar a gerar tensão nesta região, uma pequena diminuição da velocidade causará uma diminuição do valor de  $L_m$ , que por sua vez provocará uma diminuição da tensão, e por sua vez irá reduzir  $L_m$ , que novamente resultará em uma diminuição da tensão que finalmente se acabará. A Figura 14 mostra este fenômeno. Uma vez que a tensão cai, não existe fenômeno transitório, portanto a tensão não aumenta mesmo que a velocidade aumente novamente para seu valor inicial. Esta situação pode causar a desmagnetização do núcleo. Quando o núcleo se encontra desmagnetizado a auto-excitação não ocorre. Para magnetizar o núcleo, a máquina deve funcionar como um motor por alguns minutos, ou deve-se excitar os enrolamentos com uma fonte de corrente contínua. Uma outra opção é carregar os capacitores com uma fonte de corrente contínua.

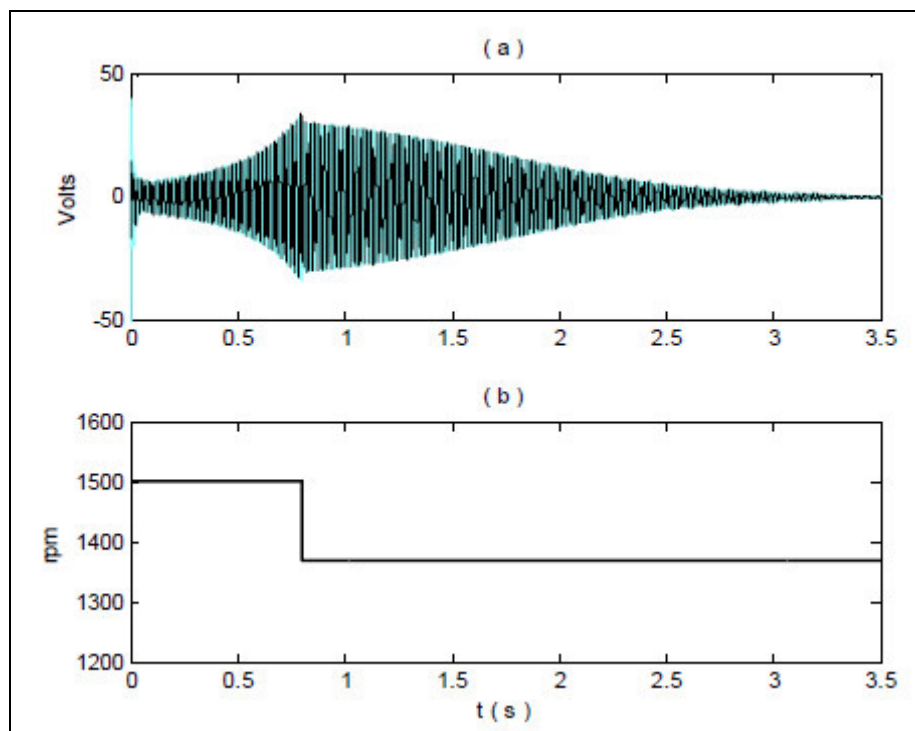


Figura 14 - Processo de auto-excitação sem sucesso, a velocidade diminui entre os pontos A e B. A tensão gerada se perde. (a) Tensão (b) Velocidade  
Fonte: Montalvo (2006, p. 39).

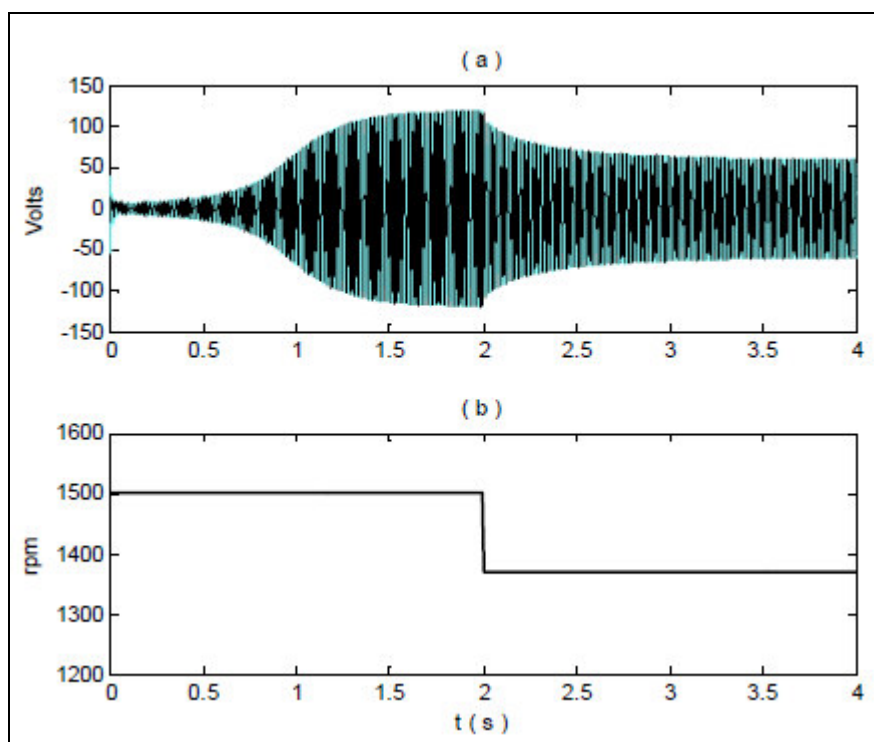


Figura 15 - Processo de auto-excitação, a velocidade diminui entre os pontos B e C. A tensão gerada se estabiliza em um novo ponto de operação. (a) Tensão (b) Velocidade  
Fonte: Montalvo (2006, p. 40).

Entre os pontos **B** e **C** se encontra a região estável de operação. Quando a velocidade diminui a tensão diminui, mas o valor de  $L_m$  aumenta o que permite que o gerador continue operando a uma tensão menor que a inicial, ou seja, em outro ponto de funcionamento estável. A Figura 15 ilustra este fenômeno. (Montalvo, 2006).

### 3.3.3 O gerador de indução com carga

O gerador pode fornecer potência ativa para uma carga, nestas condições a tensão do gerador varia junto com a carga conectada.

Se o processo de auto-excitação for bem sucedido, a análise para este caso com carga é semelhante à análise realizada para o caso a vazio, apenas precisando de uma velocidade mais alta conforme o tipo e potência da carga. Em condições de carga, existe uma velocidade mínima e uma velocidade máxima, isto é, que para um determinado valor de carga, a máquina poderá gerar energia dentro de um intervalo de velocidade, mínima para não perder a magnetização e também para atender uma tensão mínima requerida pela carga, e máxima para não fornecer tensão acima da tensão suportada pela carga.

A vazio, o gerador somente requer uma velocidade mínima para a auto-excitação, conforme descrito na seção 6.5.2 do presente trabalho, para se obter uma tensão de 240 V foi necessário aplicar uma velocidade de 1968 rpm. No entanto, em condições com carga, de acordo com a descrição dos testes realizados com cargas resistiva e indutiva demonstrados na seção 6.5.1, temos que para alimentar uma carga resistiva (uma lâmpada incandescente de 40 W / 220 V por fase) foi necessário uma velocidade de 1913 rpm para uma tensão de 220 V. Já para alimentar mais uma carga indutiva (motor trifásico de 0,33 cv) foi necessário uma velocidade de 1987 rpm para uma tensão de 220 V.

Para manter a auto-excitação do gerador para o ensaio realizado, descrito em detalhes na seção 6.5, foi utilizado dois capacitores trifásicos de 9  $\mu$ F conectados em estrela, sendo necessário inserir um

terceiro capacitor trifásico de 9  $\mu\text{F}$  somente para vencer a corrente de partida no momento da ligação da carga indutiva.

Uma vez que se obtêm os valores mínimos e máximos, pode-se determinar o intervalo de velocidade dentro da qual a máquina pode gerar energia com segurança. É normal que o gerador tenha diferentes características de velocidade-capacitância para diferentes valores de carga. Esta característica também ajuda a determinar o faixa de velocidade em que o gerador pode funcionar no estado de equilíbrio.

### 3.3.4 Variação da carga e seu efeito

Quando uma máquina de indução opera como motor, conectado a uma fonte de potência de frequência constante, a velocidade do campo magnético giratório do entreferro permanece constante. Quando se liga alguma carga ao motor, a velocidade do rotor varia, diminui, com relação à velocidade síncrona determinada pela frequência da fonte. No entanto, para um gerador de indução auto-excitado, cujo rotor gira a velocidade constante, a velocidade do campo magnético do entreferro, se atrasa com relação à velocidade do rotor.

Em condições a vazio, o escorregamento será muito pequeno, de modo que a frequência da tensão gerada será muito próximo da frequência determinada pela velocidade do rotor. Por exemplo, se o rotor gira a 1500 rpm, a frequência da tensão gerada a vazio será muito próxima a 50 Hz.

Tensões e correntes são geradas no processo de auto-excitação e uma quantidade de potência é dissipada pela máquina. O gerador de indução precisa absorver uma quantidade equivalente de potência da máquina primária, o qual lhe fará operar a uma velocidade síncrona, que é um pouco menor que a velocidade do rotor. Quando se conecta ou aumenta uma carga ao gerador o escorregamento negativo também aumenta. Neste caso a velocidade do rotor é o parâmetro de entrada, portanto, o aumento do escorregamento se deve a uma diminuição da

velocidade do campo magnético giratório no entreferro. A frequência e a tensão gerada são proporcionais à velocidade do campo magnético giratório. A diminuição da velocidade do campo magnético ocasionará uma diminuição da tensão gerada e sua frequência.

A porcentagem da diminuição da magnitude da tensão é maior se comparada à porcentagem do decaimento da frequência. Isto porque, com a ligação da carga, a corrente de excitação que é fornecida pelo capacitor, diminui, e uma diminuição da corrente de excitação se traduz em menos fluxo magnético. Quando o gerador de indução fornece potência ativa a uma carga, sua velocidade síncrona diminui para produzir a quantidade de escorregamento necessária para cada ponto de operação.

A tensão se estabelece em um novo ponto de operação sempre e quando a potência demandada pela carga, possa ser fornecida pelos capacitores. Caso contrário, a tensão continua diminuindo até haver um colapso que deixe o gerador fora de operação podendo causar a desmagnetização do núcleo.

Se a velocidade da máquina primária diminuir com a ligação de carga, a diminuição da tensão e frequência é maior que quando a velocidade permanece constante.

Uma vez que a magnitude da tensão e da frequência diminui depois da conexão de uma carga, o gerador atinge um novo ponto de funcionamento estável. A grandeza de tensão pode aumentar de duas formas: aumentando o valor da capacitância nos terminais; ou aumentando a velocidade da máquina primária, até atingir a intensidade desejada. No entanto, como a frequência é proporcional à velocidade do rotor, a única maneira de aumentar a magnitude da frequência é aumentando a velocidade da máquina primária.

Assim, um aumento no valor da capacitância, aumenta a intensidade da tensão, mas não a magnitude da frequência. Embora um aumento da velocidade da máquina primária, aumente a intensidade da tensão e frequência.

Portanto, caso se deseje manter constante a intensidade da tensão e frequência, se deve realizar um ajuste de ambos os parâmetros, da capacitância e da velocidade da máquina primária.

## **4 ASPECTOS TEÓRICOS DA COMPENSAÇÃO DE REATIVOS**

### **4.1 INTRODUÇÃO**

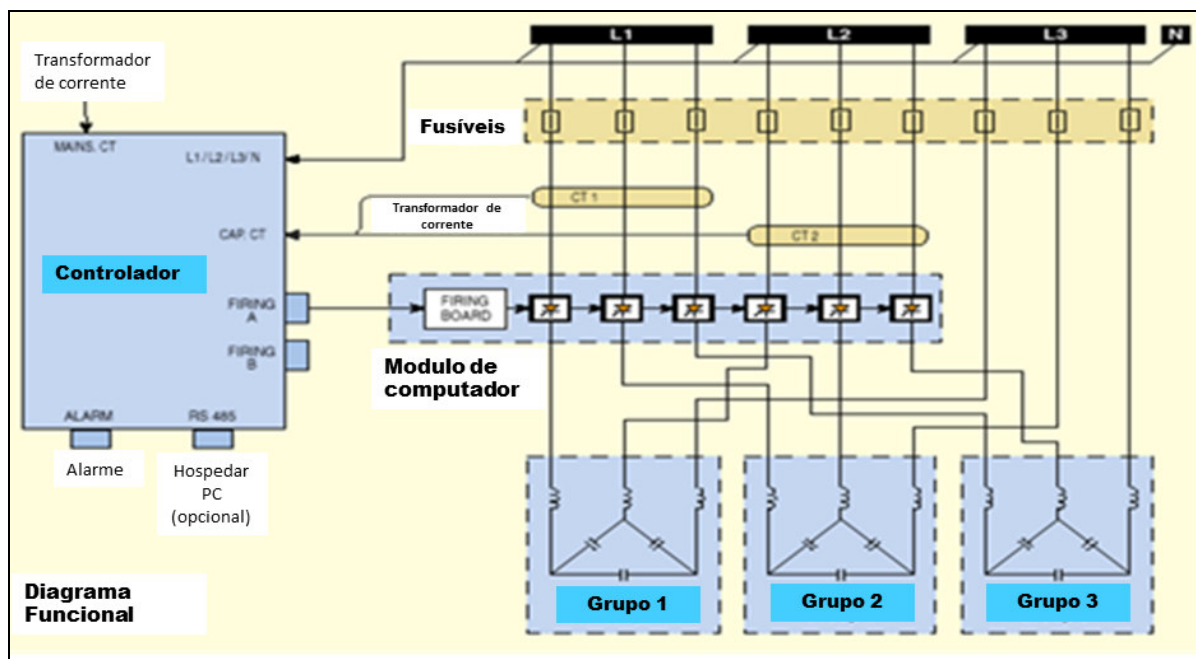
A energia elétrica é um insumo em praticamente todos os sistemas produtivos, entretanto, parte dos sistemas elétricos utilizados nos processos possui um problema denominado reativo na sua rede. A energia reativa num sistema elétrico prejudica a qualidade da energia do sistema, impactando na sua regulação e por consequência na sua utilização. Sem um controle eficiente de reativos não é possível operar a rede dentro de parâmetros aceitáveis.

A compensação adequada de reativos nas cargas é necessária para a manutenção da qualidade na rede. O uso da tecnologia para atuar na compensação reativa é uma vantagem para a eficiência do sistema.

### **4.2 FUNCIONAMENTO DO COMPENSADOR**

O sistema de compensação de energia reativa opera através da manobra de grupos de capacitores ou grupos de filtros LC por meio de dispositivos de manobra estática (SCR ou IGBT), indutores, capacitores, placa controladora microprocessada com chaveamento estático e por fim um sistema de proteção com fusíveis ou disjuntores. Na Figura 16 pode-se observar o diagrama funcional do compensador.



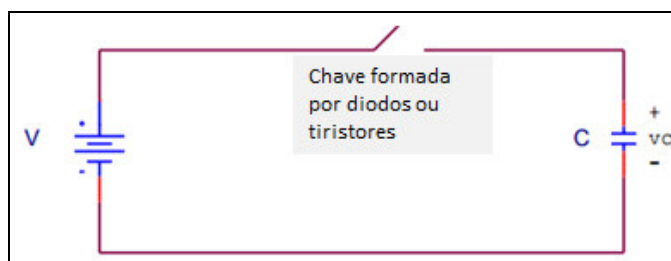


**Figura 16 - Diagrama funcional do compensador**  
 Fonte: Os autores, 2014.

O sistema fornece energia capacitiva às cargas por meio de um banco de capacitores e através do chaveamento dos tiristores o excesso de energia capacitiva é consumida pelos indutores chaveados ao sistema. O chaveamento pode ser realizado mecanicamente, ou através de um circuito dedicado.

#### 4.3 CAPACITOR FIXO E CAPACITOR CHAVEADO

Capacitor é um componente eletrônico que tem capacidade de armazenar carga elétrica, conforme sua carga diminui, também diminuem suas medidas de tensão e corrente, sua carga é medida em Farad. O capacitor fixo é ligado diretamente ao sistema, sem intervenções para seu funcionamento, no capacitor chaveado, o componente é montado num circuito onde sua ligação ao sistema é condicionada à frequência de chaveamento normalmente realizada por um conjunto de diodos ou transistores, esses componentes possibilitam uma alta frequência de chaveamento, conforme Figura 17 abaixo.

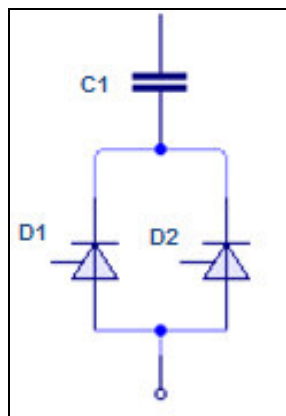


**Figura 17 - Esquema conceitual para chaveamento dos tiristores**  
Fonte: Os autores, 2014.

Existem diversas aplicações para o chaveamento de capacitores, entretanto a aplicação que será comentada é no controle de reativos dentro de um sistema elétrico.

A energia reativa é determinada pela conjunção de vários fatores, condições da rede, filtros e as cargas do sistema. Para um controle de reativos eficaz, entre outros fatores é fundamental a avaliação da utilização de capacitores fixos ou chaveados. O capacitor fixo pode ser utilizado quando o conjunto carga e gerador permitem a utilização de um capacitor fixo, sem que este apresente uma alta oscilação na corrente do sistema quando comparado ao funcionamento a vazio e com carga.

O sistema que apresentar com alto índice de oscilação de corrente, em condições de carga e vazio, requer o chaveamento de capacitores, desta forma, é possível manter a corrente do sistema em parâmetros mais adequados, pois a atuação de parte dos capacitores ocorre após o chaveamento para suprir a necessidade do aumento da energia capacitiva do sistema. A adição dos capacitores ao sistema aumenta significativamente a corrente do sistema gerador, já que parte desta corrente seria para a alimentação dos próprios capacitores, o sistema voltaria a ter sua corrente em níveis aceitáveis apenas quando a carga fosse ligada. É importante salientar que tais parâmetros devem ser calculados e testados, considerando as cargas a serem ligadas ao sistema e assim identificar os capacitores que permitiram garantir a energia capacitiva do sistema em níveis aceitáveis de operação.



**Figura 18 - Esquema do capacitor chaveado**  
Fonte: Os autores, 2014.

Na Figura 18 é apresentado o capacitor chaveado, seu esquema demonstra que o capacitor é acionado através de um grupo de tiristores, que por sua vez é acionado manualmente ou por algum dispositivo automático, normalmente esse dispositivo é uma placa com circuito de disparo dos tiristores.

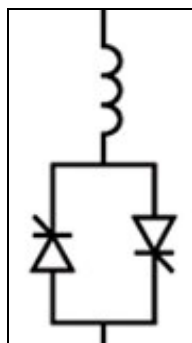
#### 4.4 INDUTOR FIXO E INDUTOR CHAVEADO

O indutor tem uma função muito importante no controle de reativos de um sistema, pois ele consome a energia reativa excedente. É primordial considerar as condições da rede, filtros e as cargas ligadas ao sistema na determinação do banco de indutores. O excesso de ação dos indutores pode eliminar o residual que permite a auto-excitação da máquina de indução.

Consideradas as condições do sistema, analisa-se qual é o melhor mecanismo de inserção dos indutores no sistema, ou seja, utilizar o indutor fixo ou o indutor chaveado. O indutor fixo pode ser utilizado quando existe pouca variação de reativos, de modo que seja possível determinar um banco de indutores que consuma os reativos excedentes sem a ocorrência de desequilíbrio do sistema.

Nos sistemas em que há grandes oscilações de reativos, sendo necessário variar o consumo de reativos para manter as condições de

auto-excitação da máquina de indução, indica-se a utilização de um banco de indutores chaveados.



**Figura 19 - Esquema do indutor chaveado**  
Fonte: Os autores, 2014.

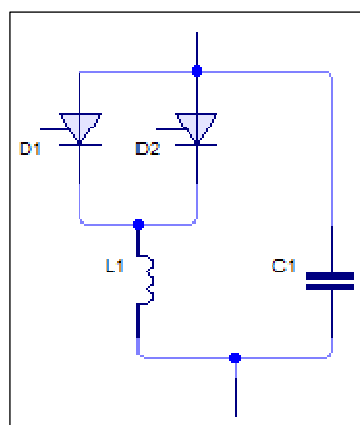
Na Figura 19 é mostrado o esquema do indutor chaveado. O indutor é chaveado por meio de um conjunto de tiristores que são acionados por um circuito de disparo que pode ser acionado de forma manual ou por meio de um controle específico. Os circuitos de disparo podem ser analógicos ou digitais.

#### 4.5 CAPACITOR FIXO E INDUTOR CHAVEADO

A utilização do capacitor fixo e indutor chaveado é indicado quando no sistema pode-se estabelecer um capacitor fixo, calculando a carga necessária que deve ser fornecida pelo capacitor para manter a excitação do gerador e a manutenção da tensão necessária quando operando em vazio e com carga. Entretanto, devido à variação dos tipos de cargas e das correntes de pico medidas no sistema, haverá um excesso de reativos que devera ser retirado.

Os reativos podem ser controlados através do chaveamento em alfa frequência dos indutores, que consomem os reativos controlando rapidamente as oscilações detectadas. A tensão aplicada no gatilho

dos tiristores no chaveamento dos indutores controla o nível de reativos consumidos pelos indutores.



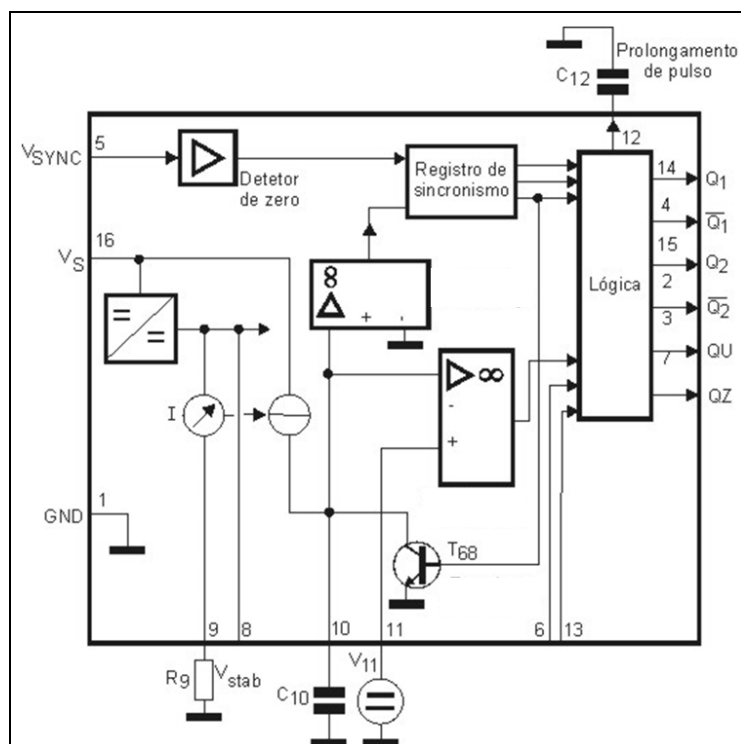
**Figura 20 - Esquema do capacitor fixo e indutor chaveado**  
**Fonte: Os autores, 2014.**

A Figura 20 apresenta o esquema, nele é possível observar que o capacitor está ligado diretamente ao sistema, sem que haja qualquer controle, entretanto os tiristores controlam a ação dos indutores.

#### 4.6 CIRCUITOS DE DISPARO

O circuito de disparo tem a finalidade de acionamento de um sistema com pontes tiristorizadas trifásicas, semi-controlada ou totalmente controladas. Este sistema possibilita o acoplamento com circuitos de controle de tensão, corrente ou velocidade para aplicação em acionamentos ou controles de máquinas elétricas.

O circuito integrado (CI) TCA785P é indicado pelo fabricante para realizar o controle de tiristores, triacs e transistores em circuitos de alta potência. Os pulsos de disparo deslocam-se de 0 a 180 °C, suas principais aplicações são em conversores, controles de potência trifásicos, entre outras. O fabricante fornece-o em com 16 pinos, possui ampla faixa de temperatura de operação. Na Figura 21 poderá ser observado o diagrama de blocos do CI.



**Figura 21 - Diagrama de blocos do TCA785P.**  
**Fonte: Os autores, 2014.**

Segundo dados fornecidos pelo fabricante, no TCA785P, o sinal de sincronização é obtido através de uma resistência ôhmica de valor alto a partir da tensão de linha (tensão  $V_{sync5}$ ). Um detector de tensão zero avalia as zero passagens e as transfere para o registro de sincronização. Esse registro de sincronização controla um gerador de rampa, nesse registrador o capacitor  $C_{10}$ , carrega-se com uma corrente constante (determinada pelo  $R_9$ ). Se a tensão da rampa  $V_{10}$  exceder a tensão de controle  $V_{11}$  (acionamento ângulo  $\phi$ ), um sinal é processado para a lógica. Dependente da magnitude da tensão de controle  $V_{11}$ , o acionamento ângulo  $\phi$  pode ser deslocado dentro de um ângulo de fase de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ .

Para cada meio ciclo, um pulso positivo de duração de aproximadamente  $30 \mu s$  aparece nas saídas  $Q_1$  e  $Q_2$ . A duração do pulso pode ser prolongada até  $180^\circ$  através do capacitor  $C_{12}$ . Se o pino 12 é ligado ao terra, os pulsos terão duração entre o ângulo de disparo e  $180^\circ$ .

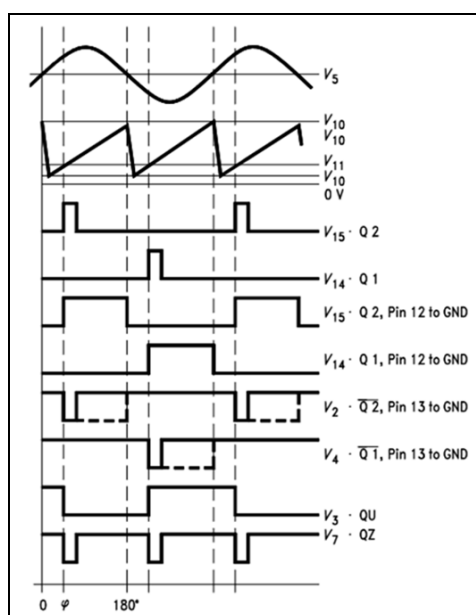
Saídas e entradas com sinais inversos de Q 1 e Q 2. Um sinal de com ângulo de disparo mais  $180^\circ$  que pode ser usado para controlar uma lógica externa, está disponível no pino 3.

Um sinal que corresponde à ligação NOR entre Q1 e Q1 NOR está disponível na saída QZ (pino 7). A entrada de inibição pode ser usada para desativar saídas Q1, Q2 e o pino 13 pode ser usado para estender as saídas ao comprimento entre o ângulo total do pulso ( $180^\circ$ ) e o ângulo de disparo.

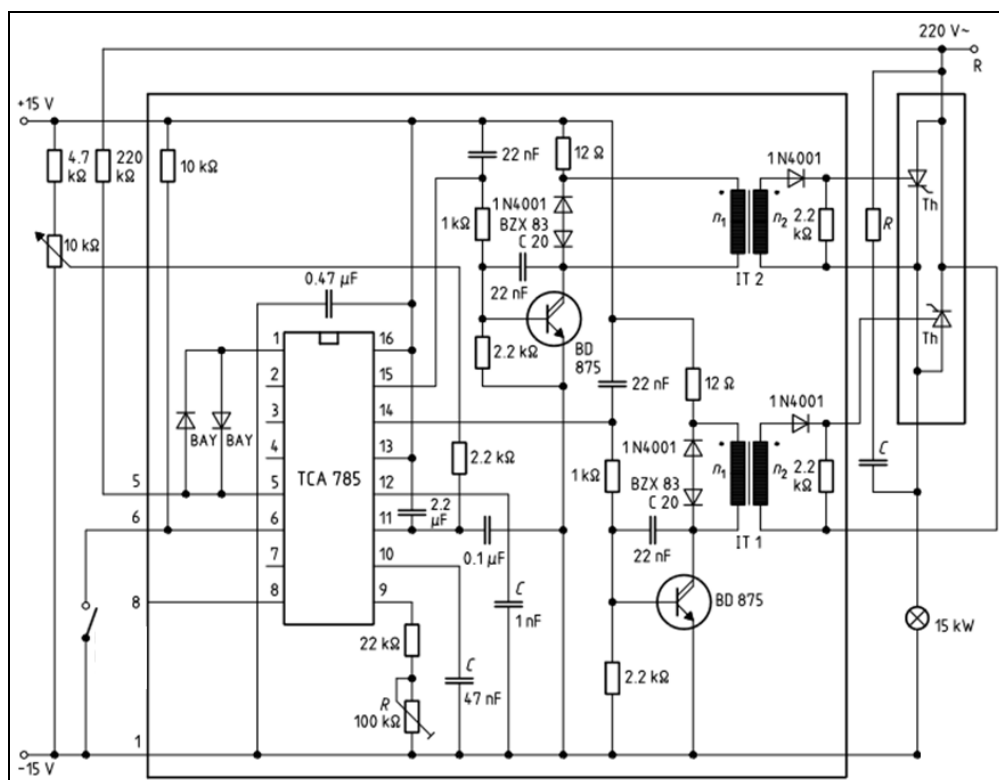
Este circuito controla o ângulo de disparo dos tiristores, este controle pode ser realizado através de um potenciômetro ou através de tensão contínua aplicada no circuito, neste caso, possibilitará o controle automático.

Na Figura 22 é demonstrado o gráfico com o diagrama de pulsos do CI.

Observa-se na Figura 23 a aplicação do TCA785 num circuito de controle de dois tiristores, numa rede de corrente alternada. São dois tiristores em antiparalelo, o sinal passa por um transformador de pulso. O ângulo de disparo pode ser controlado através de um potenciômetro, podendo variar de 0 a  $180^\circ$ .



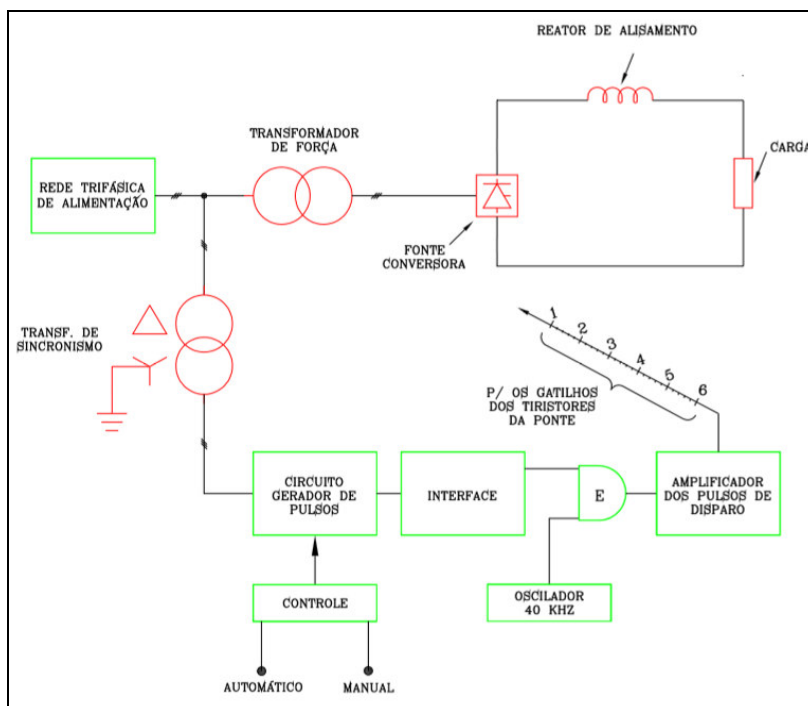
**Figura 22 - Diagrama de pulsos do TCA785**  
**Fonte: Os autores, 2014.**



**Figura 23 - Circuito de controle de dois tiristores com o TCA785**  
**Fonte: Os autores, 2014.**

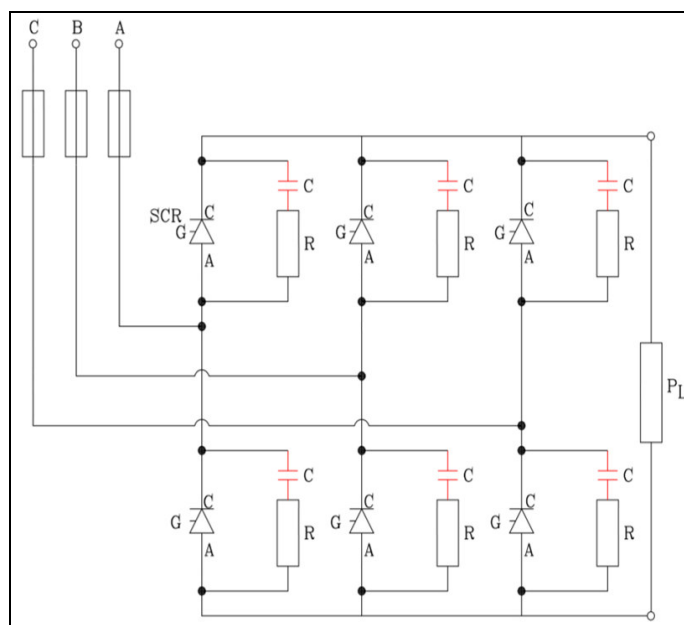
Na Figura 24 é demonstrado o diagrama de blocos do sistema de disparo da ponte conversora tiristorizada. O circuito é alimentado por uma rede trifásica, passando por um transformador e por uma ponte conversora tiristorizada. A rede está ligada em um transformador de sincronismo conectado a um circuito gerador de pulso que pode ter seu controle manual ou automático. O sinal emitido pelo circuito é fraco, seu sinal é ampliado pelo amplificador de pulso que acionam os gatilhos da ponte conversora.





**Figura 24 - Diagrama de blocos de sistema de disparo**  
 Fonte: Os autores, 2014.

Na Figura 25 é apresentado o circuito da ponte conversora com seis tiristores que são acionados pelo amplificador de pulsos de disparo.



**Figura 25 - Detector da ponte conversora com 6 tiristores**  
 Fonte: Os autores, 2014.

As tensões nas saídas não são suficientes para fornecer uma corrente de gatilho para acionar os tiristores de potência. Desta forma, faz-se necessário um circuito para a amplificação do sinal, para isso pode ser usado um circuito de comutação com tiristores.

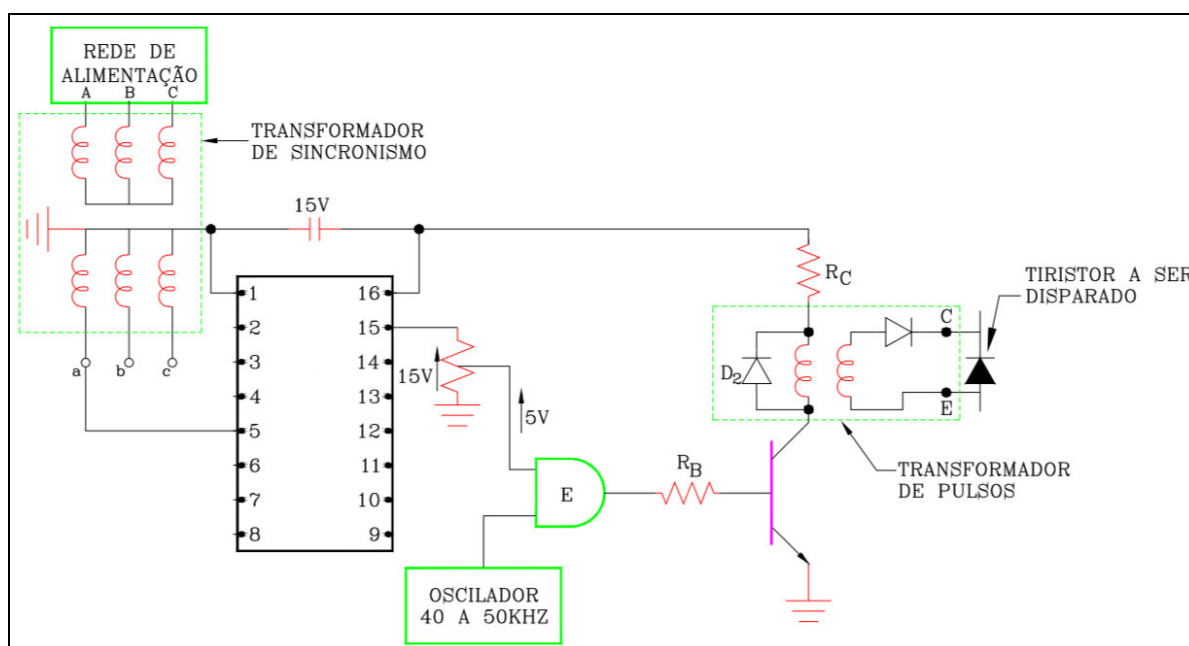
Usa-se também transformadores de pulsos para isolar o circuito de disparo do circuito de potência, esses transformadores possuem a relação de transformação 1:1.

Os transformadores de pulso possuem um diodo conectado em paralelo no seu primário para evitar sobretensões.

Diodos conectados em série nos secundários dos transformadores de pulsos para garantir tensões positivas entre o gatilho e o cátodo.

Deve-se colocar um capacitor nos pontos de alimentação do terra para filtrar ruídos nas alimentações do circuito.

A seguir a Figura 26 mostra o esquema de disparo do tiristor:



**Figura 26 - Esquema de disparo do tiristor**  
 Fonte: Os autores, 2014.

#### 4.7 SUPORTE DA TENSÃO PELO COMPENSADOR

O suporte da tensão pode ser realizado por equipamento de eletrônica de potência avançado que é utilizado na compensação de potência reativa. Tem como função suportar a tensão em áreas críticas do sistema de potência. O predecessor do compensador síncrono estático, ou seja, o compensador síncrono rotativo foi muito usado no passado para a compensação shunt de reativos.

O compensador rotativo apresenta várias características funcionais desejáveis: a capacidade de injetar elevadas correntes capacitivas durante períodos transitórios de subtensão e o fato de possuir uma impedância interna indutiva, cujos valores típicos não causam ressonância com a rede de transmissão.

Contudo, o compensador rotativo possui uma série de desvantagens como tempo de resposta lento, instabilidade rotacional, baixa impedância de curto circuito e necessidade de manutenções frequentes. Além destes, ele não atende aos requisitos modernos de flexibilidade no controle em tempo real de fluxo de potência, dentro dos novos conceitos de sistemas FACTS (Flexible AC Transmission Systems). Dentre os equipamentos que realizam essa função está o STATCOM que é o equivalente eletrônico do compensador síncrono ideal. Sua principal função é injetar corrente reativa no sistema de potência de forma controlada. Para fazer isso, é necessário que o STATCOM trabalhe como uma fonte de tensão controlada. A Figura 27 mostra a configuração básica do STATCOM.

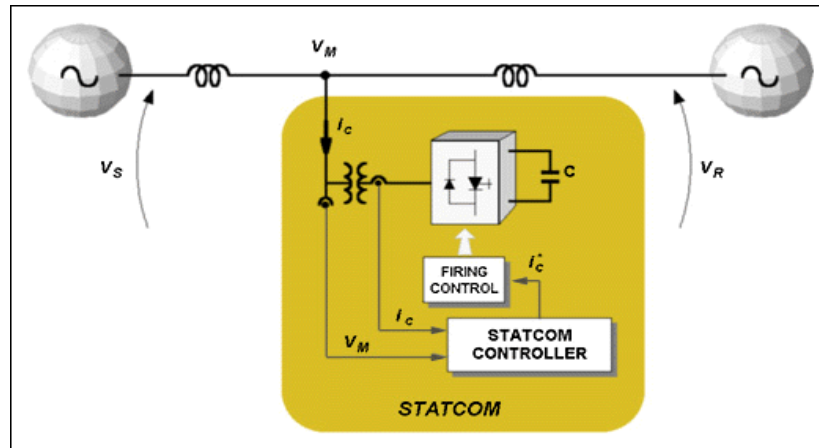


Figura 27 - Configuração básica do STATCOM  
 Fonte: Os autores, 2014.

A Figura 28 mostra o diagrama de blocos do compensador em série do tipo Static Séries (Synchronous Condenser – SSSC).

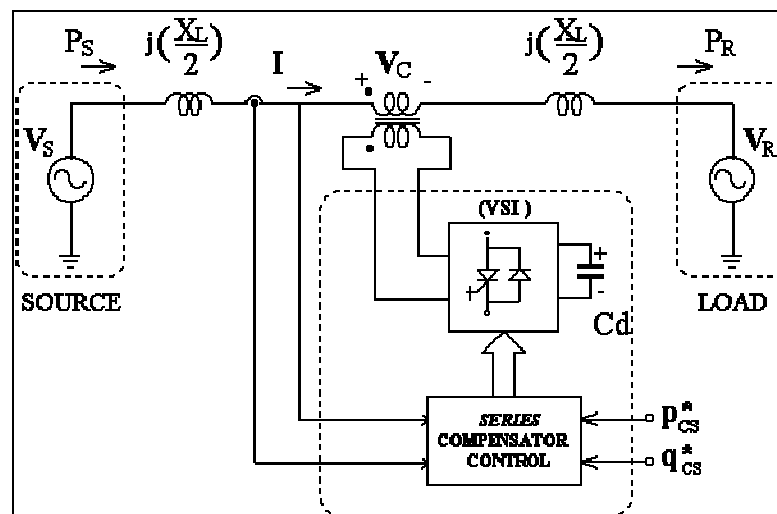


Figura 28 - Diagrama de blocos do compensador em série do tipo Static  
 Fonte: Os autores, 2014.

## 5 DESENVOLVIMENTO: MONTAGEM DA BANCADA DE TESTES

### 5.1 INTRODUÇÃO

A fim de aplicar a teoria desenvolvida no capítulo três, foi necessário montar uma bancada de controle de reativos. Constituída por um motor de indução, um gerador de indução (máquina de indução de corrente alternada), indutor chaveado, reator controlado, banco de capacitores, placa de controle, carga indutiva, carga reativa, fonte de corrente contínua e quadro de comando. A bancada permitirá simular a máquina primária e o controle de reativos no sistema.

A bancada é montada com os dois motores de indução idêntico acoplados entre si. O primeiro funcionando como gerador auto-excitado, produzindo energia que alimentam as cargas, gerando a demanda de reativos a serem controlados. O segundo alimentado através de um inversor de frequência que fornece as condições necessárias às simulações de variação de velocidade para os diversos experimentos deste trabalho. Foi identificada a necessidade de atuação de capacitores na excitação do gerador, essa necessidade já se fazia presente nas teorias já pesquisadas, assim como, a necessidade do banco de indutores para consumir parte do reativo excedente ao sistema. Foram iniciados os trabalhos práticos com a fixação e acoplamento dos motores, em seguida os motores acoplados foram fixados numa base de madeira, garantindo uma fixação adequada às vibrações comuns aos motores em funcionamento.

A seguir estará descrito de forma detalhada cada tópico da montagem completa dos equipamentos, que constituem a bancada de controle que foi utilizada para o efetivo estudo sobre o controle de reativos.

## 5.2 O COMPENSADOR DE REATIVOS

O compensador de reativos é constituído de um banco de capacitores e um indutor controlado, ligados em paralelo na bancada de ensaios. O compensador de reativos fornece ao sistema a energia reativa adequada para a auto-excitação do gerador de indução e para o consumo necessário das carga, ao passo que a necessidade de reativos do sistema diminuem o controlador retira as cargas reativas excedentes, consumindo os reativos através dos indutores controlados.

Foram utilizados três indutores idênticos, ligados um em cada fase, seu controle é feito através de uma placa de controle de disparo digital, essa placa permite diminuir ou aumentar a quantidade de reativos consumidos pelo compensador, esse controle é manual e realizado através de uma fonte CC, nela é controlada a tensão que regula o ângulo de disparo dos tiristores fixados num dissipador de calor, fazendo assim o controle do consumo dos indutores.

Os componentes utilizados na montagem do compensador são trifásicos, a placa de controle é alimentada com tensão contínua de 5 V. Os componentes serão melhores detalhados nas próximas seções.

## 5.3 PONTE DE TIRISTORES

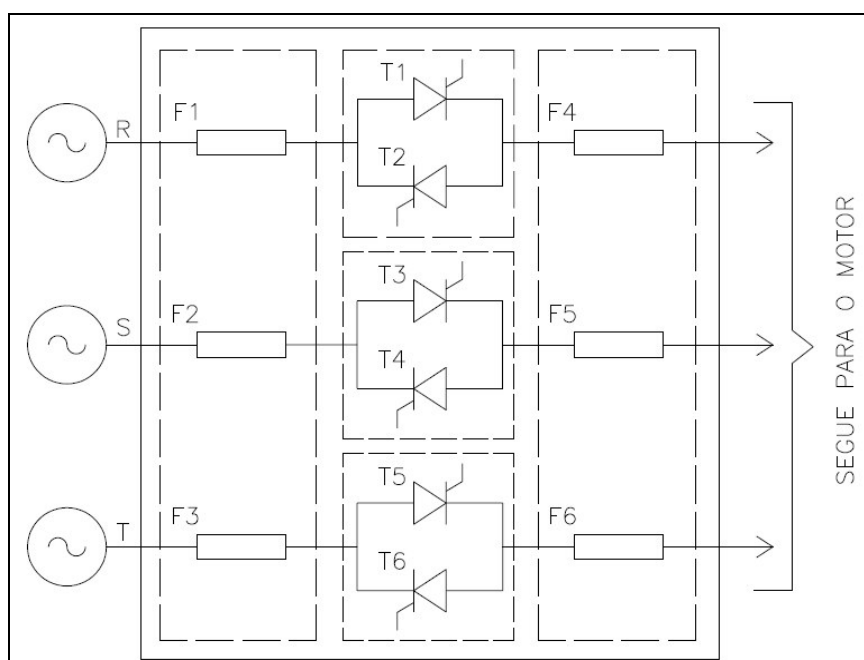
A ponte de tiristores SCR foi montada sob um dissipador de calor em alumínio, com as seguintes especificações: Liso, com medidas aproximadas de 125 mm por 135 mm, perímetro de 2126 mm, resistência térmica de  $0,73 \text{ }^{\circ}\text{C/W/4}''$ . Acoplado a ele duas placas de alumínio medindo aproximadamente 150 mm x 150 mm, nas quais foram fixados os porta fusíveis. As placas ajudam na dissipação do calor. Paralela às placas de alumínio foi instalada uma placa de acrílico com bornes nas extremidades para realizar a ligação com os indutores e com a rede.

A Figura 29 mostra a ponte de tiristores selecionada para o projeto, sendo composta de três módulos do fabricante SEMIKRON, e cada um possui dois tiristores em antiparalelo, no conjunto total são seis tiristores ligados a seis fusíveis ultrarrápidos fixados em placas de alumínio, montados sobre o dissipador de calor. Sendo o seu diagrama elétrico apresentado na Figura 30.

O ângulo de disparo dos tiristores é controlado através da placa digital por meio da regulação da tensão realizada através da fonte. Os parâmetros para regular a fonte são as leituras realizadas através dos instrumentos posicionados no sistema.



**Figura 29 - Ponte de tiristores, dissipador de calor e fusíveis de proteção**  
Fonte: Os autores, 2014.



**Figura 30 - Esquema elétrico do módulo de potência**  
Fonte: Os autores, 2014.

A Figura 31 mostra o detalhe dos tiristores utilizados na bancada. e a Figura 32 apresenta o esquema elétrico do módulo de tiristores.

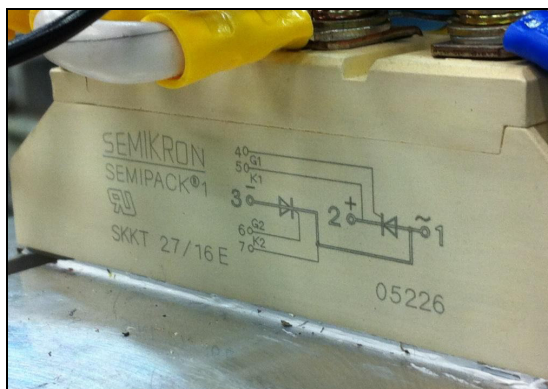


Figura 31 - Tiristor SEMIKRON SKKT 27/16 E  
Fonte: Os autores, 2014.

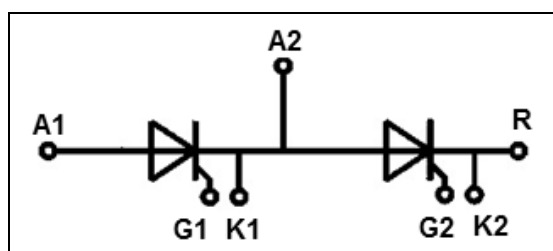


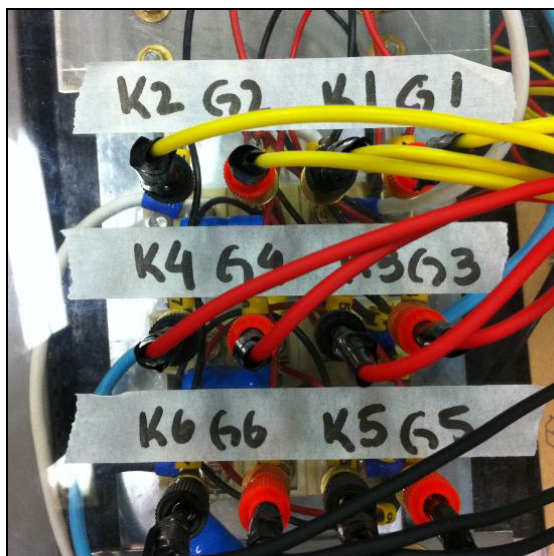
Figura 32 - Esquema elétrico do módulo de tiristores.  
Fonte: Os autores, 2014.

As especificações do módulo de tiristores SKKT selecionados estão expressos no Quadro 1.

ITEM	VALOR
$V_{RMS}$	1700 V
$V_{DRM}$	1600 V
$I_{TRMS}$	50 A
$T_C$	82° C

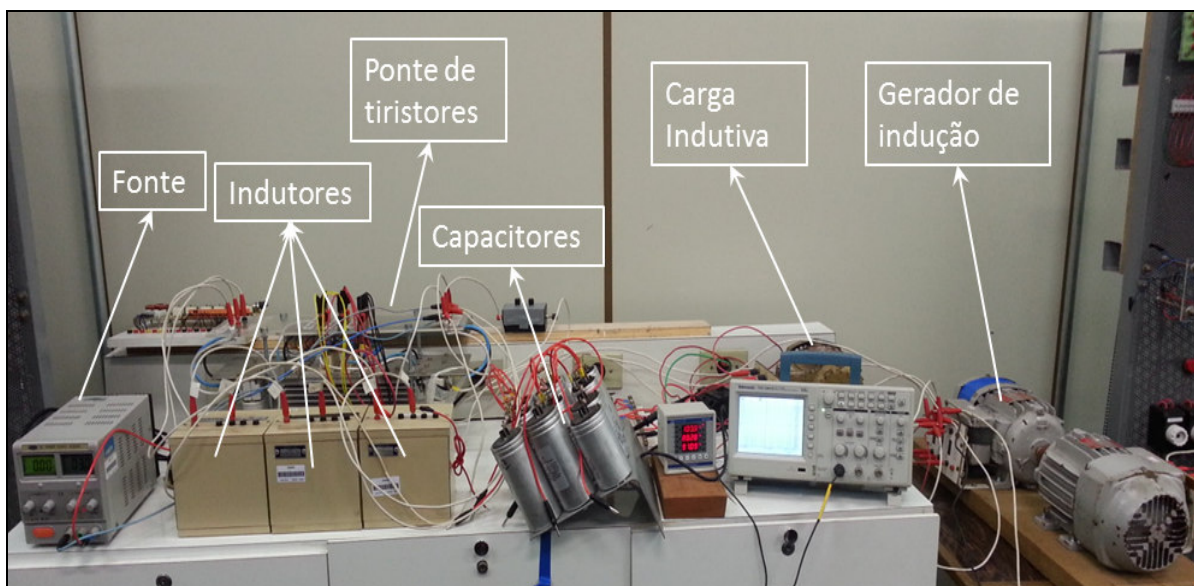
Quadro 1 - Especificação dos tiristores SKKT  
Fonte: Os autores, 2014.





**Figura 33 - Identificação dos bornes para ligação com a placa de controle**  
Fonte: Os autores, 2014.

A Figura 33 mostra a identificação dos bornes de ligação do acionamento dos módulos de tiristores pela placa de controle digital.



**Figura 34 - Montagem geral da bancada de ensaio**  
Fonte: Os autores, 2014.

Na Figura 34 pode-se verificar a bancada montada de forma preliminar com todos os componentes interligados utilizados neste projeto.

### 5.3.1 Critério de seleção

Os critérios para seleção dos componentes foram as características técnicas do gerador de indução, pois foi o principal componente na montagem da bancada. Os motores de indução utilizados nos ensaios estavam disponíveis no laboratório de controle de máquinas elétricas. Considerando que em alguns ensaios foram medidas correntes de pico que na ordem de 5,5 A, seriam necessários tiristores que suportassem uma corrente nominal mínima de 6 A para garantir a corrente de partida de 5,5 A, conforme dados fornecidos pelo fabricante. No entanto, estavam disponíveis no laboratório tiristores de 32 A, do fabricante *SEMIKRON* e modelo *SKKT 27/12 E*, os quais foram selecionados por suportarem a corrente necessária.

Conforme comentado na seção 4.6, foram selecionados seis tiristores ligados dois a dois em antiparalelo, com as características apresentadas no Quadro 2.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Corrente nominal	27 A
Corrente gatilho	150 mA
Nº de pinos	7 pinos
Corrente RMS em condução	50 A
Temperatura máxima de operação	125 °C
Temperatura mínima de operação	-40 °C

**Quadro 2 - Características técnicas dos tiristores**  
**Fonte: Os autores, 2014.**

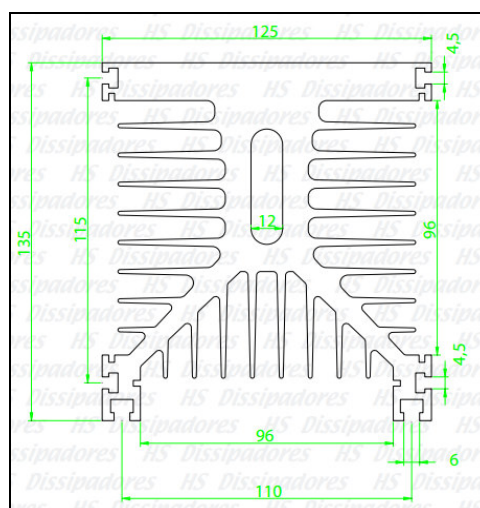
A partir da análise dos parâmetros elétricos dos motores e dos tiristores, foi avaliado que o sistema de potência suporta a carga. Para esse trabalho foi montado uma ponte de tiristores e sua proteção com fusíveis num dissipador fornecido pelo laboratório. Porém, esse conjunto foi substituído por um conjunto já montado que estava disponível no laboratório. O dissipador utilizado atende melhor as características necessárias ao projeto. No Quadro 3 são apresentadas suas características técnicas:

CARACTERÍSTICA	VALOR
Modelo	HS 125135 L
Altura	135 mm
Largura	125 mm
Resistência térmica	0,73 °C / W / 4"
Material de fabricação	Lumínio

**Quadro 3 - Características técnicas dos tiristores**

Fonte: Os autores, 2014.

As dimensões completas, assim como o desenho do dissipador são apresentadas na Figura 35.



**Figura 35 - Detalhe construtivo do dissipador de Calor**

Fonte: Página da empresa HS Dissipadores<sup>3</sup>.

Os fusíveis foram dimensionados para proteção contra curto-circuito devidamente projetado para abrir o circuito na ocorrência de uma falha. As características técnicas dos fusíveis estão apresentadas no Quadro 4.

<sup>3</sup> Disponível em: <<https://www.hsdissipadores.com.br/catalogo.pdf>> Acesso em: 9 de dez. 2014

CARACTERÍSTICA	VALOR
Tipo do fusível	"D"
Ação	Ultra rápida
Utilização	Diodos e tiristores
Modelo	SILIZED
Tipo de corrente	gR
Tensão nominal	500 Vcc / 500 Vca
Capacidade de interrupção	50 kA
Corrente nominal	16 A
Material da base	Procelana
Tensão suportada	500 V
Corrente suportada	25 A

**Quadro 4 - Características técnicas dos fusíveis**  
**Fonte: Os autores, 2014.**

#### 5.4 BANCO DE CAPACITORES

Na bancada de teste desenvolvida no laboratório há como parte do projeto um banco de capacitores, cuja função é fornecer energia reativa suficiente para a auto-excitação do motor e assim fazê-lo funcionar como gerador e ao mesmo tempo fornecer reativos suficientes para as cargas alimentadas pelo sistema. Os capacitores devem suportar a potência do sistema, suas características técnicas devem ser avaliadas para a escolha do capacitor correto, são fatores indispensáveis o tipo de capacitor, potência, tensão e comportamento do sistema.

O banco de capacitores foi montado com um único capacitor trifásico de 3 x 27,5  $\mu\text{F}$ , montado no quadro de comandos da bancada, ligado na rede alimentada pelo gerador. Desta forma, a energia reativa fornecida ao sistema pelo capacitor atua na auto-excitação do gerador.

O banco de capacitores tem um papel fundamental, pois atua na manutenção da corrente do sistema, mantém a corrente de excitação do gerador, fornece os reativos requeridos pela carga e estabelece as condições necessárias para a manutenção das correntes e tensões do sistema.

Segue na Figura 36 o capacitor utilizado na bancada implementada, ficando instalado dentro do quadro de comando

mostrado na Figura 37 na parte superior, sendo acionado pela chave seletora que alimenta o contator que por sua vez aciona o capacitor.

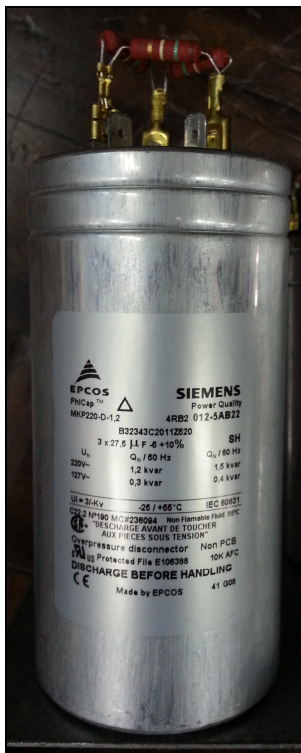


Figura 36 - Capacitor trifásico de 27,5  $\mu\text{F}$   
Fonte: Os autores, 2014.

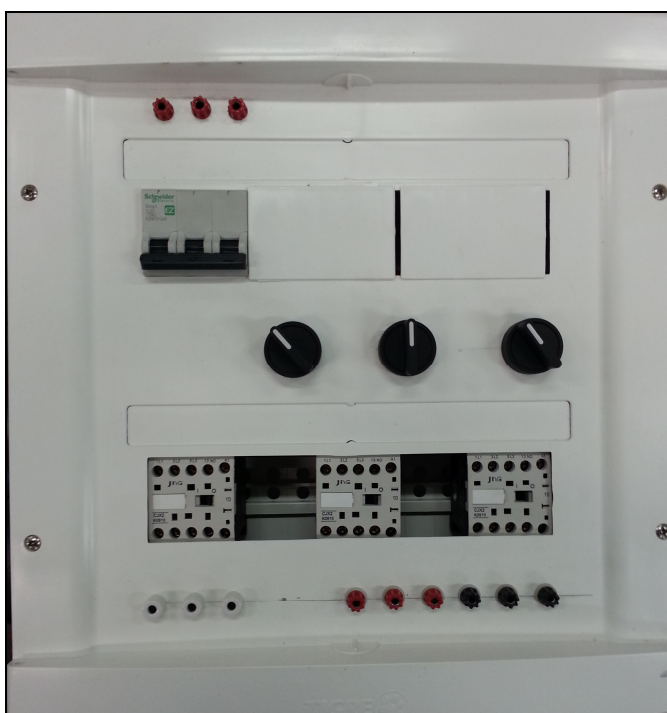


Figura 37 - Quadro de comando para acionamento de capacitor, indutor e carga  
Fonte: Os autores, 2014.

#### 5.4.1 Critério de seleção

O dimensionamento dos capacitores foi realizado previamente mediante o seguinte cálculo:  $C = Q / V$ .

Quando um Coulomb de carga (Q) é acumulado, estabelecendo-se entre os terminais do capacitor uma diferença de potencial (V) de um volt, dizemos que a capacitância (C) é de um Farad. Foram realizadas as medições das propriedades elétricas dos motores usados na montagem da bancada, assim como foram incorporadas no cálculo os valores das possíveis cargas a serem ligadas no sistema.

Considerou-se também que o sistema é trifásico com uma tensão de 220 V. Os cálculos auxiliaram na determinação do  $X_c$ , para seleção dos capacitores utilizados nos experimentos na montagem da bancada, pois existem fatores de funcionamento que influenciam nas especificações dos capacitores que são determinados apenas experimentalmente, assim através das análises do funcionamento do sistema montado, determina-se a seleção dos capacitores que melhor se adaptam às especificações do sistema.

Mediante o valor calculado do  $X_c$ , foi possível classificar previamente as características necessárias aos capacitores utilizados. Portanto, foram selecionados cinco conjuntos de capacitores e realizados ensaios com valores de  $X_c$  igual a 11,65  $\mu\text{F}$ , 17,5  $\mu\text{F}$ , 18  $\mu\text{F}$ , 105  $\mu\text{F}$  e 27,5  $\mu\text{F}$ . Os ensaios foram realizados na bancada de teste no laboratório de controle de máquinas.

ITEM	VALOR
Tipo de capacitor	Encapsulado
Norma	ABNT NBR IEC 60831
Potência	0,4 KVAR / 1,5 KVAR
Tensão	127 v / 220 V
Tipo de alimentação	Trifásico
Faixa de temperatura	-25 / +55 °C
Dispositivo de interrupção	Por sobrepressão

**Quadro 5 - Características técnicas do capacitor**  
 Fonte: Os autores, 2014.

Os testes laboratoriais permitiram, através dos parâmetros medidos e analisados, obter informações de potência, variações das tensões, correntes e frequência, nas diferentes situações, permitindo a determinação do capacitor trifásico de 27,5  $\mu\text{F}$ , cujas características técnicas são informadas no Quadro 5. Avaliou-se que esse capacitor foi o que melhor se apresentou para suprir as demandas necessárias ao desenvolvimento do sistema. As medições e análises realizadas serão detalhadas nos capítulos 6 e 7 do presente trabalho.

## 5.5 INDUTORES

Os indutores utilizados na montagem da bancada são do tipo ajustável e foram selecionados devido à disponibilidade no laboratório da universidade. Selecionaram-se três indutores, os quais foram montados um em cada fase da bancada, ligados à rede alimentada pelo gerador. O indutor ajustável permitiu a avaliação das diferentes possibilidades de indutância inserida no sistema. A indutância inserida em cada fase deve ser rigorosamente igual, o que requer uma atenção especial para manter o mesmo valor de indutância em todos os indutores.

Os aspectos técnicos da bancada, permitiram a utilização dos indutores disponíveis sem que fossem realizados testes com outros tipos, essa decisão foi possível devido aos resultados obtidos, sendo analisados como satisfatórios, sem prejuízo aos objetivos planejados.

### 5.5.1 Critério de seleção

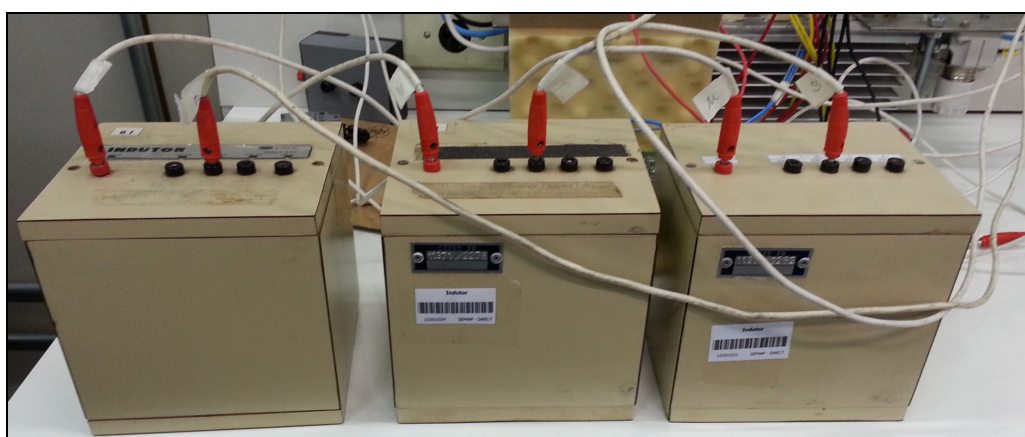
Nos parâmetros para seleção dos indutores utilizados na montagem da bancada foram considerados fatores como as cargas ligadas ao sistema, o funcionamento do sistema a vazio, a energia

reativa do sistema a vazio, a energia reativa do sistema com carga, a tensão do sistema e a corrente gerada.

Os testes realizados na bancada com os diversos capacitores possibilitaram a medição das propriedades elétricas da bancada, segundo as avaliações das condições da bancada, optou-se por usar um conjunto de três indutores ajustáveis, um em cada fase, conforme mostrado na Figura 38. Os indutores são ajustáveis de 100 mH a 400mH. Os testes iniciais foram realizados com 100 mH em cada fase, porém os resultados dos testes indicaram que os melhores resultados foram apresentados com 200 mH em cada fase. No Quadro 6, são apresentadas as características técnicas dos indutores selecionados.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Tipo de Indutor	Ajustável
Faixa de ajuste	100 mH - 400 mH
Camada de ajuste	100 mH
Corrente máxima	2,5 A
Tipo de alimentação	Monofásico

**Quadro 6 - Característica do Indutor**  
Fonte: Os autores, 2014.



**Figura 38 - Banco de indutores utilizado nos ensaios**  
Fonte: Os autores, 2014.

Na Tabela 1 podem-se observar os valores obtidos no ensaio, variando o ângulo de disparo para manter a tensão na saída do gerador em 220 V.



**Tabela 1 - Medições realizadas para os bancos de indutores**

Indutância [mH]	I gerador [A]	I carga [A]	V gerador [v]	ângulo de disparo - $\alpha$ [Vcc]
100	1,81	0,21	220	3,9
200	1,81	0,21	220	4,6
300	1,81	0,21	220	5
400	1,81	0,21	220	5,5

Fonte: Os autores, 2014.

Os resultados da Tabela 1 foram obtidos variando a indutância aplicada ao sistema, mantendo a corrente do gerador, a corrente da carga e a tensão do gerador, constantes, para isso houve variação apenas do ângulo de disparo dos tiristores através do controle da tensão da fonte na placa de controle de disparo dos tiristores. O melhor ajuste do indutor foi obtido com 200 mH. Desta forma, adotamos o indutor ajustável em 200 mH para a montagem da bancada de ensaios.

## 5.6 CIRCUITO DE DISPARO

O circuito de disparo é um circuito eletrônico cuja função é acionar a ponte de tiristores, através dele faz-se o controle do disparo dos tiristores variando seu ângulo de disparo. Os circuitos podem ser analógicos ou digitais.

### 5.6.1 Circuito de disparo analógico

No estudo e montagem da bancada foi desenvolvida em caráter experimental uma placa de controle analógico. A placa foi desenvolvida para controlar o ângulo de disparo dos tiristores de indutores. O esquema da placa pode ser observado na Figura 39.

O ângulo de disparo dos tiristores no circuito analógico pode ser variado manualmente através do potenciômetro. Os níveis de potência fornecidos não são suficientes para fornecer uma corrente de gatilho

para acionamento dos tiristores de potência. Desta forma, faz-se necessário amplificar o sinal obtido, esse sinal é amplificado através do transistor IRF730. Nos semiciclos negativos, um pulso de disparo é obtido no pino 14 para o disparo do SCR correspondente por meio de um transformador de pulsos. Nos semiciclos positivos, o SCR recebe os pulsos de disparo pelo transformador de pulsos que vêm do pino 15. A Figura 40 demonstra a placa montada.

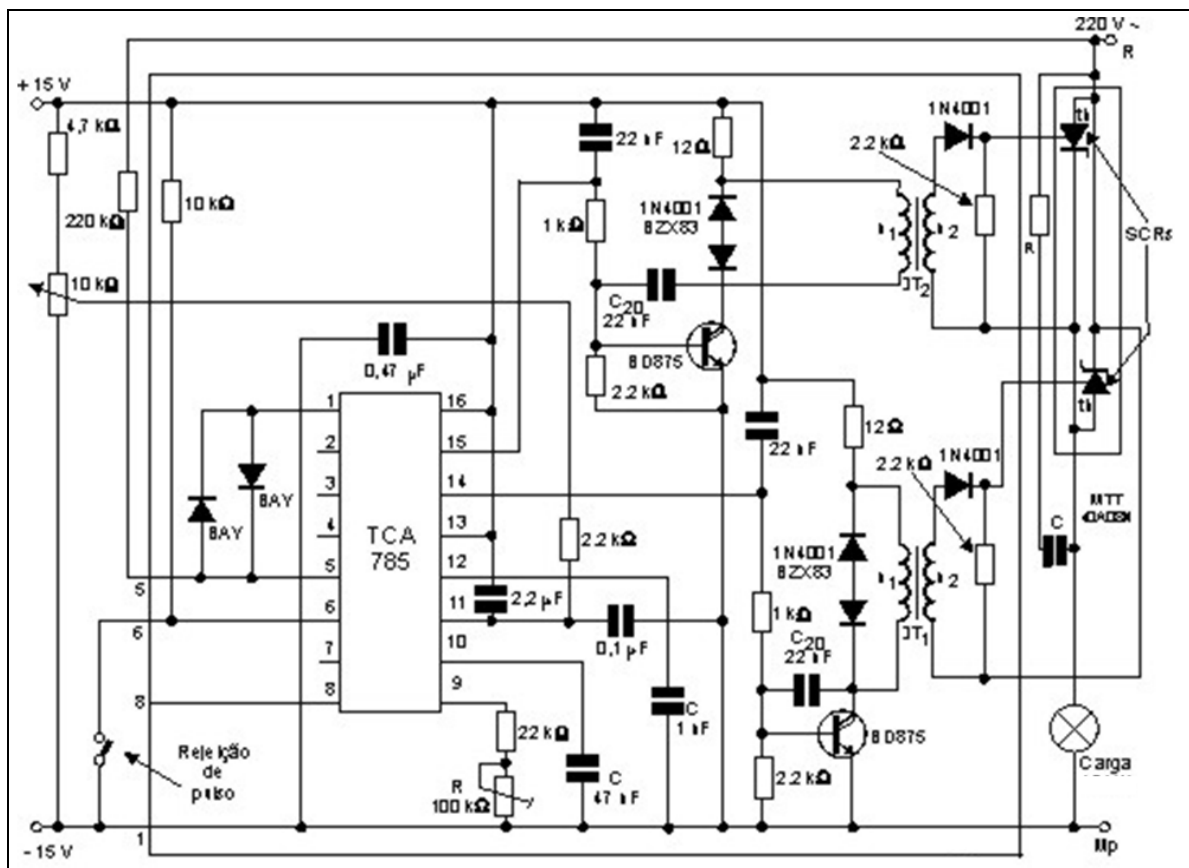
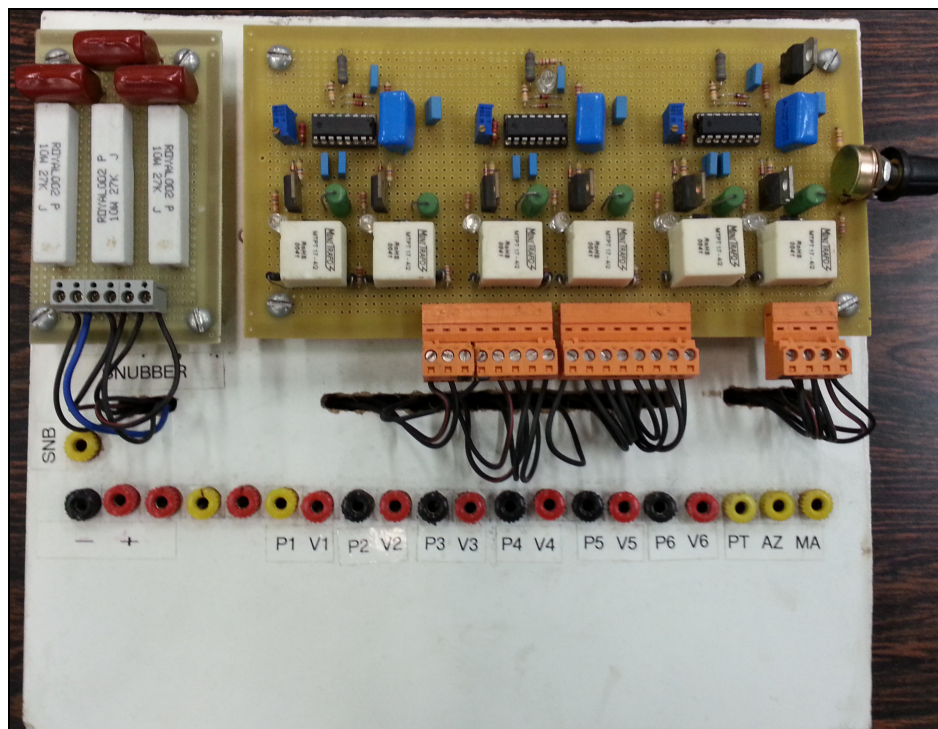


Figura 39 - Esquema de disparo do tiristor  
Fonte: Os autores, 2014.



**Figura 40 - Circuito de disparo analógico**  
**Fonte: Os autores, 2014.**

### 5.6.2 Circuito de disparo digital

O ângulo de disparo dos tiristores no circuito digital pode ser variado através da tensão aplicada pela fonte na placa de controle RT380T da SEMIKRON apresentada na Figura 41 cujo *datasheet* se encontra no anexo A. A tensão para o controle do ângulo de disparo pode variar de zero a 10 V. O módulo de disparo foi projetado para disparar seis tiristores com regulação por fase, a fim de controlar a alimentação da carga. Seguindo a recomendação do fabricante foram montados nos módulos de tiristores *snubbers* externos para proteger os tiristores e facilitar o seu acionamento.

A carga pode ser alimentada também com uma tensão alternada variável, os 6 tiristores são ligados em série, com uma tensão contínua regulável, os tiristores estão conectados em B6C, B6HK ou B6HKF. Existe uma proteção térmica, se ele abre, há paradas do módulo, sinalizando os LEDs em verde ou vermelho.

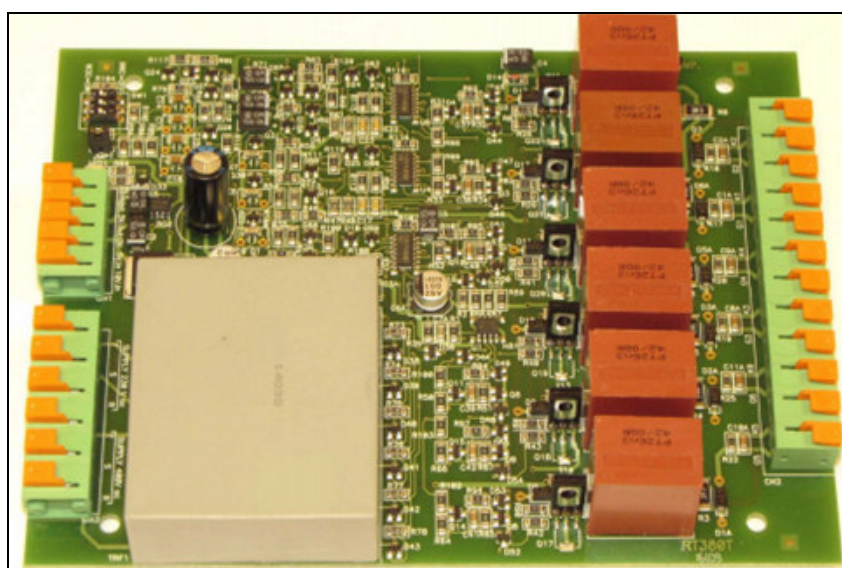
O módulo tem um atraso de Power-on automático de aproximadamente um segundo. Isso significa que, durante o primeiro segundo a saída é inibida (sem saída de pulso).

É importante para ligar as três fases, realizar as conexões das saídas das portas e dos catodos exatamente como mostrado no manual.

Após a montagem das conexões nas fases de entrada de todo o módulo de alimentação, a placa pode ser ligada a um computador. Para selecionar o W3C na conexão com os tiristores, os três *minidips* tem que estar na posição W3C. Para a posição B6C, as conexões devem estar na posição B6C.

Há uma entrada de 12 V, esta entrada por medida de segurança permite trabalhos com tensões variando de 7 a 16 V. No inibidor para a entrada e saída de pulsos pelas portas, o LED vermelho aceso indica que está ligado. A ligação é de 12 V com ligação externa ou interna.

A placa trabalha com sistema com tensão variando entre 230 a 400 V de corrente alternada, esses valores aceitam tolerância que variam entre mais 10 % e menos 15 %, na tensão de entrada essa variação corresponde entre 6 % e 15 %. Os sinais de gatilhos são acionado com tensão de 5 V com uma corrente de 100 mA.



**Figura 41 - Placa do controle digital dos tiristores RT380 da SEMIKRON**  
Fonte: Os autores, 2014.

## 5.7 SELEÇÃO DAS MÁQUINAS DE INDUÇÃO

As máquinas de indução selecionadas para realização deste trabalho foram dois motores de indução trifásicos cujas características técnicas são idênticas. Os motores foram selecionados por estarem disponíveis no laboratório e por atenderem aos requisitos técnicos necessários para a montagem da bancada.

No Quadro 7 são apresentadas as características técnicas dos motores selecionados.

Item	Valor
Fabricante	WEG
Modelo	80 487
Ano de fabricação	Não disponível
Frequência	60 HZ
Potência	1 CV
Rotação nominal	1730 RPM
Tensão de funcionamento (em triângulo)	220 V
Tensão de funcionamento (em estrela)	380 V
Corrente (em triângulo)	3,8 A
Corrente (em estrela)	2,2 A
Fator de potência	1,15
Tensão de isolamento	grau B
Relação $I_p/I_n$	5,5
Grau de proteção	IP54
Categoria do motor	N
Disponibilidade de Freio	Sim

**Quadro 7 - Especificações técnicas dos motores**

Fonte: Os autores, 2014.

Os motores são equipados originalmente com freios conforme mostrado na Figura 42.



**Figura 42 - Motor com freio desmontado**  
Fonte: Os autores, 2014.

Entretanto, na bancada de testes eles não serão utilizados. Desta forma os freios foram desmontados e retirados de ambos os motores conforme mostrado na Figura 43.



**Figura 43 - Motor com freio desmontado e retirado**  
Fonte: Os autores, 2014.

Os motores selecionados foram testados e analisados, sendo suas propriedades elétricas analisadas a fim de avaliar se estão em condições de utilização para os propósitos deste projeto.

## 5.8 INVERSOR DE FREQUÊNCIA CFW-11

Selecionou-se o inversor de frequência do fabricante WEG e modelo CFW-11, utilizado neste trabalho devido à disponibilidade do laboratório de Máquinas especiais. O inversor atendeu de maneira satisfatória aos requisitos necessários às simulações e testes realizados no desenvolvimento deste trabalho. A sua utilização foi essencial para variar a velocidade da máquina primária acoplada no gerador, possibilitando as simulações de rotação aplicada na máquina de indução. Os parâmetros do inversor utilizados nos ensaios não serão apresentados neste trabalho por ser de simples parametrização, sendo necessário apenas fornecer os dados do motor (conforme descrito na seção 5.7), demais parâmetros relativos às faixas de rotação e habilitação dos comandos via IHM. As especificações técnicas do inversor de frequência são apresentadas no Quadro 8.

Frequência de chaveamento de 10KHz e temperatura ambiente ao redor do inversor = 50 °C			
Uso em regime de sobrecarga normal (ND)		Uso em regime de sobrecarga pesada (HD)	
CARACTERÍSTICA	VALOR	CARACTERÍSTICA	VALOR
Corrente de saída nominal A	23	Corrente de saída nominal A	19,2
Corrente de sobrecarga 1 minuto (A)	25,3	Corrente de sobrecarga 1 minuto (A)	28,8
Corrente de sobrecarga 3 segundos (A)	34,5	Corrente de sobrecarga 3 segundos (A)	38,4
Motor máximo (CV/kw)	7,5/5,5	Motor máximo (CV/kw)	6/4,5
Corrente de entrada nominal (A)	19,2	Corrente de entrada nominal (A)	19,2
Potência dissipada (montagem em superfície) em W	320	Potência dissipada (montagem em superfície) em W	280
Potência dissipada (montagem em flange) em W	50	Potência dissipada (montagem em flange) em W	40
Frequência de chaveamento de 10KHz e temperatura ambiente ao redor do inversor = 40 °C			
Uso em regime de sobrecarga normal (ND)		Uso em regime de sobrecarga pesada (HD)	
CARACTERÍSTICA	VALOR	CARACTERÍSTICA	VALOR
Corrente de saída nominal A	23,8	Corrente de saída nominal A	19,9
Corrente de sobrecarga 1 minuto (A)	26,2	Corrente de sobrecarga 1 minuto (A)	29,9
Corrente de sobrecarga 3 segundos (A)	37,5	Corrente de sobrecarga 3 segundos (A)	39,8
Motor máximo (CV/kw)	7,5/5,5	Motor máximo (CV/kw)	7,5/5,5
Corrente de entrada nominal (A)	23,8	Corrente de entrada nominal (A)	19,9
Potência dissipada (montagem em superfície) em W	330	Potência dissipada (montagem em superfície) em W	280
Potência dissipada (montagem em flange) em W	50	Potência dissipada (montagem em flange) em W	40

**Quadro 8 - Características técnicas do inversor de frequência**

Fonte: Os autores, 2014.

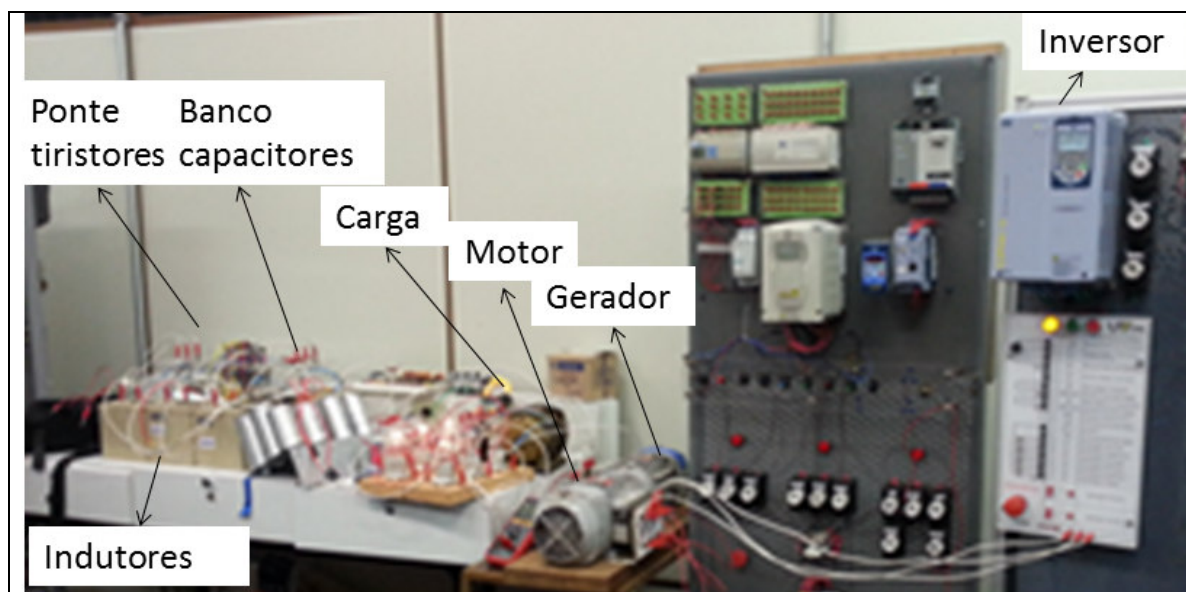
A utilização desse modelo de inversor facilitou a execução dos ensaios, pois é o mesmo modelo utilizado durante os experimentos laboratoriais. Seu painel digital facilita a visualização dos parâmetros

necessários dos ensaios de forma rápida conforme apresentado na Figura 44.



**Figura 44 - Vista frontal do inversor de frequência**  
Fonte: Os autores, 2014.

Na Figura 45 são apresentados os equipamentos utilizados na montagem geral da bancada de testes, e como foi realizada a ligação do inversor de frequência à máquina primária.



**Figura 45 - Vista geral da ligação do inversor de frequência no motor**  
Fonte: Os autores, 2014.



A bancada de testes é composta pelo gerador de indução, motor propulsor do gerador, carga indutiva, banco de capacitores, ponte de tiristores e indutores. O inversor de frequência aciona o motor e controla sua velocidade nas condições exigidas nos ensaios realizados.

## 5.9 CARGAS

A utilização das cargas na bancada de testes é fundamental para avaliar o comportamento da tensão e da corrente medidos durante os ensaios. Os ensaios combinam diferentes cargas, simulando situações diferentes de acionamento e manutenção dos equipamentos em funcionamento. Desta forma, é possível analisar o sistema em situações com correntes de pico, medição das curvas de tensão e corrente, assim como avaliar se as seleções realizadas dos componentes da bancada estão de acordo com os requisitos necessários ao funcionamento de toda a bancada. Nos ensaios foram utilizadas cargas indutivas e resistivas.

### 5.9.1 Carga indutiva

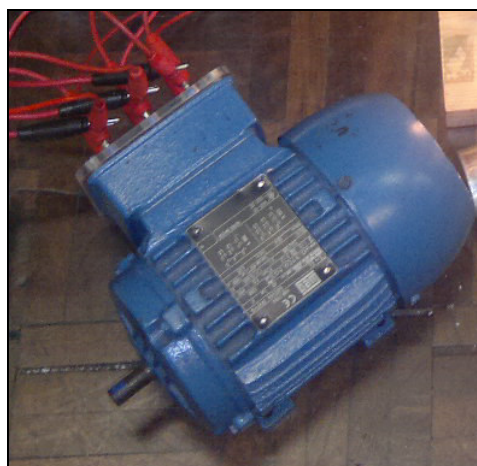
A seleção das cargas indutivas considerou a necessidade de realizar ensaios com diferentes cargas para avaliar o sistema em diferentes situações. Utilizaram-se três cargas indutivas, a primeira um motor de indução trifásico, tipo gaiola de esquilo, de 0,25 cv cujas especificações são apresentadas no Quadro 9, as outras duas cargas foram utilizados motores idênticos de 0,33 cv.

ITEM	VALOR
Fabricante	WEG
Modelo	GK47419
Fases	Trifásico
Categoria	N
Potência	0,25 CV
Frequência	60 Hz
Tensão em triângulo	220 V
Tensão em estrela	380 V
Corrente em triângulo	1,71
Corrente em estrela	0,99
Fator de serviço	1,15
Classe de isolamento	B
Rotação nominal	3380 RPM
Grau de proteção	IP55
Rendimento	68,4
Cos $\phi$	0,83

**Quadro 9 - Características da carga indutiva utilizada**  
**Autor: Os autores, 2014.**

Na Figura 46 apresenta-se o motor de 0,25 cv, sendo este, utilizado somente para os ensaios iniciais, quando se buscava o funcionamento das cargas sem a perda da magnetização residual do gerador, antes da seleção ideal do banco de capacitores. Este foi o único motor que acionou e permaneceu em funcionamento sem eliminar a geração de energia. Isso ocorreu, pois sua característica técnica solicita baixa potência para seu funcionamento.

As outras duas cargas indutivas utilizadas tinham como característica serem motores de indução trifásicos, tipo gaiola de esquilo com as especificações listadas no Quadro 10.

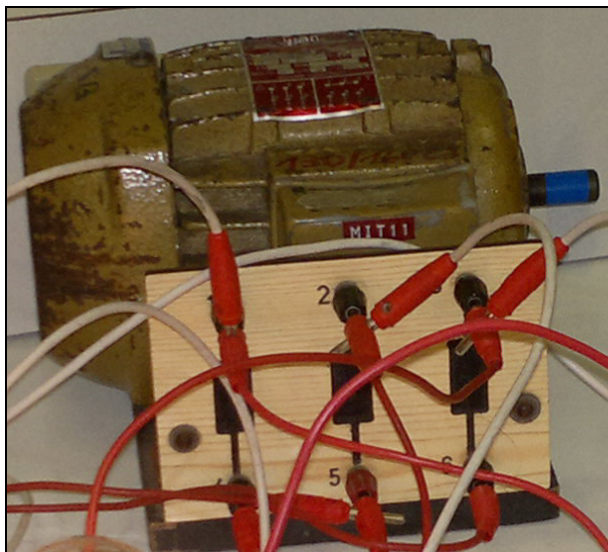


**Figura 46 - Motor de indução trifásico 0,25 cv utilizado como carga indutiva**  
**Fonte: Os autores, 2014.**

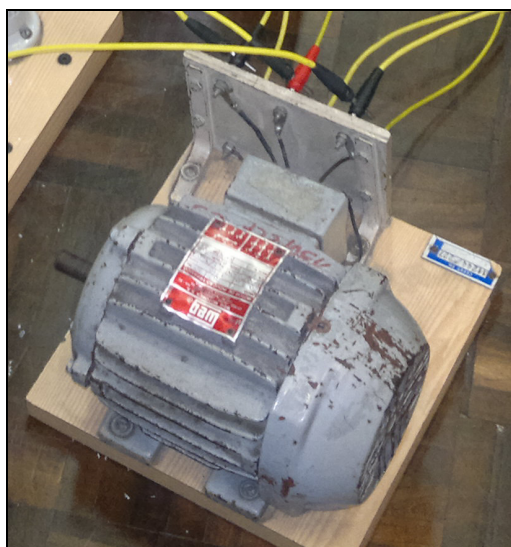
ITEM	VALOR
Fabricante	WEG
Modelo	0480
Fases	Trifásico
Categoria	B
Potência	0,33 CV
Frequência	60 Hz
Tensão em triângulo	220 V
Tensão em estrela	380 V
Corrente em triângulo	1,5
Corrente em estrela	0,85
Fator de serviço	1,25
Classe de isolamento	B
Rotação nominal	3520 RPM
Grau de proteção	IP44

**Quadro 10 - Características da carga utilizada**  
**Fonte: Os autores, 2014.**

A corrente de partida elevada gerou a necessidade de ligar as cargas em estrela para que no momento da partida, a corrente de pico não consumisse a tensão residual do gerador e eliminasse as condições de excitação para geração de energia. As duas cargas indutivas podem ser vistas nas Figuras 47 e 48. Sendo a carga da Figura 47 utilizada para o registro e levantamento das curvas dos ensaios descritos nos capítulos 6 e 7. Esta carga é referenciada como “L” nos próximos tópicos. A escolha entre as duas cargas se deu, após avaliação das condições de qualidade e conservação, pois a máquina da Figura 48 apresentava-se em estado de conservação ruim, com prejuízo ao seu funcionamento e possíveis impactos nos resultados dos ensaios.



**Figura 47 - Motor de indução trifásico 0,33 cv utilizado como carga indutiva em todos os ensaios**  
Fonte: Os autores, 2014.



**Figura 48 - Motor de indução trifásico 0,33 cv utilizado como carga indutiva somente no primeiro ensaio**  
Fonte: Os autores, 2014.

### 5.9.2 Carga resistiva

A seleção das cargas resistivas foi realizada considerando a disponibilização de cargas nos laboratórios. Observam-se na Figura 49 as cargas resistivas ligadas. Elas são formadas por conjuntos de três

lâmpadas de mesma tensão. No Quadro 11, são apresentadas as características técnicas das cargas resistivas.

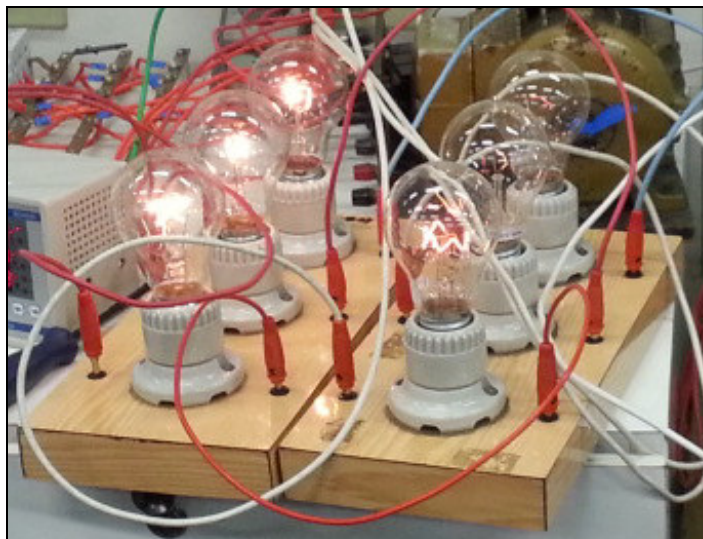
Referência	Item	Tensão	Potência	Potência por Fase	Quantidade	Tipo de Ligação
R1	Lâmpada Incandescente	220 V	60 W	60 W	3	Estrela
R2	Lâmpada Incandescente	220 V	60 W	100 W	3	Estrela
			40 W		3	
R3	Lâmpada Incandescente	220 V	40 W	60 W	3	Estrela

**Quadro 11 - Especificações das cargas resistivas**  
Fontes: Os autores, 2014.

As cargas são formadas por conjunto de lâmpadas, com diferentes potências. Nas cargas R1 e R3 os conjuntos são formados por três lâmpadas idênticas ligadas em estrela. A carga R2 é formada por lâmpadas de 60 W ligadas em série com lâmpadas de 40 W, formando uma potência de 100 W, que é ligada ao sistema em estrela. Nas Figuras 49 e 50, são apresentadas as lâmpadas utilizadas nos ensaios.



**Figura 49 - Conjunto de lâmpadas 220 V utilizadas como cargas resistivas.**  
Fonte: Os autores, 2014.



**Figura 50 - Dois conjuntos de lâmpadas 220 V utilizadas como cargas resistivas.  
Fonte: Os autores, 2014.**

A seleção das cargas resistivas e indutivas permitiu uma variação de sete diferentes cargas a serem utilizadas nos testes. As cargas R1, R2, R3, L1 e L2 foram combinadas entre si para gerar diferentes valores, que por consequência alteram o comportamento do sistema produzindo resultados analisados nos próximos tópicos. A importância dessas combinações reflete-se numa melhor avaliação do comportamento do sistema de compensação de reativos.

## 6 CARACTERÍSTICAS DO GERADOR DE INDUÇÃO ISOLADO DA REDE

Antes de iniciar os ensaios referentes ao controle da tensão gerada, foi necessário conhecer os parâmetros das máquinas de indução envolvidas na montagem do sistema de controle de reativo. No presente capítulo, está descrito os ensaios práticos desenvolvidos no laboratório de máquinas da UTFPR, nas duas máquinas de indução utilizadas no projeto para levantamento dos parâmetros e características.

### 6.1 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA MÁQUINA DE INDUÇÃO – ENSAIO COM ROTOR LIVRE E ROTOR BLOQUEADO

#### 6.1.1 Introdução

Cada parâmetro tem sua função para determinar com maior exatidão as características da máquina de indução (conforme descrito na seção 2.8 do presente trabalho). Abaixo, foi descrito os procedimentos do ensaio e os resultados obtidos.

#### 6.1.2 Objetivo

Determinar com maior exatidão os parâmetros da máquina de indução através de ensaios práticos com rotor livre e rotor bloqueado, com a finalidade de determinação dos parâmetros e características necessárias para o cálculo do valor de  $X_C$  (capacitância) após a obtenção dos valores de  $r_{mag}$ ,  $X_{mag}$ ,  $R_E$  e  $X_{LE}$ . Onde:  $r_{mag}$  e  $X_{mag}$

representam as perdas rotacionais e perdas magnéticas respectivamente, do ramo magnetizante. E  $R_E$  e  $X_{LE}$  representam as perdas ôhmicas e perdas no cobre respectivamente.

### 6.1.3 Materiais

- Dois motores de indução trifásico de 1 cv identificados como “MOTOR 1” e “MOTOR 2”;
- dois wattímetros monofásicos;
- três amperímetros analógicos de bancada;
- dois multímetros digitais;
- um variac trifásico;
- e um alicate universal.

### 6.1.4 Procedimento

Baseando-se nas seções 2.8.1 e 2.8.2 onde se tem a descrição teórica dos ensaios de rotor livre e rotor bloqueado respectivamente, nesta seção será visto os procedimentos.

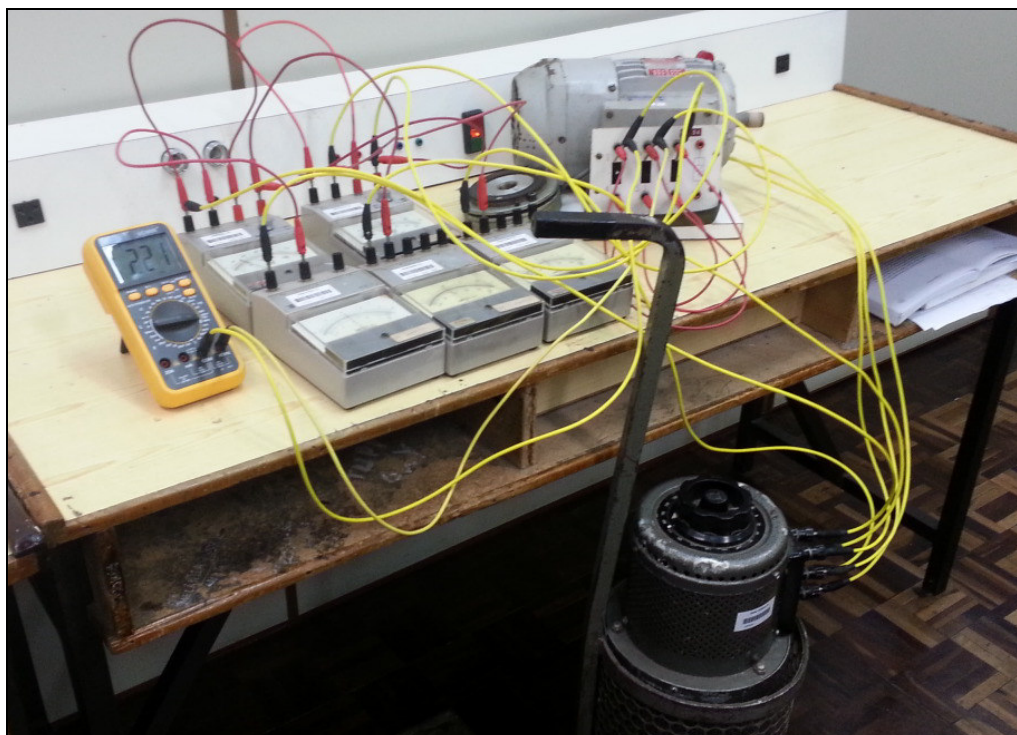
Realizaram-se sete conjuntos de testes para cada motor, identificados como “MOTOR 1” e “MOTOR 2”, tanto para o ensaio do rotor livre, como para o ensaio do rotor bloqueado. Sendo cada conjunto de teste com três medições e levantamento de dados considerando a mudança de posicionamento dos equipamentos, para gerar resultados válidos e excluir os resultados mais discrepantes que estão fora do desvio padrão.

Utilizou-se dois wattímetros monofásicos conectados pela ligação AARON, o que permite medir potência trifásica ligando-se as bobinas Bc em série com a fase e as bobinas Bv em paralelo com as fases “A” “B” e “C”. Da seguinte maneira:



- Wattímetro 1 – bobina Bc em série com a fase “A” e a bobina Bv em paralelo entre as fases “A” e “B”;
- Wattímetro 2 – bobina Bc em série com a fase “C” e a bobina Bv em paralelo entre as fases “B” e “C”.

Podendo ser visto na Figura 51 a montagem dos ensaios.



**Figura 51 - Montagem do ensaio a vazio e de rotor bloqueado**  
Fonte: Os autores, 2014.

Realizaram-se as medições de tensão entre as fases e medição das correntes com três amperímetros analógicos de bancada para as três fases. Utilizou-se um variac trifásico para alimentar o “MOTOR 1” e “MOTOR 2” conectados em triângulo para variar a tensão na entrada dos motores. Para o ensaio a vazio (sem carga), aplicou-se uma tensão nominal de 220 V. Já para o ensaio com rotor bloqueado, a tensão iniciou-se em zero e aumentou-se até aplicar corrente nominal de 3,8 A (para ligação em triângulo), pelo menos em um dos alicates amperímetros conectados.

Segue na Figura 52 o esquema de ligação do circuito dos ensaios realizados.

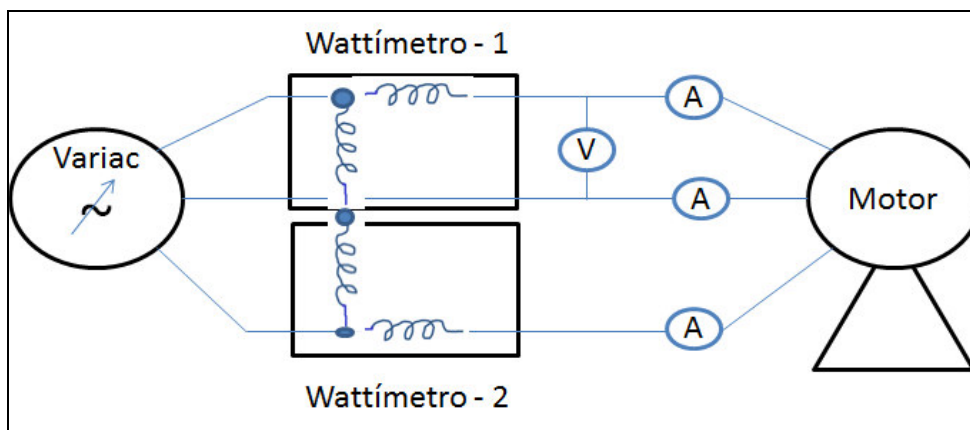


Figura 52 - Esquema de ligação – ensaios a vazio e com rotor e bloqueado  
 Fonte: Os autores, 2014.

### 6.1.5 Resultados

Seguem os resultados obtidos empiricamente nos ensaios.

Tabela 2 - Ensaio de rotor livre em "MOTOR 1" de indução trifásico, alimentado em triângulo

Parâmetros	1ª MEDIÇÃO	2ª MEDIÇÃO	3ª MEDIÇÃO	MÉDIA
V0 [V]	220,00	220,00	220,00	220,00
IR [A]	2,90	2,90	2,92	2,91
IS [A]	2,78	2,70	2,68	2,72
IT [A]	3,18	3,12	3,12	3,14
W1 [W]	-240,00	420,00	430,00	203,33
W2 [W]	550,00	-250,00	-260,00	13,33

Fonte: Os autores, 2014.

Tabela 3 - Ensaio de rotor bloqueado em "MOTOR 1" de indução trifásico, alimentado em triângulo

Parâmetros	1ª MEDIÇÃO	2ª MEDIÇÃO	3ª MEDIÇÃO	MÉDIA
V0 [V]	42,00	41,00	36,00	39,67
IR [A]	3,85	3,80	3,80	3,82
IS [A]	3,70	3,82	3,14	3,55
IT [A]	4,20	4,06	3,16	3,81
W1 [W]	0,00	170,00	130,00	150,00
W2 [W]	210,00	0,00	0,00	210,00

Fonte: Os autores, 2014.

Tabela 4 - Ensaio de rotor livre em "MOTOR 2" de indução trifásico, alimentado em triângulo

Parâmetros	1ª MEDIÇÃO	2ª MEDIÇÃO	3ª MEDIÇÃO	MÉDIA
V0 [V]	220,00	220,00	221,00	220,33
IR [A]	2,90	3,19	2,95	3,01
IS [A]	2,70	2,60	2,72	2,67
IT [A]	3,10	2,90	3,16	3,05
W1 [W]	-235,00	440,00	440,00	215,00
W2 [W]	542,00	-250,00	-260,00	10,67

Fonte: Os autores, 2014.

Tabela 5 - Ensaio de rotor bloqueado em "MOTOR 2" de indução trifásico, alimentado em triângulo

Parâmetros	1ª MEDIÇÃO	2ª MEDIÇÃO	3ª MEDIÇÃO	MÉDIA
V0 [V]	39,00	40,00	39,00	39,33
IR [A]	3,80	3,80	3,80	3,80
IS [A]	5,70	3,70	3,30	4,23
IT [A]	4,00	4,06	3,80	3,95
W1 [W]	0,00	170,00	145,00	157,50
W2 [W]	200,00	0,00	0,00	200,00

Fonte: Os autores, 2014.

A partir dos dados levantados do ensaio a vazio (sem carga), utilizaram-se as Equações (14) e (15) para o cálculo das resistências de  $r_{mag}$  e  $X_{mag}$ , onde representam as perdas rotacionais e perdas magnéticas respectivamente do ramo magnetizante.

$$r_{mag} = \frac{P_0 f}{I_p^2} \quad [\Omega] \quad (14)$$

$$X_{mag} = \frac{V_0 f}{I_Q} \quad [\Omega] \quad (15)$$

Já para os dados de rotor bloqueado, utilizaram-se as equações (16) e (17) para se obter as perdas ôhmicas e perdas no cobre  $R_E$  e  $X_{LE}$ , dados pela soma das resistências do estator e rotor da máquina de indução.

$$R_E = \frac{P_{BL}}{(I_{BL})^2} \quad [\Omega] \quad (16)$$

$$X_{LE} = \sqrt{Z_E^2 - R_E^2} \quad [\Omega] \quad (17)$$

Aplicaram-se os resultados obtidos nas equações (16) e (17) e calculando a média dos valores obtidos, chegou-se aos seguintes resultados apresentados nas Tabelas 6 e 7, referente ao "MOTOR 1" e "MOTOR 2" respectivamente:

Tabela 6 - Resumo dos cálculos considerando as médias válidas para o "MOTOR 1"

ENSAIO [N°]	MEDIÇÃO	ROTOR LIVRE		ROTOR BLOQUEADO	
		Rmag [Ω]	Xmag [Ω]	Xe	RE
1	1ª	468,387	134,218	-	-
1	2ª	854,118	132,688	-	-
1	3ª	854,118	132,688	-	-
2	1ª	-	141,836	-	-
2	2ª	-	143,703	-	-
2	3ª	-	-	17,445	3,776
2	4ª	-	-	17,466	4,511
<b>TOTAL MÉDIA</b>		<b>725,541</b>	<b>137,027</b>	<b>17,456</b>	<b>4,144</b>

Fonte: Os autores, 2014.

Tabela 7 - Resumo dos cálculos considerando as médias válidas para o "MOTOR 2"

ENSAIO [N°]	MEDIÇÃO	ROTOR LIVRE		ROTOR BLOQUEADO	
		Rmag [Ω]	Xmag [Ω]	Xe	RE
1	1ª	472,964	136,872	-	-
1	2ª	764,211	133,551	-	-
1	3ª	814,017	131,764	-	-
2	1ª	-	144,100	-	-
2	2ª	-	143,598	-	-
2	3ª	-	-	17,039	4,511
2	4ª	-	-	16,676	3,609
<b>TOTAL MÉDIA</b>		<b>683,730</b>	<b>137,977</b>	<b>16,858</b>	<b>4,060</b>

Fonte: Os autores, 2014.

Ou seja:

<b>Motor 1</b>	<b>Motor 2</b>
$r_{mag} = 725,541 \Omega$	$r_{mag} = 683,730 \Omega$
$X_{mag} = 137,027 \Omega$	$X_{mag} = 137,977 \Omega$
$R_E = 4,144 \Omega$	$R_E = 4,06 \Omega$
$X_{LE} = 17,456 \Omega$	$X_{LE} = 16,858 \Omega$

**Quadro 12 - Parâmetros da máquina de indução**  
 Fonte: Os autores, 2014.

## 6.2 DETERMINAÇÃO DA CURVA DE MAGNETIZAÇÃO E INDUTÂNCIA DE MAGNETIZAÇÃO

### 6.2.1 Introdução

Na seção 2.9 do presente trabalho citou-se a importância de se determinar a curva de magnetização ou curva de saturação. Já na seção 3.3.2 descreveu-se a indutância de magnetização. Nesta seção foram descrito os procedimentos do ensaio e os resultados obtidos.

### 6.2.2 Objetivo

Determinar a curva de magnetização ou curva de saturação para calcular a indutância de magnetização  $L_m$ .

### 6.2.3 Materiais

- Dois motores de indução trifásico de 1 cv acoplados por mancal;
- um inversor de frequência do fabricante WEG e modelo CFW-11;

- dois multímetros digitais;
- e um variac trifásico com escala até 380 V.

#### 6.2.4 Procedimento

Com as duas máquinas de indução trifásicas acopladas por um mancal, como pode ser visto na Figura 53, uma delas atuando como motor (máquina primária) e a outra como gerador. Utilizou-se um inversor de frequência, pertencente à bancada da Universidade, para alimentação da máquina primária com controle da velocidade, frequência, tensão e corrente. Realizaram-se dois ensaios:

- No primeiro ensaio aplicou-se uma tensão senoidal até atingir uma frequência de 60 Hz e 1800 rpm fornecidas pelo inversor de frequência à máquina primária. Posteriormente aplicou-se tensão proveniente do variac conectado nos terminais do gerador em ligação estrela. Iniciando em zero elevou-se a tensão até 380 V o que gerou uma corrente de 1,61 A entre o gerador e o variac, podendo a corrente chegar até a nominal que para este caso é de 3,2 A.

- No segundo ensaio aplicou-se uma tensão senoidal até atingir uma frequência de 50 Hz e 1500 rpm fornecidas pelo inversor de frequência à máquina primária. Posteriormente aplicou-se tensão proveniente do variac conectado nos terminais do gerador em ligação estrela. Iniciando em zero elevou-se a tensão até 220 V o que gerou uma corrente de 2,98 A entre o gerador e o variac.

Registraram-se os valores de corrente e tensão entre o gerador e o variac, e valores de frequência, rotação, tensão e corrente fornecidas pelo inversor de frequência. Sendo mostrado na Figura 53 à forma de acoplamento entre as máquinas e na Figura 54 um exemplo da bancada do inversor de frequência da UTFPR.

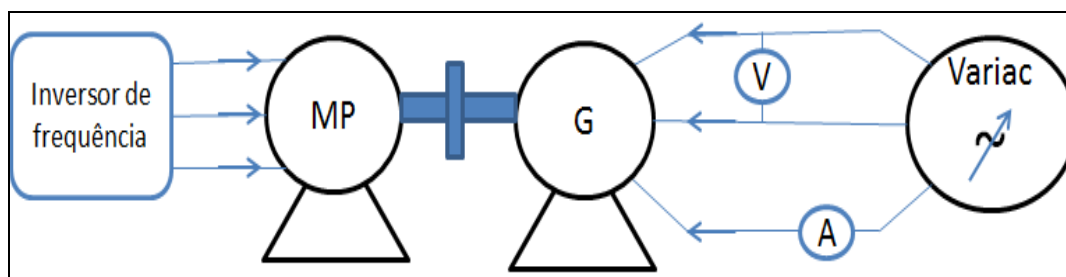


**Figura 53 - Acoplamento mecânico entre as máquinas de indução**  
Fonte: Os autores, 2014.



**Figura 54 - Exemplo da montagem e ligação dos motores no inversor de frequência**  
Fonte: Os autores, 2014.

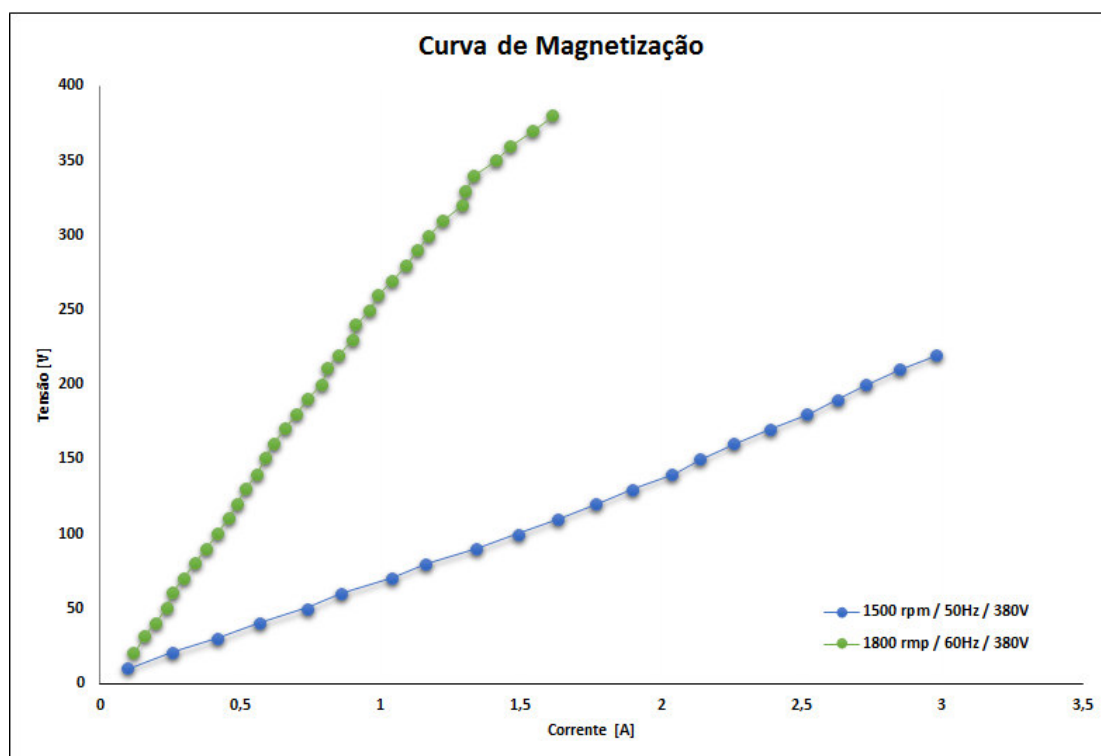
Segue na Figura 55 o esquema de ligação do circuito dos ensaios realizados.



**Figura 55 - Esquema do circuito ensaio de magnetização**  
 Fonte: Os autores, 2014.

### 6.2.5 Resultados

Segue na Figura 56 a curva de magnetização, desenvolvida a partir dos dados levantados de corrente-tensão para as frequências de 50 e 60 Hz e velocidades de 1500 e 1800 rpm respectivamente, apresentados na Tabela 8 no APÊNDICE A.



**Figura 56 - Curva de magnetização corrente-tensão**  
 Fonte: Os autores, 2014.



O fator mais importante para se determinar é a variação da indutância de magnetização, quando a máquina funciona como gerador observando sua dinâmica à medida que se eleva a tensão.

Com base nos dados obtidos nas curvas de magnetização mostradas na Figura 56, calcula-se o valor da indutância de magnetização ( $L_m$ ), dividindo o valor da tensão ( $V$ ) com o valor correspondente de corrente ( $I_{mag}$ ) multiplicado pelo fator ( $2\pi f$ ), onde  $f$  é a frequência realizada no ensaio. Este cálculo é realizado para cada par de valores corrente-tensão levantados empiricamente nos ensaios aplicando-se a Equação (18) representada abaixo.

$$L_m = \frac{V}{2\pi \cdot f \cdot I_{mag}} \text{ [H]} \quad (18)$$

Aplicando a equação (18), calculou-se a variação da indutância de magnetização, sendo mostrada na Figura 57. Os dados estão apresentados na Tabela 9 do APÊNDICE A.

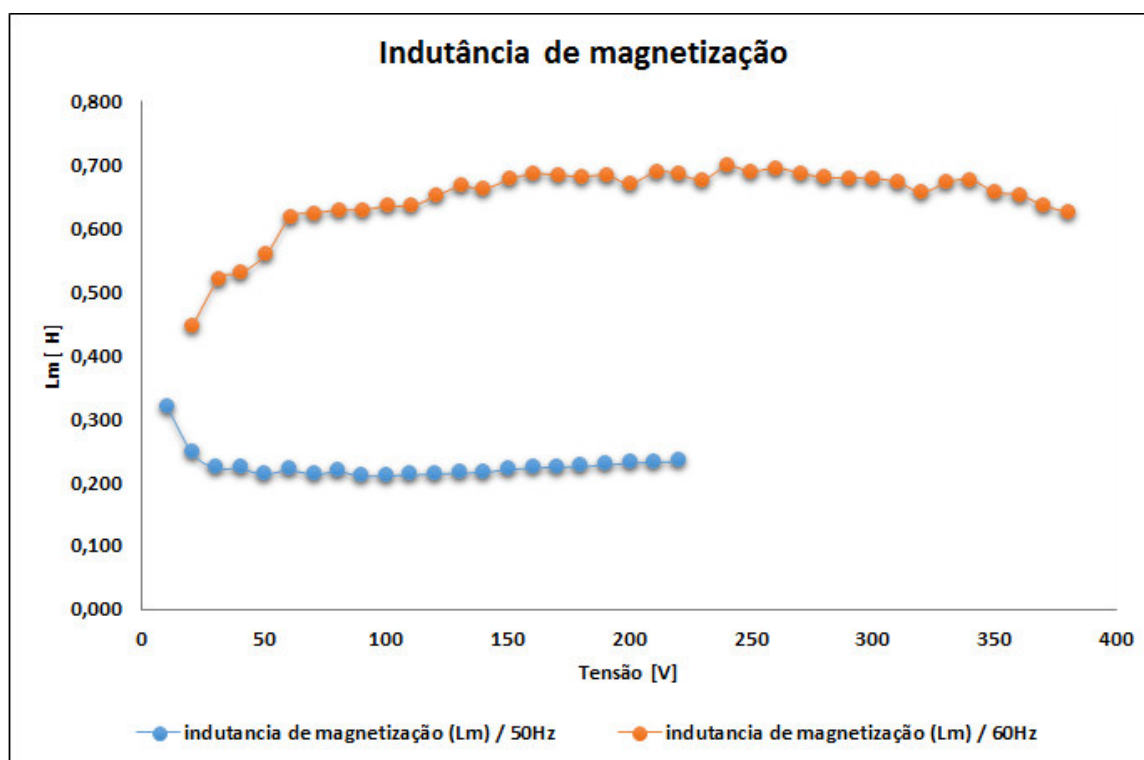


Figura 57 – Variação da indutância de magnetização, tensão-indutância  
Fonte: Os autores, 2014.

Conforme apresentado na seção 3.3.2 do presente trabalho, observou-se uma semelhança com a Figura 13 o qual apresenta uma região instável no início da curva até o valor máximo de  $L_m$ . Após este evento nota-se o aumento da tensão e  $L_m$  decrescendo. Segundo Montalvo,  $L_m$  se manterá constante após atingir o equilíbrio. Mediante esses valores nota-se que a curva para uma frequência de 60 Hz apresentada na Figura 57 se assemelha ao descrito pelo referido autor. Não é possível observar este equilíbrio de  $L_m$ , pois, alcançou o limite da escala do variac de 380 V.

## 6.3 O MAGNETISMO RESIDUAL E A AUTO-EXCITAÇÃO

### 6.3.1 Introdução

O processo de auto-excitação pode ou não ocorrer, mesmo com todos os procedimentos relativos à geração de energia a partir de uma máquina de indução previamente realizados, conforme descrito na seção 3.3 do presente trabalho, pois, depende de uma série de fatores interligados e inter-relacionados.

### 6.3.2 Objetivo

Determinar a auto-excitação para valores diferentes de  $X_c$ .

### 6.3.3 Materiais

- Dois motores de indução trifásico de 1 cv acoplados por mancal;

- um inversor de frequência do fabricante WEG e modelo CFW-11;
- dois multímetros digitais;
- nove capacitores monofásicos de 35  $\mu\text{F}$  e 220 V;
- e três capacitores trifásicos de 9  $\mu\text{F}$  e 220 V.

#### 6.3.4 Procedimento

De acordo com o exposto na seção 3.3 do presente trabalho, observou-se empiricamente a importância de existir magnetismo residual ou fluxo magnético remanescente no gerador, para a elevação da tensão à medida que a velocidade da máquina primária aumenta. Pois, mesmo com o banco de capacitores dimensionados corretamente e conectados ao gerador, e este girando a uma velocidade acima da velocidade síncrona, pode ser necessário à energização inicial das bobinas do gerador com aplicação de tensão nominal por alguns segundos. Aplicou-se, toda vez que necessária, tensão nominal no gerador por aproximadamente 30 s. Posteriormente a este processo de magnetização continuávamos os ensaios.

Para se obter as curvas de auto-excitação utilizou-se diversas configurações com capacitores monofásicos e trifásicos, mas somente foi realizado o levantamento de dados para o conjunto de capacitores que eram capazes de produzir energia nos terminais do gerador suficiente para ligar uma carga resistiva e uma carga indutiva juntas.

Assim sendo, realizaram-se quatro ensaios com valores diferentes de capacitância ( $X_c$ ):

- **Primeiro ensaio** – realizou-se a combinação de três capacitores monofásicos de 35  $\mu\text{F}$  ligados em série para cada fase, fornecendo 11,65  $\mu\text{F}$  por fase.

- **Segundo ensaio** – realizou-se a combinação de dois capacitores monofásicos de 35  $\mu\text{F}$  ligados em série para cada fase, fornecendo 17,5  $\mu\text{F}$  por fase.

- **Terceiro ensaio** - realizou-se a combinação de três capacitores monofásicos de 35  $\mu\text{F}$  ligados em paralelo para cada fase, fornecendo 105  $\mu\text{F}$  por fase.

- **Quarto ensaio** – Realizou-se a combinação de dois capacitores trifásico de 9  $\mu\text{F}$  ligados em paralelo, fornecendo 18  $\mu\text{F}$  para cada fase.

Para os quatro ensaios, aplicou-se tensão nominal de 220 V na máquina primária, fornecida pelo inversor de frequência, variando sua rotação até que o gerador comece a fornecer tensão acima de 220 V. Posteriormente, reduziu-se a velocidade, mas não muito, o suficiente para fornecer tensões acima da nominal, mas com correntes dentro dos limites do gerador e assim iniciar os ensaios com levantamento dos dados de corrente e tensão nos terminais do gerador para cada conjunto de capacitores conforme já mencionado anteriormente.

Inicia-se então, para cada ensaio, a redução da velocidade e conseqüentemente a redução da tensão na saída do gerador, até cessar o fornecimento de tensão e corrente na saída do gerador.

Segue na Figura 58 o esquema de ligação do circuito dos ensaios realizados.

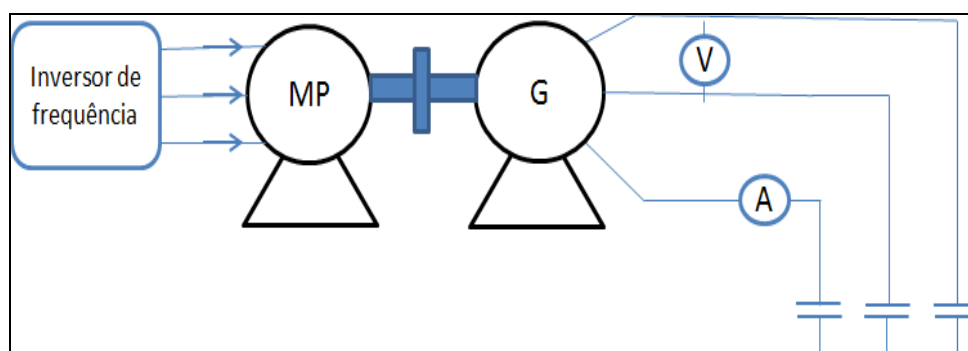


Figura 58 - Esquema do circuito ensaio auto-excitação  
Fonte: Os autores, 2014.

### 6.3.5 Resultados

A Figura 59 apresenta os resultados obtidos nos quatro ensaios realizados empiricamente, conforme procedimentos realizados,

baseado no levantamento mostrado nas Tabelas 10, 11, 12 e 13 do APÊNDICE A.

Pode-se observar a linearidade nas curvas corrente-tensão para os quatro ensaios, com destaque para o terceiro ensaio devido a sua faixa de trabalho, que apresentou uma corrente de 5,4 A, 68 % da corrente nominal. Isto porque o ensaio foi realizado a vazio, portanto, estava com excesso de reativo.

Para o cálculo do valor de  $X_c$  (capacitância) foi utilizado à Equação (19), com base nas informações obtidas nos ensaios práticos para levantamento dos parâmetros da máquina de indução, mostradas na seção 6.1. De posse das informações dos valores de  $r_{mag}$ ,  $X_{mag}$ ,  $R_E$  e  $X_{LE}$  temos que:

$$X_c = X_{mag} + X_{LE} [\Omega] \quad (19)$$

onde

$$X_c = 137,07 + 17,456 = 154,483 [\Omega]$$

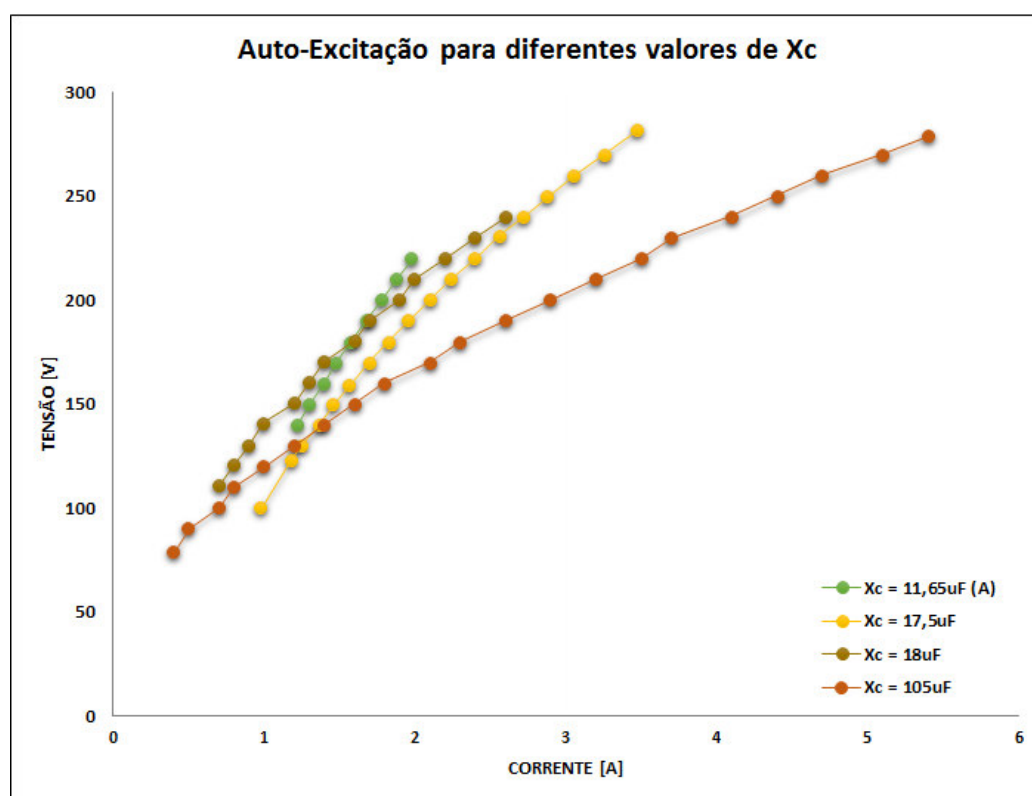


Figura 59 - Curva de auto-excitação para diferentes valores de  $X_c$   
Fonte: Os autores, 2014.

Utilizando a Equação (19) para calcular o valor da capacitância, temos que:

$$C = \frac{1}{2\pi f \cdot X_c} [F] = 17,171 \text{ } [\mu F] \quad (20)$$

Portanto, a Equação (20) nos forneceu a referência dos valores de capacitância para iniciarmos os ensaios, mas como dependíamos da disponibilidade dos capacitores existentes no laboratório da universidade com seus arranjos série-paralelo, foram elaboradas as curvas de auto-excitação mostradas na Figura 59.

#### 6.4 LEVANTAMENTO DA TENSÃO GERADA EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE – ENSAIO COM CARGA

##### 6.4.1 Introdução

Após o levantamento das curvas de auto-excitação, foram realizados diversos ensaios visando o melhor arranjo de capacitores para fornecimento de reativo suficiente para energizar cargas indutivas e resistivas conectadas ao gerador.

O aumento da carga sem o correto fornecimento de capacitância, por vezes cessava o fornecimento de energia nos terminais do gerador e também eliminava o magnetismo residual. Necessitando a energização direta do gerador com tensão nominal e assim obrigando a repetir os ensaios.

#### 6.4.2 Objetivo

Determinar a curva rotação-tensão do gerador variando a carga acoplada ao mesmo.

#### 6.4.3 Materiais

- Dois motores de indução trifásico de 1 cv acoplados por mancal;
- um inversor de frequência do fabricante WEG e modelo CFW-11;
- dois multímetros digitais;
- três capacitores trifásicos de 9  $\mu$ F e 220 V;
- e dois disjuntores tripolar de 25 A.

#### 6.4.4 Procedimento

Para a realização dos ensaios com carga utilizou-se o conjunto de capacitores que apresentaram melhor resultado, tanto para a carga resistiva como para carga indutiva.

Realizou-se dois ensaios com carga, um deles com carga resistiva e outro com carga resistiva e indutiva juntas, ligadas em estrela. Segue abaixo descrição dos ensaios:

- **Primeiro ensaio - com carga resistiva:** conectaram-se três lâmpadas de 40 W, 220 V ligadas em estrela, utilizando dois capacitores trifásicos, conectados também em estrela, de 9  $\mu$ F por fase ( $9 + 9 = 18\mu$ F). O ensaio inicia-se aplicando tensão na máquina primária fornecida pelo inversor de frequência. Depois de estabilizado o fornecimento de tensão na saída do gerador, é necessário elevar a tensão a 260 V na saída do gerador antes de conectar as cargas, para que no momento da conexão o gerador continue fornecendo energia sem perder seu magnetismo residual. Após a estabilização da tensão

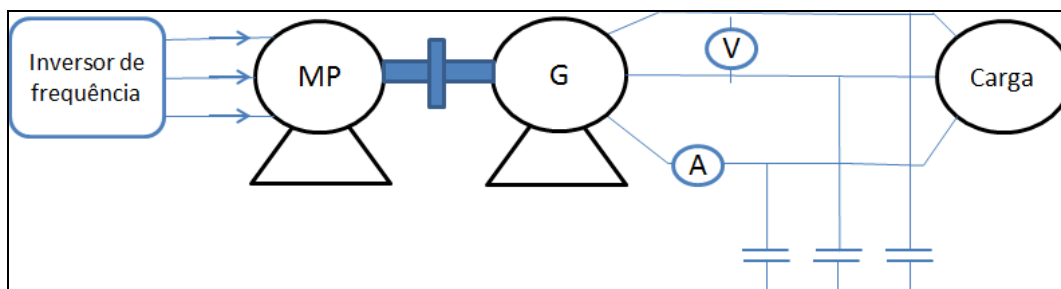
do gerador com a carga conectada, regula-se a rotação no inversor de frequência para que a tensão fornecida à carga pelo gerador fique em 240 V, isto ocorre a uma rotação de 2052 rpm. Na sequência, inicia-se o levantamento de dados diminuindo gradativamente a rotação e conseqüentemente a tensão e corrente na saída do gerador até cessar o fornecimento de energia do gerador.

- **Segundo Ensaio - com carga resistiva e indutiva juntas:** repete-se o procedimento do primeiro ensaio com a diferença que após a estabilização do gerador com a carga resistiva do primeiro ensaio, é necessário a conexão de outro capacitor trifásico de 9  $\mu\text{F}$  (conectado ao gerador por meio de um disjuntor tripolar) somente para vencer a corrente de partida da carga indutiva. Que após a estabilização do sistema, ou seja, as duas cargas em funcionamento e uma tensão de 240 V na saída do gerador. Iniciou-se o levantamento de dados diminuindo-se gradativamente a rotação até cessar o fornecimento de energia na saída do gerador. No momento da conexão do terceiro capacitor obtém-se 21  $\mu\text{F}$  por fase. Sendo que após estabilizar a rotação da carga, este terceiro capacitor é desconectado do sistema, ficando uma capacitância de 18  $\mu\text{F}$  fornecida pelos dois capacitores trifásicos de 9  $\mu\text{F}$ .

A carga indutiva foi ligada em estrela (conectado ao gerador por meio de um disjuntor tripolar) para diminuir a corrente de partida, pois na ligação em triângulo mesmo conectando o terceiro capacitor, o gerador perde o fluxo magnético e cessa o fornecimento de energia. Para diminuir a corrente de partida poderia ser usado uma *soft-starter*, chave *estrela-triângulo* ou outro controle de velocidade ou corrente de partida, mas para simplificar os ensaios optou-se em energizar o motor em estrela e adicionando-se um capacitor para fornecimento de reativo no momento da partida. O que foi o suficiente para manter estabilizado o gerador.

Segue na Figura 60 o esquema de ligação do circuito dos ensaios realizados.





**Figura 60 - Esquema do circuito - ensaio com carga**  
**Fonte: Os autores, 2014.**

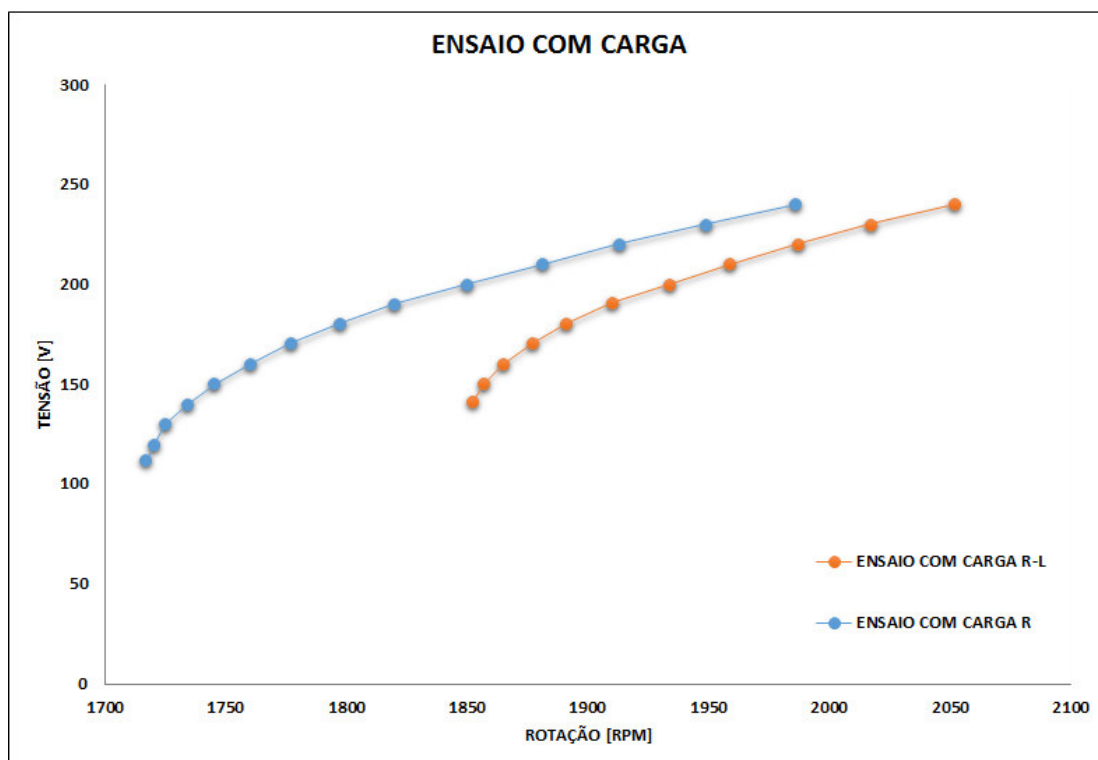
#### 6.4.5 Resultados

Observando o comportamento do gerador no primeiro ensaio, no momento da conexão das resistências ao gerador a tensão decai um pouco, em torno de 10 V, cessando o fornecimento de energia no momento em que se tem 112 V a 1717 rpm. Acontecimento semelhante se comparado a vazio. Mas quando se conecta uma carga indutiva, no caso um motor trifásico de 0,33 cv, esta consome todo reativo fornecido pelos capacitores eliminando o magnetismo residual do gerador.

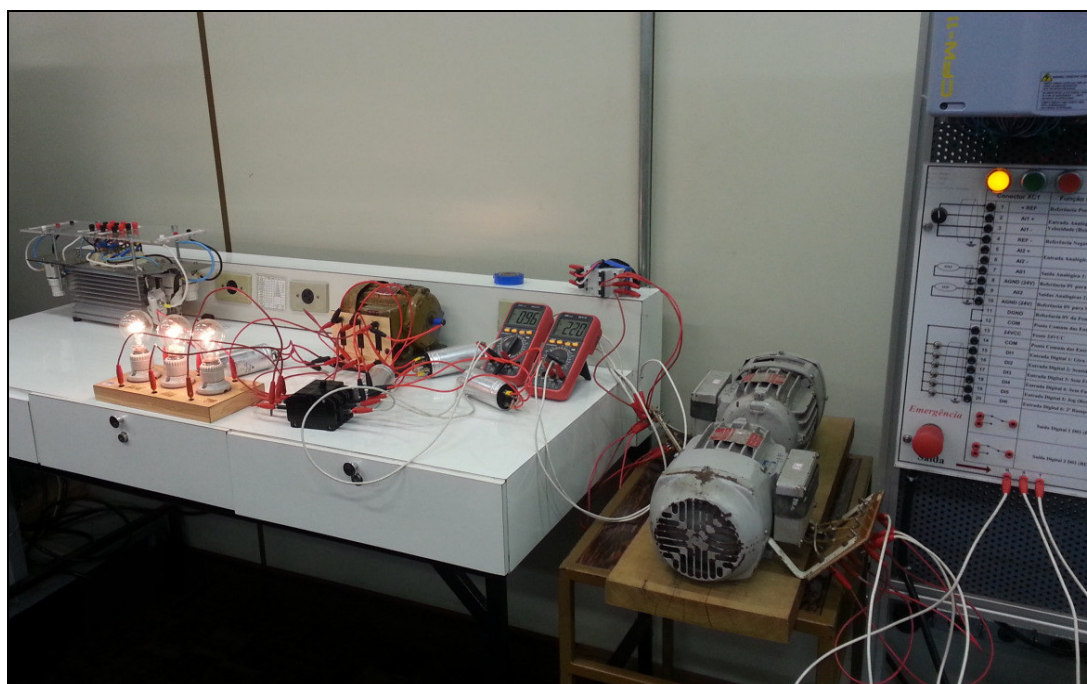
A Figura 61 apresenta as curvas realizadas nos dois ensaios, com carga somente resistiva e com cargas resistiva e indutiva conectadas em estrela. Sendo os dados apresentados na Tabela 14 do APÊNDICE A. Analisando a referida figura, observa-se um decaimento normal da tensão em relação à diminuição da rotação. Verifica-se também que para o segundo ensaio com ambas as cargas conectadas ao gerador, tem-se uma menor faixa de trabalho cessando o fornecimento de energia em 141,3 V e 1,56 A, a uma rotação de 1852 rpm. Já para o primeiro ensaio devido à necessidade de uma menor corrente, chega-se a uma tensão de 112 V e 1,22 A, a uma rotação de 1717 rpm.

O comportamento linear e proporcional à carga acoplada é satisfatório.

Na Figura 62, temos a montagem do ensaio realizado no laboratório da UTFPR, podendo ser visto todo o conjunto em funcionamento.



**Figura 61 - Curvas com carga somente resistiva e indutiva - resistiva juntas**  
 Fonte: Os autores, 2014.



**Figura 62 - Montagem do ensaio curva com carga**  
 Fonte: Os autores, 2014.

## 6.5 LEVANTAMENTO DA TENSÃO GERADA EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE – ENSAIO SEM CARGA (À VAZIO)

### 6.5.1 Introdução

O ensaio sem carga foi o mesmo realizado para o quarto ensaio para levantamento da curva de auto-excitação para diferentes valores de  $X_c$  da seção 6.3.

### 6.5.2 Objetivo

Determinar a curva rotação-tensão do gerador sem carga (à vazio).

### 6.5.3 Materiais

- Dois motores de indução trifásico de 1 cv acoplados por mancal;
- um inversor de frequência do fabricante WEG e modelo CFW-11;
- dois multímetros digitais;
- e dois capacitores trifásicos de 9  $\mu\text{F}$  e 220 V.

### 6.5.4 Procedimento

Realizou-se a combinação de dois capacitores trifásico de 9  $\mu\text{F}$  ligados em paralelo, fornecendo 18  $\mu\text{F}$  para cada fase, aplicou-se tensão nominal de 220 V na máquina primária, fornecida pelo inversor de frequência, variando sua rotação até que o gerador comece a

fornecer tensão acima de 220 V. Posteriormente, reduziu-se a velocidade, mas não muito, o suficiente para fornecer tensões acima da nominal, mas com correntes dentro dos limites do gerador e assim iniciar o levantamento de dados com a redução gradativa da velocidade e conseqüentemente a redução da tensão na saída do gerador, até cessar o fornecimento de tensão e corrente na saída do gerador.

O esquema do circuito de montagem é o mesmo da Figura 58 da seção 6.3.

#### 6.5.5 Resultados

Os dados levantados e resultados obtidos são os mesmos do quarto ensaio da seção 6.3, com a diferença na apresentação dos resultados conforme demonstra a Figura 63, onde se tem o parâmetro rotação no lugar do parâmetro corrente conforme mostrado na Figura 59 da seção 6.3.

Pode-se observar também um comportamento semelhante ao primeiro ensaio da seção 6.4 com carga somente resistiva. Isto acontece devido a baixa potência da carga resistiva conectada ao gerador, assim, varia-se pouco o comportamento do gerador se comparado à vazio, com a necessidade de se elevar apenas 20 rpm para obter uma tensão de 240 V na saída do gerador para o ensaio com carga resistiva. Comparando-se as Figuras 61 e 63 nota-se com facilidade esta semelhança. Os dados da Figura 63 podem ser vistos na Tabela 15 do APÊNDICE A.

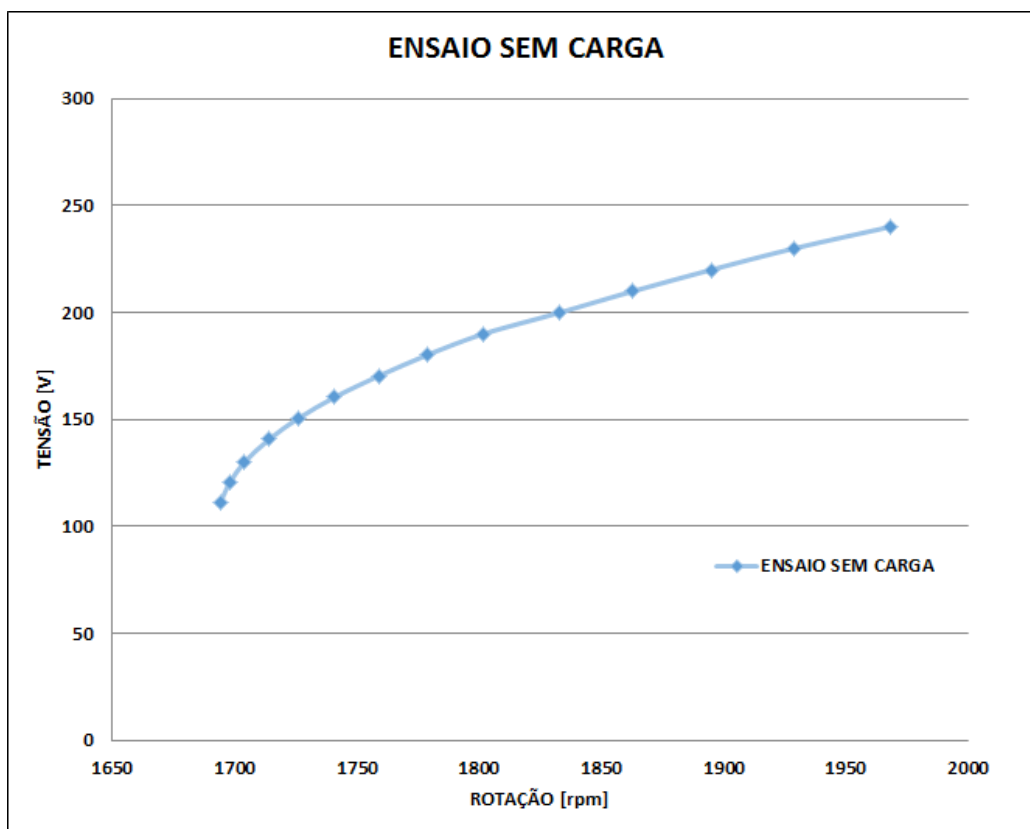


Figura 63 - Curva sem carga para uma capacitância de 18  $\mu\text{F}$   
Fonte: Os autores, 2014.

## 6.6 TENSÃO E CORRENTE DO GERADOR DE INDUÇÃO COM DIFERENTES CARGAS E DIFERENTES CAPACITORES

### 6.6.1 Introdução

É necessário verificar o comportamento do gerador de indução para diversas situações de carga, tanto resistivas como indutivas, e com diferentes configurações de capacitores variando a capacitância fornecida. Desta forma é possível analisar a eficiência do gerador.

### 6.6.2 Objetivo

Determinar as curvas e o comportamento do gerador de indução para varias cargas com valores diferentes de capacitância ( $X_c$ ).

### 6.6.3 Materiais

- Dois motores de indução trifásico de 1 cv acoplados por mancal;
- um inversor de frequência do fabricante WEG e modelo CFW-11;
- dois multímetros digitais;
- um capacitor trifásico de 27,5  $\mu$ F, 1,5 kVAr a 220 V / 60 Hz;
- dois capacitores trifásicos de 9  $\mu$ F, 1,0 kVAr a 220 V / 60 Hz;
- seis capacitores monofásicos de 46  $\mu$ F, 0,84 kVAr a 220 V / 60 Hz;
- um conjunto de três lâmpadas incandescentes de 40 W / 220 V;
- um conjunto de três lâmpadas incandescente de 60 W / 220 V.
- e um motor trifásico de 0,33 cv.

### 6.6.4 Procedimento

Realizaram-se seis ensaios para diferentes agrupamentos de carga, sendo para cada ensaio três arranjos diferentes de capacitores, com diferentes valores de  $X_c$ . Sendo a configuração utilizada tanto para as cargas como para os capacitores, detalhadas abaixo:

- **Configuração R1** – carga resistiva formada por três lâmpadas incandescente de 60 W e 220 V ligadas em estrela;
- **Configuração R2** – carga resistiva formada por três lâmpadas incandescente de 60 W e 220 V ligadas em estrela e em série

com três lâmpadas incandescente de 40 W e 220 V ligadas em estrela totalizando 100 W por fase;

- **Configuração R3** - carga resistiva formada por três lâmpadas incandescente de 40 W e 220 V ligadas em estrela;
- **Configuração RL1** – carga indutiva (motor de indução trifásico de 0,33 cv) ligada em paralelo com a carga resistiva R1;
- **Configuração RL2** - carga indutiva (motor de indução trifásico de 0,33 cv) ligada em paralelo com a carga resistiva R2;
- **Configuração RL3** - carga indutiva (motor de indução trifásico de 0,33 cv) ligada em paralelo com a carga resistiva R3;

Já quanto ao arranjo de capacitores utilizados, segue abaixo seus arranjos:

- **Configuração C1** – ligação de um capacitor trifásico de 27,5  $\mu\text{F}$  por fase e 1,5 kVAr a 220 V / 60 Hz;
- **Configuração C2** – ligação de dois capacitores trifásicos ligados em estrela de 9  $\mu\text{F}$  por fase gerando ao todo 18  $\mu\text{F}$  e 1,0 kVAr a 220 V / 60 Hz;
- **Configuração C3** – ligação de seis capacitores monofásicos de 46  $\mu\text{F}$  ligados em série dois por fase gerando 23  $\mu\text{F}$  por fase, e 0,84 kVAr a 220 V / 60 Hz.

Para a elaboração dos seis ensaios realizaram-se os mesmos procedimentos iniciais, já realizados nos demais ensaios descritos nas seções anteriores, ou seja: aplicou-se tensão nominal de 220 V na máquina primária, fornecida pelo inversor de frequência, variando sua rotação até que o gerador comece a fornecer tensão acima de 220 V. Posteriormente, reduziu-se a velocidade, mas não muito, o suficiente para fornecer tensões acima da nominal, mas com correntes dentro dos limites do gerador e assim iniciar o levantamento de dados com a redução gradativa da velocidade e conseqüentemente a redução da tensão na saída do gerador, até cessar o fornecimento de tensão e corrente na saída do gerador.

O que diferencia cada ensaio são as diferentes cargas conectadas ao gerador, sendo utilizado para cada uma das três variações de cargas, os três arranjos de capacitores. Por exemplo, para o primeiro ensaio, após a etapa de energização do gerador com “C1” conectado em estrela, é conectada a carga “R1”, Posteriormente repetiu-se a etapa de energização do gerador, mas utilizando “C2” e após o equilíbrio, com a carga “R1” conectada, inicia-se o levantamento de dados. Na sequência, repete-se o procedimento, mas utilizando “C3”.

Para o segundo ensaio, repete-se as etapas anteriores com a diferença de utilizar a carga “R2”, sendo realizadas três curvas para as três configurações de capacitores. No total realizaram-se dezoito ensaios nesta seção.

Para os ensaios com carga indutiva – “RL1”, “RL2” e “RL3” – nas configurações “C2” e “C3”, utilizou-se a conexão de mais capacitor trifásico de 9  $\mu\text{F}$  por fase e 1,0 kVAr a 220 V / 60 Hz, somente para suprir a partida da carga indutiva até o equilíbrio do gerador, após este capacitor adicional era removido do sistema. No entanto, para a configuração “C1”, devido à potência do capacitor trifásico, não foi necessário à inclusão do capacitor adicional para a partida da carga indutiva, ele supriu toda a demanda de reativo necessária à carga.

O esquema do circuito de montagem é o mesmo da Figura 60 da seção 6.4.

#### 6.6.5 Resultados

Observando as curvas levantadas nos ensaios demonstrados nas Figuras 64, 65, 66, 67, 68 e 69, com seus dados apresentados respectivamente nas Tabelas 16, 17, 18, 19, 20 e 21 do APÊNDICE A, pode-se verificar uma linearidade no comportamento do gerador para as diferentes cargas, tanto resistivas como indutivas / resistivas e também para as três configurações de capacitância.

Podemos observar ainda, que na configuração RL2 (Figura 68) em que temos 100 W de carga resistiva e um motor de 0,33 cv, ou seja,



a maior potência testada, a faixa de trabalho é menor e necessita de uma rotação, tensão e corrente maiores para acionar a carga, caso contrario a carga elimina e consome todo o fluxo magnético cessando o fornecimento de energia. Caso isto ocorra é necessário executar o procedimento de proporcionar magnetismo residual ao gerador conforme descrito na seção 6.3.4 do presente trabalho.

Estes ensaios mostraram que para situações em que se tem carga variável, é necessário o fornecimento de mais reativo que somente o necessário para manter a tensão desejada equilibrada, por exemplo, de 220 V.

O consumo do reativo deve ocorrer o tempo todo, pois caso a carga não consuma o reativo gerado pelos capacitores, e não seja realizado este consumo por nenhum outro dispositivo, este reativo excedente se comporta como uma carga a mais ligada no gerador, com a diferença que aumenta a corrente sem alterar a tensão gerando aquecimento prejudicial à máquina.

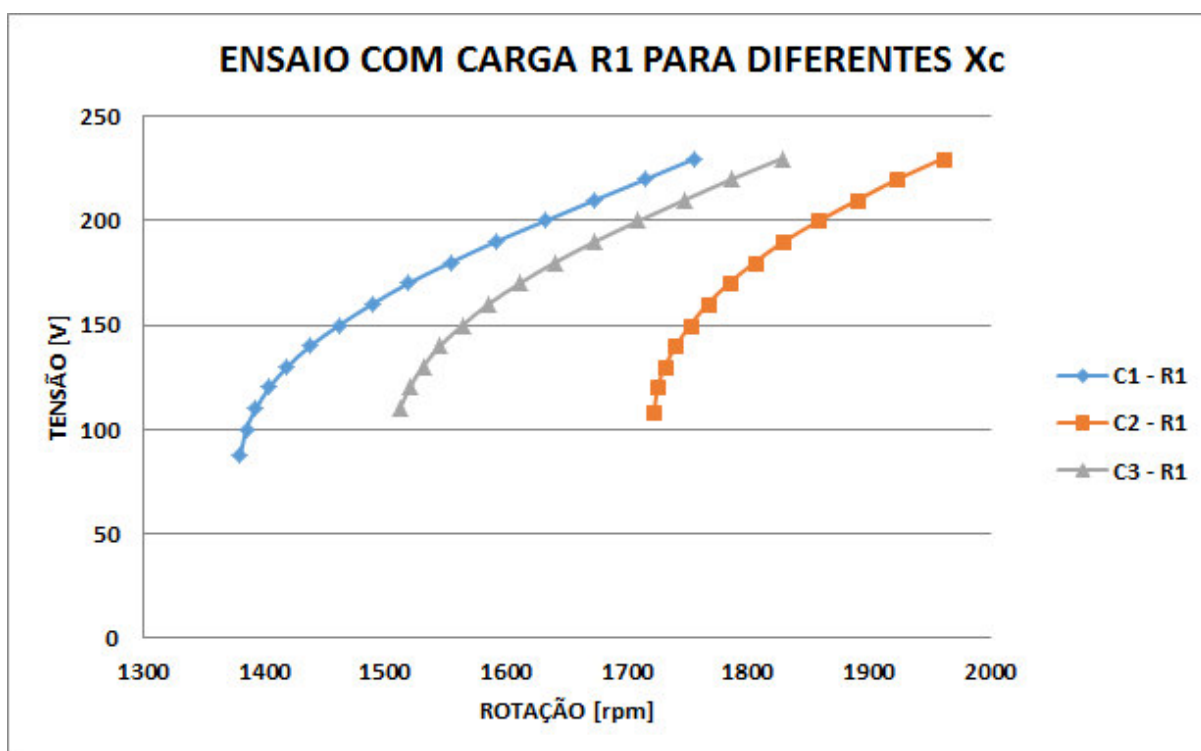


Figura 64 - Curva com carga resistiva (três lâmpadas de 60 W ligadas em estrela) para diferentes valores de capacitância

Fonte: Os autores, 2014.

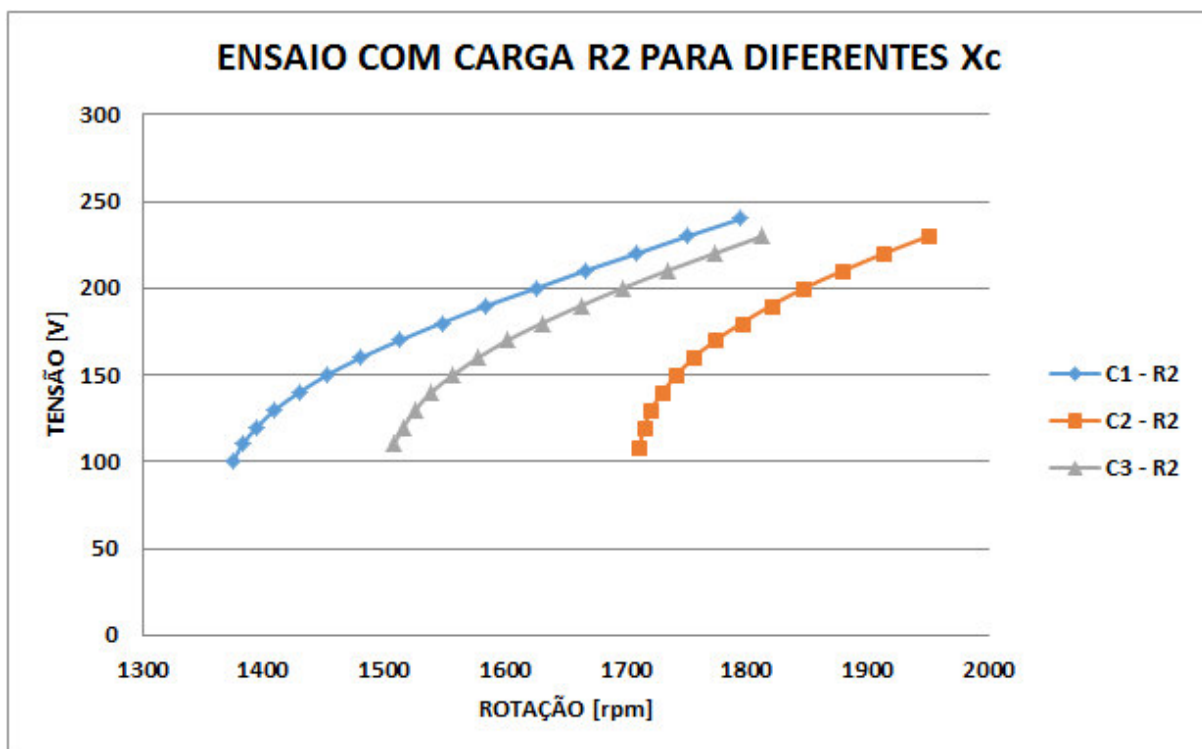


Figura 65 - Curva com carga resistiva (3 lâmpadas de 60 W em série com 3 de 40 W ligadas em estrela) para diferentes valores de capacitância  
Fonte: Os autores, 2014.

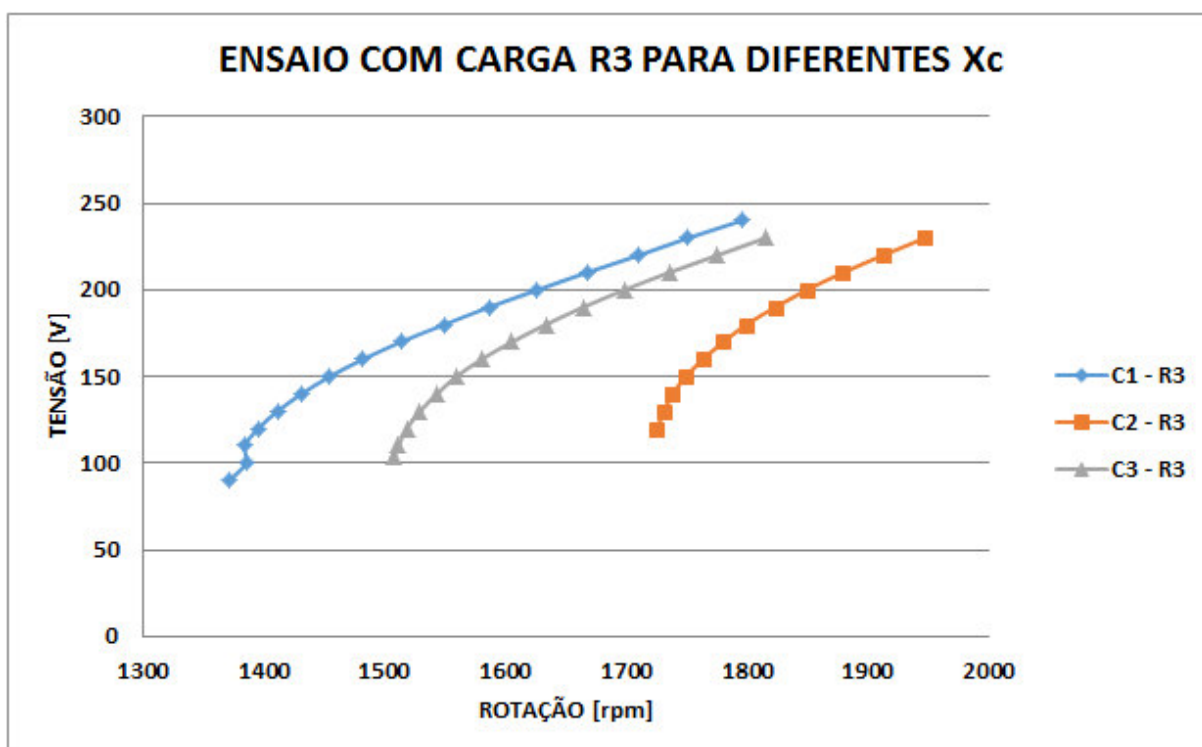


Figura 66 - Curva com carga resistiva (três lâmpadas de 40 W ligadas em estrela) para diferentes valores de capacitância  
Fonte: Os autores, 2014.

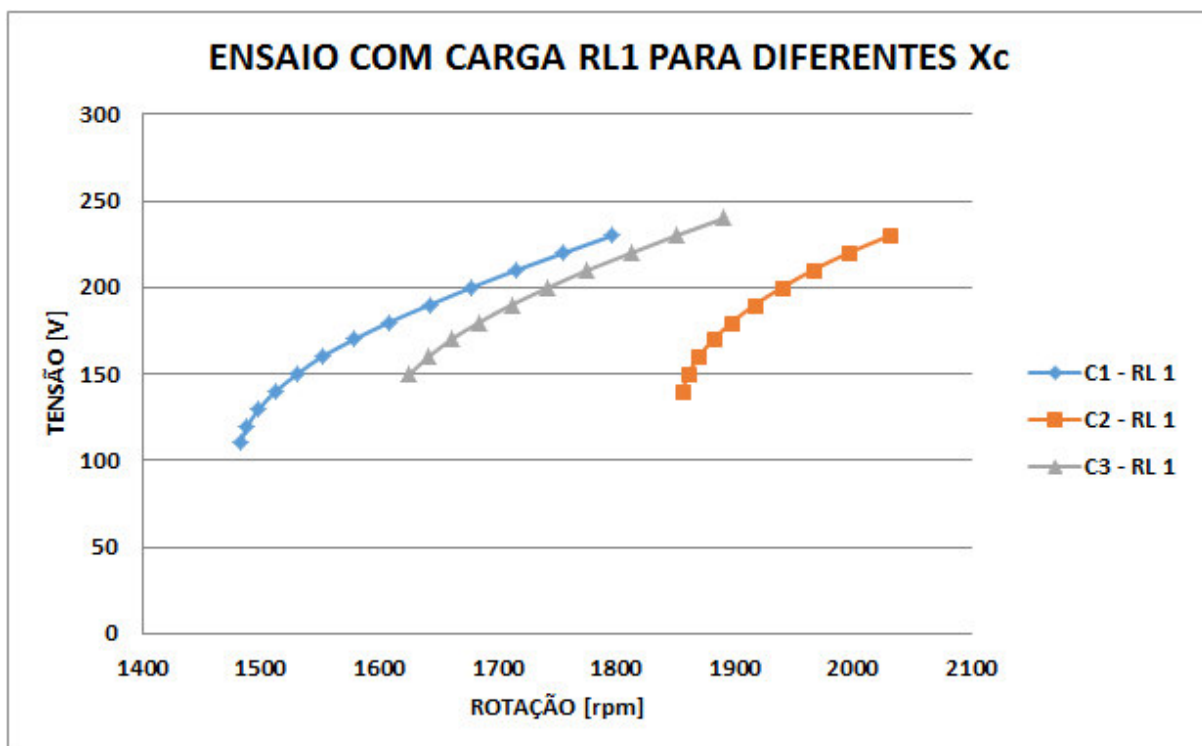


Figura 67 - Curva com carga indutiva e resistiva ligadas em paralelo na configuração RL1 para diferentes valores de capacitância  
Fonte: Os autores, 2014.

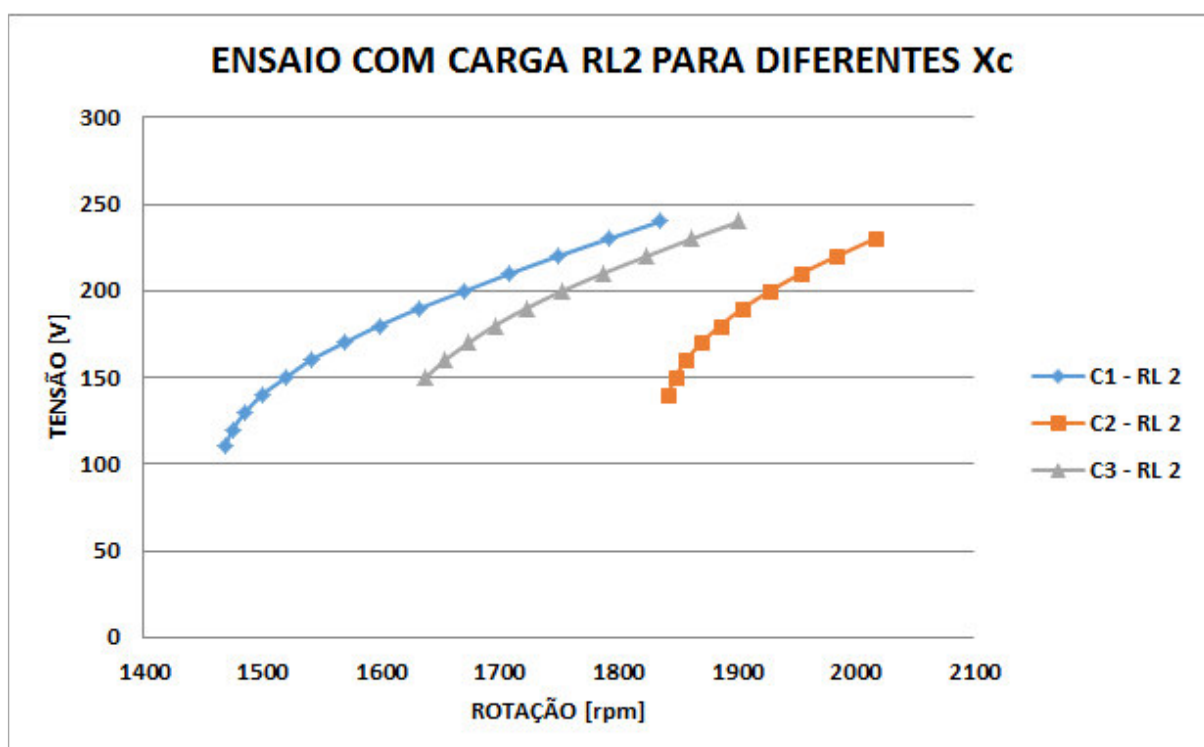


Figura 68 - Curva com carga indutiva e resistiva ligadas em paralelo na configuração RL2 para diferentes valores de capacitância  
Fonte: Os autores, 2014.

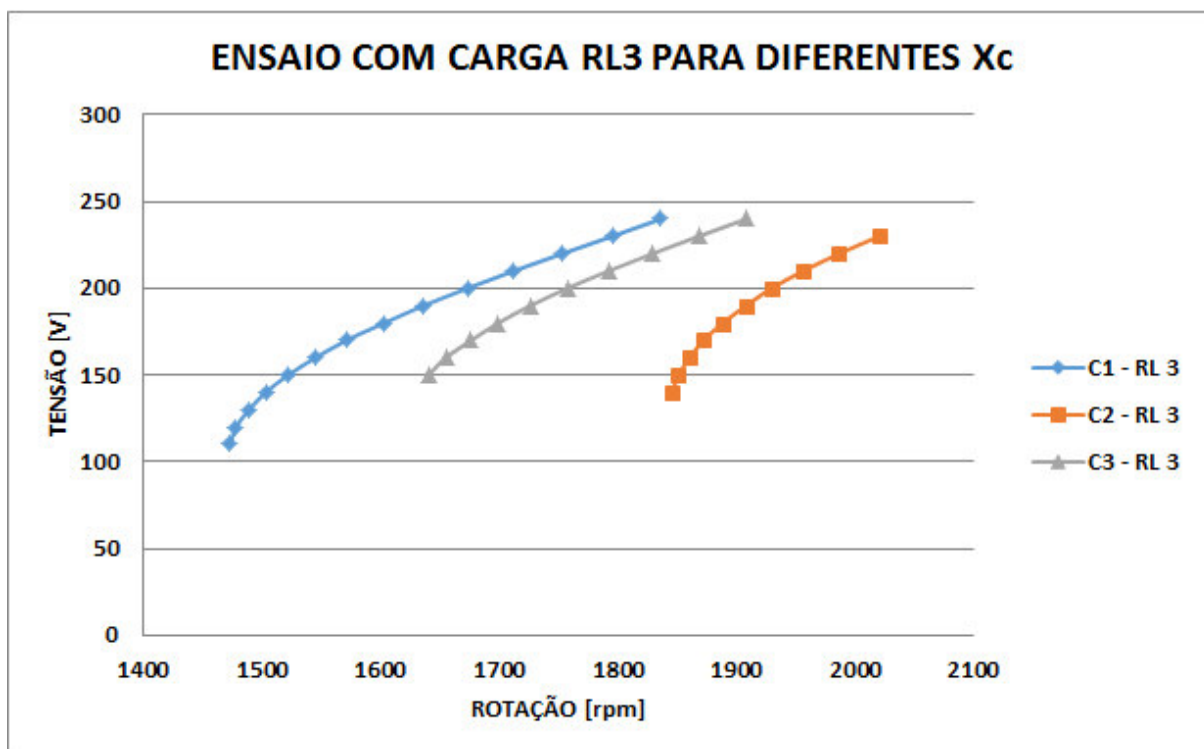


Figura 69 - Curva com carga indutiva e resistiva ligadas em paralelo na configuração RL3 para diferentes valores de capacitância  
Fonte: Os autores, 2014.

## **7 CONTROLE DA TENSÃO DO GERADOR DE INDUÇÃO**

### **7.1 INTRODUÇÃO**

Baseado nos estudos e ensaios sobre o gerador de indução auto-excitado realizados no capítulo 6, pode-se observar o comportamento dinâmico da tensão gerada sob diferentes condições de carga e diferentes valores de capacitância. Conforme o valor de potência demandada pela carga aumenta, a intensidade da tensão e frequência nos terminais do gerador diminuem, e para manter os valores da tensão gerada constante ou com variações mínimas, a corrente reativa fornecida pelos capacitores de excitação devem variar junto com a carga.

A regulação da tensão de um gerador de indução com capacitores fixos é ineficiente, devido à variação de corrente reativa para diferentes valores de carga. Existem vários esquemas em eletrônica de potência para se realizar o controle da tensão. Estes sistemas foram projetados assumindo que uma vez que o gerador é excitado, a variação da tensão em torno do ponto de operação é linear. Nas próximas seções será visto uma descrição sobre os esquemas.

### **7.2 ASPECTOS RELACIONADOS COM O CONTROLE DA TENSÃO**

A necessidade do fornecimento de potência reativa para realizar a auto-excitação e controle da tensão, tem sido as duas maiores desvantagens dos geradores de indução. Algumas pesquisas apresentam uma análise da regulação de tensão utilizando uma combinação de capacitores, de auto-excitação, em derivação (paralelo) e capacitores em série com a carga. Esta última configuração, mostra que há uma melhor regulação da tensão se comparado a um banco de capacitores em derivação. No entanto, o valor do capacitor em série é

ligeiramente maior que o dobro do valor do capacitor em paralelo. No qual resulta num custo maior, e ainda exigem capacitores que suportem corrente a plena carga. Portanto, podemos concluir que a configuração do gerador de indução com capacitores em paralelo é mais acessível se comparada com os capacitores em série, tanto em termos econômicos como técnicos; ainda, a compensação realizada por esta configuração ocasiona um problema de ressonância subsíncrona enquanto a potência é fornecida a uma carga indutiva e ou dinâmica.

Outra pesquisa apresenta um esquema de controle de tensão baseado em dois grupos de capacitores, nos quais fornecem potência reativa suficiente para o gerador e a carga a todo o momento. Um grupo de capacitores tem um valor fixo, enquanto que o outro grupo de capacitores é comutado para compensar a potência reativa demandada pela carga a todo o momento. O número de capacitores comutados se mantém a um mínimo para simplificar o circuito de comutação e fornece a compensação reativa variante e necessária. O controlador detecta a potência reativa consumida pela máquina e de acordo com este valor proporciona a potência reativa necessária para manter o fator de potência o mais próximo possível da unidade. Este método tem aplicações práticas limitadas porque regula a tensão nos terminais em passos discretos.

Existem outros métodos para o controle da tensão do GIAE cujo princípio de funcionamento se baseia em um Controlador Eletrônico de Carga (CEC). Vários tipos de CEC têm sido relatados na literatura. Alguns usam resistências comutadas, disparos de tiristores controlados por ângulo de fase, retificadores controlados que alimentam resistências de descarga que dissipam a potência gerada que não é aproveitada pelo consumidor, e retificadores não controlados por um circuito chaveado que alimenta de igual maneira uma resistência de descarga.

O CEC que utiliza resistências comutadas, a carga resistiva total se divide em um número diferente de elementos com o qual o sistema se torna volumoso, propenso a falhar e tem pouca confiabilidade. No CEC baseado em tiristores, o atraso no ângulo de disparo varia de  $0^\circ$  a

180° conforme a carga utilizada pelo usuário entre 0 a 100%. Devido ao atraso do ângulo de disparo, este dispositivo demanda potência reativa e injeta harmônicos no sistema e requer dispositivos de controle complexos. Na pesquisa (Singh) propõe um CEC utilizando uma ponte retificadora não controlada, um circuito gerador que alimenta uma resistência de descarga na qual absorve a potência não aproveitada pelo consumidor. Embora este sistema conte com algumas vantagens, como necessidade de utilizar poucos dispositivos de comutação, a estratégia de controle é complicada e injeta harmônicos sob várias condições de operação, de modo que a tensão não seja de boa qualidade. Além disso, o autor não menciona se a CEC pode operar em condições desequilibradas.

### 7.3 PROCESSO DE AUTO-EXCITAÇÃO COM COMPENSADOR CONECTADO AO GERADOR

#### 7.3.1 Introdução

O sistema de controle de reativo para controle da tensão em um gerador de indução auto-excitado, foi implementado em bancada na UTFPR, utilizando equipamentos e infraestrutura da Universidade. Para os ensaios realizados nesta seção temos todo o sistema interligado, ou seja, o inversor de frequência alimentando a MP, a qual tem acoplada ao seu eixo um gerador de indução trifásico, um banco de capacitores conectados em paralelo, um banco de indutores acionados por uma placa de controle que controla o ângulo de disparo dos tiristores para consumir o reativo excedente, fornecido pelo banco de capacitores. Nas próximas seções serão apresentados os procedimentos e resultados obtidos nos ensaios para o controle da tensão do GIAE.

### 7.3.2 Objetivo

Determinar os parâmetros de tensão, corrente no gerador e corrente no indutor de acordo com a variação do ângulo de disparo dos tiristores.

### 7.3.3 Materiais

- Dois motores de indução trifásico de 1 cv acoplados por mancal;
- um inversor de frequência do fabricante WEG e modelo CFW-11;
- dois multímetros digitais;
- um capacitor trifásico de 27,5  $\mu\text{F}$ , 1,5 kVAr a 220 V / 60 Hz;
- três indutores de bancada de 200 mH;
- três tiristores do fabricante SEMIKRON e modelo SKKT 27/16 E;
- Placa de controle - módulo RT380T;
- Fonte de tensão cc variável de bancada.

### 7.3.4 Procedimento

Realizaram-se dois ensaios, um para a rotação fixa de 1779 rpm e a outra fixa em 1850 rpm e demonstrados em três análises diferentes – verificação da tensão, corrente no gerador e corrente no indutor.

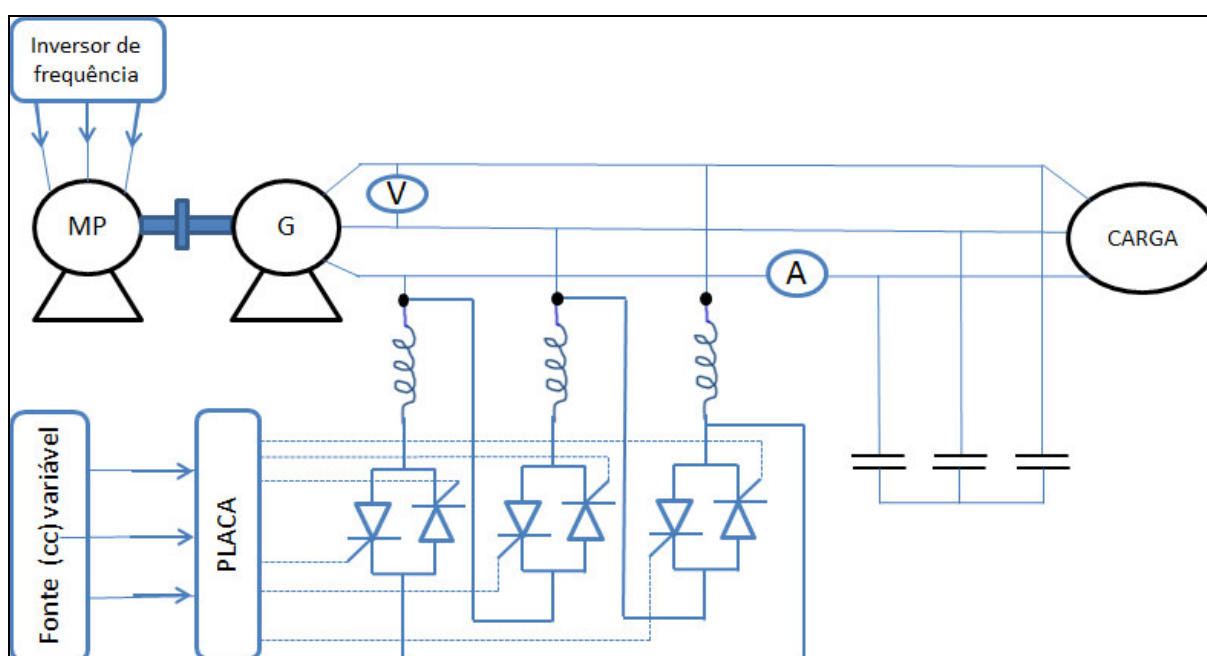
Utilizaram-se os mesmos procedimentos da auto-excitação dos ensaio anteriores, no entanto, utilizando o capacitor trifásico de 27,5  $\mu\text{F}$  por fase: aplicou-se tensão nominal de 220 V na máquina primária, fornecida pelo inversor de frequência, variando sua rotação até que o gerador comece a fornecer tensão acima de 220 V. Posteriormente, reduziu-se a velocidade, mas não muito, o suficiente para fornecer tensões acima da nominal, mas com correntes dentro dos limites do gerador. Após, liga-se a placa de controle (até porque ela é alimentada



pela tensão gerada nos terminais do gerador) e então varia-se o ângulo de disparo dos tiristores a partir da variação da tensão cc (proveniente de uma fonte cc variável) aplicada à placa de controle.

Posteriormente, iniciou-se o levantamento de dados, agora não mais variando a velocidade da MP pelo inversor de frequência, mas variando o ângulo de disparo dos tiristores para aumentar o consumo de reativo pelo banco de indutores, sendo um indutor de 200 mH por fase conectados com os tiristores em ligação triângulo.

Segue na Figura 70 o esquema de ligação do circuito dos ensaios realizados.



**Figura 70 - Esquema do circuito - ensaio de auto-excitação com compensador conectado**

Fonte: Os autores, 2014.

### 7.3.5 Resultados

Pode-se observar que conforme eleva-se o ângulo de disparo da placa de controle conectada aos tiristores, o banco de indutor consome mais o reativo do gerador, conseqüentemente diminuindo a tensão e

corrente no gerador e aumentando proporcionalmente a corrente nos indutores.

No mesmo ensaio elevou-se a rotação de 1779 para 1850 rpm, para verificar se ocorreria alguma variação. No entanto, observou-se uma linearidade nas curvas e uma semelhança com as curvas levantadas nas seções anteriores, onde tínhamos a variação das cargas e da rotação sem a utilização do compensador. Podendo ser feita a analogia do compensador a carga conectada ao gerador. Pois quanto maior a carga conectada, menor a tensão e corrente no gerador, o mesmo ocorre na compensação com os indutores, quanto maior o ângulo de disparo, maior o consumo pelos indutores e menor a tensão e corrente no gerador.

As Figuras 71, 72 e 73 cujos dados são apresentados nas Tabelas 22 e 23 do APÊNDICE A, onde se tem a tensão no gerador, a corrente no gerador e a corrente no indutor conseqüentemente,

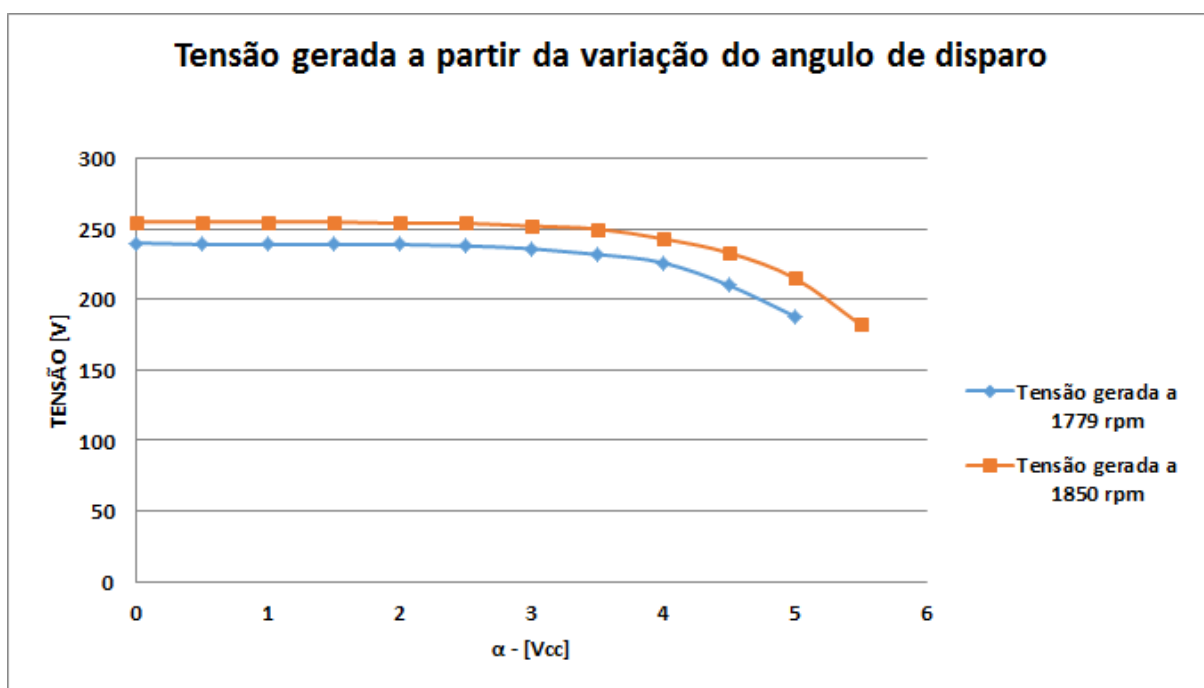
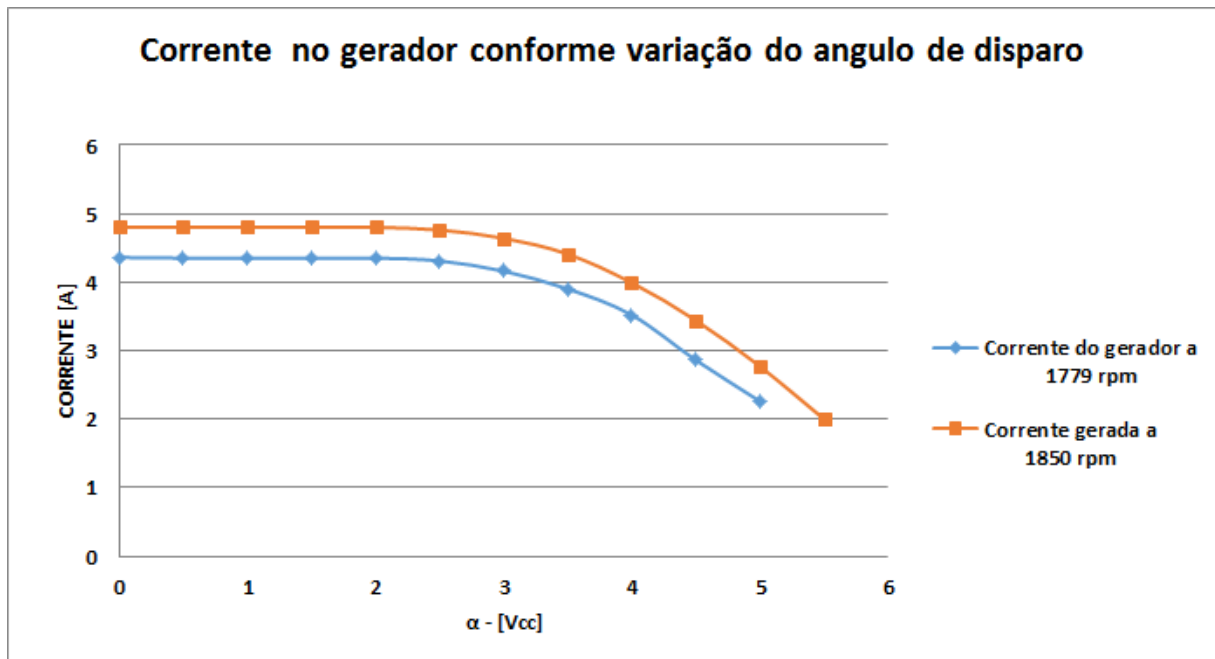
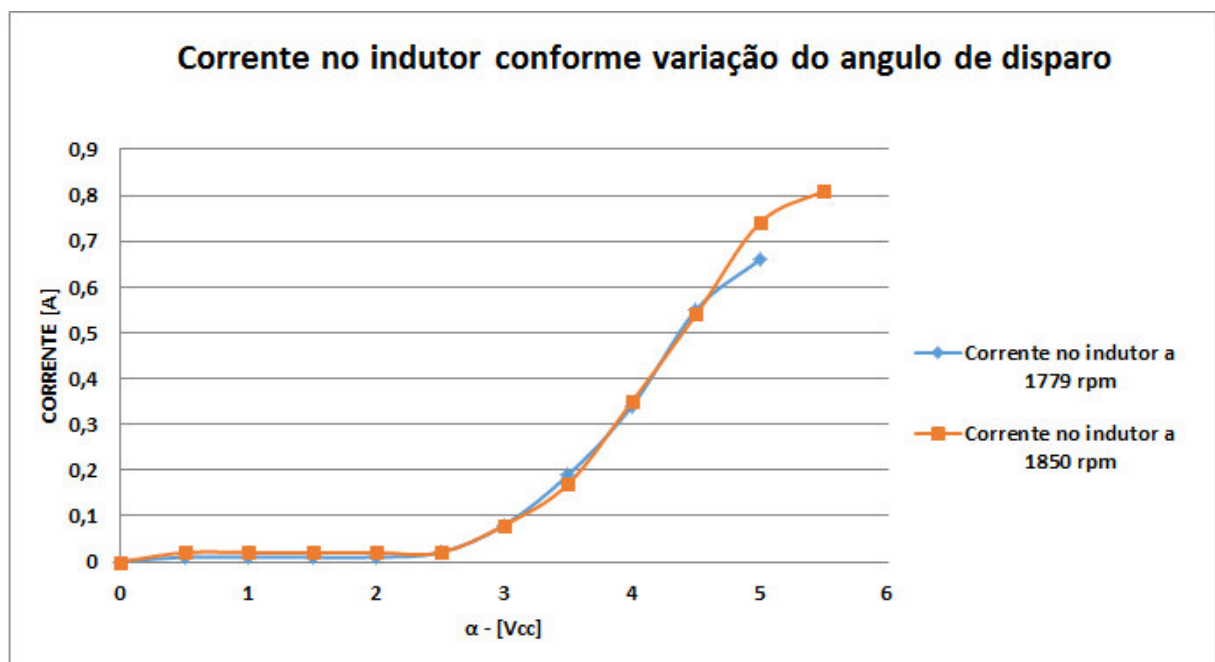


Figura 71 - Tensão gerada a partir da variação do ângulo de disparo  
Fonte: Os autores, 2014.



**Figura 72 - Corrente no gerador conforme variação do ângulo de disparo**  
 Fonte: Os autores, 2014.



**Figura 73 - Corrente no indutor conforme variação do ângulo de disparo**  
 Fonte: Os autores, 2014.

## 7.4 RESPOSTA DO COMPENSADOR SOB CONDIÇÕES DE CARGA

### 7.4.1 Introdução

Para verificar as características e o comportamento do gerador de indução (GI) após a interligação com o sistema de compensação de reativo, é necessário analisar o seu funcionamento variando as cargas conectadas ao gerador.

### 7.4.2 Objetivo

Determinar o comportamento do GI considerando a variação da carga conectada nos terminais de saída, virando também a compensação de reativos controlando o ângulo de disparo dos tiristores.

### 7.4.3 Materiais

- Dois motores de indução trifásico de 1 cv acoplados por mancal;
- um inversor de frequência do fabricante WEG e modelo CFW-11;
- dois multímetros digitais;
- um capacitor trifásico de 27,5  $\mu$ F, 1,5 kVAr a 220 V / 60 Hz;
- três indutores de bancada de 200 mH;
- três tiristores do fabricante SEMIKRON e modelo SKKT 27/16 E;
- Placa de controle - módulo RT380T;
- Fonte de tensão cc variável de bancada.
- um conjunto de três lâmpadas incandescentes de 40 W / 220 V;
- um conjunto de três lâmpadas incandescente de 60 W / 220 V.
- e um motor trifásico de 0,33 cv.

#### 7.4.4 Procedimento

Realizaram-se três ensaios, o primeiro sem utilizar a compensação de reativo variando a carga conectada ao gerador, ou seja, deixando em zero volt na placa de controle que controla o ângulo de disparo dos tiristores. O segundo, mantendo a tensão fixa de 220 V na saída do gerador variando a carga e o banco de indutores utilizando a compensação de reativo. No terceiro ensaio manteve-se a carga fixa e variou-se o ângulo de disparo para analisar os parâmetros de tensão, frequência e corrente. Segue os detalhes dos ensaios realizados:

- **Primeiro ensaio** – realizou-se o ensaio sem variar o ângulo de disparo dos tiristores para verificar a queda de tensão ao conectar cargas resistivas e indutivas nos terminais do gerador. Mantendo-se a rotação fixa, utilizando um capacitor trifásico de 27,5  $\mu\text{F}$  para fornecimento de reativo e executar a auto-excitação do gerador. Repetiu-se o procedimento de auto-excitação das seções anteriores, após a estabilização do gerador, aplica-se uma rotação no gerador de 1782 rpm e tensão inicial de 240 V. Em seguida, foram conectadas as cargas, uma de cada vez, e assim verificou-se a queda da tensão gerada por cada carga instalada. Para a realização deste ensaio utilizou-se a seguinte configuração de cargas:

- **Configuração C1** – carga resistiva formada por três lâmpadas incandescente de 40 W e 220 V ligadas em estrela;
- **Configuração C2** – carga resistiva formada por três lâmpadas incandescente de 60 W e 220 V ligadas em estrela;
- **Configuração C3** - carga indutiva (motor de indução trifásico de 0,33 cv) ligada em estrela;
- **Configuração C4** - carga indutiva (motor de indução trifásico de 0,33 cv) ligada em estrela e em paralelo com a carga C1;
- **Configuração C5** - carga resistiva C1 ligada em série com a carga resistiva C2;
- **Configuração C6** - carga indutiva (motor de indução trifásico de 0,33 cv) ligada em estrela e em paralelo com a carga C2;

- **Configuração C7** - carga indutiva (motor de indução trifásico de 0,33 cv) ligada em estrela e em paralelo com as carga C1 e C2 ligadas em série.

- **Segundo ensaio** – realizaram-se dois ensaios mantendo a tensão fixa. Sendo que no primeiro deles, variou-se as cargas e controlou-se o ângulo de disparo dos tiristores conectados ao banco de indutores de 200 mH por fase, para manter a tensão fornecida pelo gerador em 220 V sem alterar a rotação. No segundo levantamento utilizou-se a carga indutiva na configuração C1 (carga indutiva), variou-se a indutância variando o banco de indutores nos seguintes valores: 100, 200, 300 e 400 mH. Para manter a tensão fixa em 220 V na saída do gerador, foi necessário variar o ângulo de disparo dos tiristores para banco de indutor conectado.

Para os dois levantamentos citados, inicialmente repetiu-se novamente a etapa de auto-excitação das seções anteriores, após a estabilização do gerador, aplica-se uma rotação no gerador de 1850 rpm e tensão inicial de 240 V. Para o primeiro levantamento, foram conectadas as cargas, uma de cada vez, então regulou-se o ângulo de disparo dos tiristores para se obter uma tensão de 220 V na saída do gerador e anotou-se os parâmetros obtidos. Para o segundo levantamento, foram são regulados os ângulos de disparo dos tiristores para se obter uma tensão de 220 V no gerador, e anotou-se os valores dos parâmetros para cada banco de indutores.

Segue abaixo configurações das cargas utilizadas nestes ensaios:

- **Configuração C1** – carga indutiva (motor de indução trifásico de 0,33 cv) ligada em estrela;
- **Configuração C2** – carga indutiva (motor de indução trifásico de 0,33 cv) ligada em estrela e em paralelo com a carga C5;
- **Configuração C3** – carga indutiva (motor de indução trifásico de 0,33 cv) ligada em estrela e em paralelo com as carga C5 e C6 ligadas em série;

- **Configuração C4** – carga resistiva C5 ligada em série com a carga resistiva C6;
- **Configuração C5** – carga resistiva formada por três lâmpadas incandescente de 40 W e 220 V ligadas em estrela;
- **Configuração C6** – carga resistiva formada por três lâmpadas incandescente de 60 W e 220 V ligadas em estrela;
- **Configuração C7** – carga indutiva (motor de indução trifásico de 0,33 cv) ligada em estrela e em paralelo com a carga C6.

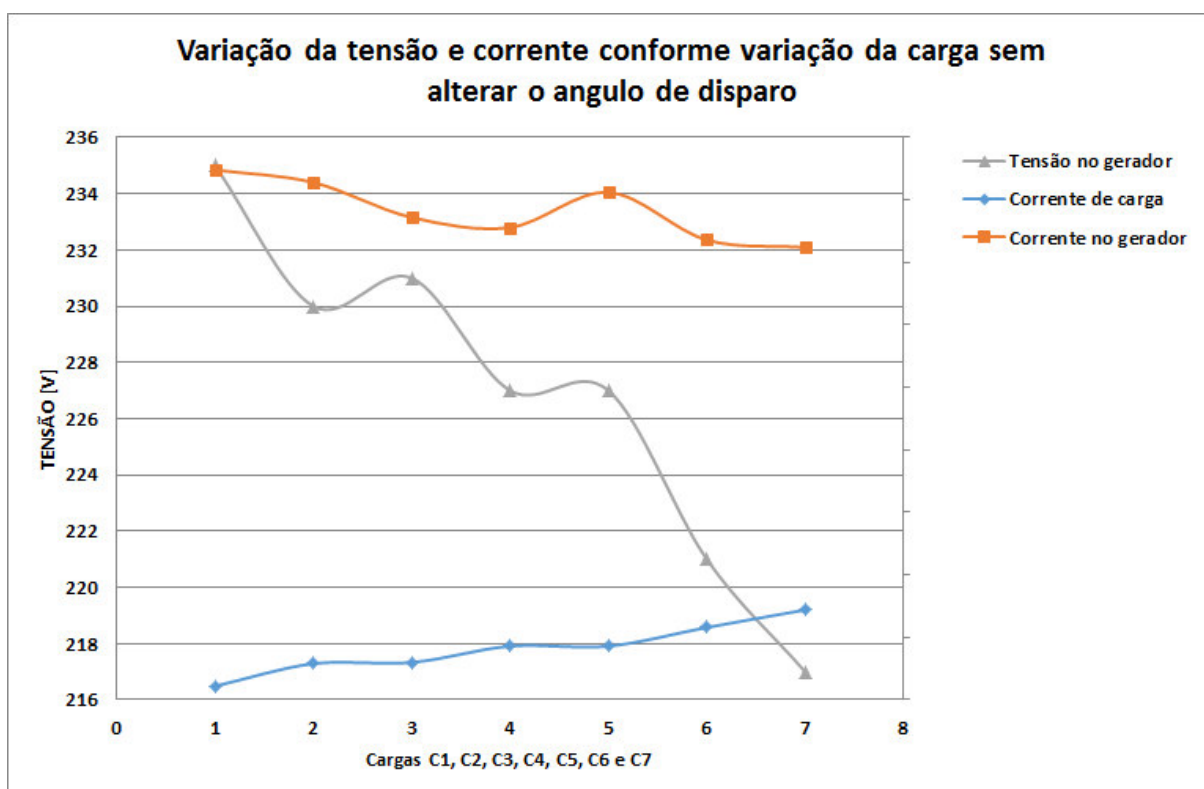
- **Terceiro ensaio** – realizou-se os procedimentos da auto-excitação, e após a estabilização do gerador, aplicou-se uma rotação no gerador de 1850 rpm e tensão inicial de 250 V. E com a carga indutiva de 0,33 cv conectada ao gerador, capacitância de 27,5  $\mu\text{F}$  e indutância de 200 mH para cada fase, fornecida pelo banco de indutores, varia-se o ângulo de disparo dos tiristores de zero até 5,5 Vcc, onde cessa o fornecimento de energia.

O esquema do circuito de montagem é o mesmo da Figura 70 da seção 7.3.

#### 7.4.5 Resultados

Para o primeiro ensaio realizado, desta seção, temos os resultados obtidos na Figura 74 cujos dados são apresentados na Tabela 24 do APÊNDICE A. Pode-se observar que quanto maior a potência da carga conectada nos terminais do gerador e maior a corrente na carga, menor a tensão e corrente do gerador. Isto ocorre porque a carga consome o reativo fornecido pelo capacitor, e como mantem-se a rotação do gerador fixa, a tensão diminui conforme mostrado na Figura 74, variando de 240 V, sem carga, a 217 V com

todas as cargas conectadas de acordo com a configuração C7 (motor de indução trifásico de 0,33 cv ligada em estrela e em paralelo com as cargas C1 (lâmpadas de 40 W) e C2 (lâmpadas de 60 W) ligadas em série).



**Figura 74 - Variação da tensão e corrente conforme variação da carga sem alterar o ângulo de disparo**  
 Fonte: Os autores, 2014.

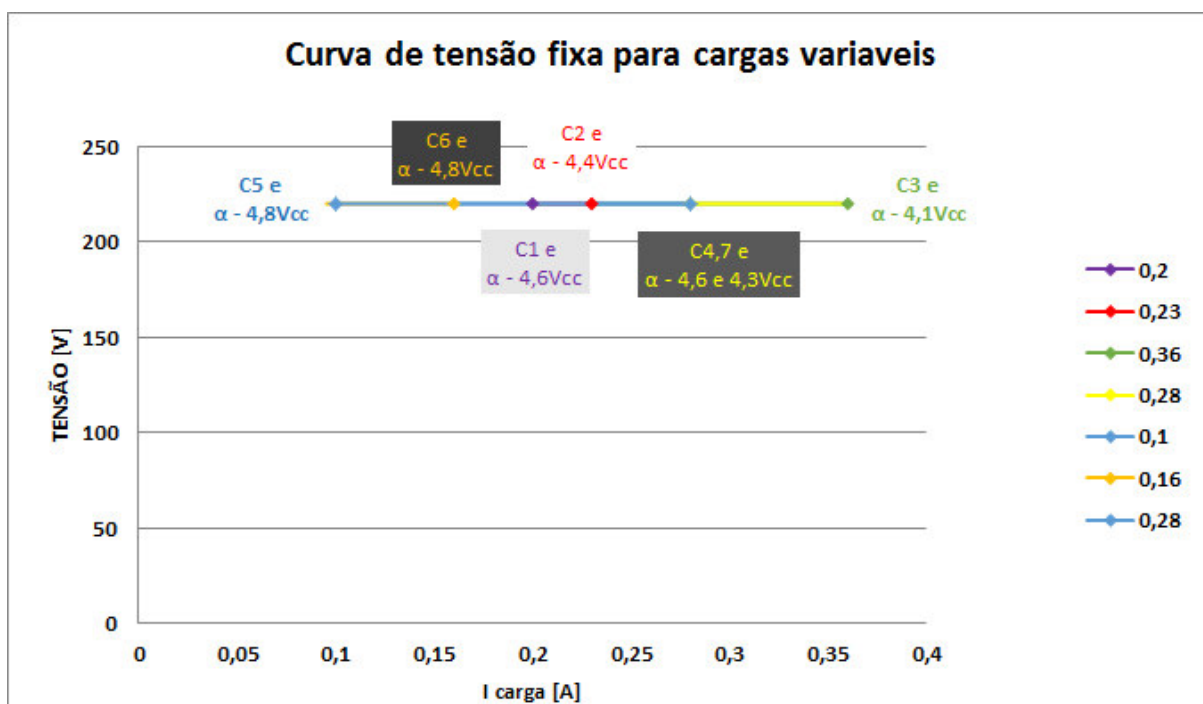
Para o segundo ensaio realizado, citado nesta seção, temos os resultados obtidos apresentados nas Figuras 75 e 76, cujos dados estão apresentados nas Tabelas 25 e 26 do APÊNDICE A, respectivamente.

Analisando a Figura 75, pode-se verificar que quanto menor a carga utilizada menor sua corrente, conseqüentemente, e maior o ângulo de disparo, e ao contrário, quanto maior a carga maior sua corrente, sendo menor o ângulo de disparo. Isto ocorre porque quanto maior o ângulo de disparo o banco de indutor consome mais reativo,

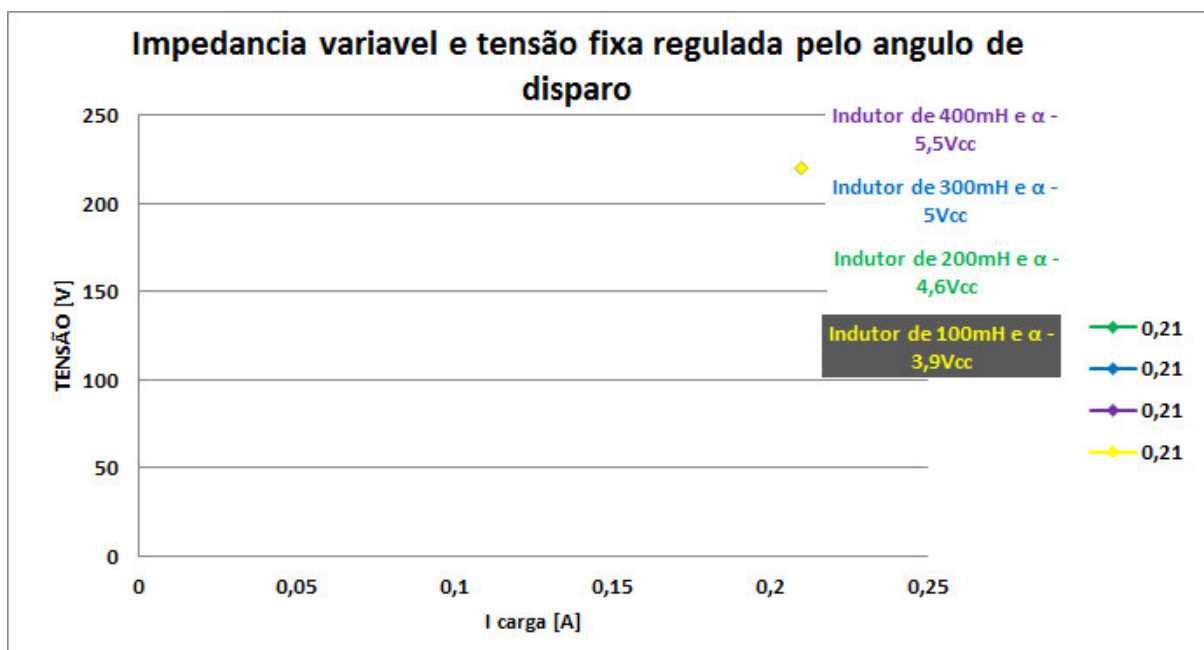


compensando assim a menor carga (configuração C5). Já para uma carga de maior potência como é o caso da configuração C3, onde temos o motor ligado em estrela com as lâmpadas de 40 W e 60 W ligadas em série, é necessário um ângulo de disparo menor para consumir menos reativo.

Observando a Figura 76, pode-se verificar apenas um ponto para as quatro variações de indutância (100, 200, 300 e 400 mH). Isto porque a carga não variou, mantendo a corrente em 0,21 A, a tensão manteve-se fixa em 220 V porque foi compensada pelo ângulo de disparo da placa de controle que regula o disparo dos tiristores, que por sua vez consomem mais ou menos reativo do sistema.



**Figura 75 - Curva de tensão fixa para cargas variáveis**  
 Fonte: Os autores, 2014.



**Figura 76 - Impedância Variável e tensão fixa regulada pelo ângulo de disparo.**  
 Fonte: Os autores, 2014.

Para o terceiro ensaio realizado, citado nesta seção, temos os resultados obtidos apresentados nas Figuras 77, 78 e 79, cujos dados apresentam-se na Tabela 27 do APÊNDICE A.

Analisando a Figura 77, pode-se observar a caimento gradativo da curva, ângulo de disparo x tensão, iniciando-se em 250 V para um ângulo de disparo igual a zero e ao final uma tensão de 163 V, para um ângulo de disparo 5,5 Vcc aplicado na placa de controle, apresentando uma corrente no banco de indutor de 0,77 A. Este comportamento é considerado normal, pois conforme se aumenta o ângulo de disparo maior o consumo de reativo do gerador, em consequência, análogo aos ensaios com carga, a tensão diminui de acordo com o aumento da indutância e ou carga conectada.

Na Figura 78, pode-se observar uma pequena oscilação na frequência variando de 59,7 Hz, para um ângulo de disparo de zero volt, a 60,61 Hz para um ângulo de disparo de 5,5 Vcc. Conforme aumenta o ângulo de disparo a rotação aumenta um pouco, em torno de 1 Hz, valor este insignificante, já que para a tensão de 220 V a frequência fica em torno de 60 Hz.

Neste mesmo ensaio foram verificadas as correntes no gerador, na carga e no indutor, como mostra a Figura 79 podemos verificar que conforme aumentamos o ângulo de disparo dos tiristores, a corrente no indutor aumenta, diminuindo assim a corrente do gerador de maneira simétrica, isto porque a corrente disponível gerada nos terminais do gerador é consumida pelo banco de indutor à medida que aumentamos o ângulo de disparo até cessar a geração de energia que ocorre em 163 V e um ângulo de disparo de 5,5 Vcc. Podemos verificar ainda que a corrente na carga se mantém constante, chegando à zero somente ao final do ensaio, quando se perde a auto-excitação do gerador e conseqüentemente seu fornecimento de energia.

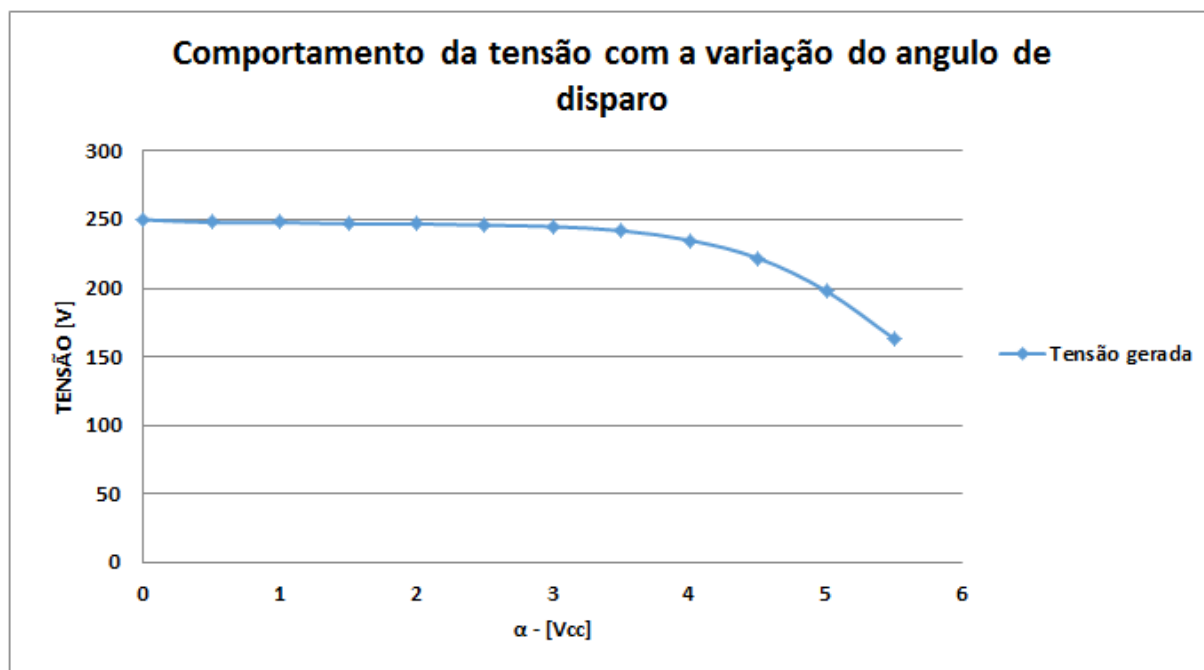


Figura 77 - Tensão gerada variando o ângulo de disparo  
Fonte: Os autores, 2014.

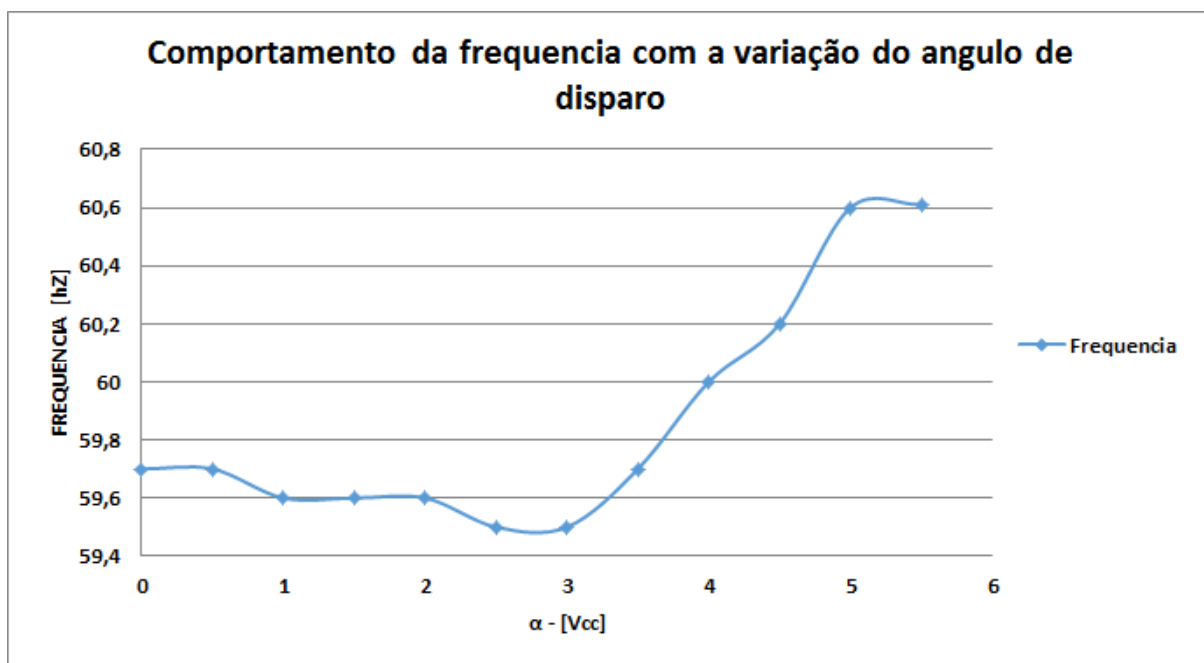


Figura 78 - Frequência gerada variando o ângulo de disparo  
Fonte: Os autores, 2014.

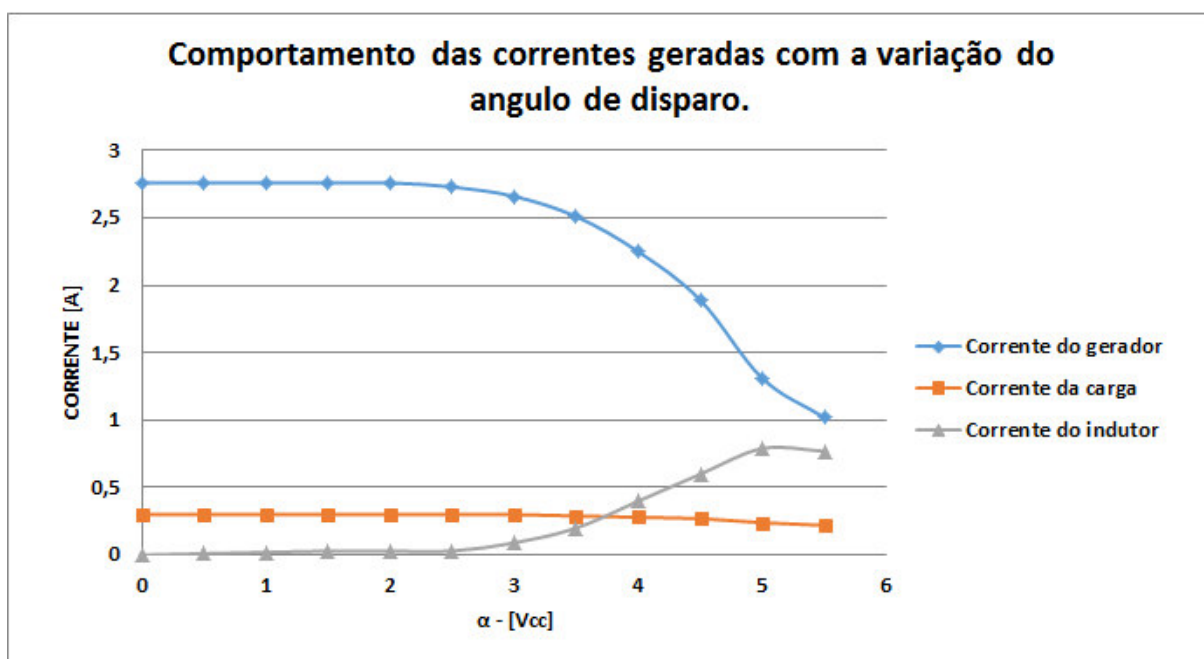


Figura 79 - Comportamento das correntes geradas com a variação do ângulo de disparo.  
Fonte: Os autores, 2014.

Os testes comprovam que o sistema é eficaz e se comporta adequadamente para um possível controle de tensão em uma micro geração de energia mesmo quando se tenha variação de carga e ou variação na rotação no eixo da máquina primária.

## 8 CONCLUSÃO

Este trabalho procurou analisar e estudar uma alternativa eficiente e de baixo custo para o controle da tensão em geradores de indução auto-excitado, visando uma possível utilização em micro geração de energia elétrica isolada. A alternativa foi desenvolvida através do estudo da máquina de indução como gerador, utilizando-se banco de capacitores e indutores chaveados.

A escolha da máquina de indução trifásica com rotor gaiola de esquilo para atuar como gerador tem como motivação o fato de ser uma das máquinas mais robustas e mais amplamente usada na indústria, são de fácil manutenção, baixo custo entre outras vantagens. Mas para ser utilizada como gerador é necessário o fornecimento de energia reativa para criar campo magnético do estator, o qual foi realizado a partir de um banco de capacitores. No entanto, a grande dificuldade da geração de energia através da máquina de indução é sua regulação de tensão, pois, qualquer variação de velocidade ou aumento e/ou diminuição da carga conectada, temos uma variação da tensão na saída do gerador.

Na tentativa de regular a tensão gerada na saída do gerador, foi implementado um compensador de reativos controlado por uma ponte de tiristores, que por sua vez foi controlada por uma placa eletrônica de controle, consome mais ou menos reativo, este fornecido pelo banco de capacitores, e assim regular a tensão conforme a variação tanto da carga como da velocidade do gerador.

A falta de registros bibliográficos dificultou bastante à compreensão do funcionamento da máquina de indução operando como gerador. Observando os trabalhos já realizados notou-se que a grande maioria somente elaboram ensaios e testes por meio de softwares específicos. No entanto, no presente trabalho foi implementado, empiricamente um sistema de compensação de reativos.

Analisando os resultados obtidos nos ensaios, chegamos à conclusão de que o controle da tensão gerada por meio da

compensação de reativos representa uma alternativa eficaz para a micro geração de energia elétrica.

O presente trabalho atingiu todos os objetivos propostos, desta forma, acreditamos ter contribuído bastante para a realização de trabalhos futuros, pois, no presente trabalho constam todos os procedimentos adotados bem como as dificuldades encontradas durante as práticas, inclusive apresentação de todos os resultados obtidos tanto na forma de gráficos como em tabelas, podendo ser continuado e ampliado facilmente.

## **9 TRABALHOS FUTUROS**

Existem várias vertentes de continuação deste trabalho, uma delas está sendo realizada na UTFPR, visando o controle automático do ângulo de disparo dos tiristores a partir do controle com retroalimentação.

Outra opção seria aplicar a uma bancada de gerador de indução com placa de controle da SEMIKRON. E outra sugestão seria utilizar compensador série com compensador shunt.

## REFERÊNCIAS

BASSET, D. E., Potter, M. F. **Capacitive excitation for induction generators**. AIEE Transactions, 1935.

BOYLESTAD, Robert L.. **Introdução à análise de circuitos**, 10. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2004.

DEL TORO, Vicent; tradução Onofre de Andrade Martins. **Fundamentos de máquinas elétricas**. Rio de Janeiro, RJ: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2011.

FADIGAS, Eliane A. Amaral. **Energia Eólica**. 1. ed. Barueri, SP: Manole, 2011.

FITZGERALD, A. E.; Charles Kingsley Jr.; Stephen D. Umans; tradução Anatólio Laschuk. **Máquinas elétricas** – Com introdução à eletrônica de potência. 6. ed. Porto Alegre, RS: Bookman, 2006.

MONTALVO, Emanuel Torres. **Control de Voltaje del Generador de Inducción Auto-Excitado para Aplicaciones de micro/mini Generación de Energía Eléctrica**. 2006. 103 f. Tese (Mestre em Engenharia Elétrica) – CINVESTAV – Centro de Pesquisas e Estudos Avançados do Instituto Politécnico Nacional. Guadalajara, México.

SANTOS, Kristian Pessoa dos; MONTE, Augusto César Sousa Braga. **Compensação de reativos em sistemas elétricos de potência**. 2009. 44 f. Monografia (Graduado em Engenharia Elétrica - Eletrotécnica) – Universidade Estadual do Piauí. Teresina.

SIMÕES, M. G., Farret, F. A.. **Alternative Energy Systems: Design and Analysis with Induction Generators**, 2. ed. CRC Press, 2007.

SINGH, B., Murthy, S. S., Gupta, S.. **Analysis and Design of Electronic Load controller for Self-Excited Induction Generators**, IEEE Transactions energy conversion, vol. 21, no. 1, 2006.

WAGNER, C. F. Self-Excitation of Induction Motors. AIEE Transactions, Vol 58, pp. 47-51, 1939.



## APÊNDICE A – Resultados obtidos nos ensaios realizados

Tabela 8 - Curva de magnetização do gerador de indução trifásico

1500 rpm / 50 Hz / 380 V		1800 rpm / 60 Hz / 380 V	
TENSÃO [V]	CORRENTE [A]	TENSÃO [V]	CORRENTE [A]
10,1	0,1	20,2	0,12
20,4	0,26	31,5	0,16
29,8	0,42	40	0,2
40,2	0,57	50,7	0,24
50,1	0,74	60,6	0,26
60	0,86	70,7	0,3
70,4	1,04	80,8	0,34
80	1,16	90,3	0,38
90	1,34	100,8	0,42
99,9	1,49	110,4	0,46
110	1,63	120,5	0,49
120,1	1,77	130,9	0,52
130	1,9	140	0,56
139,9	2,04	151,1	0,59
150	2,14	160,7	0,62
160,3	2,26	170,5	0,66
170,3	2,39	180,3	0,7
180	2,52	191	0,74
190	2,63	200	0,79
200	2,73	211	0,81
210	2,85	220	0,85
220	2,98	230	0,9
-	-	240	0,91
-	-	250	0,96
-	-	260	0,99
-	-	270	1,04
-	-	280	1,09
-	-	290	1,13
-	-	300	1,17
-	-	310	1,22
-	-	320	1,29
-	-	330	1,3
-	-	340	1,33
-	-	350	1,41
-	-	360	1,46
-	-	370	1,54
-	-	380	1,61

Fonte: Os autores, 2014.

Tabela 9 - Curva de indutância de magnetização do gerador de indução trifásico

1500 rpm / 50 Hz / 380 V		1800 rpm / 60 Hz / 380 V	
Indutância de magnetização (Lm) / 50 Hz	Tensão a 50 Hz [V]	Indutância de magnetização (Lm) / 60 Hz	Tensão a 60 Hz [V]
0,322	10,1	0,447	20,2
0,250	20,4	0,522	31,5
0,226	29,8	0,531	40
0,224	40,2	0,560	50,7
0,216	50,1	0,618	60,6
0,222	60	0,625	70,7
0,215	70,4	0,630	80,8
0,220	80	0,630	90,3
0,214	90	0,637	100,8
0,213	99,9	0,637	110,4
0,215	110	0,652	120,5
0,216	120,1	0,668	130,9
0,218	130	0,663	140
0,218	139,9	0,679	151,1
0,223	150	0,688	160,7
0,226	160,3	0,685	170,5
0,227	170,3	0,683	180,3
0,227	180	0,685	191
0,230	190	0,672	200
0,233	200	0,691	211
0,235	210	0,687	220
0,235	220	0,678	230
-	-	0,700	240
-	-	0,691	250
-	-	0,697	260
-	-	0,689	270
-	-	0,681	280
-	-	0,681	290
-	-	0,680	300
-	-	0,674	310
-	-	0,658	320
-	-	0,673	330
-	-	0,678	340
-	-	0,658	350
-	-	0,654	360
-	-	0,637	370
-	-	0,626	380

Fonte: Os autores, 2014.

Tabela 10 - Curva a vazio para  $X_c = 11,65 \mu\text{F}$ 

TENSÃO [V]	CORRENTE [A]	ROTAÇÃO [RPM]
220	1,98	2220
210	1,88	2199
200	1,78	2182
190	1,68	2167
180	1,58	2154
170	1,48	2144
160	1,4	2136
150	1,3	2129
140	1,22	2125

Fonte: Os autores, 2014.

Tabela 11 - Curva a vazio para  $X_c = 17,5 \mu\text{F}$ 

TENSÃO [V]	CORRENTE [A]	ROTAÇÃO [RPM]
282	3,47	2150
270	3,26	2104
260	3,05	2058
250	2,88	2022
240	2,72	1986
231	2,56	1952
220	2,4	1917
210	2,24	1884
200	2,1	1856
190	1,96	1831
180	1,83	1809
170	1,7	1789
159	1,57	1772
150	1,46	1758
140	1,37	1749
130	1,25	1739
123	1,18	1735
100	0,98	1729

Fonte: Os autores, 2014.

Tabela 12 - Curva a vazio para  $X_c = 18 \mu\text{F}$ 

TENSÃO [V]	CORRENTE [A]	ROTAÇÃO [RPM]
240	2,6	1968
230	2,4	1929
220	2,2	1895
210	2	1863
200	1,9	1833
190,1	1,7	1802
180,3	1,6	1779
170,4	1,4	1759
160,5	1,3	1741
150,5	1,2	1726
140,7	1	1714
130	0,9	1704
120,6	0,8	1698
110,9	0,7	1694

Fonte: Os autores, 2014.

Tabela 13 - Curva a vazio para  $X_c = 105 \mu\text{F}$ 

TENSÃO [V]	CORRENTE [A]	ROTAÇÃO [RPM]
279	5,4	1907
270	5,1	1865
260	4,7	1818
250	4,4	1769
240	4,1	1724
230	3,7	1677
220	3,5	1635
210	3,2	1589
200	2,9	1545
190	2,6	1502
180	2,3	1460
170	2,1	1421
160	1,8	1384
150	1,6	1350
140	1,4	1320
130	1,2	1295
120	1	1273
110	0,8	1256
100	0,7	1243
90	0,5	1232
79	0,4	1226

Fonte: Os autores, 2014.

Tabela 14 - Ensaio com carga resistiva-indutiva e resistiva

ENSAIO COM CARGA R-L			ENSAIO COM CARGA R		
TENSÃO [V]	CORRENTE [A]	ROTAÇÃO [RPM]	TENSÃO [V]	CORRENTE [A]	ROTAÇÃO [RPM]
240	3,02	2052	240	3,09	1986
230	2,83	2017	230	2,91	1949
220	2,67	1987	220	2,72	1913
210	2,5	1959	210	2,56	1881
200	2,35	1934	200	2,39	1850
190,5	2,19	1910	190	2,21	1820
180,2	2,04	1891	180,2	2,07	1797
170,5	1,92	1877	170,3	1,93	1777
160,2	1,78	1865	160,3	1,79	1760
150,6	1,67	1857	150	1,66	1745
141,3	1,56	1852	140	1,54	1734
-	-	-	130	1,42	1725
-	-	-	120	1,31	1720
-	-	-	112	1,22	1717

Fonte: Os autores, 2014.

Tabela 15 - Ensaio sem carga

TENSÃO [V]	CORRENTE [A]	ROTAÇÃO [RPM]
240	2,6	1968
230	2,4	1929
220	2,2	1895
210	2	1863
200	1,9	1833
190,1	1,7	1802
180,3	1,6	1779
170,4	1,4	1759
160,5	1,3	1741
150,5	1,2	1726
140,7	1	1714
130	0,9	1704
120,6	0,8	1698
110,9	0,7	1694

Fonte: Os autores, 2014.

Tabela 16 – Ensaio com carga R1 para diferentes Xc

C1 - R1			C2 - R1			C3 - R1		
TENSÃO [V]	CORRENTE [A]	ROTAÇÃO [RPM]	TENSÃO [V]	CORRENTE [A]	ROTAÇÃO [RPM]	TENSÃO [V]	CORRENTE [A]	ROTAÇÃO [RPM]
230	3,99	1756	230	2,87	1961	230	3,46	1828
220	3,72	1715	220	2,68	1923	220	3,23	1786
210	3,45	1673	210	2,47	1890	210	3,02	1747
200	3,19	1632	200	2,3	1858	200	2,81	1709
190	2,94	1591	190	2,15	1829	190	2,6	1673
180	2,71	1554	180	2,01	1805	180	2,41	1640
170	2,48	1519	170	1,86	1784	170	2,24	1611
160	2,29	1489	160	1,74	1766	160	2,08	1585
150	2,1	1462	150	1,61	1752	150	1,93	1564
140	1,92	1438	140	1,48	1740	140	1,78	1545
130	1,75	1419	130	1,37	1731	130	1,63	1531
120	1,6	1404	120	1,25	1725	120	1,49	1520
110	1,45	1393	108	1,12	1722	110	1,36	1512
100	1,28	1385	-	-	-	100	1,24	1508
87	1,12	1380	-	-	-	-	-	-

Fonte: Os autores, 2014.

Tabela 17 - Ensaio com carga R2 para diferentes Xc

C1 - R2			C2 - R2			C3 - R2		
TENSÃO [V]	CORRENTE [A]	ROTAÇÃO [RPM]	TENSÃO [V]	CORRENTE [A]	ROTAÇÃO [RPM]	TENSÃO [V]	CORRENTE [A]	ROTAÇÃO [RPM]
240	4,27	1794	230	2,86	1949	230	3,47	1812
230	3,98	1750	220	2,68	1912	220	3,26	1772
220	3,71	1708	210	2,5	1878	210	2,98	1733
210	3,44	1665	200	2,33	1846	200	2,78	1696
200	3,18	1625	190	2,18	1819	190	2,58	1662
190	2,93	1584	180	2,03	1795	180	2,4	1630
180	2,7	1547	170	1,88	1773	170	2,22	1601
170	2,48	1512	160	1,74	1755	160	2,07	1577
160	2,28	1480	150	1,62	1741	150	1,91	1556
150	2,08	1452	140	1,5	1729	140	1,76	1538
140	1,9	1429	130	1,4	1720	130	1,62	1525
130	1,73	1409	120	1,28	1714	120	1,49	1515
120	1,58	1394	108	1,13	1710	110	1,36	1507
110	1,42	1382	-	-	-	100	1,23	1503
100	1,29	1374	-	-	-	-	-	-

Fonte: Os autores, 2014.

Tabela 18 - Ensaio com carga R3 para diferentes Xc

C1 - R3			C2 - R3			C3 - R3		
TENSÃO [V]	CORRENTE [A]	ROTAÇÃO [RPM]	TENSÃO [V]	CORRENTE [A]	ROTAÇÃO [RPM]	TENSÃO [V]	CORRENTE [A]	ROTAÇÃO [RPM]
240	4,27	1795	230	2,91	1947	230	3,41	1815
230	3,98	1751	220	2,74	1912	220	3,18	1775
220	3,72	1710	210	2,56	1879	210	2,97	1735
210	3,44	1667	200	2,41	1849	200	2,77	1698
200	3,19	1626	190	2,25	1823	190	2,58	1664
190	2,94	1586	180	2,07	1799	180	2,4	1633
180	2,71	1549	170	1,93	1780	170	2,23	1605
170	2,48	1513	160	1,8	1763	160	2,07	1580
160	2,28	1482	150	1,68	1749	150	1,92	1559
150	2,08	1454	140	1,55	1738	140	1,79	1543
140	1,91	1431	130	1,45	1731	130	1,66	1529
130	1,74	1411	120	1,32	1725	120	1,53	1518
120	1,57	1395	-	-	-	110	1,39	1511
110	1,43	1384	-	-	-	104	1,31	1508
100	1,28	1385	-	-	-	-	-	-
90	1,15	1371	-	-	-	-	-	-

Fonte: Os autores, 2014.

Tabela 19 - Ensaio com carga RL 1 para diferentes Xc

C1 - RL 1			C2 - RL 1			C3 - RL 1		
TENSÃO [V]	CORRENTE [A]	ROTAÇÃO [RPM]	TENSÃO [V]	CORRENTE [A]	ROTAÇÃO [RPM]	TENSÃO [V]	CORRENTE [A]	ROTAÇÃO [RPM]
230	3,79	1796	230	2,68	2030	240	3,49	1890
220	3,54	1755	220	2,51	1995	230	3,26	1850
210	3,27	1715	210	2,34	1965	220	3,04	1812
200	3,02	1677	200	2,2	1939	210	2,83	1775
190	2,8	1642	190	2,05	1916	200	2,64	1742
180	2,58	1608	180	1,92	1897	190	2,4	1711
170	2,37	1578	170	1,79	1881	180	2,28	1684
160	2,17	1551	160	1,67	1869	170	2,11	1660
150	2	1530	150	1,55	1860	160	1,96	1641
140	1,84	1512	140	1,45	1855	150	1,81	1625
130	1,68	1498	-	-	-	140	1,68	1612
120	1,54	1488	-	-	-	130	1,54	1603
110	1,4	1482	-	-	-	120	1,41	1597

Fonte: Os autores, 2014.

Tabela 20 - Ensaio com carga RL 2 para diferentes Xc

C1 - RL 2			C2 - RL 2			C3 - RL 2		
TENSÃO [V]	CORRENTE [A]	ROTAÇÃO [RPM]	TENSÃO [V]	CORRENTE [A]	ROTAÇÃO [RPM]	TENSÃO [V]	CORRENTE [A]	ROTAÇÃO [RPM]
240	4,04	1835	230	2,64	2016	240	3,56	1902
230	3,77	1792	220	2,48	1984	230	3,32	1862
220	3,49	1749	210	2,32	1954	220	3,09	1824
210	3,24	1709	200	2,17	1928	210	2,88	1787
200	3	1671	190	2,03	1905	200	2,69	1753
190	2,76	1633	180	1,89	1886	190	2,5	1723
180	2,54	1599	170	1,77	1870	180	2,32	1696
170	2,34	1569	160	1,64	1857	170	2,17	1674
160	2,15	1541	150	1,53	1848	160	2,01	1654
150	1,96	1520	140	1,41	1842	150	1,85	1638
140	1,81	1500	-	-	-	140	1,71	1626
130	1,66	1486	-	-	-	130	1,58	1618
120	1,51	1475	-	-	-	120	1,43	1612
110	1,38	1469	-	-	-	-	-	-

Fonte: Os autores, 2014.

Tabela 21 - Ensaio com carga RL 3 - para diferentes Xc

C1 - RL 3			C2 - RL 3			C3 - RL 3		
TENSÃO [V]	CORRENTE [A]	ROTAÇÃO [RPM]	TENSÃO [V]	CORRENTE [A]	ROTAÇÃO [RPM]	TENSÃO [V]	CORRENTE [A]	ROTAÇÃO [RPM]
240	4,02	1836	230	2,65	2020	240	3,51	1908
230	3,74	1795	220	2,48	1986	230	3,29	1868
220	3,47	1753	210	2,31	1956	220	3,06	1829
210	3,22	1712	200	2,16	1929	210	2,85	1792
200	3	1673	190	2,03	1908	200	2,65	1757
190	2,76	1636	180	1,89	1888	190	2,47	1726
180	2,55	1603	170	1,76	1872	180	2,3	1699
170	2,34	1571	160	1,65	1860	170	2,14	1676
160	2,15	1545	150	1,52	1851	160	1,98	1655
150	1,97	1522	140	1,41	1845	150	1,84	1640
140	1,8	1503	-	-	-	140	1,7	1628
130	1,65	1489	-	-	-	130	1,57	1619
120	1,5	1478	-	-	-	120	1,43	1613
110	1,38	1473	-	-	-	-	-	-

Fonte: Os autores, 2014.



Tabela 22 - Tensão e corrente no gerador e corrente no indutor para rotação fixa de 1779 rpm

$\alpha$ - [Vcc]	V gerador [v]	I gerador [A]	IH [A]
0	240	4,36	0
0,5	239	4,35	0,01
1	239	4,35	0,01
1,5	239	4,35	0,01
2	239	4,35	0,01
2,5	238	4,31	0,02
3	236	4,16	0,08
3,5	232	3,9	0,19
4	226	3,52	0,34
4,5	210	2,86	0,55
5	188	2,26	0,66

Fonte: Os autores, 2014.

Tabela 23 - Tensão e corrente no gerador e corrente no indutor para rotação fixa de 1850 rpm

$\alpha$ - [Vcc]	V gerador [v]	I gerador [A]	IH [A]
0	255	4,8	0
0,5	255	4,8	0,02
1	255	4,8	0,02
1,5	255	4,8	0,02
2	254	4,8	0,02
2,5	254	4,76	0,02
3	252	4,64	0,08
3,5	250	4,41	0,17
4	243	3,99	0,35
4,5	233	3,44	0,54
5	215	2,77	0,74
5,5	182	2	0,81

Fonte: Os autores, 2014.

Tabela 24 - Variação da tensão e corrente conforme variação de carga sem alterar o ângulo de disparo

CARGA	I carga [A]	I gerador [A]	V gerador [v]
C1 - R1 (40 W)	0,11	4,24	235
C2 - R2 (60 W)	0,29	4,14	230
C3 - L (motor)	0,3	3,86	231
C4 - L + R1 (40 W)	0,43	3,78	227
C5 - R1 + R2	0,43	4,06	227
C6 - L + R2	0,58	3,68	221
C7 - L + R1 + R2	0,72	3,62	217

Fonte: Os autores, 2014.

Tabela 25 - Curva de tensão fixa para cargas variáveis

CARGA	V gerador [v]	I carga [A]	$\alpha$ - [Vcc]	I gerador [A]
C1 L - MOTOR	220	0,2	4,6	1,84
C2 L + R1 (40 W)	220	0,23	4,4	1,9
C3 L + R1 + R2 (40W + 60 W)	220	0,36	4,1	2
C4 R1 + R2 (40W + 60 W)	220	0,28	4,6	1,93
C5 R1 ( 40 W)	220	0,1	4,8	1,82
C6 R2 (60 W)	220	0,16	4,8	1,85
C7 L +R2 (60 W)	220	0,28	4,3	1,92

Fonte: Os autores, 2014.

Tabela 26 - Impedância variável e tensão fixa regulada pelo ângulo de disparo

INDUTANCIA [H]	V gerador [v]	I carga [A]	$\alpha$ - [Vcc]	I gerador [A]
I1 200 mH	220	0,21	4,6	1,81
I2 300 mH	220	0,21	5	1,81
I3 400 mH	220	0,21	5,5	1,81
I4 100 mH	220	0,21	3,9	1,81

Fonte: Os autores, 2014.

Tabela 27 - Comportamento da tensão, frequência e correntes geradas com a variação do ângulo de disparo

V gerador [v]	$\alpha$ - [Vcc]	I gerador [A]	I indutor[A]	I carga [A]	f (Hz)
250	0	2,76	0	0,3	59,7
248	0,5	2,76	0,01	0,3	59,7
248	1	2,76	0,02	0,3	59,6
247	1,5	2,76	0,03	0,3	59,6
247	2	2,76	0,03	0,3	59,6
246	2,5	2,73	0,03	0,3	59,5
245	3	2,66	0,09	0,3	59,5
242	3,5	2,51	0,2	0,29	59,7
235	4	2,25	0,4	0,28	60
222	4,5	1,89	0,6	0,27	60,2
198	5	1,31	0,79	0,24	60,6
163	5,5	1,02	0,77	0,22	60,61

Fonte: Os autores, 2014.

## ANEXO A – Placa digital de disparo dos tiristores: SEMIKRON RT380T 230/400 PCB RoHS

### **RT380T 230/400 PCB RoHS**

*Analog three-phase thyristor trigger module*

- Two supply voltages: 230 Vac or 400Vac
- Supply with external trafo up to 690 Vac
- Screwless terminal blocks
- Control voltage selectable 0-5/0-10V
- External inhibit input
- 4.000 V galvanic insulation
- Triggers the whole range SEMIKRON
- No external components needed

#### TECHNICAL SPECIFICATIONS

Supply voltage		230/400 V <sub>AC</sub> +10% / -15%
Power drain		8 VA max.
Input voltages	INHIBIT-IN	7-16 Vcc
	0-5 V IN	0 - 5 Vcc (15 Vcc max.)
	0-10 V IN	0 - 10 Vcc (15 Vcc max.)
Output signals	+5V OUT	5 Vcc 100 mA max.
Trigger current		600 mA @ V <sub>GT</sub> = 5V
Isolation		4000Vca inlet/outlet
Working frequency		45-65Hz (automatic adaptation)
Working temperature		5 - 50°C
Humidity		10 - 95% without condensation
Power-on		1 second
Weight		525 g

This module has been designed for triggering 6 thyristors with phase regulation in order to control the power on the load. It is recommended the use of external RC-snubbers to protect the thyristors and to facilitate its triggering.

The load may be supplied with a variable alternating voltage if the 6 thyristors are connected in antiparallel W3C, or with a variable direct voltage if they are connected in B6C, B6HK or B6HKF.

The external thermal trip has to be normally close. If it opens, the module stops, the green LED stops lighting and the red LED lights.

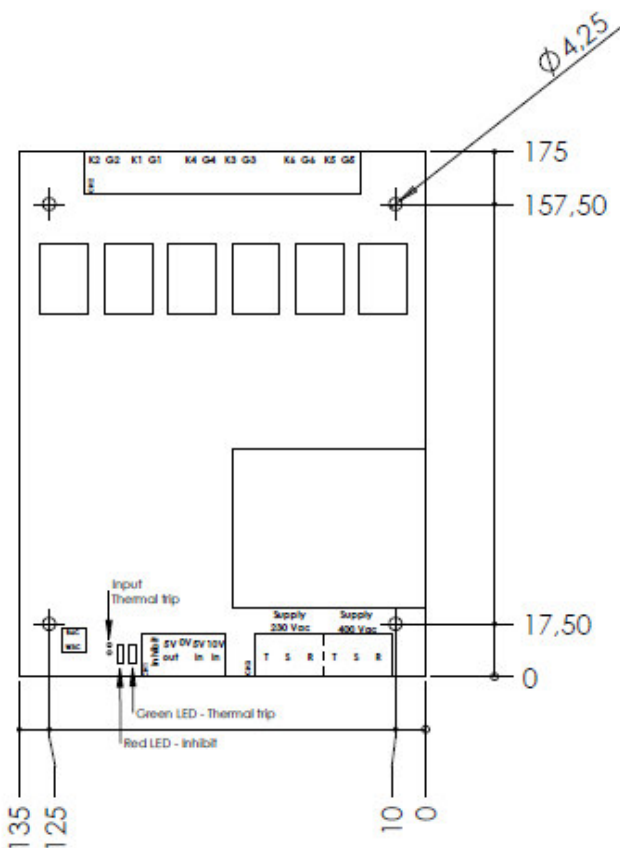
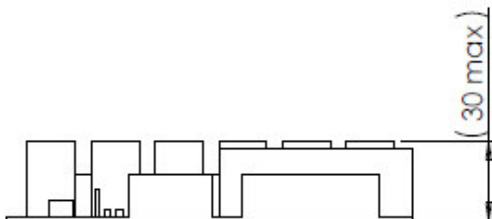
The module has an automatic Power-on delay of approx. 1 second. That means that during the first second the output is inhibited (no pulse output).

It is important to connect the three phases and the outputs of gates and cathodes exactly as shown in the label. Done this, the input phases *of the whole equipment* (module + power) can be connected in the sequence you want.

To select the thyristors connection W3C, the three minidips have to be in W3C position. For a B6C connection, they have to be in B6C position.

An input of +12V (7 to 16V) in the input INHIBIT stops the output of gate pulses and red LED starts lighting. This +12V can be external or using the internal auxiliary 12V<sub>DC</sub> present at the thermal trip jumper (see drawing).

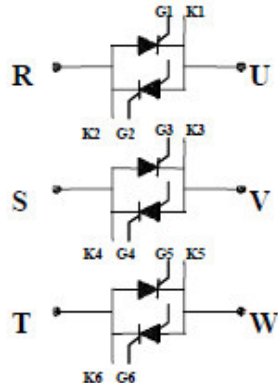
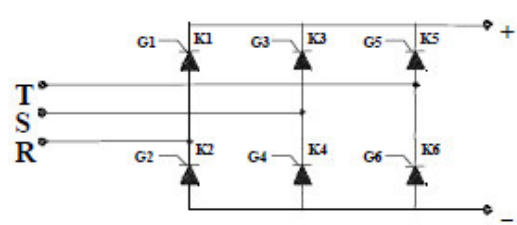
Semikron Electronics SL posee el copyright de este plano.  
 Se autoriza su uso única y exclusivamente para el fin para el que ha sido enviado.  
 No se permite su reproducción sin el consentimiento escrito previo de los autores.



**INPUT THERMALTRIP**

Thermaltrip with contacts normally Closed

To inhibit the output pulses: connect the +12V of the input thermaltrip to the terminal "INHIBIT"



<b>SEMIKRON</b>	Escala	Material	Denominación	Código	Rev
	1:2		RT380T 230/400 PCB RoHS	RT380Tpcb	0
	Tolerancia Entre Centros: ±0.25	Acabado	Artículo	Dibujado	Revisado
	Métrica: x0.5		97492031	CO	
					Fecha
					29/04/09