

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS - UFG  
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE  
COMPUTAÇÃO - EEEC

OPERAÇÃO DO GERADOR DE INDUÇÃO EM  
CONEXÃO ASSÍNCRONA COM A REDE  
MONOFÁSICA

NÉLIO NEVES LIMA

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Pinheiro Alvarenga

Goiânia – GO  
2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS - UFG  
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE  
COMPUTAÇÃO - EEEC

OPERAÇÃO DO GERADOR DE INDUÇÃO EM  
CONEXÃO ASSÍNCRONA COM A REDE  
MONOFÁSICA

Dissertação apresentada à Coordenação do  
Programa de Mestrado em Engenharia  
Elétrica e de Computação da Universidade  
Federal de Goiás como parte dos requisitos  
para a obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Engenharia Elétrica

NÉLIO NEVES LIMA

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Pinheiro Alvarenga

Goiânia – GO  
2010



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS**  
Escola de Engenharia Elétrica e de Computação  
Coordenação de Pós-Graduação e Pesquisa  
em Engenharia Elétrica e de Computação



## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

# **"Gerador de Indução Conectado Assincronamente à Rede Monofásica"**

**NÉLIO NEVES LIMA**

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

---

Prof. Dr. Bernardo Pinheiro de Alvarenga, Orientador – EEEEC/UFG

---

Prof. Dr. Élcio Precioso de Paiva – IFTO

---

Prof. Dr. Pedro José Abrão – IFG

---

Prof. Dr. Lourenço Matias – EEEEC/UFG

---

Prof. Dr. Enes Gonçalves Marra – EEEEC/UFG

Goiânia, 26 de Março de 2010

## AGRADECIMENTOS

---

Agradeço especialmente a minha mãe Neli Neves por sua dedicação e força. Com certeza sem seu exemplo eu jamais chegaria até aqui.

A minha noiva Lívia Fernanda de Oliveira, por nunca deixar de acreditar em mim e em minha capacidade, mesmo quando nem eu acreditava.

Ao professor Enes Gonçalves Marra por sua orientação, sem a qual este projeto não existiria.

A todos meus familiares, que se envolveram junto comigo neste projeto.

Aos amigos, da FATEC-IB e da EEEC-UFG, também sempre presentes e apoiando sempre que possível.

Ao meu pai, que mesmo não estando mais entre nós, sei que esteve presente em minha caminhada.

A todos que agradei, considerem este, um projeto nosso.

## RESUMO

---

Este trabalho apresenta a proposta de um sistema para geração de energia elétrica baseado na Máquina de Indução Trifásica (MIT) com rotor tipo gaiola de esquilo associada a um conversor de frequência chaveado no modo PWM (modulação por largura de pulsos na sigla em inglês) senoidal. O lado CC do conversor de frequência é conectado assincronamente à rede monofásica da concessionária através de um inversor monofásico em ponte completa a tiristores, alimentado em corrente, e de um conversor CC-CC abaixador de tensão, utilizado para modular senoidalmente a corrente injetada na rede via inversor. Este sistema permite a operação como co-gerador em localidades alimentadas por linhas monofásicas e com disponibilidade de recursos energéticos. O conversor de frequência é responsável por manter a frequência fundamental nos terminais do gerador de indução fixa em 60 Hz. A tensão no capacitor  $C_{cc}$  ( $V_{cc}$ ) é controlada através da manutenção do balanço energético no lado CC do conversor PWM, ajustando a amplitude da corrente ativa injetada na rede monofásica em um valor adequado. A estratégia empregada para implementação do controle foi a compensação analógica tipo proporcional-integral (PI) do erro de  $V_{cc}$ . O sistema é ainda capaz de atuar como compensador de potência reativa para as cargas CA, já que o capacitor  $C_{cc}$  representa uma fonte de tensão contínua para o inversor e a ponte trifásica a diodos permite o fluxo bidirecional de energia entre os lados CA e CC do sistema. Os resultados de simulação e experimentais sustentam a viabilidade do sistema para prover tensões trifásicas equilibradas e reguladas, satisfazendo os requisitos da resolução 505/2001 da ANEEL e da norma IEEE Std 519-1992 do IEEE/ANSI.

*Palavras-Chave: Gerador de Indução Trifásico, Conversor PWM, Inversor Monofásico de Corrente a Tiristores, Controle Proporcional-Integral, Co-geração.*

## ABSTRACT

---

This text reports the effort to present a proposal of a power generation system based on cage rotor Induction Electrical Machine associated to a sinusoidally-switched PWM (Pulse Width Modulation) frequency converter responsible for maintaining constant 60 Hz frequency at the generator leads. DC side at the PWM converter is nonsynchronously connected to a single-phase utility line by means of a full-bridge current-fed thyristor inverter, employing a step-down DC-DC converter in order to turn the grid injected current into a sinusoidal waveform. The proposed system allows for the operation as cogenerator in sites fed by single-phase utility net where there is availability of energetic resources. The DC capacitor voltage ( $V_{dc}$ ) is controlled through the DC side energy balance adjusting the amplitude of the active current sent to the utility grid. The control strategy employed was the analogic proportional-integral (PI) error compensation. The system is also able to act as reactive power compensator to the AC loads as the  $C_{dc}$  capacitor represents a voltage source to the inverter and the three-phase diode bridge allows for bidirectional power flow between AC and DC sides. Simulation and experimental results has corroborated system viability to provide three-phase balanced regulated voltages complying with ANEEL 505/2001 Resolution and with IEEE Std 519-1992.

*Keywords: Induction Electrical Generator, PWM Converter, Single-Phase Current Thyristor Inverter, Proportional-Integral Control, Cogenerator.*

## Lista de Figuras

---

Figura 2.1 - Geometria da máquina de indução trifásica de dois pólos e eixos de referência $\alpha\beta\gamma$ (MARRA, 1999). .....	21
Figura 2.2 - Representação Circuitual do Modelo $\alpha\beta\gamma$ da Máquina de Indução Trifásica. ....	24
Figura 2.3 - Conjugado ( $T_{mec}$ ) em função do escorregamento ( $s$ ). .....	26
Figura 2.4 - Gerador de Indução Auto-Excitado. ....	26
Figura 2.5 - Processo de Auto-Excitação do Gerador de Indução Trifásico. ....	27
Figura 2.6 - GI conectado ao Conversor PWM. ....	28
Figura 2.7 - CI TCA 780 para disparo de tiristores (SIEMENS). ....	31
Figura 2.8 - Inversor monofásico de corrente IMC. ....	32
Figura 2.9 - Representação do modelo $\alpha\beta\gamma$ da MIT. ....	34
Figura 2.10 - Conversor de tensão PWM e Filtro Lf-Cca. ....	34
Figura 2.11 - Inversor de tensão e controle de $V_{cc}$ e da corrente de saída. ....	35
Figura 2.12 - Circuito de tempo morto. ....	35
Figura 2.13 - Controle de disparo dos tiristores. ....	36
Figura 2.14 - Tensão de linha com gerador operando sem carga CA (Vert: 200V/Div, Horiz: 1s/Div). ....	36
Figura 2.15 - Tensão do capacitor CC (Vert: 50V/Div, Horiz: 0,5s/Div). ....	37
Figura 2.16 - Aspecto geral da tensão $V_{ab}$ gerada (Vert: 200V/Div, Horiz: 1s/Div). ....	37
Figura 2.17 - Forma de onda da tensão gerada após aplicação da carga de 0,25pu (Vert: 50V/Div, Horiz: 0,05s/Div). ....	38
Figura 2.18 - Tensão sobre o capacitor $C_{cc}$ (Vert: 50V/Div, Horiz: 1s/Div). ....	38
Figura 2.19 - Corrente injetada a rede monofásica (Vert: 1A/Div, Horiz: 1 s/Div). ....	39
Figura 2.20 - Corrente injetada ( $I_o$ ) a rede monofásica ( $V_{rede}$ ). ....	39
Figura 2.21 - Tensão $V_{ab}$ após aplicação em degrau de cargas de 0,25pu e 0,4pu (Vert: 200V/Div, Horiz: 1s/Div). ....	40
Figura 2.22 - Tensão $V_{cc}$ durante a aplicação em degrau das cargas de 0,25pu e 0,40pu (Vert: 50V/Div, Horiz: 1s/Div). ....	41
Figura 2.23 - Tensão $V_{ab}$ em detalhe após aplicadas as cargas de 0,25pu e 0,40pu (Vert: 100V/Div, Horiz: 0,05s/Div). ....	41
Figura 2.24 - Corrente $I_o$ após durante aplicação das cargas de 0,25pu e 0,40pu (Vert: 1A/Div, Horiz: 1s/Div). ....	42
Figura 2.25 - Forma de onda da tensão gerada ( $V_{ab}$ ), e comportamento do valor eficaz da tensão gerada ( $V_{abRMS}$ ). ....	43
Figura 2.26 - $V_{cc}$ durante aplicação de carga desequilibrada (Vert: 50V/Div, Horiz: 0,5s/Div). ....	43
Figura 2.27 - Corrente injetada a rede monofásica (Vert: 1A/Div, Horiz: 0,5s/Div). ....	44
Figura 2.28 - Corrente injetada a rede monofásica após aplicação da carga desequilibrada aos terminais do GI (Vert: 1A/Div, Horiz: 20ms/Div). ....	44
Figura 2.29 - Forma de onda da tensão gerada pelo GI ( $V_{ab}$ ), e o comportamento de seu valor eficaz ao se aplicar carga indutiva. ....	45
Figura 2.30 - Corrente injetada a rede monofásica ( $I_o$ ), e seu valor eficaz ( $I_{orms}$ ) para carga indutiva. ....	46
Figura 2.31 - Tensão sobre capacitor $C_{cc}$ . ....	46
Figura 2.32 - Valor eficaz da tensão gerada ( $V_{ABrms}$ ), e sua forma de onda ( $V_{ab}$ ). ....	47
Figura 2.33 - Tensão $V_{cc}$ ao aplicar retificador trifásico aos terminais do GI (Vert: 50V/Div, Horiz: 0,5s/Div). ....	48

Figura 2.34 - Corrente injetada a rede monofásica (Vert: 1A/Div, Horiz: 0,5s/Div).....	48
Figura 3.1 - Circuito de controle do IMC.....	51
Figura 3.2 - Pulso de disparo dos tiristores. (a)saída dos pinos 14 e 15 do TCA780. (b)saída do temporizador NE555.....	52
Figura 3.3 - Ângulo de disparo na saída do IMC. ....	52
Figura 3.4 - Forma de onda na saída do IMC.....	53
Figura 3.5 - Diagrama de blocos funcional do sistema proposto (MARRA, 1999).....	54
Figura 3.6 Amplificador PI implementado no CI L4981A. ....	55
Figura 3.7 - Corrente de saída do conversor CC-CC abaixador.....	56
Figura 3.8 - (1) Tensão gerada; (2) Corrente elétrica injetada a rede monofásica. ....	58
Figura 3.9 - Tensão gerada sem carga CA.....	59
Figura 3.10 - Tensão, corrente, fator de crista e frequência da tensão gerada sem carga CA..	59
Figura 3.11 - (a) Harmônicos e (b) Tabela de harmônicos, ambos gerados pelo analisador de energia. ....	60
Figura 3.12 - $V_{cc}$ com GI operando sem carga CA. ....	60
Figura 3.13 - (a) Início co chaveamento do IMC; (b) corrente injetada na rede monofásica com GI operando sem carga CA. ....	61
Figura 3.14 - DHT medido da tensão da rede monofásica. ....	61
Figura 3.15 - Tensão da rede monofásica, corrente injetada a rede. ....	62
Figura 3.16 - Potência e energia medida da corrente injetada a rede. ....	62
Figura 3.17 - Desequilíbrio entre tensão da rede monofásica da concessionária e corrente injetada. ....	63
Figura 3.18 - Tensão antes e depois da aplicação da carga de 75W (a) Tensão de linha gerada; (b) tensão CC do conversor PWM.....	63
Figura 3.19 - (a) Tensões de fase; (b) correntes de linha, aplicadas a carga de 75W.....	64
Figura 3.20 - Tensão, corrente e frequência da tensão gerada após aplicação de carga de 75W. ....	64
Figura 3.21 - (a) DHT das tensões e; (b) tabela de harmônicos gerada pelo analisador de energia. ....	65
Figura 3.22 - Potência e energia consumida pela carga. ....	65
Figura 3.23 - Tensão elétrica da rede monofásica da concessionária e corrente injetada. ....	66
Figura 3.24 - Corrente injetada a rede monofásica da concessionária. ....	66
Figura 3.25 - (a)DHT da tensão da rede monofásica da concessionária; e (b) DHT da corrente injetada. ....	67
Figura 3.26 - Diagrama fasorial da tensão da rede monofásica da concessionária e da corrente injetada a rede.....	67
Figura 3.27 - Tensão gerada antes e após a aplicação da carga de 450W.....	68
Figura 3.28 - Tensões de linha após aplicação de carga de 450W. ....	68
Figura 3.29 - Correntes de linha para a carga de 450W. ....	69
Figura 3.30 - (a) DHT das tensões de linha; e (b) tabela de harmônicos gerada pelo analisador de energia.....	69
Figura 3.31 - Potencia consumida pela carga. ....	70
Figura 3.32 - (a) corrente injetada a rede monofásica; e (b) tensão sobre o capacitor CC.....	70
Figura 3.33 - Tensão da rede monofásica e corrente injetada a rede.....	71
Figura 3.34 - Potência do sinal injetado a rede. ....	71
Figura 3.35 - DHT tensão da rede. ....	72
Figura 3.36 - Valor eficaz da tensão gerada durante o teste de rejeição de carga. ....	73
Figura 3.37 - Tensão, corrente e frequência gerada (a) antes e (b) depois do teste de rejeição de carga resistiva. ....	73
Figura 3.38 - Valor eficaz da corrente aplicada a carga durante o teste de rejeição de carga. .	74

Figura 3.39 - Tensão e corrente aplicadas as cargas de (a)180W; (b)180W+120W e (c) 180W+120W-180W. ....	74
Figura 3.40 - Comportamento do valor eficaz da corrente injetada a rede monofásica. ....	75
Figura 3.41 - Potência e Fator de Potência do sinal injetado a rede; Energia enviada à rede em 8 minutos. ....	75
Figura 3.42 - Tensão da rede monofásica e corrente elétrica injetada a mesma. ....	76
Figura 3.43 - Comportamento da tensão sobre capacitor $C_{cc}$ durante teste de rejeição de carga. ....	76
Figura 3.44 - Tensão de linha gerada antes (a) e após (b) aplicação de carga resistiva desequilibrada. ....	77
Figura 3.45 – Corrente de linha aplicada a carga desequilibrada. ....	77
Figura 3.46 - Tensão e corrente. ....	78
Figura 3.47 - Monitoramento da tensão (a) e corrente (b). ....	78
Figura 3.48 - Monitoramento da frequência durante teste de carga desequilibrada. ....	79
Figura 3.49 - (a) DHT das tensões de linha e; (b) Tabela de harmônicos gerada pelo analisador de energia. ....	79
Figura 3.50 - (a) Monitoramento do valor eficaz da corrente injetada a rede monofásica e; (b) Formas de onda da tensão da rede monofásica e corrente injetada a mesma. ....	80
Figura 3.51 - Monitoramento da frequência do sinal de corrente injetado à rede monofásica. ....	80
Figura 3.52 - Tabela de harmônicos gerada pelo analisador de energia. ....	81
Figura 3.53 - Diagrama fasorial da tensão da rede monofásica e corrente injetada a mesma. ....	81
Figura 3.54 - Comportamento da tensão L13 durante a aplicação das cargas. ....	82
Figura 3.55 - Forma de onda das tensões de linha após aplicadas as cargas. ....	83
Figura 3.56 - Fasores das tensões. ....	83
Figura 3.57 - Correntes de linha após aplicadas as cargas aos terminais do GI. ....	83
Figura 3.58 - Valores eficazes das tensões e correntes medidas nos terminais do GI. ....	84
Figura 3.59 - Valores eficazes das tensões (a) e correntes (b) de linha. ....	84
Figura 3.60 - Potência e Energia consumidas pelo GI após oito minutos da aplicação as cargas. ....	85
Figura 3.61 - Tabela de harmônicos gerada pelo analisador de energia. ....	85
Figura 3.62 - (a) Corrente injetada a rede monofásica da concessionária; (b) Tensão sobre capacitor $C_{cc}$ . ....	86
Figura 3.63 - Diagrama fasorial da tensão monofásica da concessionária e corrente injetada a mesma após aplicadas as cargas aos terminais do GI. ....	86
Figura 3.64 - Tabela de harmônicos gerada pelo analisador de energia. ....	87
Figura 3.65 - Tensão de linha do GI antes e depois de aplicada a carga. ....	87
Figura 3.66 - Tensões de linha do GI após aplicação do retificador trifásico aos seus terminais. ....	88
Figura 3.67 - Tabela de harmônicos gerada pelo analisador de energia após a aplicação do retificador trifásico aos terminais do GI. ....	88
Figura 3.68 - Tensão retificada entregue a carga resistiva. ....	89
Figura 3.69 – Diagrama fasorial. ....	89

## Lista de Tabelas

---

TABELA 2.1 – Variações percentuais dos valores eficazes de tensão e corrente para as cargas.....	49
TABELA 3.1 - Valores percentuais das tensões e correntes eficazes para cargas aplicadas.....	90

## Lista de Abreviaturas

---

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica.

BFT – Bomba Funcionando como Turbina.

CA– Corrente Alternada.

CC – Corrente Contínua.

CI – Circuito Integrado.

DSP – Digital Signal Processor.

DHT – Distorção Harmônica Total.

FMM – Força Magnetomotriz

GI – Gerador de Indução.

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers.

IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor.

IMC – Inversor Monofásico de Corrente.

MIT – Máquina de Indução Trifásica.

PI – Proporcional Integral.

PWM – Pulse With Modulation.

SCR – Silicon Controlled Rectifier.

## Lista de Símbolos

---

$B_m$ : Constante de atrito rotacional.

$C_{ca}$ : Capacitância por fase do banco de magnetização do gerador de indução.

$C_{cc}$ : Capacitância no lado cc do conversor PWM.

$[f_{abc}]$ : Vetor de grandezas quaisquer representadas em termos das fases a, b e c do estator e do rotor no sistema abc.

$[f_{\alpha\beta\gamma}]$ : Vetor de grandezas quaisquer referidas ao sistema  $\alpha\beta\gamma$ .

$i_{as}; i_{bs}; i_{cs}$ : Correntes instantâneas de linha do estator, para as fases a, b, e c respectivamente.

$i'_{ar}, i'_{br}, i'_{cr}$ : Correntes instantâneas de linha do rotor, referidas ao estator, para as fases a, b, e c respectivamente.

$i_{\alpha r}; i_{\beta r}; i_{\gamma r}$ : Correntes instantâneas de linha do rotor, para as fases a, b, e c na referência  $\alpha\beta\gamma$ .

$I_s$ : Corrente de linha no estator.

$I'_r$ : Corrente de linha no rotor, referida ao estator.

$[i'_{abc}]$ : Vetor das correntes de linha do estator na referência abc.

$[i'_{abcr}]$ : Vetor das correntes de linha do rotor, referidas ao estator, na referência abc.

$[i'_{\alpha\beta\gamma}]$ : Vetor das correntes de linha do rotor, referidas ao estator, na referência  $\alpha\beta\gamma$ .

$J$ : Constante de inércia.

$ki$ : Ganho integral do controlador proporcional integral.

$kp$ : Ganho proporcional do controlador proporcional integral.

$[K_{\alpha}^a]$ : Matriz de transformação do sistema de referências abc para o sistema  $\alpha\beta\gamma$ .

$L_f$ : Indutância série do filtro passa baixas.

$L_{ls}$ : Indutância de dispersão nos enrolamentos do estator.

$L_{ms}$ : Indutância de magnetização dos enrolamentos do estator ou do rotor.

$L'_{lr}$ : Indutância de dispersão nos enrolamentos do rotor, referida ao estator.

$[L_s]$ : Matriz de indutâncias próprias de estator.

$[L_{sr}]$ : Matriz de indutâncias mútuas entre os enrolamentos das fases do rotor e do estator.

$[L'_{r}]$ : Matriz de indutâncias próprias de rotor, referidas ao estator.

$n_f$ : Número de fases da máquina.

$P_j$ : Potência das perdas no cobre do rotor.

$P_{mec}$ : Potência mecânica da máquina.

$P_r$ : Potência transferida ao rotor.

$P_t$ : Potência total fornecida.

$P_0$ : Potência de perdas magnéticas, perdas mecânicas e perdas adicionais.

$r_m$ : Resistência que representa as perdas magnéticas por histerese, correntes parasitas e demais perdas.

$r_s$ : Resistência dos enrolamentos do estator.

$r'r$  : Resistência do rotor (enrolamentos ou gaiola).

$[R_s]$ : Matriz das resistências de estator.

$[R'r]$  : Matriz das resistências de rotor, referidas ao estator.

$s$ : Escorregamento da onda da força magnetomotriz (FMM) do rotor por unidade da velocidade síncrona da máquina.

$T_{mec}$ : Conjugado mecânico desenvolvido pela máquina de indução.

$V_{cc}$ : Tensão cc no capacitor do conversor PWM.

$V_e$ : Tensão de entreferro por fase.

$V_s$ : Tensão terminal por fase do estator.

$[v_{abcs}^a]$  : Vetor de tensão nas fases do estator na referência abc.

$[v_{abcs}]$ : Vetor de tensão nas fases do estator na referência  $\alpha\beta\gamma$ .

$[v'_{abcr}]$ : Vetor das tensões nas fases do rotor, referidas ao estator.

$XM$ : Reatância de magnetização do entreferro.

$X_s$ : Reatância de dispersão do estator.

$X'r$ : Reatância de dispersão do rotor.

$[\lambda_{abcs}^a]$  : Vetor de fluxo concatenado nas fases do estator, na referência abc.

$[\lambda_{abcs}]$  : Vetor de fluxo concatenado nas fases do estator, na referência  $\alpha\beta\gamma$ .

$[\lambda'_{abcr}]$  : Vetor de fluxo concatenado nas fases do rotor, referidas ao estator, na referência abc.

$[\lambda'_{\alpha\beta\gamma r}]$  : Vetor de fluxo concatenado nas fases do rotor, referidas ao estator, na referência  $\alpha\beta\gamma$ .

$[\lambda_{\alpha x}]$ : Vetor diferenças de fluxos, resultante da transformação  $\alpha\beta\gamma$ .

$\theta_r$ : Posição angular do rotor em relação ao estator.

$\theta_r 0$ : Valor inicial da posição angular do rotor em relação ao estator.

$\omega_r$ : Velocidade angular elétrica do rotor.

$\omega_s$ : Velocidade angular elétrica da onda de FMM no estator (velocidade síncrona).

# SUMÁRIO

---

1 – INTRODUÇÃO.....	15
1.1 OBJETIVOS.....	15
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	16
2 – GERADOR DE INDUÇÃO ASSOCIADO AO CONVERSOR PWM COM FREQUÊNCIA CONSTANTE E CONEXÃO ASSÍNCRONA À REDE MONOFÁSICA... 17	17
2.1 MODELO DINÂMICO DA MÁQUINA DE INDUÇÃO.....	17
2.2 MODELO $\alpha\beta\gamma$ DA MÁQUINA DE INDUÇÃO TRIFÁSICA.....	18
2.3 REPRESENTAÇÃO CIRCUITAL DO MODELO $\alpha\beta\gamma$ DA MÁQUINA DE INDUÇÃO TRIFÁSICA. ....	24
2.4 MÁQUINA DE INDUÇÃO TRIFÁSICA OPERANDO COMO GERADOR .....	25
2.5 GERADOR DE INDUÇÃO AUTO-EXCITADO .....	26
2.6 ASSOCIAÇÃO COM CONVERSOR PWM.....	28
2.7 INVERSOR MONOFÁSICO A TIRISTORES ALIMENTADO EM CORRENTE .....	30
2.8 CONVERSOR ABAIXADOR CC-CC OPERANDO COMO REGULADOR DE FATOR DE POTÊNCIA .....	32
2.9 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO .....	33
2.9.2 – Resultados de simulação com degrau único de carga resistiva. ....	37
2.9.3 – Resultados da simulação com degrau duplo de carga resistiva. ....	40
2.9.4 – Resultados da simulação de aplicação de carga desequilibrada. ....	42
2.9.5 – Resultados de simulação com degrau de carga indutiva. ....	45
2.9.6 – Resultado da simulação do GI alimentando um retificador trifásico de onda completa com carga puramente resistiva.....	47
2.10 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	49
3 – IMPLEMENTAÇÃO EXPERIMENTAL DO SISTEMA .....	50
3.1 Inversor Monofásico de Corrente .....	50
3.2 Conversor Abaixador CC-CC.....	53
3.3 - Implementação no DSP (Controle de conversor PWM).....	57
3.4 – Resultados Experimentais.....	57
4 – CONCLUSÃO.....	91
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	93
ANEXO A .....	95

# 1 – INTRODUÇÃO

---

A adoção da corrente alternada trifásica teve a importante contribuição de Nicola Tesla, o qual também desenvolveu a teoria do campo girante que é a base conceitual da máquina de indução trifásica (MIT) com rotor tipo gaiola, que, devido suas características, é a máquina elétrica mais usada em aplicações industriais (MCPHERSON et al, 1990; CHAPMAN, 1985; FITZGERALD et al, 1975; ALGER, 1970; SLEMON, 1966). Robustez, custo atrativo e boa relação potência/peso (W/kg) têm sido as principais vantagens da MIT em relação às demais (DEWAN et al., 1984).

É devido às suas características atrativas a sua larga utilização como motor, porém, ainda é pouco freqüente sua utilização como gerador, em função de sua pobre regulação de tensão e variação de freqüência, mesmo quando acionada a velocidade constante e alimentando carga resistiva (BASSET et al., 1935; WAGNER, 1939). No entanto, o Gerador de Indução (GI) possui capacidade de gerar tensões trifásicas com freqüência constante, não utiliza fonte de tensão contínua e anéis coletores para excitação. (WANG et al., 1997; MELO et al, 1982).

Apesar das suas vantagens, o GI necessita de um mecanismo externo para a compensação da potência reativa envolvida na sua magnetização e para a compensação da potência reativa da carga alimentada (MARRA, 1999). Essas características desencorajam o uso de GI ainda hoje.

## 1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo, propor um sistema de geração de energia elétrica através do uso da MIT com rotor tipo gaiola de esquilo, operando como gerador e conectado assincronamente à rede monofásica da concessionária. Este sistema permite a operação de co-geração em localidades alimentadas por linhas monofásicas e com disposição de recursos hidráulicos suficientes para tal fim, situação esta, comum em diversas regiões.

Como ainda existe uma quantidade considerável de áreas rurais e em regiões afastadas, este sistema de geração pode vir a contribuir com o fornecimento de tensões trifásicas senoidais, equilibradas e com freqüência constante para tais localidades. Desta

forma, este trabalho apresenta o modelo de gerador baseado na MIT (DEMETRIADES, 2000).

Em regiões rurais afastadas, torna-se dispendiosa a implantação de uma linha de distribuição rural, e, somado a isso, o baixo consumo desestimula a concessionária na construção de tais redes (DEMETRIADES, 2000). Outro ponto considerável para a concessionária é que, devido às características das redes de distribuição rural, as mesmas acabam afetando negativamente seus índices de qualidade.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Além deste capítulo introdutório, o texto desta dissertação está dividido em mais três outros capítulos, conforme descritos a seguir.

Capítulo 2: *Gerador de Indução Associado ao Conversor PWM com Frequência Constante e Conexão Assíncrona à Rede Monofásica*. Este capítulo apresenta o modelo dinâmico no domínio  $\alpha\beta\gamma$  da máquina de indução. Apresenta também a proposta de associação do GI a um conversor PWM bidirecional como estratégia de fixação da frequência, regulação da tensão terminal e compensação de potência reativa em cargas reativas. É apresentado também a simulação do modelo dinâmico e seus resultados para diversos tipos de cargas aplicadas ao sistema.

Capítulo 3: *Implementação Experimental do Sistema*. Neste capítulo são apresentados os aspectos construtivos do sistema, assim como suas características de operação como co-gerador. São apresentados também resultados experimentais da tensão gerada e da corrente injetada a rede monofásica da concessionária. Todos esses resultados são investigados quanto sua qualidade sob diversos aspectos.

Capítulo 4: *Conclusão*. Neste capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho. São apresentadas comparações e também pontos que podem ser investigados por trabalhos futuros.

No próximo capítulo será apresentado o sistema proposto para a utilização do gerador de indução em conexão assíncrona com uma fonte monofásica.

## **2 – GERADOR DE INDUÇÃO ASSOCIADO AO CONVERSOR PWM COM FREQUÊNCIA CONSTANTE E CONEXÃO ASSÍNCRONA À REDE MONOFÁSICA.**

---

Tipicamente são utilizadas máquinas síncronas para a geração de energia elétrica, em decorrência de seu controle acessível e sua facilidade na manutenção de frequência fixa, onde esta última é garantida através do controle da velocidade de rotação de seu eixo, que deve permanecer constante. Por outro lado, a Máquina de Indução Trifásica (MIT) é mais utilizada como motor e ainda é pequena sua utilização como gerador, devido sua deficiente regulação de tensão e manutenção da frequência fixa em seus terminais, mesmo quando acionada com velocidade constante.

A MIT, se comparada com as máquinas síncronas e até mesmo com as máquinas de corrente contínua (CC), percebe-se que a mesma é mais robusta, possui preço atrativo, requer menos manutenção e possui maior relação potência/peso (W/kg). Devido a essas vantagens, torna-se interessante o estudo da MIT como gerador.

A máquina de indução operando como motor possui representação satisfatória através de circuito equivalente em regime permanente, considerando-se que o motor não sofre frequentemente grandes variações em sua frequência e em sua tensão em torno do ponto de operação (MARRA, 1999). Para aplicações onde a máquina de indução opera em velocidade variável, torna-se necessário o uso de um modelo dinâmico. Neste trabalho será dada ênfase para a máquina de indução operando como gerador.

### **2.1 MODELO DINÂMICO DA MÁQUINA DE INDUÇÃO**

A máquina de indução possui um número considerável de modelos dinâmicos onde, cujo principal objetivo é a eliminação da dependência dos coeficientes das equações de estado da máquina em relação à posição angular do rotor (SZCZESNY et al., 1991; KRAUSE et al, 1986; ONG, 1988; HANCOCK, 1974).

Para este trabalho, foi escolhido um sistema referido a três eixos estacionários ( $\alpha\beta\gamma$ ), de forma que cada eixo é posicionado sobre um dos eixos magnéticos das fases (abc)

do estator de uma máquina equivalente de dois pólos. Este modelo foi proposto desta forma por Szczesny e Ronkowski para a representação da máquina de indução, e é denominado Modelo  $\alpha\beta\gamma$  (SZCZESNY et al, 1991).

As principais vantagens do modelo  $\alpha\beta\gamma$  são:

- O circuito equivalente apresenta o mesmo número de terminais da máquina original.
- O modelo permite a simulação dinâmica da máquina utilizando programas que empregam interface simbólica circuital, como por exemplo, o PSpice e PSim.
- A transformação  $\alpha\beta\gamma$  não altera as grandezas do estator.
- As grandezas do rotor, quando transformadas para a referência  $\alpha\beta\gamma$ , apresentam os mesmos valores das grandezas do rotor medidas fisicamente no estator.
- É um modelo com boa precisão e robustez matemática.
- O modelo permite a inclusão de desequilíbrios externos à máquina, desde que o seu circuito seja trifásico a três condutores. Necessita-se apenas alterar o valor dos parâmetros de estator, não sendo necessária a inclusão de nenhuma equação adicional.
- Como o modelo  $\alpha\beta\gamma$  não altera as grandezas de estator, pode-se conectar ao estator do circuito do modelo dinâmico qualquer dispositivo, sem a necessidade de incluir transformações matemáticas (SZCZESNY et al, 1991).

A representação  $\alpha\beta\gamma$  utiliza parâmetros da máquina de indução que são obtidos através de ensaios.

## 2.2 MODELO $\alpha\beta\gamma$ DA MÁQUINA DE INDUÇÃO TRIFÁSICA

Para a determinação do modelo  $\alpha\beta\gamma$  da máquina de indução referido ao sistema de eixos estacionários, são feitas as seguintes considerações:

- As grandezas do rotor são referidas ao estator.
- Não há saturação magnética na máquina.
- A Força Magnetomotriz (FMM) do estator e o fluxo do entreferro não apresentam componentes harmônicos espaciais.
- As perdas magnéticas e mecânicas são desprezadas.
- A máquina é trifásica a três condutores.

Devido à consideração feita inicialmente de que a máquina é trifásica a três condutores, pode-se concluir que a soma das correntes trifásicas no estator, bem como no rotor devem se anular, conforme mostrado em (2.1) e (2.2).

$$i_{as} + i_{bs} + i_{cs} = 0 \quad (2.1)$$

$$i'_{ar} + i'_{br} + i'_{cr} = 0 \quad (2.2)$$

As correntes  $i_{as}$ ,  $i_{bs}$  e  $i_{cs}$  são correntes de linha do estator nas fases  $a$ ,  $b$  e  $c$ . As correntes  $i'_{ar}$ ,  $i'_{br}$  e  $i'_{cr}$  são correntes de linha do rotor nas fases  $a$ ,  $b$  e  $c$  referidas ao estator através da relação de espiras entre estator e rotor.

As equações do modelo dinâmico da máquina de indução são descritas a seguir, em termos das grandezas instantâneas das fases  $a$ ,  $b$  e  $c$  do estator e do rotor (sistema  $abc$ ).

$$[v_{abcs}^a] = [R_s][i_{abcs}^a] + \frac{d[\lambda_{abcs}^a]}{dt} \quad (2.3)$$

$$[v'_{abcr}] = [R'_r][i'_{abcr}] + \frac{d[\lambda'_{abcr}]}{dt} \quad (2.4)$$

$$[\lambda_{abcs}^a] = [L_s][i_{abcs}^a] + [L_{sr}][i'_{abcr}] \quad (2.5)$$

$$[\lambda'_{abcr}] = [L'_r][i'_{abcr}] + [L_{sr}]^T [i_{abcs}^a] \quad (2.6)$$

$[v_{abcs}^a]$ ,  $[i_{abcs}^a]$  e  $[\lambda_{abcs}^a]$  são respectivamente os vetores de tensão, corrente e fluxo concatenado nas fases do estator, no sistema de referências  $abc$ .

$[v'_{abcr}]$ ,  $[i'_{abcr}]$  e  $[\lambda'_{abcr}]$  são respectivamente os vetores de tensão, corrente e fluxo concatenado nas fases do rotor, referidos ao estator, no sistema de referências  $abc$ .

$[R_s]$  e  $[L_s]$  são as matrizes das resistências de estator e das indutâncias próprias do estator, respectivamente.

$[R'_r]$  e  $[L'_r]$  são as respectivas matrizes das resistências de rotor e das indutâncias próprias do rotor, referidas ao número de espiras do estator.

$[L_{sr}]$  é a matriz das indutâncias mútuas entre os enrolamentos das fases do rotor e do estator.

O sobrescrito 'a' indica que as grandezas do estator estão escritas no sistema de referência  $abc$ .

Desta forma, tem-se que:

$$[i_{abcs}^a] = [i_{as}^a \quad i_{bs}^a \quad i_{cs}^a]^T \quad (2.7)$$

$$[i'_{abcr}] = [i'_{ar} \quad i'_{br} \quad i'_{cr}]^T \quad (2.8)$$

$$[v_{abcs}^a] = [v_{as}^a \quad v_{bs}^a \quad v_{cs}^a]^T \quad (2.9)$$

$$[v'_{abcr}] = [v'_{ar} \quad v'_{br} \quad v'_{cr}]^T \quad (2.10)$$

$$[\lambda_{abcs}^a] = [\lambda_{as}^a \quad \lambda_{bs}^a \quad \lambda_{cs}^a]^T \quad (2.11)$$

$$[\lambda'_{abcr}] = [\lambda'_{ar} \quad \lambda'_{br} \quad \lambda'_{cr}]^T \quad (2.12)$$

Nas quais T indica matriz transposta.

$$[R_s] = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} = \text{diag}[r_s] \quad (2.13)$$

$$[R_r] = \text{diag}[r_r'] \quad (2.14)$$

Considerando-se as restrições impostas por (2.1) e (2.2), tem-se:

$$[L_s] = \text{diag}[L_{ls} + M] \quad (2.15)$$

$$[L_r] = \text{diag}[L'_{lr} + M] \quad (2.16)$$

$$M = \frac{3}{2} L_{ms} \quad (2.17)$$

$$[L_{sr}] = L_{ms} \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta_r & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta_r \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$\theta_r = \int_0^t \omega_r dt + \theta_{r0} \quad (2.19)$$

Onde:

$L_{ms}$  é a indutância de magnetização dos enrolamentos do estator ou do rotor.

$L_{ls}$  e  $L'_{lr}$  são indutâncias de dispersão dos enrolamentos do estator e do rotor referidas ao estator, respectivamente.

$M$  é a indutância de magnetização do entreferro.

$\omega_r$  é a velocidade angular elétrica do rotor e  $\omega_{mr}$  é a velocidade angular mecânica do rotor, ambas convencionadas positivas no sentido anti-horário.

Em caso de  $\omega_r$  constante no tempo, tem-se que (2.19) resulta em:

$$\theta_r = \omega_r t + \theta_{r0} \quad (2.20)$$

$\theta_r$  é a posição angular do rotor em relação ao estator, que é convencionada positiva no sentido anti-horário, e  $t$  é o tempo em segundos.

$\theta_{r0}$  é o valor inicial de  $\theta_r$  em  $t = 0s$ .

A velocidade angular elétrica é determinada a partir da velocidade angular mecânica do rotor ( $\omega_{mr}$ ), conforme mostrado em (2.21), sendo  $P$  o número de pólos magnéticos da máquina.

$$\omega_r = \frac{P}{2} \omega_{mr} \quad (2.21)$$

Nas equações apresentadas anteriormente, ainda há uma dependência dos coeficientes com a posição angular entre o rotor e o estator ( $\theta_r$ ), tornando a solução do sistema mais complexa.

Em seu trabalho, Szczesny e Ronkowski (1991) propõem uma transformação matemática que transforma as equações descritivas do modelo da máquina no sistema  $abc$ , para um sistema baseado em três eixos estacionários  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ . Estes eixos de referência são posicionados sob os eixos magnéticos das fases  $a$ ,  $b$  e  $c$  do estator, conforme mostrado na Figura 2.1.

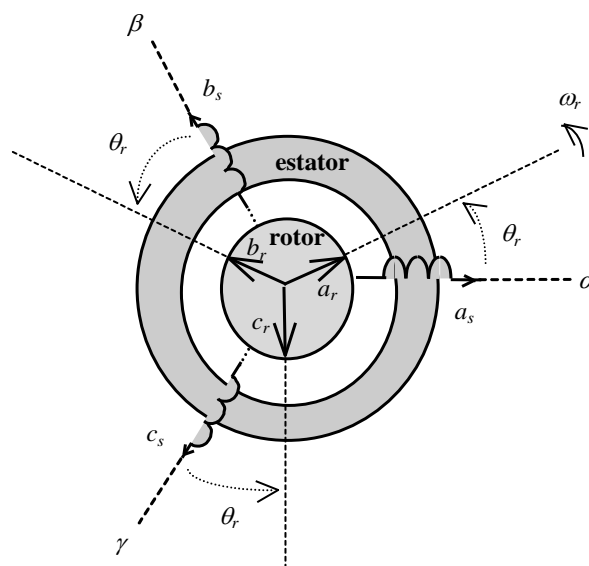


Figura 2.1 - Geometria da máquina de indução trifásica de dois pólos e eixos de referência  $\alpha\beta\gamma$  (MARRA, 1999).

Em (2.22) tem-se o equacionamento da transformação do modelo descrito em termos das grandezas das fases  $a$ ,  $b$  e  $c$  para o sistema de referência  $\alpha\beta\gamma$ .

$$[f_{\alpha\beta\gamma}] = [K_{\alpha}^a] \cdot [f_{abc}] \quad (2.22)$$

Onde:

$[f_{\alpha\beta\gamma}]$  são grandezas referidas ao sistema de eixos  $\alpha\beta\gamma$ .

$[f_{abc}]$  são grandezas referidas ao sistema de eixos  $abc$ .

$[K_{\alpha}^a]$  é a matriz de transformação do sistema de referência  $abc$  para o sistema  $\alpha\beta\gamma$ .

A matriz  $[K_{\alpha}^a]$  de transformação  $\alpha\beta\gamma$  assume a forma da matriz  $[K_{\alpha s}^a]$  para o estator e da matriz  $[K_{\alpha r}^a]$  para o rotor, conforme (2.23) e (2.24).

$$[K_{\alpha s}^a] = \text{diag}[1 \quad 1 \quad 1] \quad (2.23)$$

$$[K_{\alpha r}^a] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_r + \frac{1}{2} & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) + \frac{1}{2} & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) + \frac{1}{2} \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) + \frac{1}{2} & \cos \theta_r + \frac{1}{2} & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) + \frac{1}{2} \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) + \frac{1}{2} & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) + \frac{1}{2} & \cos \theta_r + \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Em (2.23) pode-se notar que as grandezas do estator não são alteradas na transformação para o sistema de referência  $\alpha\beta\gamma$ .

Substituindo as equações (2.23) e (2.24) em (2.22) tem-se a transformação das grandezas do estator e do rotor para o sistema  $\alpha\beta\gamma$  conforme (2.25) e (2.26).

$$[f_{abc s}] = [K_{\alpha s}^a] \cdot [f_{abc s}^a] \quad (2.25)$$

$$[f_{\alpha\beta\gamma r}] = [K_{\alpha r}^a] \cdot [f_{abc r}^a] \quad (2.26)$$

As formas inversas das matrizes  $[K_{\alpha s}^a]$  e  $[K_{\alpha r}^a]$  são suas matrizes transpostas.

Desta forma, a transformação inversa do modelo escrito na referência  $\alpha\beta\gamma$ , para o sistema de referência das bases  $abc$  do estator e do rotor é realizado por meio de (2.27) e (2.28), para o estator e para o rotor respectivamente.

$$[f_{abc s}^a] = [K_{\alpha s}^a]^T \cdot [f_{abc s}] \quad (2.27)$$

$$[f_{abc r}^a] = [K_{\alpha r}^a]^T \cdot [f_{\alpha\beta\gamma r}] \quad (2.28)$$

A aplicação de (2.23) a (2.26) em (2.3) a (2.21), resulta no modelo  $\alpha\beta\gamma$  para a máquina de indução trifásica.

Considerando que na máquina de indução com rotor em gaiola  $[v'_{abcr}]$  é nulo, o modelo  $\alpha\beta\gamma$  desta máquina é descrito pelas equações (2.29) até (2.40).

$$[v_{abcs}] = r_s [i_{abcs}] + \frac{d[\lambda_{abcs}]}{dt} \quad (2.29)$$

$$0 = r_r [i'_{\alpha\beta\gamma}] + \frac{d[\lambda'_{\alpha\beta\gamma}]}{dt} + \frac{\omega_r}{\sqrt{3}} [\lambda_{\alpha\gamma}] \quad (2.30)$$

$$[\lambda_{abcs}] = (L_{ls} + M)[i_{abcs}] + M[i'_{\alpha\beta\gamma}] \quad (2.31)$$

$$[\lambda'_{\alpha\beta\gamma}] = (L'_{lr} + M)[i'_{\alpha\beta\gamma}] + M[i_{abcs}] \quad (2.32)$$

Onde:

$[v_{abcs}]$ ,  $[i_{abcs}]$  e  $[\lambda_{abcs}]$  são os respectivos vetores de tensão, corrente e fluxo concatenado nos enrolamentos do estator, na referência  $\alpha\beta\gamma$ .

$[i'_{\alpha\beta\gamma}]$  e  $[\lambda'_{\alpha\beta\gamma}]$  são os respectivos vetores de corrente e fluxo concatenado nos enrolamentos do rotor, referidos ao estator, na referência  $\alpha\beta\gamma$ .

$[\lambda_{\alpha\gamma}]$  é o vetor de diferenças de fluxos, resultante da transformação  $\alpha\beta\gamma$ .

Sendo:

$$[\lambda_{\alpha\gamma}] = \begin{bmatrix} (\lambda'_{\beta r} - \lambda'_{\gamma r}) \\ (\lambda'_{\gamma r} - \lambda'_{\alpha r}) \\ (\lambda'_{\alpha r} - \lambda'_{\beta r}) \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

$$[i_{abcs}] = [i_{as} \quad i_{bs} \quad i_{cs}]^T \quad (2.34)$$

$$[i'_{\alpha\beta\gamma}] = [i'_{\alpha r} \quad i'_{\beta r} \quad i'_{\gamma r}]^T \quad (2.35)$$

$$[v_{abcs}] = [v_{as} \quad v_{bs} \quad v_{cs}]^T \quad (2.36)$$

$$[\lambda_{abcs}] = [\lambda_{as} \quad \lambda_{bs} \quad \lambda_{cs}]^T \quad (2.37)$$

$$[\lambda'_{\alpha\beta\gamma}] = [\lambda'_{\alpha r} \quad \lambda'_{\beta r} \quad \lambda'_{\gamma r}]^T \quad (2.38)$$

O conjugado mecânico ( $T_{mec}$ ) no eixo do rotor pode ser escrito em função das correntes  $i_{as}$ ,  $i_{cs}$ ,  $i'_{\gamma r}$  e  $i'_{\alpha r}$  como em (2.39).

$$T_{mec} = \sqrt{3} \left( \frac{P}{2} \right) M (i_{as} i'_{\gamma r} - i_{cs} i'_{\alpha r}) \quad (2.39)$$

A equação (2.40) determina o comportamento dinâmico do sistema eletromecânico.

$$T_{mec} = \left( \frac{2}{P} \right) J \frac{d\omega_r}{dt} + \left( \frac{2}{P} \right) B_m \omega_r + T_L \quad (2.40)$$

Sendo  $J$  a constante de inércia do rotor em  $\text{kg.m}^2$ ;  $B_m$  é a constante de atrito rotacional em  $\text{kg.m}^2/\text{s}$ ; e  $T_L$  é o conjugado da carga mecânica em  $\text{N.m}$ .

A descrição do modelo dinâmico da máquina de indução descrito por (2.29) a (2.40) é primeiramente apresentado por Szczesny e Ronkowski (1991) tal qual neste texto, com apenas algumas alterações na notação e no formato das equações.

### 2.3 REPRESENTAÇÃO CIRCUITAL DO MODELO $\alpha\beta\gamma$ DA MÁQUINA DE INDUÇÃO TRIFÁSICA.

O modelo  $\alpha\beta\gamma$  da máquina de indução trifásica apresenta facilidade de representação em programas que utilizam interface simbólica com elementos de circuitos elétricos, tais como SPICE e SIMCAD. Na figura 2.2 pode-se ver a representação circuitual do modelo  $\alpha\beta\gamma$  para MIT.

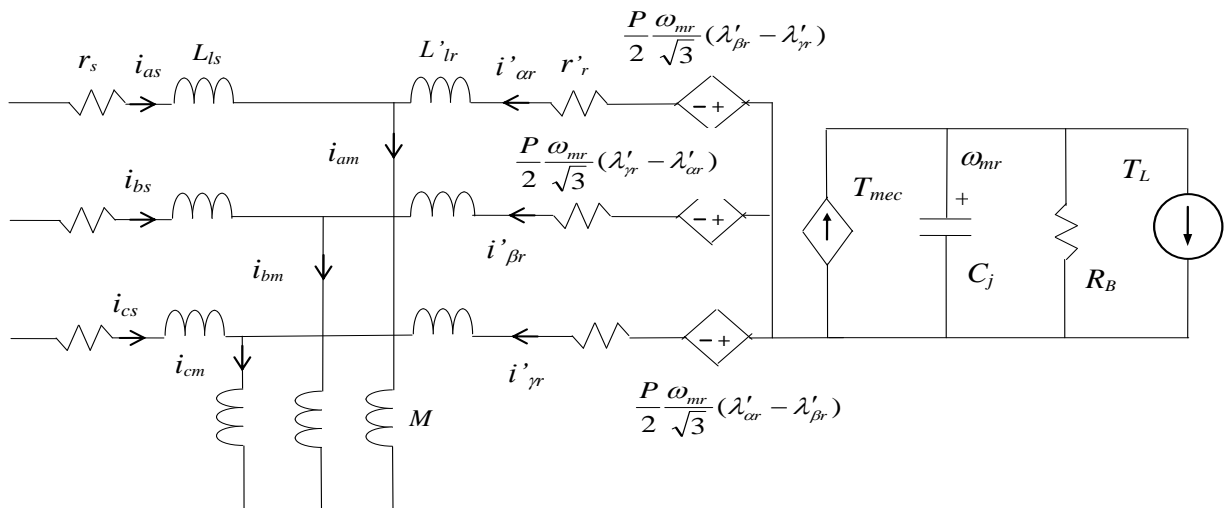


Figura 2.2 - Representação Circuitual do Modelo  $\alpha\beta\gamma$  da Máquina de Indução Trifásica.

Na representação do modelo  $\alpha\beta\gamma$  da MIT da figura 2.2, são desprezados as perdas magnéticas e o efeito da saturação, resultando assim, em um valor constante para o parâmetro

$M$  e a ausência de resistência no ramo de magnetização para representar as perdas magnéticas. Este circuito é descrito matematicamente através das equações (2.29) a (2.40).

As fontes vinculadas de tensão presentes no rotor representam o efeito da carga mecânica no circuito elétrico da máquina.

O Conjugado mecânico da máquina ( $T_{mec}$ ) possui seu valor determinado através da equação (2.39), valor este, representado por meio de uma fonte de corrente no circuito elétrico análogo ao modelo mecânico descrito por (2.40). Este circuito elétrico análogo ao modelo mecânico é descrito pela equação (2.41).

$$T_{mec} = C_j \frac{d\omega_{mr}}{dt} + \frac{1}{R_B} \omega_{mr} + T_L \quad (2.41)$$

Fazendo-se a comparação entre (2.41) e (2.40) percebe-se as seguintes analogias:

$$J = C_j$$

$$B_m = \frac{1}{R_B}$$

$\omega_{mr}$  é a tensão sobre o capacitor  $C_j$ .

$T_{mec}$  é o conjugado desenvolvido pela máquina.

$T_L$  é o conjugado da carga mecânica, constante e invariável com  $\omega_{mr}$ , porém outras várias representações para  $T_L$  são possíveis.

As amplitudes das tensões das fontes vinculadas que estão presentes no rotor são determinadas por  $\omega_{mr}$ , pelas correntes  $[i_{abcs}]$  e  $[i'_{\alpha\beta\gamma}]$ , pelos parâmetros  $L_{ls}$ ,  $L'_{lr}$  e  $M$ , conforme se pode observar a partir de (2.30), (2.32) e (2.33).

## 2.4 MÁQUINA DE INDUÇÃO TRIFÁSICA OPERANDO COMO GERADOR

A MIT é capaz de fornecer potência ativa, ou seja, operar como gerador se for provida de excitação suficiente (BASSET et al, 1935) e quando sua velocidade angular do rotor ( $\omega_r$ ) atinge um valor maior que o de sua velocidade angular síncrona ( $\omega_s$ ), passando, então, a desenvolver um escorregamento ( $s$ ) negativo, conforme (2.42).

$$s = \frac{(\omega_s - \omega_r)}{\omega_s} \quad (2.42)$$

A Figura 2.3 apresenta o Conjugado ( $T_{mec}$ ) em função do escorregamento ( $s$ ) da MIT. Percebe-se que onde o  $T_{mec}$  é negativo (sentido oposto ao de  $\omega_s$ ) e a velocidade do rotor  $\omega_r$  é positiva, a máquina passa a receber potência mecânica através de seu eixo e a transforma em potência elétrica enviada por meio dos terminais do estator. Porém, parte desta potência produzida é usada para suprir as perdas internas.

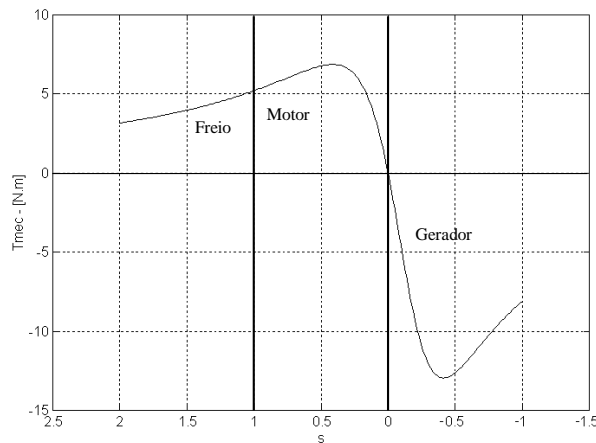


Figura 2.3 - Conjugado ( $T_{mec}$ ) em função do escorregamento ( $s$ ).

No entanto, a máquina de indução não é um gerador auto-excitado. Para suprir as necessidades de potência reativa, deve-se excitar o estator a partir de uma fonte externa. Uma maneira é a conexão de capacitores de excitação aos terminais do estator do GI. Desta forma é possível a troca de potência reativa entre o gerador e o banco de capacitores, desde que o banco de capacitores seja suficiente para compensar a potência reativa requerida tanto pela carga alimentada em corrente alternada (CA) quanto pelo GI.

## 2.5 GERADOR DE INDUÇÃO AUTO-EXCITADO

A Figura 2.4 ilustra a configuração de uma máquina de indução trifásica para operar como um gerador de indução auto-excitado.

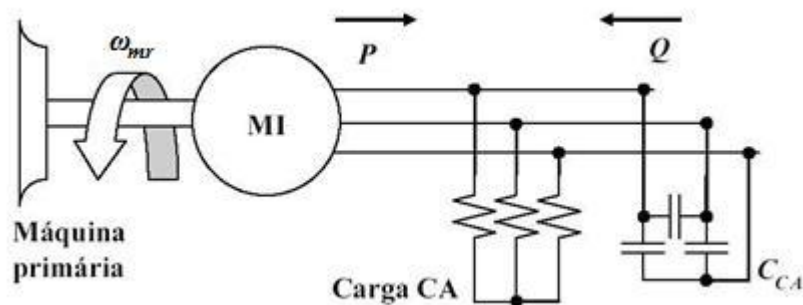


Figura 2.4 - Gerador de Indução Auto-Excitado.

Conforme mostrado anteriormente, a primeira condição para se levar uma MI a operar como gerador, é garantir que a frequência de escorregamento do rotor seja negativa. Satisfeita esta condição por meio do processo de interação entre o fluxo residual da MIT e o banco de capacitores ( $C_{ca}$ ) conectados em seus terminais, obtém-se a auto-indução. Esta interação provoca um crescimento da tensão terminal. A máquina primária acoplada ao eixo da MIT é responsável pelo fornecimento de torque mecânico, necessário para fazê-la girar. O banco de capacitores trifásico fornece potência reativa ( $Q$ ), utilizada em parte pela máquina de indução para que esta possa obter a excitação, e outra parte pela carga CA, caso ela tenha fator de potência indutivo. Desta forma, uma MIT acionada por uma máquina primária e excitada por um banco de capacitores é capaz de fornecer potência ativa ( $P$ ) a uma carga conectada em seus terminais.

A Figura 2.5 ilustra qualitativamente a auto-excitação do gerador de indução.

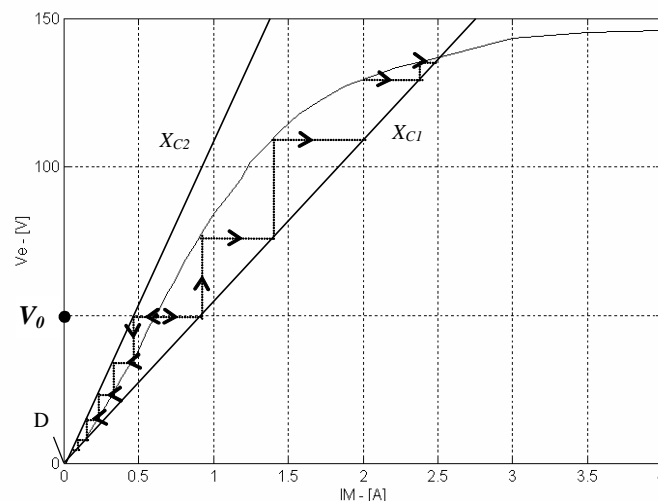


Figura 2.5 - Processo de Auto-Excitação do Gerador de Indução Trifásico.

Conforme apresentado anteriormente, a MIT possui um banco de capacitores conectado aos seus terminais de estator. A Figura 2.5 apresenta a reta de carga do banco de capacitores, descrita por  $X_{C1}$ . A auto-excitação ocorrerá por meio da interação da corrente de magnetização provinda do banco de capacitores com a tensão induzida no estator pelo fluxo residual do entreferro. A Figura 2.5 mostra que, no instante inicial, a tensão eficaz residual do GI é inicialmente  $V_0$ , cuja corrente de magnetização é nula, já que esta tensão é produzida pelo fluxo residual do rotor.

Após o início do processo de auto-excitação, uma corrente de magnetização é gerada, devido à tensão  $V_0$  produzida no estator, que também se faz presente nos terminais dos capacitores. Devido a esta corrente, o fluxo aumentará no rotor, produzindo assim, uma tensão maior que  $V_0$  nos terminais do estator. Para esta tensão nos terminais do estator, haverá

uma corrente de magnetização maior, que por sua vez irá produzir um novo acréscimo na tensão do estator. Todo este processo irá se repetir até que a curva de magnetização cruze com a reta de carga  $X_{C1}$  no ponto de saturação, que é o ponto onde a curva de carga da reatância capacitiva por fase do banco de capacitores intercepta a curva de magnetização do gerador.

A Figura 2.5 mostra também a reta de carga  $X_{C2}$ . Caso esta seja a reatância do banco de capacitores, a tensão  $V_o$  produzida pelo fluxo residual do rotor resultará em um valor de corrente que corresponderá a um valor inferior de tensão no estator. Assim, a tensão do estator não irá se elevar como exemplificado anteriormente. O que de fato ocorrerá é uma redução de seu valor, até sua completa desmagnetização.

O processo de auto-excitação descrito na Figura 2.5 é, de fato, uma simplificação idealizada com finalidade explicativa. No momento da auto-excitação, a variação da tensão terminal do gerador produz variação das perdas ativas. Como as perdas ativas representam uma carga para o gerador, a frequência síncrona da tensão gerada sofrerá alterações ao longo do processo de auto-excitação. As mudanças na frequência levarão a alterações na curva de magnetização da MIT, bem como do banco de capacitores. A interação das curvas características do gerador e do banco de capacitores deve ocorrer de uma forma um pouco distinta da descrita anteriormente, porém respeitando os mesmos mecanismos.

## 2.6 ASSOCIAÇÃO COM CONVERSOR PWM

As variações de frequência e de amplitude da tensão apresentadas pelo GI constituem um obstáculo para a geração de energia elétrica com qualidade satisfatória. Uma forma de se minimizar tais efeitos é a utilização de um conversor PWM alimentado em tensão a partir do capacitor  $C_{cc}$  e associado ao GI, conforme ilustra a Figura 2.6.

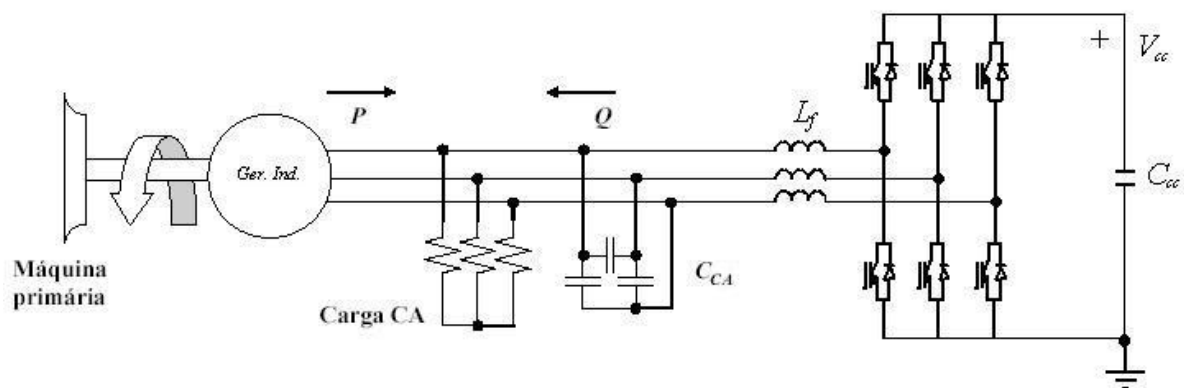


Figura 2.6 - GI conectado ao Conversor PWM.

Neste caso o inversor PWM opera com frequência constante de 60Hz, fazendo que se tenha uma referência de frequência fixa e mantendo a frequência síncrona constante no gerador.

O conversor PWM associado ao GI possui uma indutância de baixo valor, presente no filtro  $L_f C_{ca}$ . Este filtro é necessário para que o sistema de geração seja capaz de fornecer tensão com forma de onda senoidal. Para isso é usado um filtro passa-baixas com o intuito de se suprimir as componentes de tensão nas frequências de chaveamento e superiores presentes na saída do inversor PWM, garantindo uma forma de onda senoidal nos terminais do GI. O banco de capacitores  $C_{ca}$  presente nos terminais do GI atua também como fornecedor de potência reativa necessária para manter a excitação da máquina.

O capacitor  $C_{ca}$  da Figura 2.6 é escolhido a partir da potência reativa necessária para manter a excitação do gerador de indução (MARRA, 1999). O valor da potência reativa do banco de capacitores trifásico deve ser o mesmo da potência reativa medida no ensaio a vazio ( $Q_0$ ), realizados na frequência e tensão nominais da máquina de indução. Assim sendo, os valores de  $C_{ca}$  e da reatância capacitiva por fase ( $X_{ca}$ ) do banco de excitação podem ser determinados.

Considerando que o banco de capacitores está conectado em  $\Delta$  e desprezando-se a impedância do estator, pode-se determinar  $X_{ca}$  e  $C_{ca}$  conforme as equações 2.43 e 2.44.

$$X_{ca} = \frac{3 \cdot V_L^2}{Q_0} \quad (2.43)$$

$$C_{ca} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot X_{ca}} \quad (2.44)$$

Para o cálculo da indutância série do filtro ( $L_f$ ), será usado o valor conhecido da capacitância  $C_{ca}$  e a frequência de corte ( $f_c$ ) do filtro  $L_f C_{ca}$ , conforme a 2.45.

$$L_f = \frac{1}{C_{ca} (2 \cdot \pi \cdot f_c)^2} \quad 2.45$$

A frequência de corte ( $f_c$ ) é escolhida uma década abaixo da frequência de chaveamento do conversor PWM, a fim de eliminar os efeitos do chaveamento na tensão terminal.

O sistema da Figura 2.6 pode ser usado como configuração básica para algumas variações deste tipo de sistema. Assim, o conversor PWM também pode atuar como um regulador da tensão terminal do gerador e como compensador de potência reativa para a carga CA do sistema, caso requerido, até o seu limite de corrente nominal

Uma proposta para o sistema da Figura 2.6 foi apresentada por Marra e Pomilio (MARRA, POMILIO, 1998) na qual o inversor PWM atuaria com frequência constante. Para este caso, o conversor mantém estável a frequência da tensão gerada e também faz a compensação da potência reativa do sistema. Esta estratégia de controle resulta em uma tensão terminal de amplitude constante em regime permanente. Porém, para este caso é necessário que a máquina primária tenha sua velocidade controlada, a fim de que a potência gerada seja igual à solicitada pela carga. Pode-se perceber através da figura 2.6 que a potência ativa fornecida pelo GI é distribuída entre a carga e o inversor. Para o caso em que a potência ativa gerada for maior que a absorvida pela carga, a parte excedente da geração irá para o conversor, o que conseqüentemente acarretará em um aumento da tensão sobre o capacitor  $C_{cc}$ , devido ao aumento do acúmulo de carga provocada pelo excedente de energia sobre o capacitor. A situação inversa irá provocar uma descarga do capacitor  $C_{cc}$ , e conseqüentemente uma diminuição da tensão sobre o mesmo. Esta variação de tensão sobre o capacitor  $C_{cc}$  é usada então, como informação para o controlador de velocidade da turbina.

Outra proposta dos mesmos autores (MARRA, POMILIO, 1998), é utilizar um GI auto-excitado conectado a um conversor trifásico, na qual a velocidade da turbina não é controlada. A estratégia de controle para este caso seria garantir que toda a energia gerada pelo GI seja consumida. Para isto, os autores utilizaram uma carga adicional conectada ao lado CC do conversor, cuja potência é ajustada a partir do valor da tensão sobre o capacitor  $C_{cc}$ , da mesma forma utilizada no sistema descrito anteriormente. Marra (MARRA, 1999) também propõe este mesmo sistema, porém utilizando a carga ajustável no lado CA.

Marra (MARRA, 1999) também propõe um sistema cuja operação é semelhante ao sistema anterior. No entanto, a estratégia de regulação da tensão usada é fazendo uma conexão assíncrona com a rede monofásica da concessionária, utilizando para isso, a tensão  $V_{cc}$  sobre o capacitor  $C_{cc}$ . Desta forma, o sistema permite a operação de co-geração em localidades alimentadas por linhas monofásicas e que dispõem de recursos suficientes para acionar a turbina. O sistema proposto nesta dissertação é similar a este e será detalhado no capítulo 3.

## **2.7 INVERSOR MONOFÁSICO A TIRISTORES ALIMENTADO EM CORRENTE**

A função do inversor é converter um sinal de corrente monopolar da entrada em um sinal de corrente CA em sua saída. Como apresentado anteriormente, este trabalho visa à conexão assíncrona do sistema de geração baseado na MIT com a rede monofásica da

concessionária. Neste caso, o inversor irá converter o sinal de corrente do elo CC do conversor PWM para um sinal CA, e injetá-lo a rede monofásica da concessionária por meio de tiristores SCRs disparados de maneira conveniente, como estratégia de controle da tensão CA gerada pelo GI. Para que a corrente seja injetada na rede, é necessário que haja sincronia entre os sinais. Esta sincronia é garantida pelo circuito integrado TCA780, apresentado na Figura 2.7a.

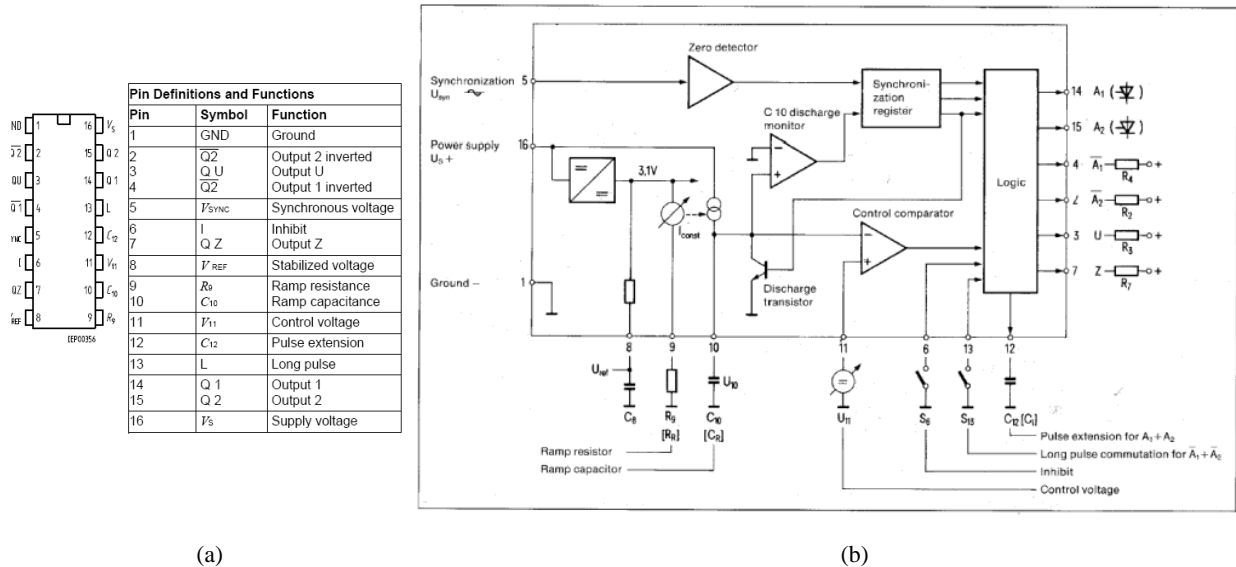


Figura 2.7 - CI TCA 780 para disparo de tiristores (SIEMENS).

O TCA780 é um dispositivo próprio para acionamento de tiristores. Na Figura 2.7b é apresentado o diagrama de blocos do TCA780. A tensão de sincronismo ( $V_{sync}$ ) é aplicada no pino 5. O sincronismo é obtido através de um detector de cruzamento por zero de  $V_{sync}$ , seguido por um registro de sincronismo. A tensão de sincronismo é a tensão monofásica da rede concessionária, e o CI TCA780, por meio do detector de cruzamento fará com que os SCRs que compõem o inversor sejam disparados de maneira conveniente para que o sinal CC de entrada seja convertido em um sinal CA e em sincronia com  $V_{sync}$ .

O inversor implementado utiliza tiristores SCR, conforme mostrado a Figura 2.8.

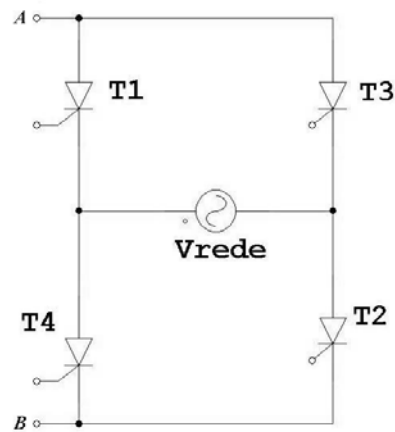


Figura 2.8 - Inversor monofásico de corrente IMC.

Conforme apresenta a Figura 2.8, o inversor é formado por quatro tiristores SCRs, e o sinal de entrada monopolar é aplicado nos pontos A e B. Os pares de tiristores T1 e T2 permanecem em condução enquanto o outro par de tiristores (T3 e T4) permanece em bloqueio, permitindo assim que a corrente seja injetada na rede monofásica da concessionária (Vrede). Porém, quando o par T3 e T4 estão operando em condução, o par T1 e T2 permanecem em bloqueio, permitindo que a corrente seja injeta na rede (Vrede) com o sentido contrário ao do caso anterior, de forma que a rede monofásica da concessionária (Vrede) receba o sinal CA e em sincronia com a mesma. O ajuste da frequência desejada para o sinal de saída do inversor é feito através do controle do disparo dos tiristores, onde cada par deve ser acionado a cada meio ciclo do período do sinal desejado. Porém o tiristor do tipo SCR não permite este tipo de chaveamento da corrente de anodo. Desta forma, uma estratégia deverá ser executada para que o inversor possa converter o sinal de entrada CC em um sinal CA de saída. Esta estratégia será detalhada no capítulo 3.

## 2.8 CONVERSOR ABAIXADOR CC-CC OPERANDO COMO REGULADOR DE FATOR DE POTÊNCIA

O conversor abaixador CC-CC, opera como regulador do fator de potência, com o intuito de manter a forma de onda da corrente enviada para o inversor CC-CA, aproximadamente senoidal retificada e com alto fator de potência, para que a corrente seja injetada na rede monofásica da concessionária (MARRA, POMILIO; 2000).

Todo o sistema é basicamente composto por: um gerador de indução trifásico com rotor tipo gaiola, um banco de capacitores de magnetização, um conversor PWM bidirecional alimentado em tensão, um conversor CC-CC abaixador de tensão (buck) como pré-regulador

de fator de potência e um inversor monofásico a tiristores alimentado em corrente. Sistema semelhante foi proposto por Marra (Marra, 1999; p. 109) onde o inversor PWM opera com frequência constante e mantém estável a frequência da tensão gerada. O mesmo inversor faz também a compensação de potência reativa para a carga CA do sistema, caso esta necessite. Este sistema é apresentado na Figura 2.9.

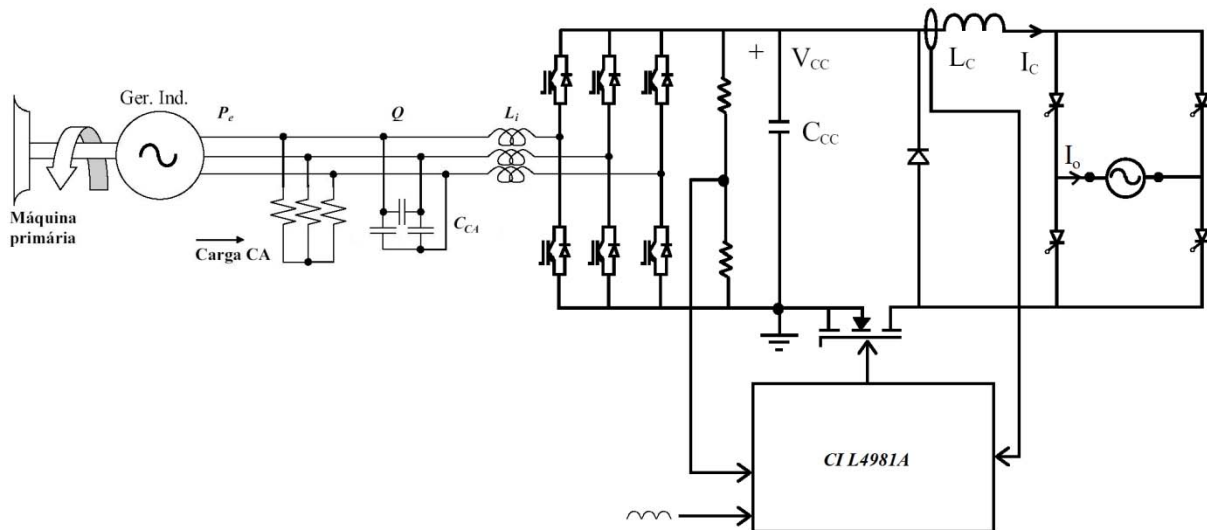


Figura 2.9 – Sistema de Geração

O conversor CC-CC abaixador (buck), é chaveado no modo PWM através do circuito integrado L4981A (SGS-THOMSON,1997), que também é responsável por prover o controle da tensão  $V_{cc}$  sobre o capacitor  $C_{cc}$ , por meio do ajuste de amplitude da corrente  $I_{cc}$ , que é injetada na rede monofásica. A corrente possui ajuste proporcional à tensão  $V_{cc}$ , no entanto, este sistema opera como co-gerador, e a rede monofásica recebe apenas o excedente de energia convertida. Desta forma o controle opera apenas para valores de  $V_{cc}$  acima do valor da tensão de referência. Isto implica que este sistema não será usado como correção de eventuais subtensões.

## 2.9 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Para a simulação do sistema apresentado na Figura 2.9, foi utilizado o software SIMCAD 4.0, destinado a simulações de sistemas elétricos com interface simbólica circuitual.

Assim sendo, a representação do modelo  $\alpha\beta\gamma$  apresentado na Figura 2.2 no software SIMCAD é ilustrada na Figura 2.9.

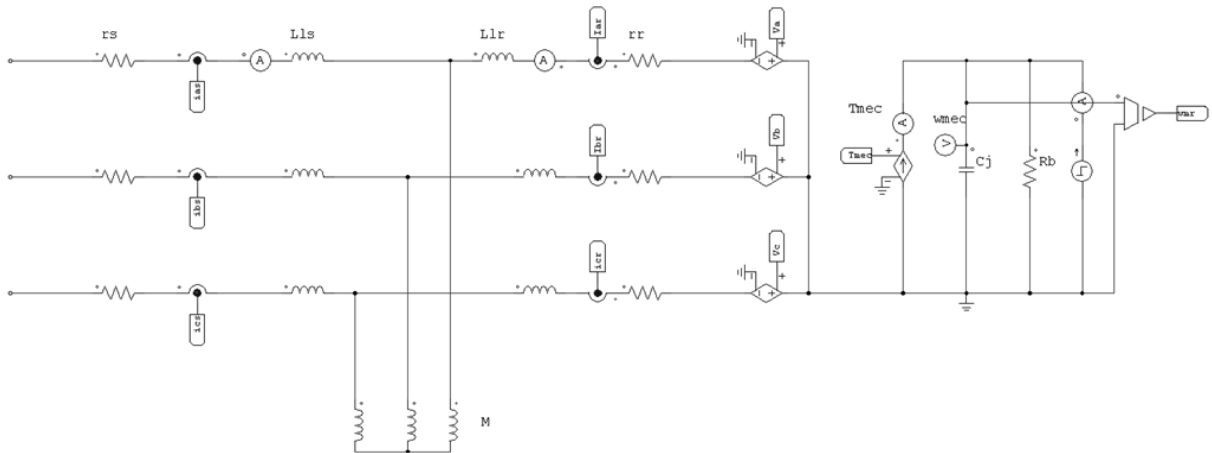


Figura 2.9 - Representação do modelo  $\alpha\beta\gamma$  da MIT.

A MIT usada foi de quatro pólos e  $I_{cv}$ . Todos os seus parâmetros foram obtidos por meio de ensaios. Todos os seus parâmetros se encontram no Anexo A.

A Figura 2.10 apresenta o conversor PWM juntamente com o filtro  $L_f-C_{ca}$ .

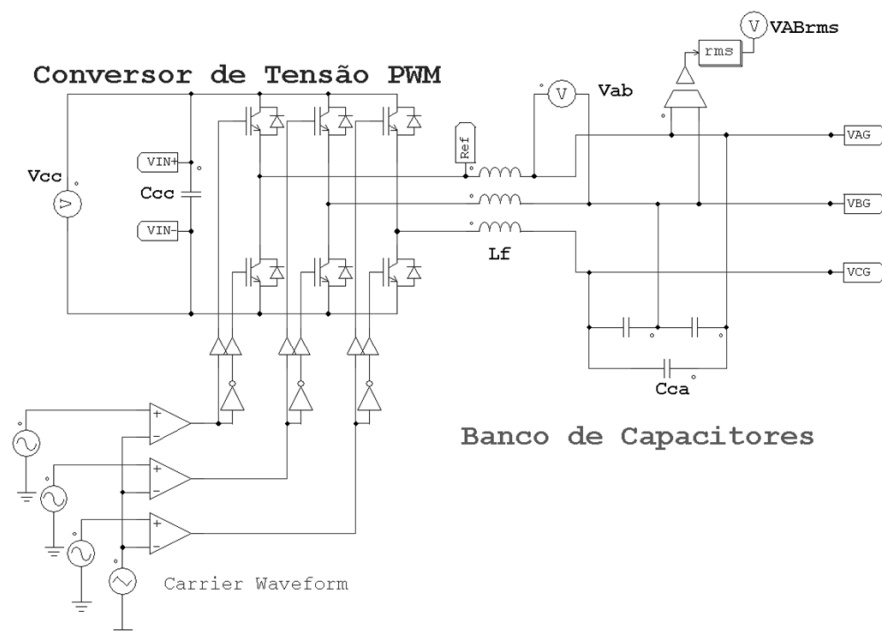


Figura 2.10 - Conversor de tensão PWM e Filtro  $L_f-C_{ca}$ .

Para o conversor de tensão, foram usadas chaves IGBTs, o capacitor  $C_{cc}$  usado possui o valor de  $2200 \mu\text{F}$ , e a tensão sobre ele é medida pelo voltímetro  $V_{cc}$ . Este conversor foi modulado por largura de pulso (PWM) senoidal, de portadora triangular de frequência igual a  $4,2\text{kHz}$ , índice de modulação igual a 1 e de sinal modulante senoidal de  $60\text{Hz}$ . Desta forma, o sinal modulado terá alta frequência. Assim, o filtro  $L_f-C_{ca}$  irá efetuar a demodulação deste sinal.

O inversor de corrente usado para a injeção de corrente na rede monofásica da concessionária utiliza quatro tiristores. O controle da tensão  $V_{cc}$  e da corrente de saída do

inversor  $I_c$ , mostrados na Figura 2.11, representam a ação do CI L4981A, onde o erro da tensão  $V_{cc}$  é somado a tensão de referência  $V_{ref}$ , representado por uma fonte de tensão com valor de 317V. O sinal, ajustado para o valor fixo do elo CC-CC do conversor PWM, é amplificado por um amplificador proporcional – integral (PI).

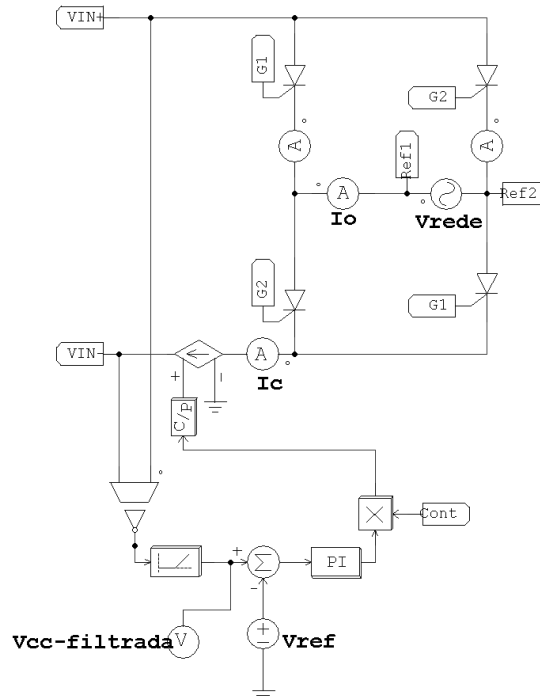


Figura 2.11 - Inversor de tensão e controle de  $V_{cc}$  e da corrente de saída.

Para os tiristores SCRs comutarem, foi necessário um tempo maior de permanência em zero, chamado de “Tempo Morto”. Este tempo morto é introduzido no circuito, multiplicando a saída do PI. O sistema que representa o tempo morto é mostrado na Figura 2.12.

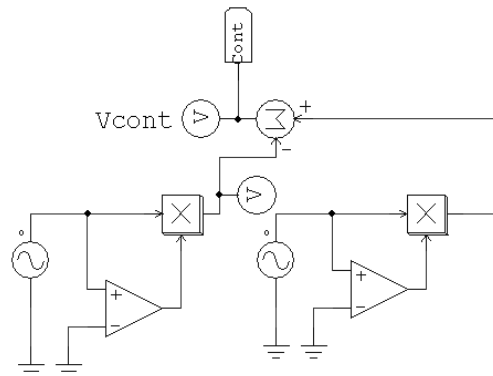


Figura 2.12 - Circuito de tempo morto.

O circuito de disparo dos tiristores utiliza com referência a tensão da rede monofásica, como pode ser visto na Figura 2.13.

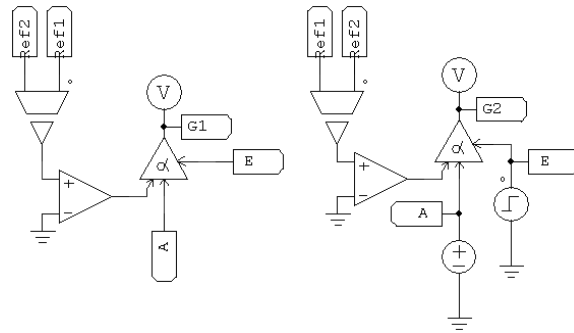


Figura 2.13 - Controle de disparo dos tiristores.

Note que as referências  $Ref_1$  e  $Ref_2$  também podem ser vistas na Figura 2.11.

### 2.9.1 Resultados da simulação com GI sem carga CA.

Para o sistema mostrado na Figura 2.9, foram usados os seguintes valores para os componentes mostrados:  $L_f=5\text{mH}$ ,  $C_{ca}=20\mu\text{F}$  e  $C_{cc}=2,2\text{mF}$ . Com o sistema operando sem carga CA a tensão de linha gerada ( $V_{ab}$ ) é mostrada na Figura 2.14

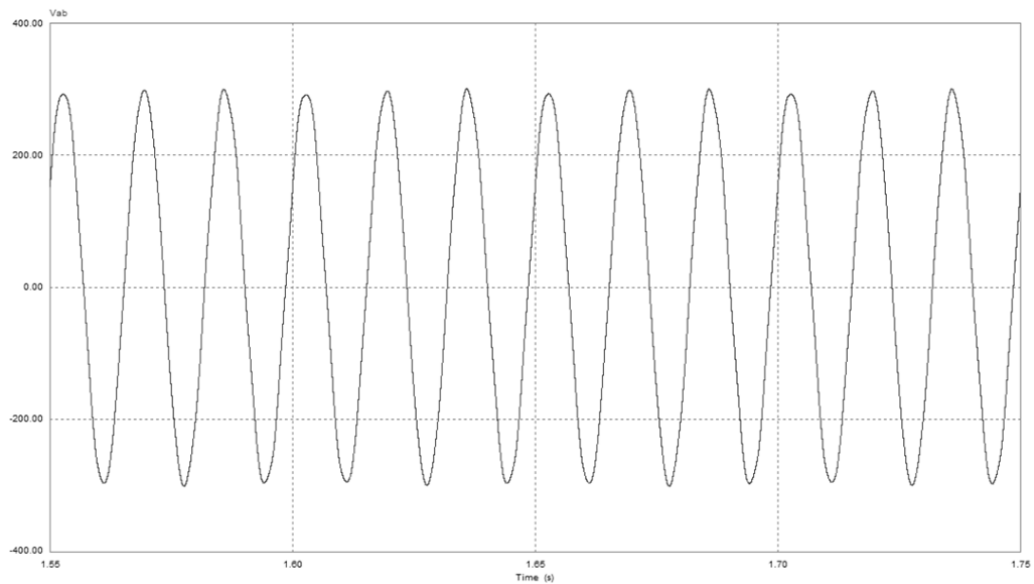


Figura 2.14 - Tensão de linha com gerador operando sem carga CA (Vert: 200V/Div, Horiz: 1s/Div).

Para o sistema operando sem carga CA a tensão  $V_{ab}$  gerada apresentou o valor eficaz de 210V aproximadamente. A distorção harmônica total (DHT) medida para o sistema operando sem carga CA foi de 1,33%.

A Figura 2.15 apresenta a tensão sobre o capacitor CC ( $C_{cc}$ ).

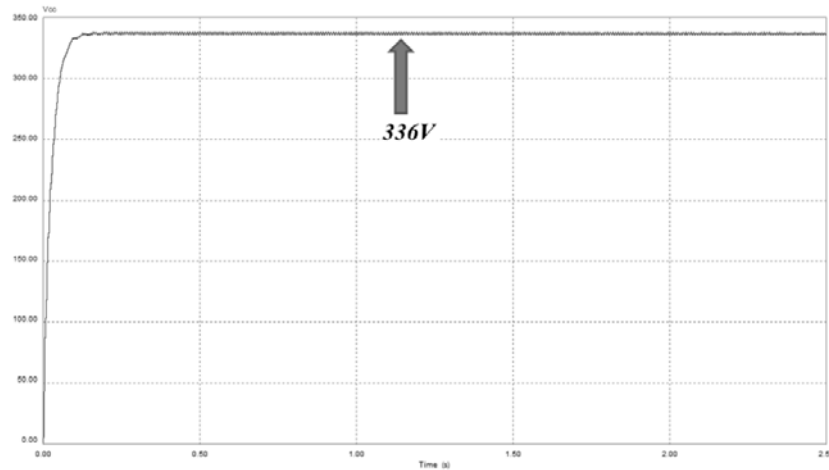


Figura 2.15 - Tensão do capacitor CC (Vert: 50V/Div, Horiz: 0,5s/Div).

O controle da tensão CA gerada pelo GI é garantido por meio do controle da tensão sobre o capacitor  $C_{cc}$  do conversor PWM. Nota-se pela Figura 2.15 que o controle atua de forma a manter constante a tensão CC. Para esta simulação, o valor ajustado para a tensão CC pelo controle PI foi de 336V com o GI sem carga CA.

### 2.9.2 – Resultados de simulação com degrau único de carga resistiva.

Para esta simulação, foi utilizada uma carga de 187W, aproximadamente 0,25pu, aplicada em  $t=3s$ . A Figura 2.16 apresenta o aspecto geral da forma de onda da tensão  $V_{ab}$  gerada, e a Figura 2.17 apresenta mais detalhadamente a tensão gerada após a aplicação da carga e 0,25pu.

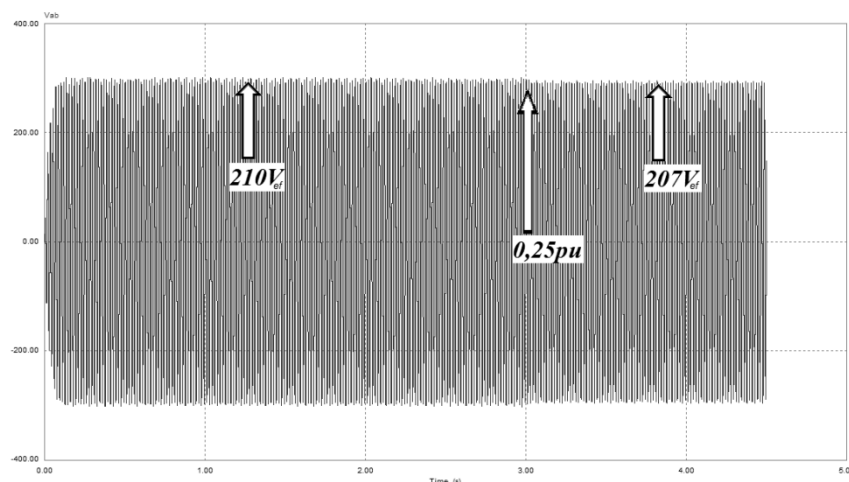


Figura 2.16 - Aspecto geral da tensão  $V_{ab}$  gerada (Vert: 200V/Div, Horiz: 1s/Div).

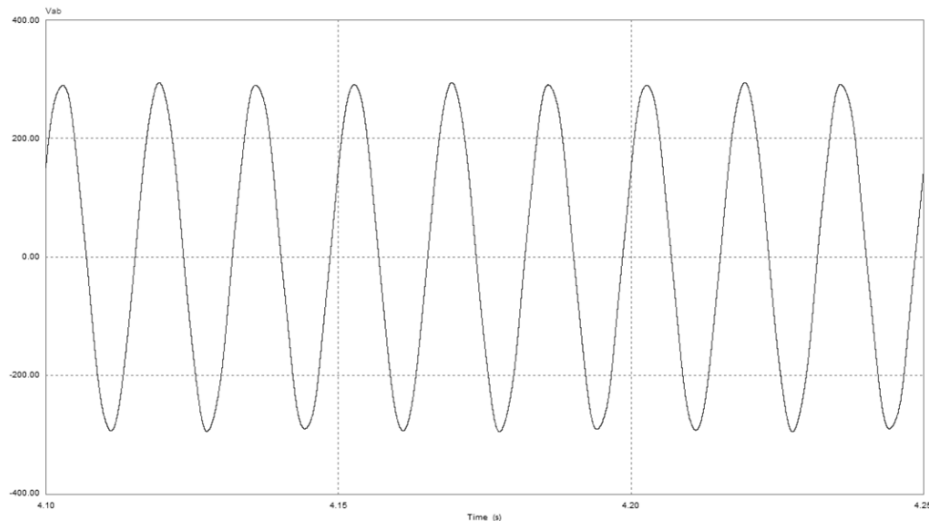


Figura 2.17 – Forma de onda da tensão gerada após aplicação da carga de 0,25pu (Vert: 50V/Div, Horiz: 0,05s/Div).

A queda da tensão  $V_{ab}$  após aplicação da carga de 0,25pu é devida a ação do controle PI, que se ajustou a um novo ponto de operação. A variação da tensão gerada foi de 1,4%. A DHT após a aplicação da carga foi de 1,1%.

A Figura 2.18 apresenta o comportamento da tensão sobre o capacitor  $C_{cc}$ .

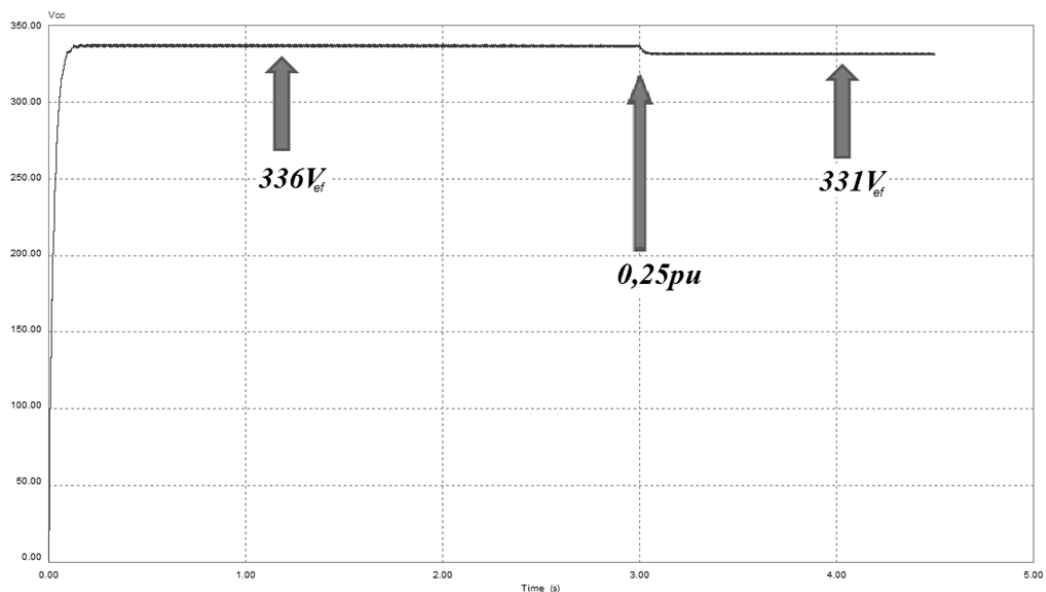


Figura 2.18 - Tensão sobre o capacitor  $C_{cc}$  (Vert: 50V/Div, Horiz: 1s/Div).

A queda da tensão CC também foi de 1,4% aproximadamente, pelo mesmo motivo da queda na tensão CA gerada.

A Figura 2.19 apresenta a corrente injetada a rede monofásica como estratégia de controle do equilíbrio dinâmico da potência do sistema.

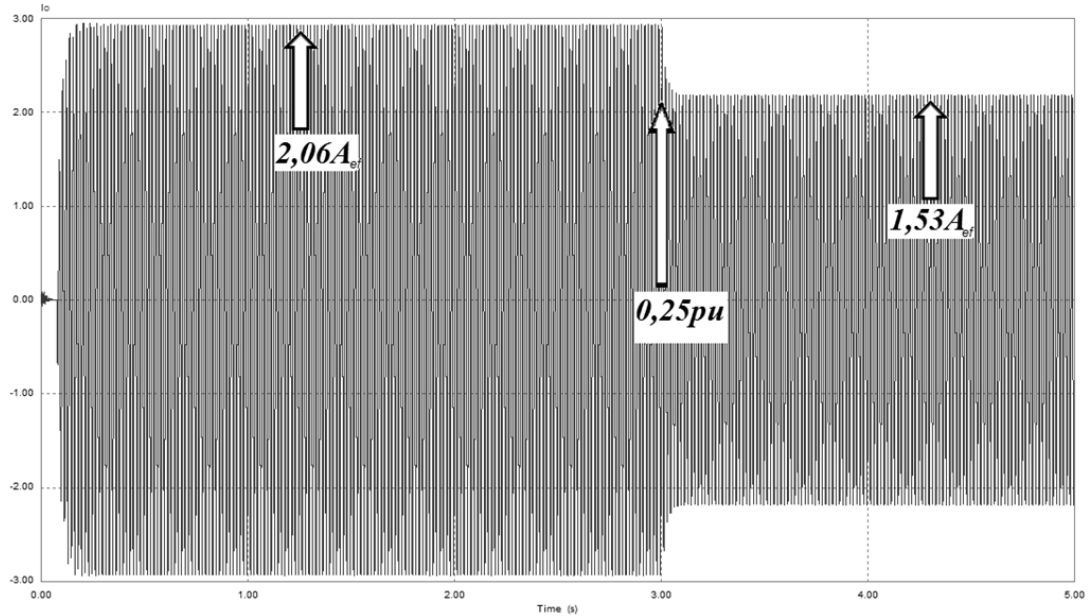


Figura 2.19 - Corrente injetada a rede monofásica (Vert: 1A/Div, Horiz: 1 s/Div).

Observa-se na Figura 2.19 que a corrente injetada a rede monofásica apresenta uma queda ao se aplicar a carga de 0,25pu, pois cabe ao inversor monofásico de corrente injetar na rede monofásica somente o excedente de energia. Como a carga passou a consumir parte da energia gerada, conseqüentemente o inversor necessitou enviar uma menor quantidade de energia a rede monofásica.

A Figura 2.20 apresenta corrente injetada e a tensão da rede monofásica no instante em que a carga de 0,25pu foi aplicada aos terminais do GI.

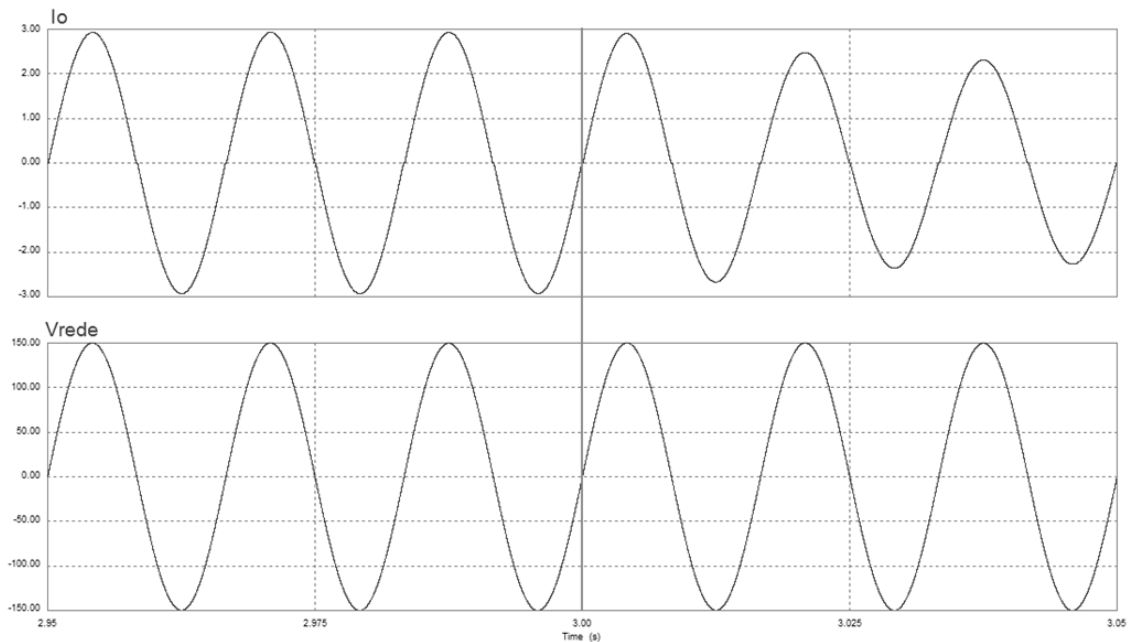


Figura 2.20 - Corrente injetada ( $I_o$ ) a rede monofásica ( $V_{rede}$ ).

Observa-se que corrente injetada e a tensão da rede monofásica estão em sincronia, mesmo quando aplicada a carga ao GI e há uma queda na amplitude de  $I_o$ .

### 2.9.3 – Resultados da simulação com degrau duplo de carga resistiva.

Para esta simulação foram usadas duas cargas, uma de 0,25pu e outra de 0,40pu aproximadamente, aplicadas em  $t=3s$  e  $t=5s$  respectivamente. Ambas as cargas são puramente resistivas e equilibradas.

A Figura 2.21 apresenta os valores eficazes da tensão de linha gerada pelo GI durante a aplicação das cargas de 0,25pu e 0,40pu.

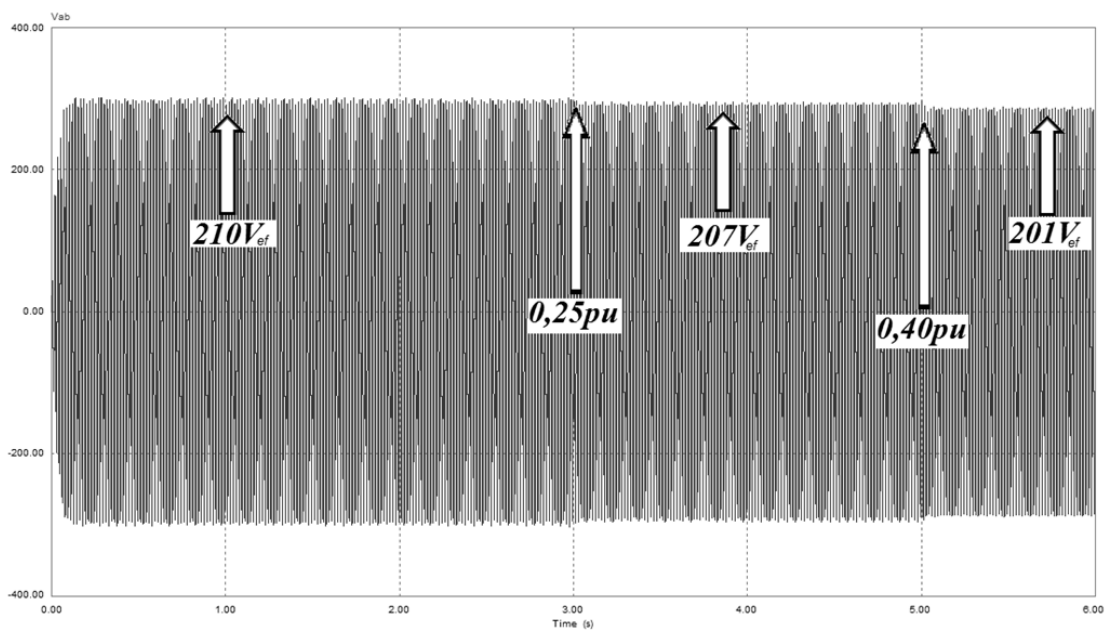


Figura 2.21 - Tensão  $V_{ab}$  após aplicação em degrau de cargas de 0,25pu e 0,4pu (Vert: 200V/Div, Horiz: 1s/Div).

Observa-se que após a aplicação da carga de 0,40pu, a tensão gerada apresentou uma queda na amplitude, comportamento semelhante ao apresentado durante a aplicação da carga de 0,25pu, pelo mesmo motivo já explicado anteriormente. Com as duas cargas sendo alimentadas pelo GI, totalizando 0,65pu, a queda no valor eficaz da tensão gerada foi de 4,2% aproximadamente.

A Figura 2.22 apresenta o comportamento da tensão  $V_{cc}$  sobre o capacitor  $C_{cc}$  durante a aplicação das cargas.

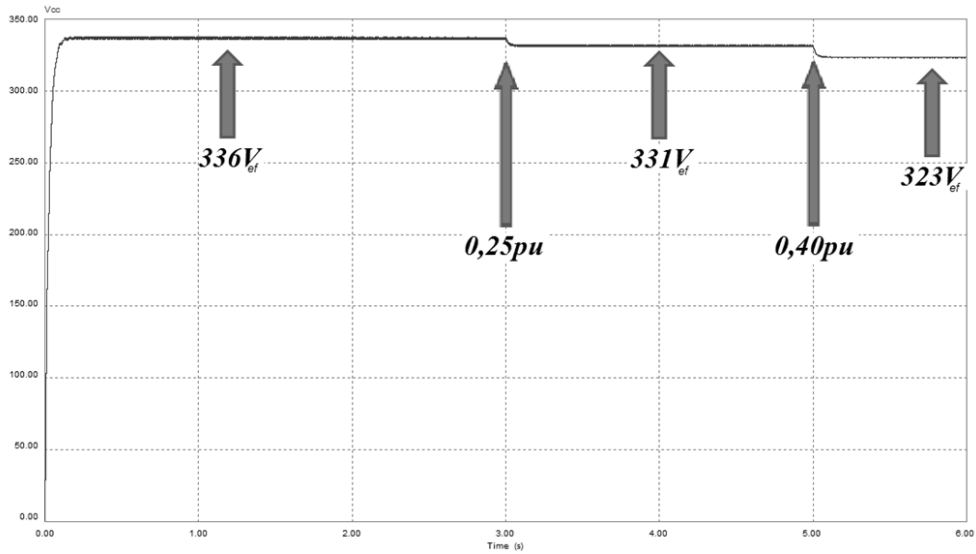


Figura 2.22 - Tensão  $V_{cc}$  durante a aplicação em degrau das cargas de 0,25pu e 0,40pu (Vert: 50V/Div, Horiz: 1s/Div).

Na Figura 2.22 nota-se novamente o mesmo comportamento do sistema de geração apresentado anteriormente. O controle PI se ajusta a outro valor de  $V_{cc}$  no intuito de manter o equilíbrio dinâmico da máquina de indução.

A Figura 2.23 apresenta a forma de onda da tensão gerada mais detalhadamente, após aplicadas as cargas de 0,25pu e 0,40pu.

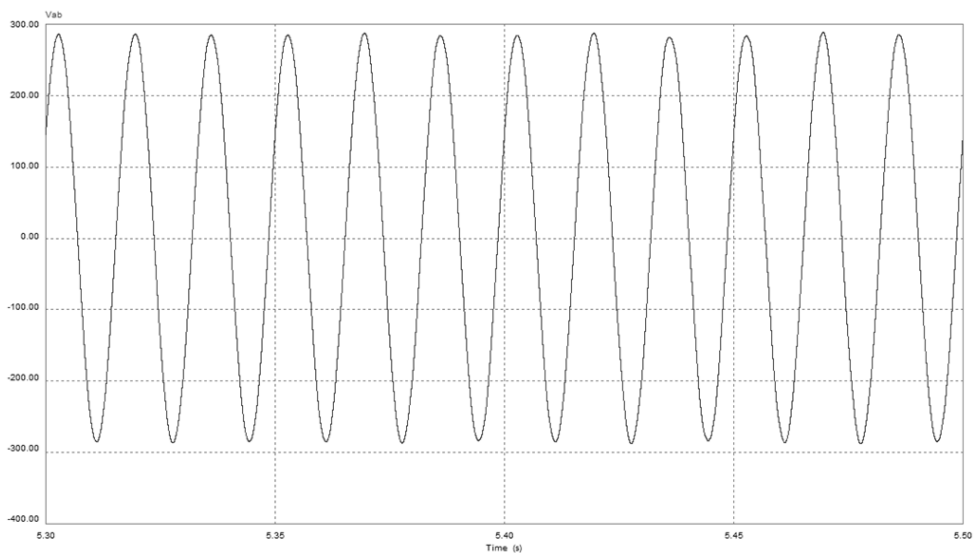


Figura 2.23 - Tensão  $V_{ab}$  em detalhe após aplicadas as cargas de 0,25pu e 0,40pu (Vert: 100V/Div, Horiz: 0,05s/Div).

Observa-se que a tensão apresenta uma forma de onda senoidal em 60Hz.

O DHT medido após a aplicação das cargas foi de 0,81%.

A Figura 2.24 apresenta o comportamento da corrente  $I_o$  durante a aplicação das cargas de 0,25pu e 0,40pu, somando ao final uma carga de 0,65pu.

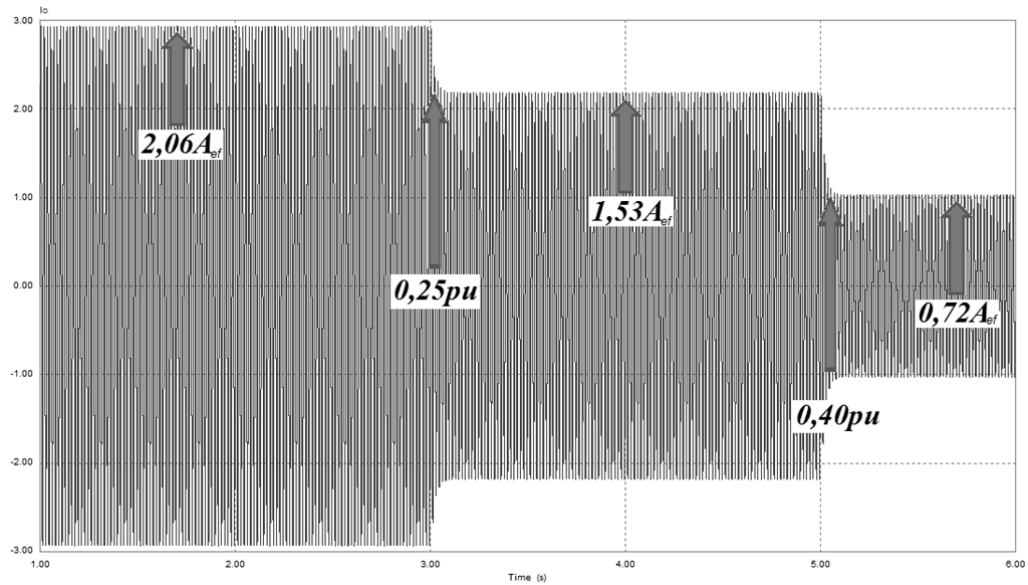


Figura 2.24 - Corrente  $I_o$  após durante aplicação das cargas de 0,25pu e 0,40pu (Vert: 1A/Div, Horiz: 1s/Div).

Na Figura 2.24 observa-se que corrente injetada a rede monofásica diminui proporcionalmente ao acréscimo de carga aos terminais do GI.

#### 2.9.4 – Resultados da simulação de aplicação de carga desequilibrada.

A simulação de aplicação de carga puramente resistiva desequilibrada foi realizada para se observar o comportamento do sistema proposto sob este tipo de situação.

Para esta simulação foi usada uma carga trifásica desequilibrada de aproximadamente 0,25pu aplicada em  $t=2s$ . A Figura 2.25 apresenta a forma de onda da tensão  $V_{ab}$  e o comportamento do valor eficaz de  $V_{ab}$  ( $V_{abRMS}$ ).

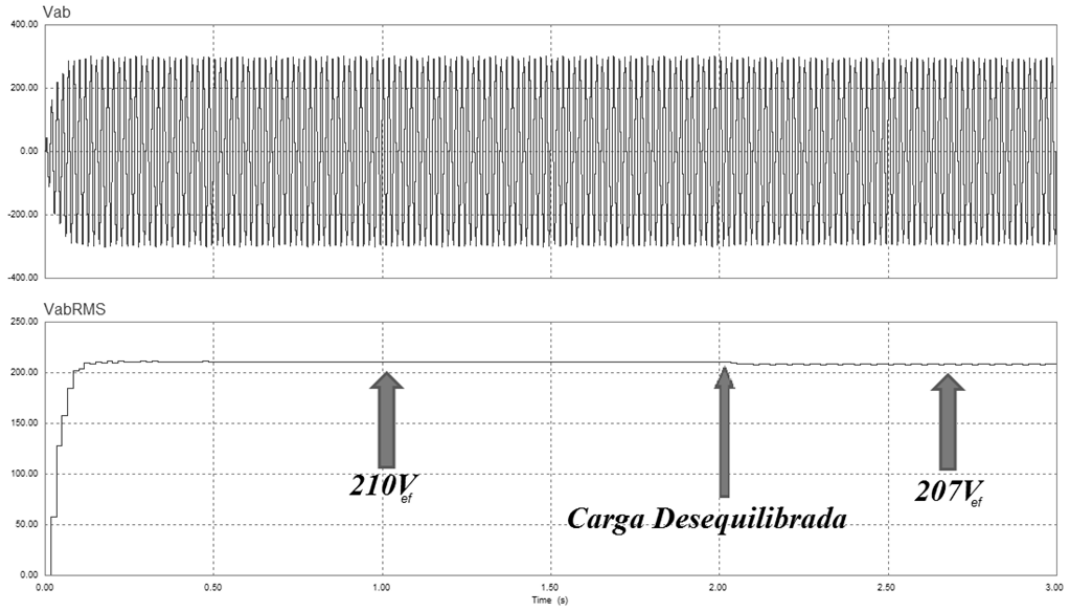


Figura 2.25 - Forma de onda da tensão gerada ( $V_{ab}$ ), e comportamento do valor eficaz da tensão gerada ( $V_{abRMS}$ ).

A queda no valor eficaz da tensão gerada foi de 1,42% aproximadamente, e o DHT medido após a aplicação da carga foi de 4,5%.

A Figura 2.26 apresenta o comportamento da tensão  $V_{cc}$  ao se aplicar a carga desequilibrada aos terminais do *GI*.

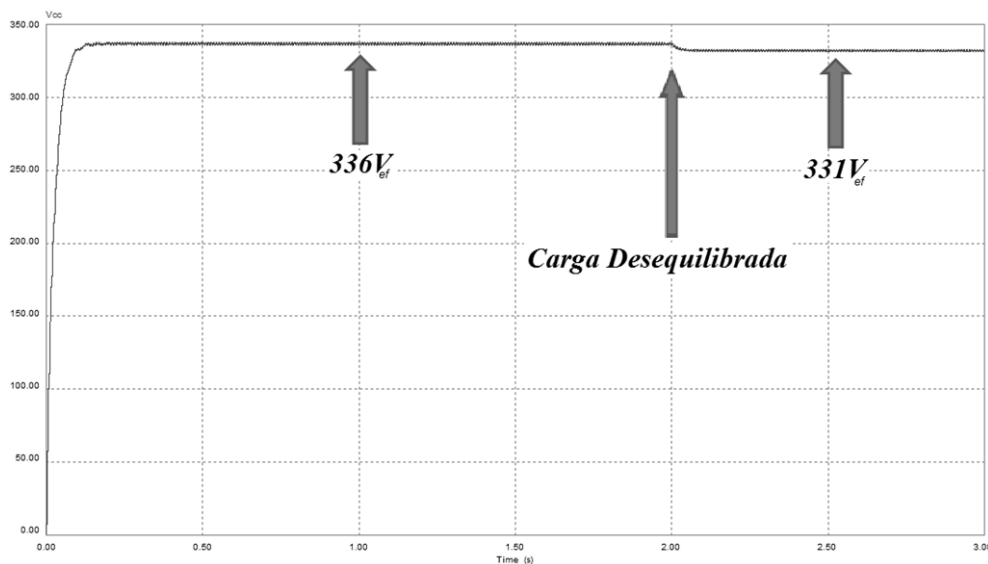


Figura 2.26 -  $V_{cc}$  durante aplicação de carga desequilibrada (Vert: 50V/Div, Horiz: 0,5s/Div).

Conforme mostra a Figura 2.26, o controle PI ajustou outro ponto de operação após a perturbação causada pela aplicação da carga desequilibrada.

A Figura 2.27 apresenta a corrente injetada a rede monofásica antes e depois de aplicada a carga desequilibrada aos terminais do *GI*.

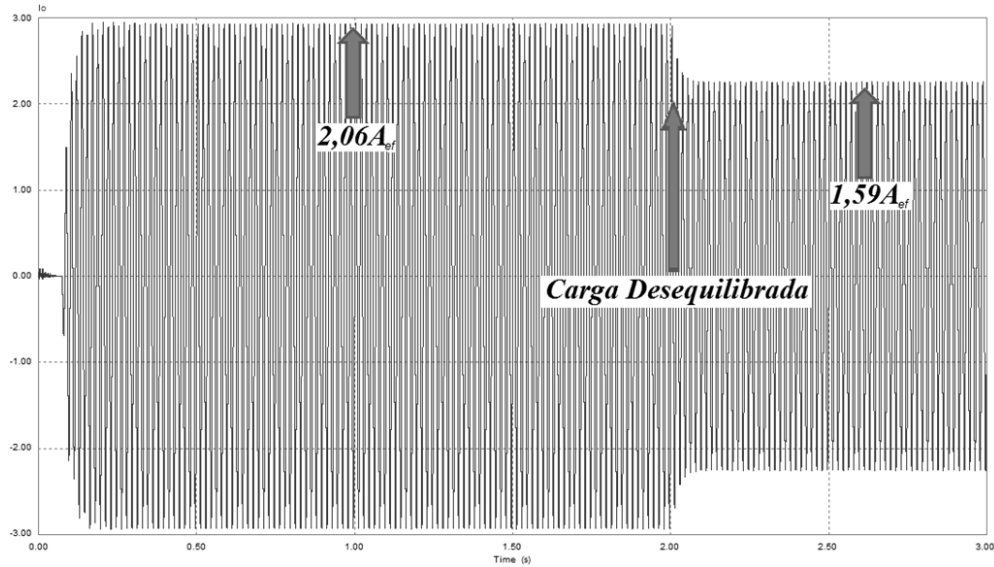


Figura 2.27 - Corrente injetada a rede monofásica (Vert: 1A/Div, Horiz: 0,5s/Div).

Para a manutenção do equilíbrio dinâmico do sistema, houve uma redução da amplitude da corrente injetada a rede monofásica  $I_o$ .

A Figura 2.28 apresenta a forma de onda da corrente injetada a rede monofásica de forma mais detalhada.

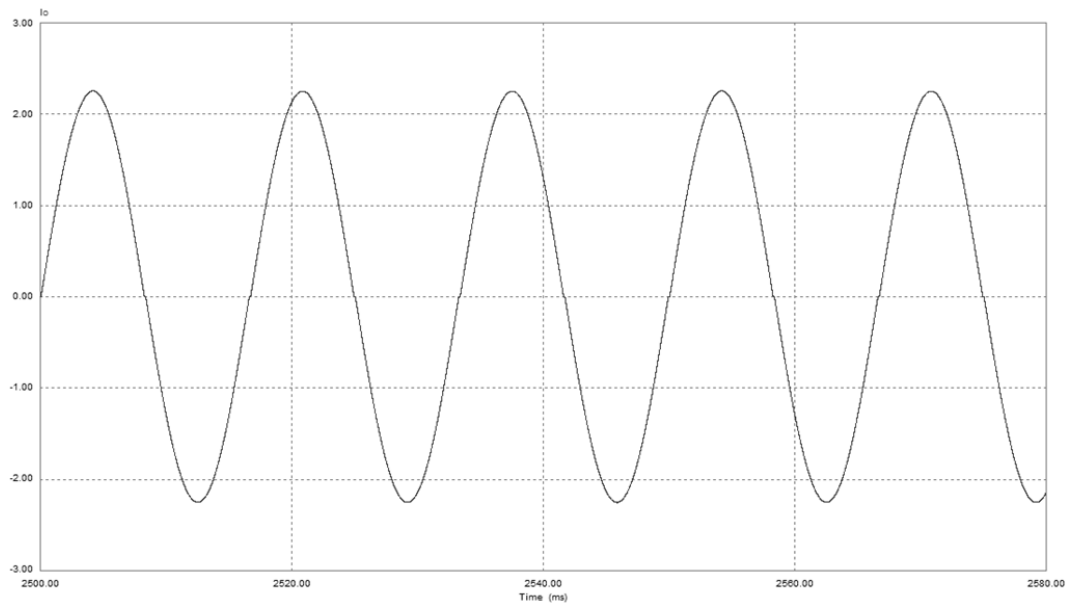


Figura 2.28 - Corrente injetada a rede monofásica após aplicação da carga desequilibrada aos terminais do GI (Vert: 1A/Div, Horiz: 20ms/Div).

Observa-se que a carga desequilibrada conectada aos terminais do GI não causa interferência na frequência da corrente injetada a rede monofásica.

### 2.9.5 – Resultados de simulação com degrau de carga indutiva.

Para a simulação com degrau de carga indutiva equilibrada, foram usados indutores de 500mH ligados em  $\Delta$ . A Figura 2.29 apresenta a forma de onda da tensão ( $V_{ab}$ ), assim como o comportamento do valor eficaz da gerada pelo GI ao se aplicar a carga indutiva em seus terminais.

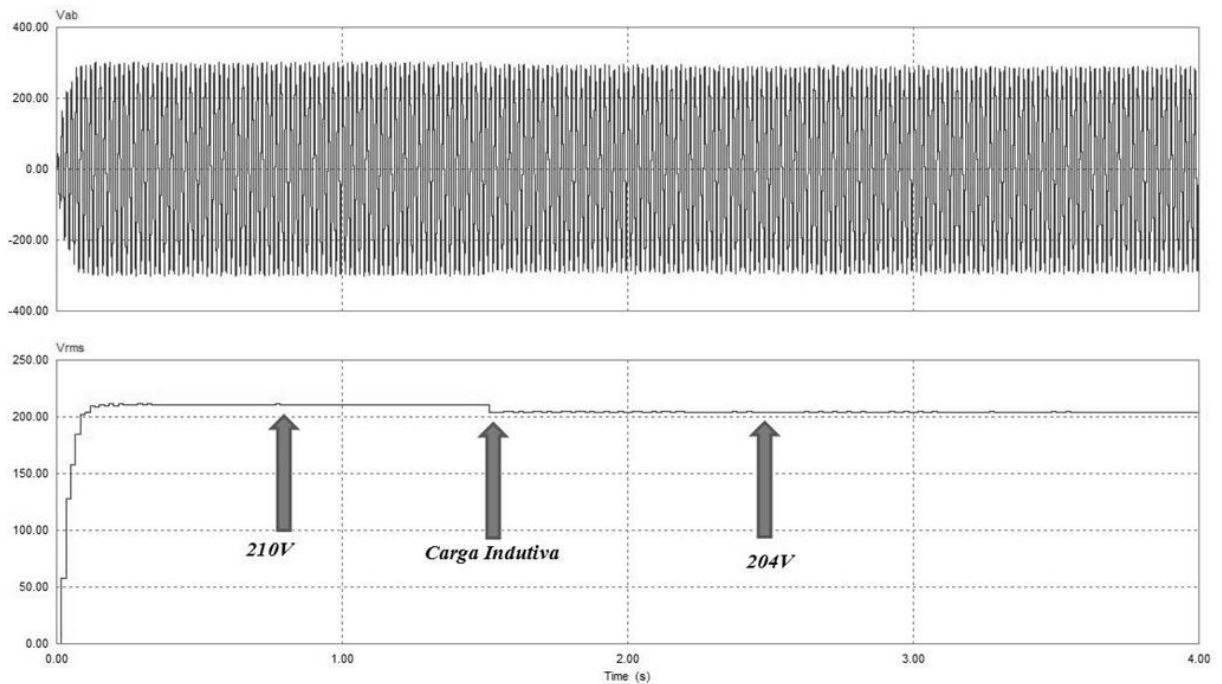


Figura 2.29 - Forma de onda da tensão gerada pelo GI ( $V_{ab}$ ), e o comportamento de seu valor eficaz ao se aplicar carga indutiva.

A queda no valor eficaz da tensão gerada após a aplicação da carga indutiva foi de 2,85% aproximadamente, e o DHT medido após aplicada a carga indutiva foi de 6,3%.

Para a análise do comportamento da corrente injetada a rede monofásica, foi usado um tempo de simulação de 20 segundos. A Figura 2.30 apresenta o comportamento da forma de onda da corrente injetada ( $I_o$ ), assim como o seu valor eficaz ao longo do período analisado.

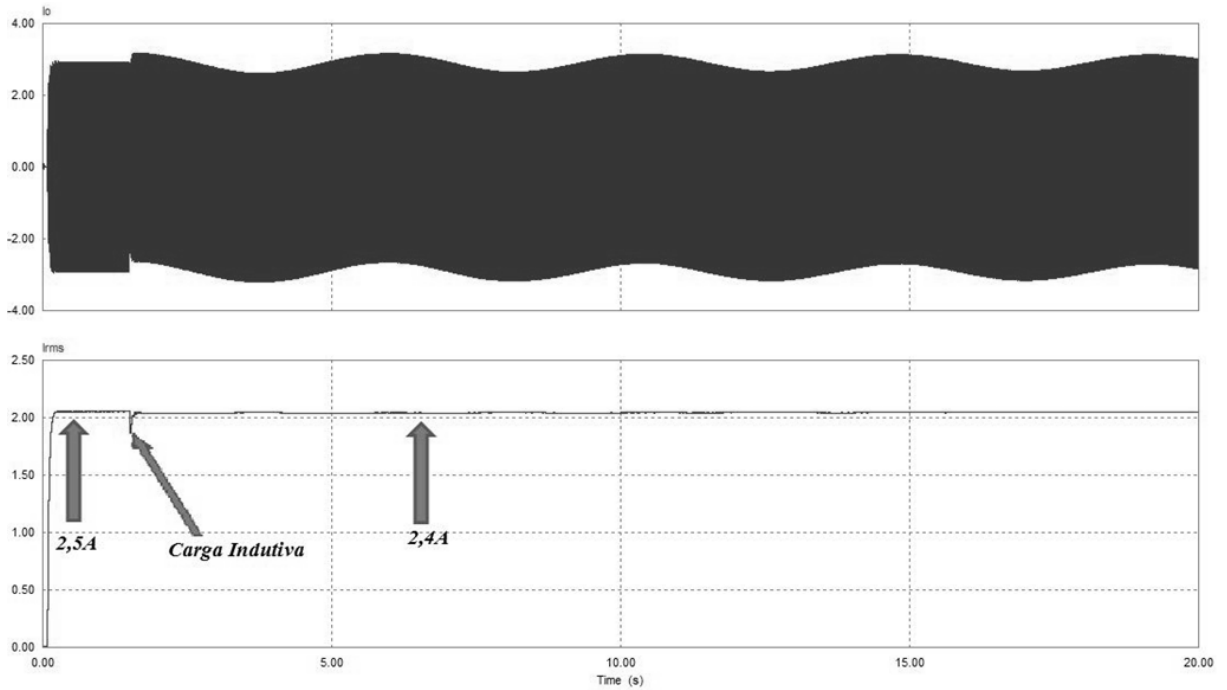


Figura 2.30 - Corrente injetada a rede monofásica ( $I_o$ ), e seu valor eficaz ( $I_{\text{orms}}$ ) para carga indutiva.

Com a Figura 2.30 observa-se que a carga puramente indutiva aplicada aos terminais do GI causa uma perturbação na corrente injetada a rede monofásica, mas que a mesma não apresenta mudança considerável no valor eficaz da corrente injetada.

A Figura 2.31 apresenta o comportamento da tensão  $V_{cc}$ .

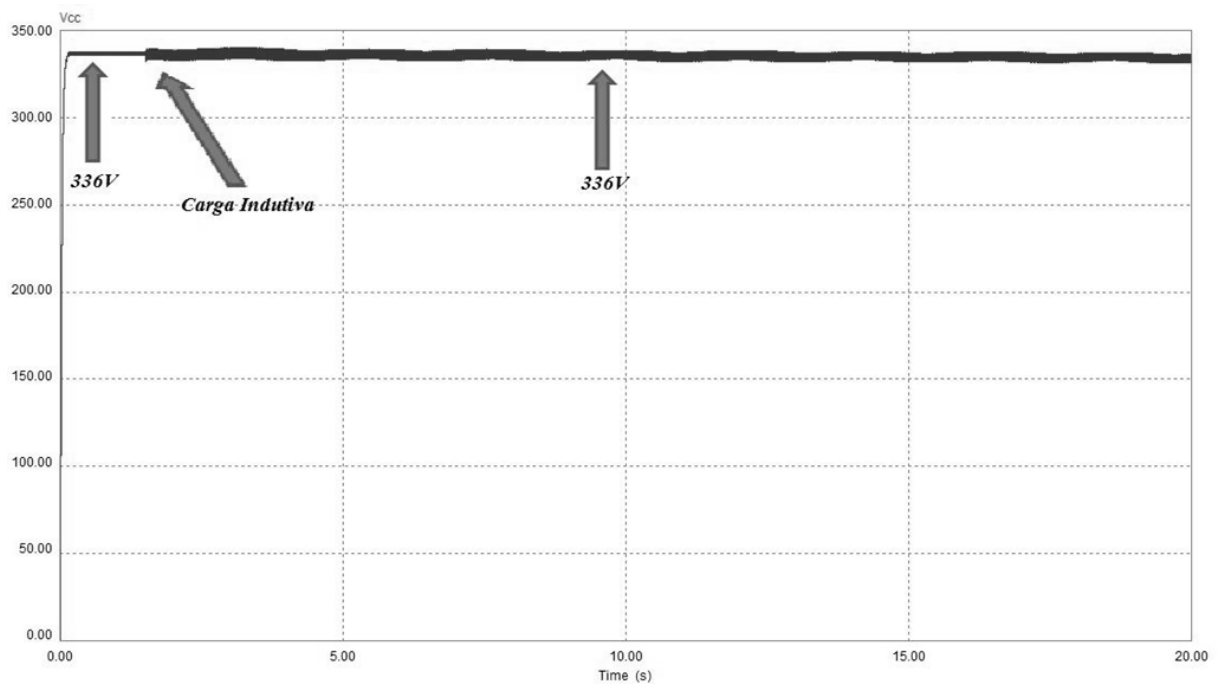


Figura 2.31 - Tensão sobre capacitor  $C_{cc}$ .

Observa-se que a tensão sobre o capacitor  $C_{cc}$  apresenta o valor constante, antes e depois de aplicada a carga indutiva.

### 2.9.6 – Resultado da simulação do GI alimentando um retificador trifásico de onda completa com carga puramente resistiva.

Também foi realizada a simulação do GI alimentando um retificador trifásico de onda completa para se observar a tensão nominal do gerador na presença de transições bruscas na corrente de linha no lado CA do retificador. O retificador alimenta uma carga puramente resistiva de aproximadamente 0,4pu que é aplicada em  $t=2s$ .

A Figura 2.32 apresenta o valor eficaz da tensão gerada pelo GI ( $V_{ABrms}$ ) e a forma de onda da tensão gerada ( $V_{ab}$ ).

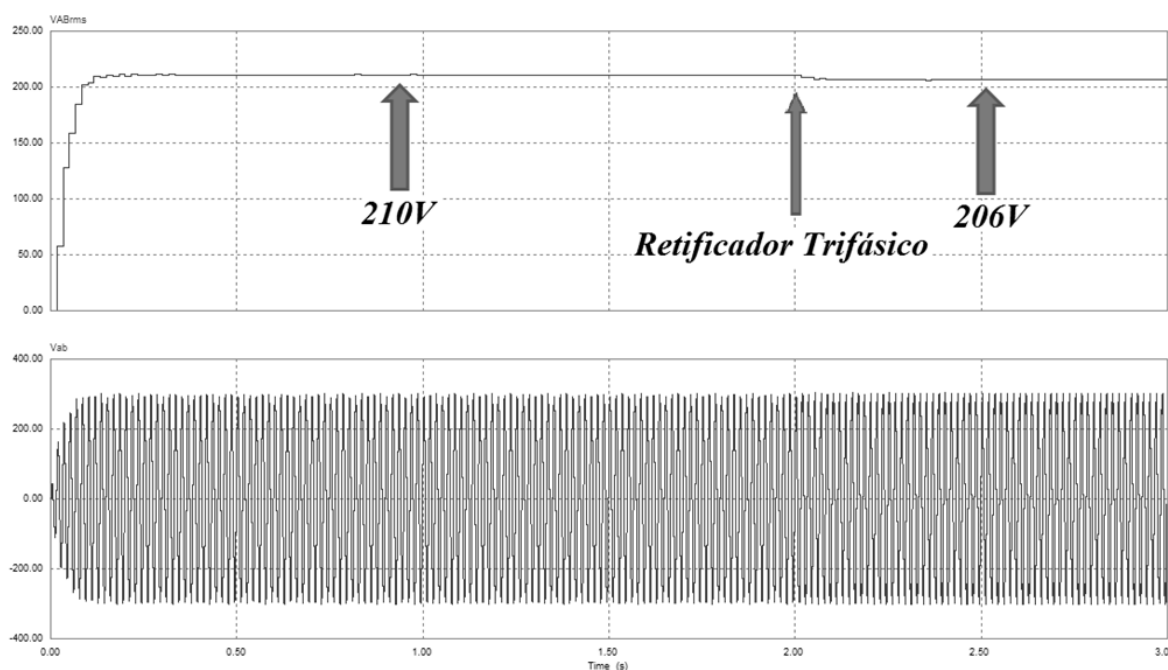


Figura 2.32 - Valor eficaz da tensão gerada ( $V_{ABrms}$ ), e sua forma de onda ( $V_{ab}$ ).

A queda no valor eficaz da tensão gerada após a aplicação do retificador trifásico aos terminais do gerador foi de 1,9% aproximadamente, e o DHT medido após a aplicação da carga foi de 14,1%.

O comportamento da tensão sobre o capacitor  $C_{cc}$  é apresentada na Figura 2.33.

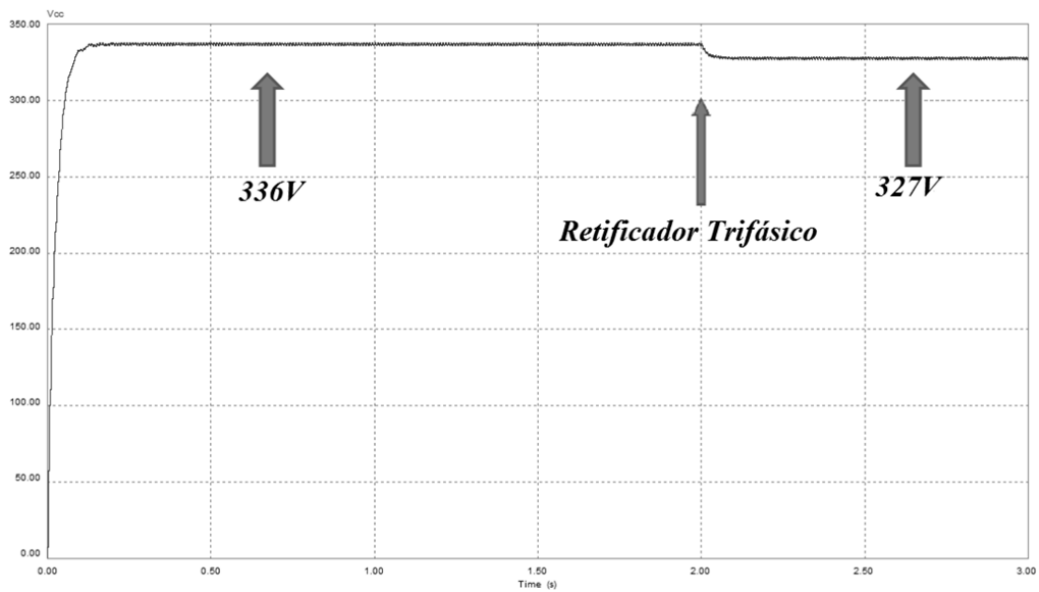


Figura 2.33 - Tensão  $V_{cc}$  ao aplicar retificador trifásico aos terminais do GI (Vert: 50V/Div, Horiz: 0,5s/Div).

Assim como nos outros testes com aplicação de carga resistiva, com o retificador trifásico de onda completa, o controle também se ajustou para outro valor de tensão no intuito de manter o equilíbrio dinâmico da máquina.

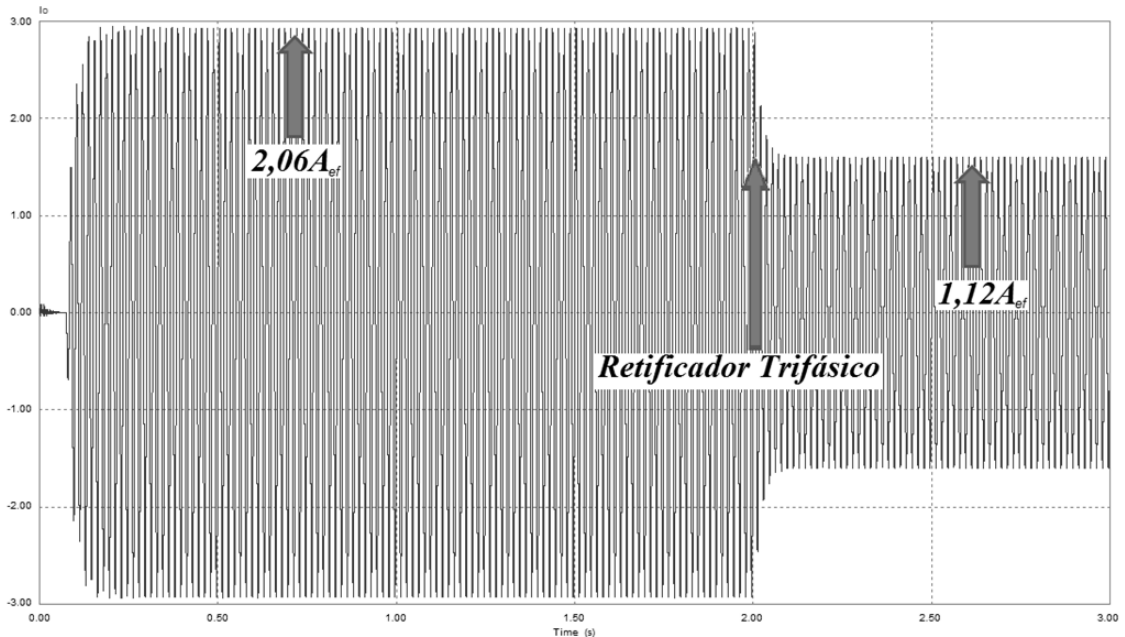


Figura 2.34 - Corrente injetada a rede monofásica (Vert: 1A/Div, Horiz: 0,5s/Div).

Observa-se que a corrente injetada a rede monofásica também apresentou o comportamento semelhante ao das outras cargas resistivas aplicadas ao GI.

A tabela 1 apresenta as variações das tensões eficaz  $V_{ab}$ ,  $V_{cc}$  e da corrente  $I_0$ .

TABELA 2.1 - Valores percentuais das tensões e correntes eficazes para cargas aplicadas.

Carga aplicada	$V_{ab}$	$V_{cc}$	$I_o$
Degrau carga resistiva $0,25pu$	1,42%	1,48%	25,72%
Degrau duplo carga resistiva $0,25pu$ e $0,4pu$	4,28%	3,86%	65,04%
Degrau carga desequilibrada $0,25pu$	1,42%	1,48%	22,81%
Degrau carga indutiva $500mH$	2,85%	0%	4%
Retificador trifásico	1,90%	2,67%	45,63%

## 2.10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, foram apresentados aspectos sobre o comportamento dinâmico da máquina de indução. O modelo  $\alpha\beta\gamma$  se mostrou satisfatório para implementação em softwares que utilizam interface circuital. Sua representação se mostrou satisfatória com a utilização do programa SIMCAD 4.0.

O programa SIMCAD 4.0 mostrou-se uma ferramenta adequada para a simulação do modelo do sistema.

Uma das vantagens deste programa é a sua capacidade de desacoplar fenômenos de alta e baixa frequência na simulação numérica. Isto permite que eventos de ordem de dezenas de ms sejam observados sob o chaveamento de dezenas de  $\mu s$ , sem que o tempo de simulação seja excessivo. Seu método de solução numérica é trapezoidal implícito, o que propicia boa estabilidade numérica.

A utilização da injeção de corrente como estratégia de controle para se mater o equilíbrio dinâmico do sistema e mostra-se uma alternativa viável para o controle do balanço energético do sistema proposto..

O inversor de corrente CC-CA, utilizando tiristores SCRs apresentou comportamento satisfatório nas simulações. As simulações indicaram que o tempo morto dos tiristores da ponte inversora de corrente deve ser adequadamente ajustado de forma a permitir que as correntes dos tiristores sejam reduzidas abaixo do valor de manutenção, levando à comutação satisfatória.

No próximo capítulo serão abordados os aspectos construtivos do sistema e sua implementação em DSP (Processador Digital de Sinais). Serão apresentados também os resultados experimentais do modelo do sistema, obtidos através da implementação em laboratório.

## **3 – IMPLEMENTAÇÃO EXPERIMENTAL DO SISTEMA**

---

O sistema descrito nos capítulos anteriores foi implementado experimentalmente e os seus resultados serão apresentados a seguir.

O sistema proposto não possui carga CA ajustável como estratégia para se estabelecer o equilíbrio energético no sistema, também não há reguladores de velocidade para este fim. Desta forma, a energia acumulada em  $C_{cc}$ , proveniente do balanço entre a potência gerada e a potência consumida pela carga CA, é enviada à rede monofásica da concessionária através do conversor CC-CC abaixador e do inversor monofásico de corrente IMC (MARRA; POMILIO 1998).

A seguir serão descritas as partes que compõem o sistema implementado e os resultados obtidos.

### **3.1 Inversor Monofásico de Corrente**

O IMC implementado é baseado no tiristor do tipo SCR. Foram utilizados quatro tiristores em ponte, paralelos dois a dois.

O circuito de controle empregado para a geração dos pulsos de disparos dos SCRs foi baseado no CI TCA 780. Como este CI possui uma limitação de corrente elétrica para o pulso de disparo dos SCRs, foi empregado um amplificador Darlington, visto que os SCRs utilizados (40TPS12) necessitam de correntes elétricas de disparo superiores às fornecidas pelo TCA 780. O amplificador Darlington eleva a corrente de saída do CI de 12mA para 2A utilizando um transistor Darlington BD241C, conforme a Figura 3.1.



pulso fornecido pelas saídas 14 e 15 do TCA780, e a Figura 3.2.b mostra o trem de pulsos fornecidos pelo temporizador.

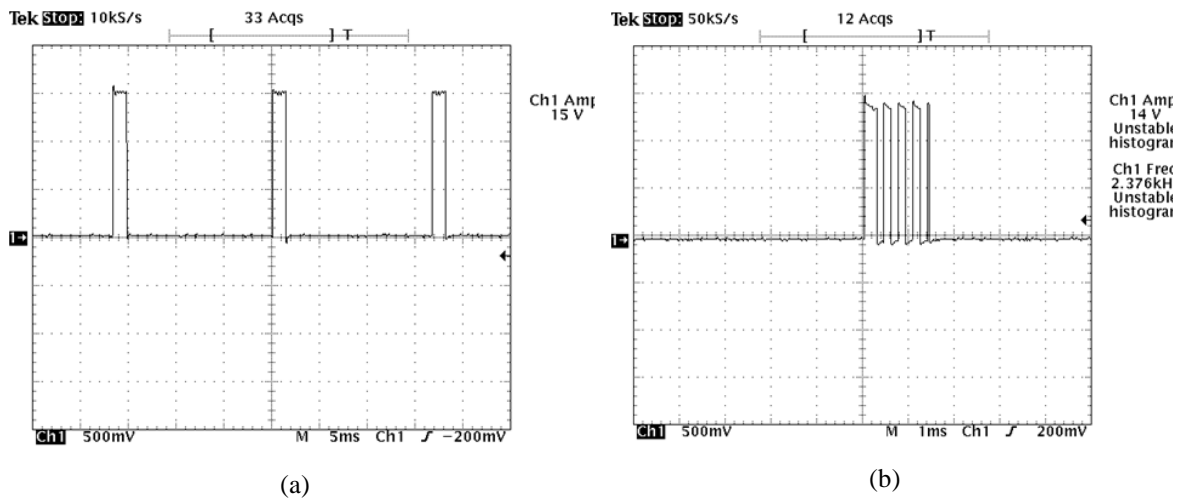


Figura 3.2 - Pulso de disparo dos tiristores. (a)saída dos pinos 14 e 15 do TCA780. (b)saída do temporizador NE555.

Como se pode observar na Figura 3.2.b, o trem de pulsos fornecido ao transformador de pulso para o disparo dos tiristores possui uma maior duração, para que se torne possível o disparo. O ângulo mínimo de disparo encontrado foi de sete graus aproximadamente ( $320\mu\text{s}$ ). Este ângulo foi ajustado para haja um tempo mínimo de permanência em zero para que os tiristores possam ser comutados. A Figura 3.3 mostra o detalhe do ângulo de disparo na saída do IMC.

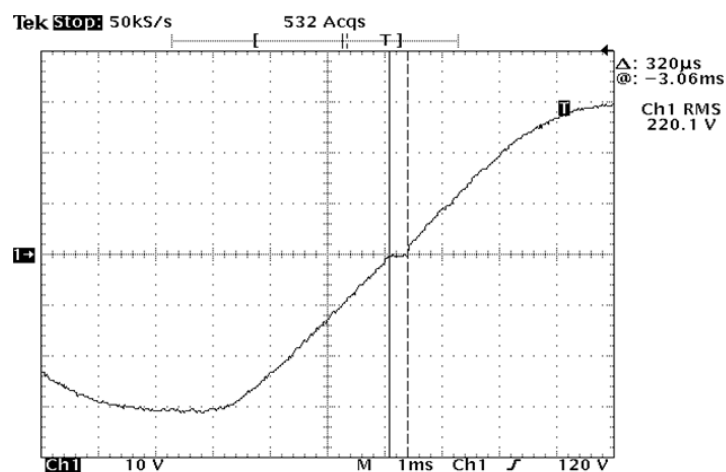


Figura 3.3 - Ângulo de disparo na saída do IMC.

A Figura 3.4 mostra a forma de onda da tensão na saída do IMC aplicada em uma carga resistiva de  $127\Omega$ .

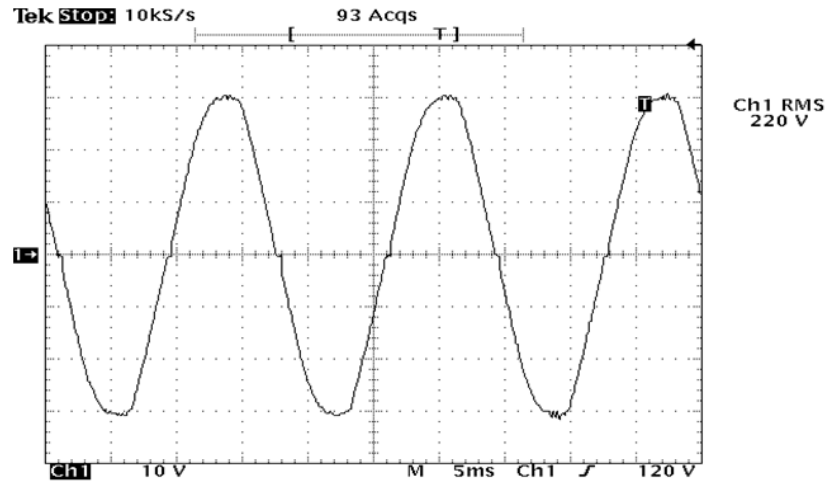


Figura 3.4 - Forma de onda na saída do IMC.

### 3.2 Conversor Abaixador CC-CC

O conversor CC-CC abaixador é usado para modular a corrente  $I_c$ , de modo a tornar sua forma de onda do tipo senoidal retificada. Este conversor é chaveado no modo PWM, e também opera como regulador do fator de potência da corrente injetada na rede monofásica. O chaveamento no modo PWM do conversor CC-CC abaixador é realizado pelo CI L4981A no intuito de controlar a tensão  $V_{cc}$  no capacitor  $C_{cc}$  por meio do ajuste da amplitude da corrente  $I_{cc}$  injetada na rede monofásica. Esta ação de controle ocorrerá somente para valores de  $V_{cc}$  acima do valor de referência da tensão.

A Figura 3.5 apresenta o diagrama de blocos funcional com os principais dispositivos que compõem o sistema de geração proposto.

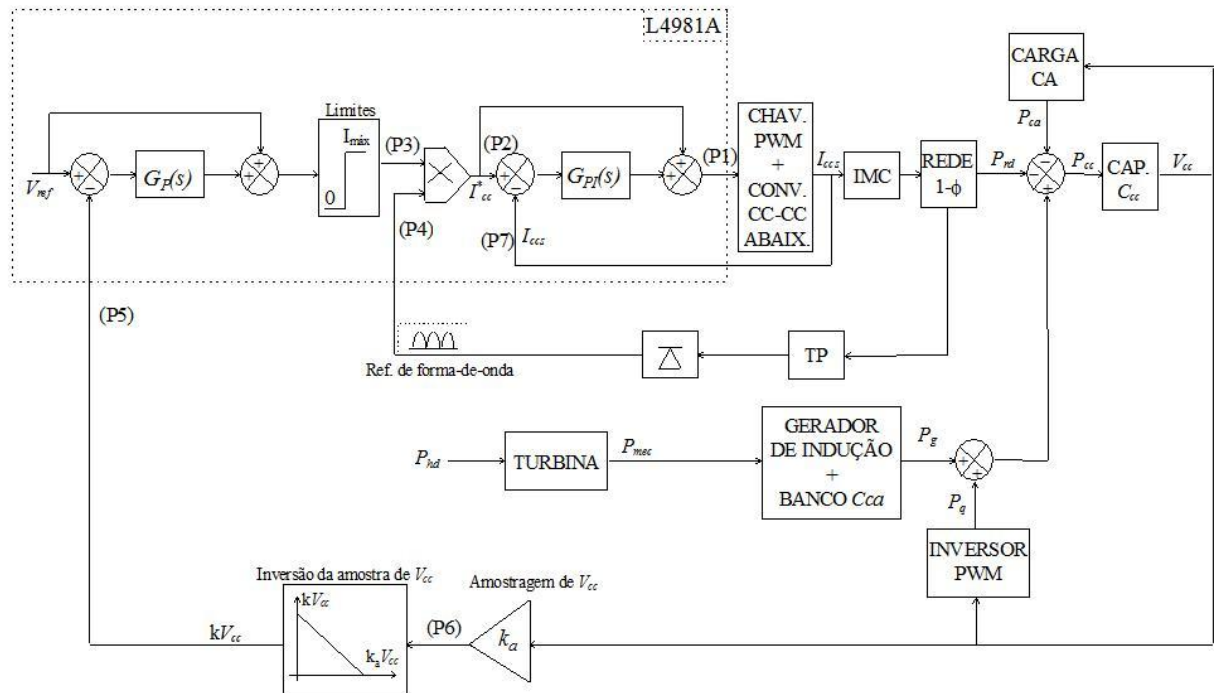


Figura 3.5 - Diagrama de blocos funcional do sistema proposto (MARRA, 1999).

Observa-se na Figura 3.5 que é feita uma amostragem da tensão  $V_{cc}$ , ( $k_a V_{cc}$ ), e após esta amostragem, o sinal é invertido, pois o CI L4981A foi originalmente projetado para operar como controlador em circuitos pré-reguladores de fator de potência em conversores CC-CC elevadores de tensão (Boost). Logo, o erro ( $V_{ref} - kV_{cc}$ ) se resulta da amplificação da diferença entre a referência de tensão ( $V_{ref}$ , sinal interno do CI L4981A) e o sinal invertido ( $kV_{cc}$ ) da amostra da tensão  $V_{cc}$ .

O chaveamento PWM e o conversor CC-CC abaixador são ambos controlados pelo CI L4981A, conforme mostra a Figura 3.5. O sinal de referência entregue ao comparador PWM é comparado com a portadora triangular interna ao CI. O resultado desta comparação determina o sinal de comando da chave do conversor CC-CC abaixador. A frequência de oscilação ( $f_{osc}$ ) da portadora triangular é definida no CI por meio de um capacitor conectado ao pino 18 ( $C_{18}$ ) e um resistor ao pino 17 ( $R_{17}$ ). O valor da frequência é definido por (3.1).

$$f_{osc} = \frac{2,44}{R_{17} \cdot C_{18}} \quad (3.1)$$

Para este trabalho, a frequência de oscilação da portadora triangular foi ajustado em 25kHz, cujos os valor aplicados ao CI L4981A foram de  $R_{17}=44,36k\Omega$  e  $C_{18}=2,2\mu F$ .

O sinal modulante da corrente para o comparador PWM (P1) é controlado pelo CI L4981A por meio de um amplificador PI, onde as entradas são os pinos 8 e 9, e a saída o pino 5, conforme mostra a Figura 3.6.

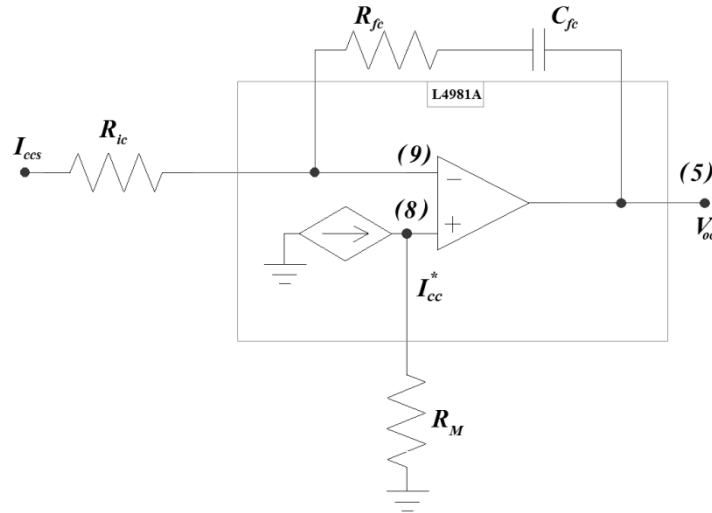


Figura 3.6 Amplificador PI implementado no CI L4981A.

O amplificador integral apresentado na Figura 3.6 eleva a ordem da malha do controle proporcional para estabelecer um valor médio para o erro de corrente ao longo de um período de chaveamento do conversor CC-CC abaixador de tensão.

Conforme a Figura 3.6, o ganho PI usa como referência um sinal interno de corrente. Como o compensador usa sinais de tensão, é necessário converter a corrente de referência em tensão. Para isso foi usada a resistência elétrica  $R_M$  de  $3,3k\Omega$ , conforme especificações do fabricante. Do mesmo modo a referência de corrente ( $I_{ccs}$ ) também é um sinal de tensão. Para isso, empregou-se um sensor de corrente por efeito Hall.

O sinal modulante do controle PWM é definido pela saída do amplificador de corrente, conforme descrito em (3.2), onde  $G_{P1}$  é o ganho do amplificador de corrente.

$$V_{oc}(S) = I_{cc}^*(S) + G_{P1}(S) \cdot Erroi(S) \quad (3.2)$$

Sendo:

$$G_{P1}(S) = k_P + \frac{k_I}{S} \quad (3.3)$$

$$Erroi(s) = I_{cc}^*(S) - I_{ccs}(S) \quad (3.4)$$

$$k_P = \frac{R_{fc}}{R_{ic}} \quad (3.5)$$

$$k_I = \frac{1}{R_{ic} \cdot C_{fc}} \quad (3.6)$$

Desta forma, a frequência angular do zero introduzido pelo controle PI é dada por:

$$\omega_Z = \frac{k_I}{k_P} = \frac{1}{R_{fc} \cdot C_{fc}} \quad (3.7)$$

Para se garantir uma amplificação das componentes de corrente com frequência do valor de chaveamento, a frequência angular do zero de controle PI,  $\omega_Z$ , deve ser escolhida abaixo da frequência de chaveamento do conversor CC-CC ( $f_{cc}$ ). No entanto,  $\omega_Z$  deve ser escolhida no mínimo uma década acima da frequência fundamental da corrente do conversor CC-CC, a qual é duas vezes a frequência fundamental da rede monofásica da concessionária ( $f_F$ ). Com isto, garante-se que o ganho para as componentes do erro da corrente  $I_{cc}$  em  $2f_F$  será pelo menos dez vezes o ganho das componentes em  $f_{cc}$ , conforme (3.8).

$$20(2\pi f_F) \leq \omega_Z < 2\pi f_{cc} \quad (3.8)$$

Para este projeto, usou-se um ganho proporcional de  $K_P=5,4$ , e um ganho integral de  $K_I=67 \times 10^3$ . Desta forma, a frequência do zero de controle PI foi  $\omega_Z=12350 \text{rd/s}$  ou  $f_Z=1,96 \text{kHz}$ . Para isso, foram usados os seguintes valores para os resistores e capacitores no amplificador PI:  $R_{ic}=15 \text{k}\Omega$ ,  $R_{fc}=81 \text{k}\Omega$  e  $C_{fc}=1 \text{nF}$ .

A Figura 3.7 mostra a corrente de saída do conversor abaixador CC-CC.

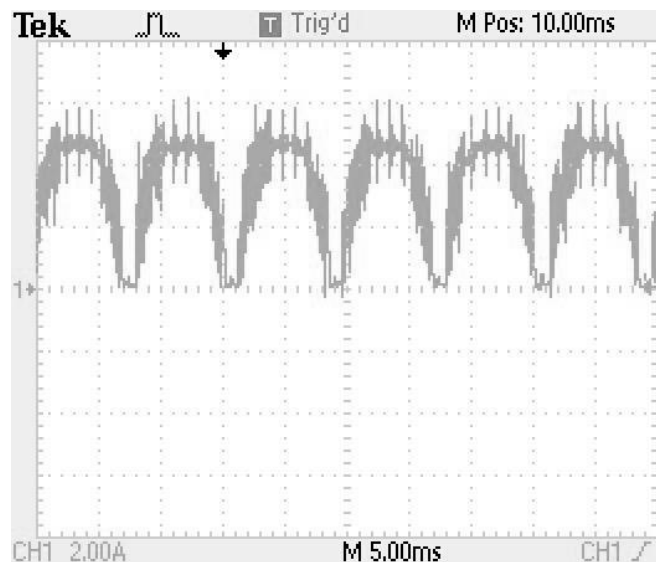


Figura 3.7 - Corrente de saída do conversor CC-CC abaixador.

A forma de onda apresentada na Figura 3.7 foi recolhida do sistema de geração em operação, como o GI operando sem carga CA, ou seja, toda a energia acumulada no capacitor  $C_{cc}$  estava sendo enviada a rede monofásica da concessionária.

### 3.3 - Implementação no DSP (Controle de conversor PWM)

O conversor PWM foi ajustado para operar em frequência fundamental constante em 60Hz, fazendo com que se tenha uma referência de frequência fixa e mantendo a frequência síncrona constante no gerador.

Desta forma, o controle da frequência de chaveamento do conversor PWM foi implantada digitalmente em um processador digital de sinais. Neste caso foi usado o kit de desenvolvimento ADSP 21992 EZ-KIT Lite (Analog Devices, 2002), que foi desenvolvido para aplicação em acionamento de máquinas elétricas.

### 3.4 – Resultados Experimentais

Visando a investigação do controle da tensão gerada sob velocidade variável, foi realizado o ensaio da variação da velocidade de acionamento da máquina primária, onde o comportamento da tensão de linha nos terminais do GI e a corrente injetada a rede monofásica foram analisados.

Inicialmente, foram realizados testes sem carga CA, e toda energia gerada era enviada à rede monofásica por meio do inversor monofásico de corrente (IMC).

Conforme apresentado na Figura 2.1 (no capítulo anterior), para o conjugado mecânico ( $T_{mec}$ ) negativo e sentido de rotação ( $\omega_r$ ) positivo, a máquina passa a receber a potência mecânica e convertê-la em potência elétrica, onde parte desta é empregada para suprir perdas eletromagnéticas e o restante é consumido pelo circuito conectado aos terminais do estator. À medida que o escorregamento ( $s$ ) aumenta, o conjugado mecânico, em módulo, passa a ser maior. Conseqüentemente, a potência mecânica convertida em potencia elétrica é maior.

Com a intenção de se averiguar a não-dependência da velocidade de rotação do rotor do GI com o valor eficaz da tensão gerada, a máquina foi acionada com uma velocidade inicial de 1850rpm, e depois esta velocidade foi sendo decrescida até 1810rpm. Com o gerador operando sem carga aplicada aos seus terminais, a energia gerada se acumula no capacitor  $C_{cc}$ . Desta forma, para o acionamento a 1850rpm uma maior quantidade de energia tenderá a se acumular no capacitor  $C_{cc}$ , obrigando o controle a injetar uma corrente elétrica na rede monofásica com uma amplitude maior do que a corrente injetada quando a máquina for

acionada com velocidade de 1810rpm, já que neste último caso a quantidade de energia convertida pelo GI será menor.

A Figura 3.8 apresenta a tensão gerada pelo gerador de indução e a corrente injetada a rede monofásica da concessionária para diferentes velocidades de acionamento da máquina primária.

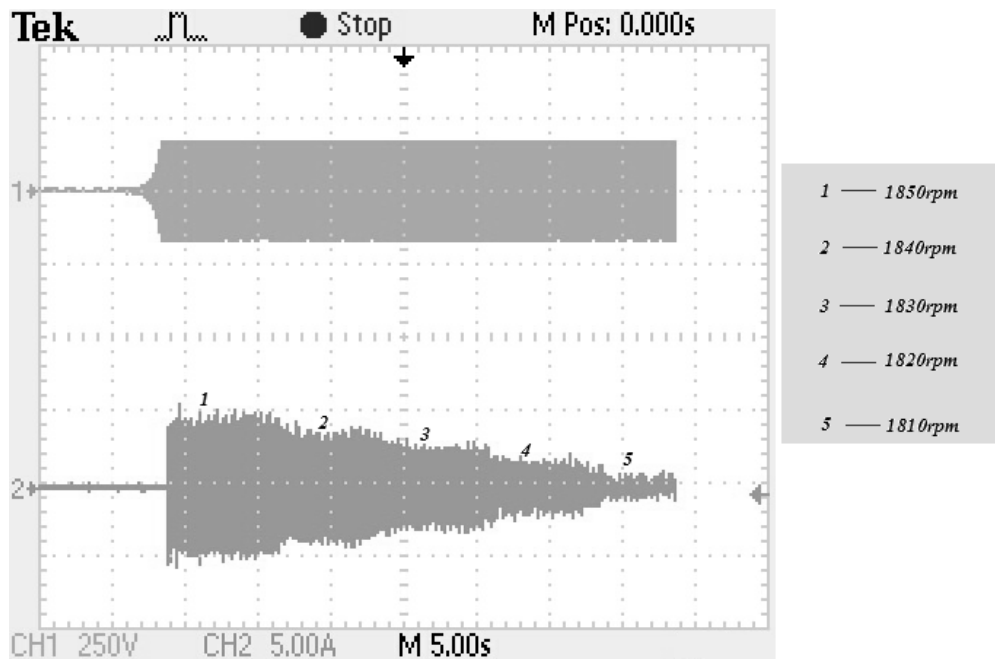


Figura 3.8 - (1) Tensão gerada; (2) Corrente elétrica injetada a rede monofásica.

Observa-se na Figura 3.8 a redução na amplitude da corrente injetada a rede monofásica com a redução da velocidade de acionamento da máquina primária. No entanto, a amplitude da tensão de linha medida nos terminais do GI não sofre variações significativas.

A Figura 3.8 mostra também que a capacidade do GI de alimentar cargas maiores depende da velocidade. A manutenção da tensão nos terminais é garantida apenas para cargas que consumam energia menor ou igual à energia convertida pelo gerador. Se for aplicada uma carga que consuma uma quantidade de energia maior que a gerada, o gerador irá se desmagnetizar, diminuindo assim o valor eficaz da tensão gerada até o colapso total.

Tendo como base a Figura 3.9, a velocidade de acionamento da máquina primária foi mantida em 1853rpm para todas as experiências realizadas. A representação abc das fases usada na simulação passa a ser 123, devido a forma de representação do analisador de energia utilizado.

a) *GI operando sem carga CA*

O sistema foi montado conforme Figura 2.9. A tensão de linha gerada com o GI operando sem carga CA é mostrada na Figura 3.9.

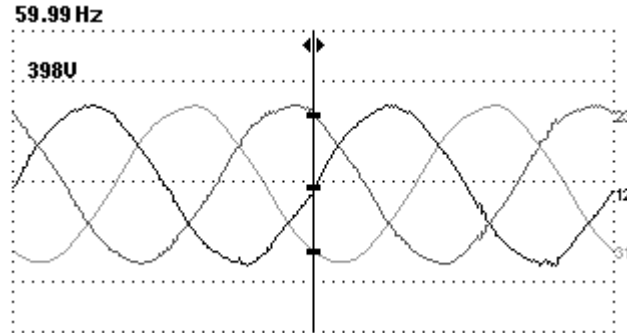


Figura 3.9 - Tensão gerada sem carga CA.

Pode-se observar que a frequência é mantida em aproximadamente 60Hz. A Figura 3.10 apresenta o valor eficaz da tensão de linha gerada sem carga CA, o fator de crista e a frequência das três tensões.

Volt/Amp/Hz			
	0:01:22		
	L12	L23	L31
V <sub>rms</sub>	218.70	219.59	219.35
V <sub>pk</sub>	316.3	313.9	313.1
CF	1.45	1.43	1.43
Hz	59.990		
	L1	L2	L3
A <sub>rms</sub>	0.0	0.1	0.0
A <sub>pk</sub>	0.1	0.2	0.1
CF	OL	OL	OL

Figura 3.10 - Tensão, corrente, fator de crista e frequência da tensão gerada sem carga CA.

Observa-se que as tensões não apresentam os mesmo valores, porém a maior diferença observada é de 0,89V.

O DHT medido da tensão gerada sem carga CA para as três tensões de linha e a tabela de harmônicos gerada pelo analisador de energia são mostrados na Figura 3.11

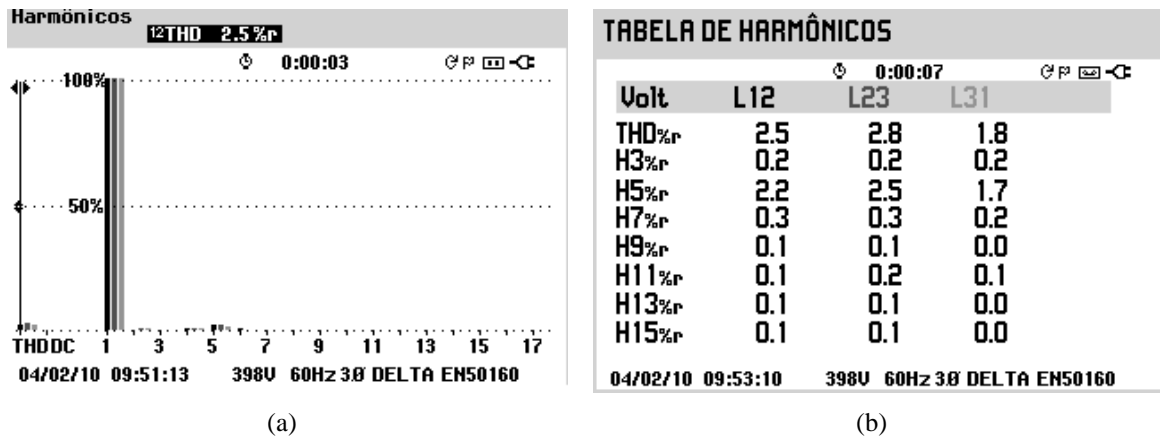


Figura 3.11 - (a) Harmônicos e (b) Tabela de harmônicos, ambos gerados pelo analisador de energia.

Observa-se que o DHT de L12 é de 2,5%, e que a componente mais significativa é a de 5° ordem. Observa-se também que para a tensão L31, o DHT é menor comparado com as outras duas tensões. Este fato se deve a características construtivas da máquina, já que todos os componentes ligados ao GI são equilibrados.

A Figura 3.12 mostra a tensão CC do conversor PWM com o GI sem carga CA, que se manteve em 340V aproximadamente.

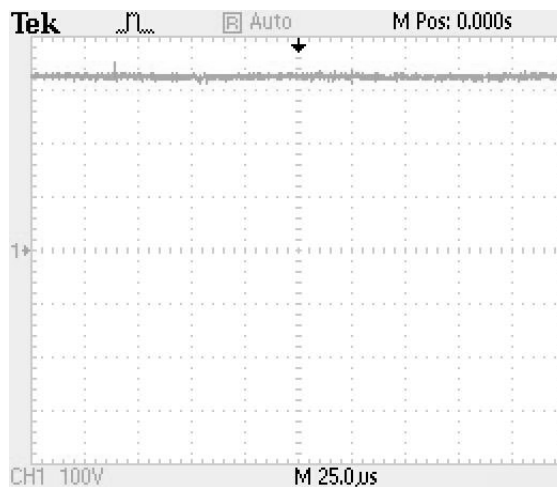


Figura 3.12 -  $V_{cc}$  com GI operando sem carga CA.

A Figura 3.13a mostra o detalhe do início do chaveamento do IMC e a Figura 3.13b mostra a corrente injetada na rede monofásica da concessionária. A distorção apresentada na Figura 3.13b se deve ao fato de que o ponto de medição da tensão também é ponto de injeção da corrente.

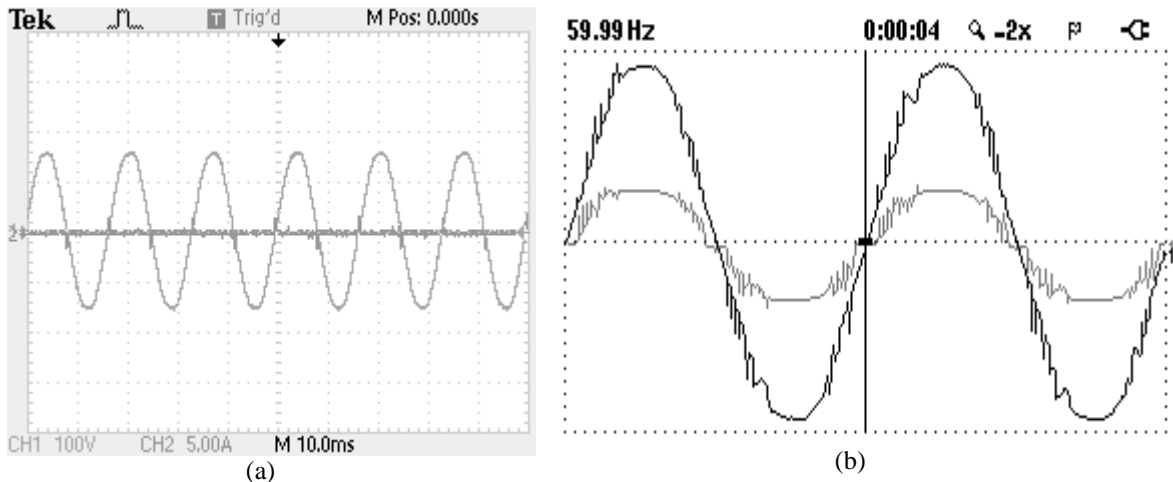


Figura 3.13 - (a) Início co chaveamento do IMC; (b) corrente injetada na rede monofásica com GI operando sem carga CA.

Pode-se observar na Figura 3.13b que a corrente injetada a rede monofásica apresenta uma frequência de oscilação em sincronia com a tensão da rede monofásica da concessionária, cujo valor é 60Hz.

O DHT da rede monofásica da concessionária foi medido antes do início dos testes, e apresentou o valor de 2,4%. Após o sistema ser colocado em operação, o DHT medido da tensão da rede monofásica da concessionária foi de 2,7%, conforme mostra a Figura 3.14.

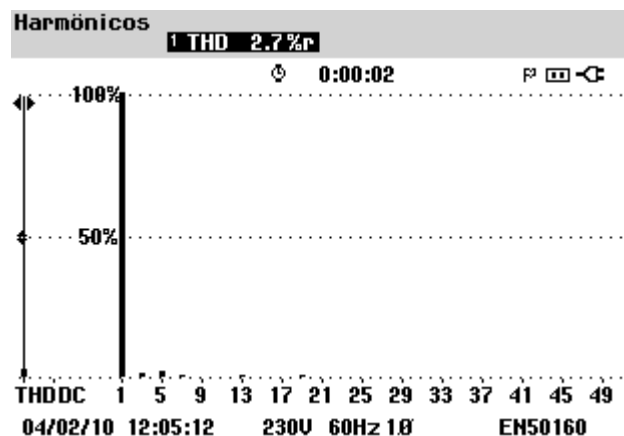


Figura 3.14 - DHT medido da tensão da rede monofásica.

Os valores da tensão e da corrente medidos na tensão da rede são mostrados na Figura 3.15.

Volt/Amp/Hz	
0:00:04	
L1	
V <sub>rms</sub>	117.49
V <sub>pk</sub>	162.8
CF	1.39
Hz	60.023
L1	
A <sub>rms</sub>	3.5
A <sub>pk</sub>	5.0
CF	1.44
04/02/10 12:04:32 230V 60Hz 1Ø	

Figura 3.15 - Tensão da rede monofásica, corrente injetada a rede.

A tensão ajustada para a tensão rede foi de 110V. Como a tensão da rede monofásica da região é de 220V, foi usado então um auto-transformador. Observa-se também que o valor eficaz da corrente injetada a rede com o gerador operando sem carga CA é de 3,5A.

Em consequência do sincronismo entre a tensão da rede e o disparo dos tiristores que compõem o IMC, ambos passam a ter um alto fator de potência, conforme mostra a Figura 3.16.

Potência e Energia		
FUND 0:00:02		
L1		Total
kW	0.39	0.39
kVA	0.39	0.39
kVAR	0.01	0.01
PF	0.98	0.98
Cos $\phi$	1.00	
A <sub>rms</sub>	3.4	
L1		
V <sub>rms</sub>	117.49	
04/02/10 12:07:18 230V 60Hz 1Ø EN50160		

Figura 3.16 - Potência e energia medida da corrente injetada a rede.

Pode-se observar que praticamente toda energia excedente da geração é aplicada a rede monofásica da concessionária. O diagrama fasorial da tensão da rede e da corrente injetada a mesma são mostrados na Figura 3.17.

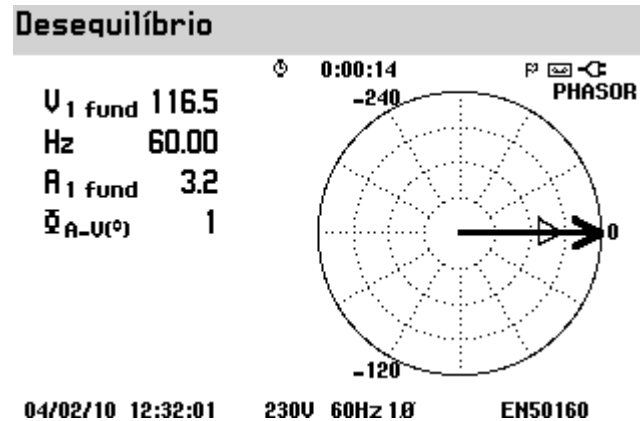


Figura 3.17 - Desequilíbrio entre tensão da rede monofásica da concessionária e corrente injetada.

Observa-se na Figura 3.17 que o ângulo entre a corrente e a tensão da rede é de  $1^\circ$ , aproximadamente.

*b) Degrau único de carga resistiva de 75W.*

Após os testes com o gerador operando sem carga CA, foram feitos testes com aplicação de uma carga resistiva. A Figura 3.18 apresenta a tensão de linha gerada e a tensão do lado CC do conversor PWM antes e depois da aplicação de uma carga de 75W aproximadamente.

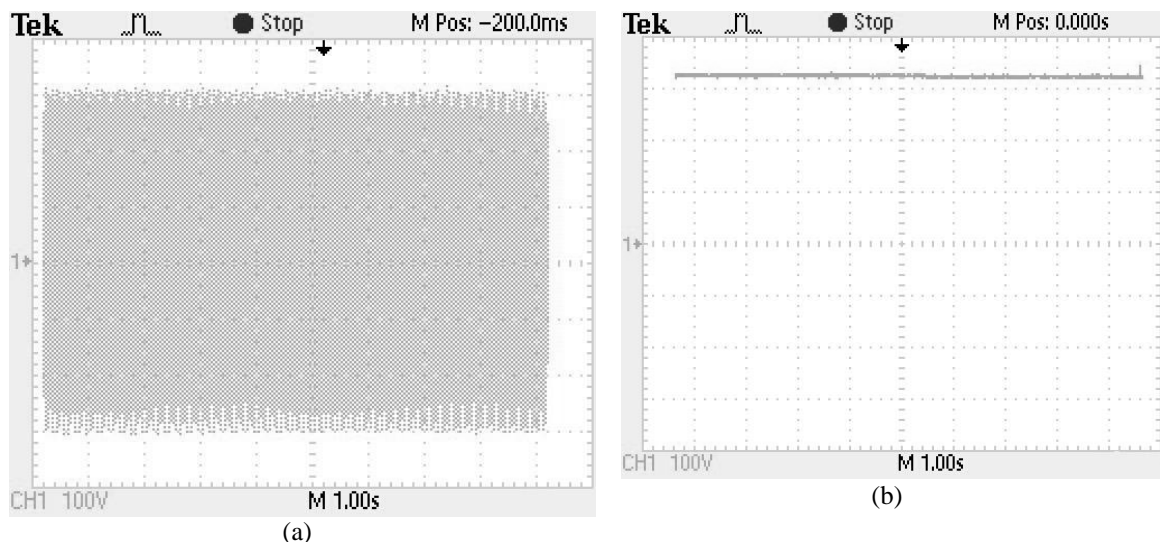


Figura 3.18 - Tensão antes e depois da aplicação da carga de 75W (a) Tensão de linha gerada; (b) tensão CC do conversor PWM.

O valor eficaz da tensão gerada reduziu de 220V para 217V, assim como a tensão sobre o capacitor  $C_{cc}$  reduziu de 339V para 338V. Observa-se que o controle, após a perturbação no sistema causada pela aplicação em degrau da carga resistiva, encontra outro ponto de equilíbrio, cujo qual provoca uma queda no valor eficaz da tensão gerada em regime

permanente. No entanto, os valores apresentados estão de acordo com a Resolução 505/2001 da ANEEL.

A forma de onda da tensão e da corrente são mostradas na Figura 3.19.

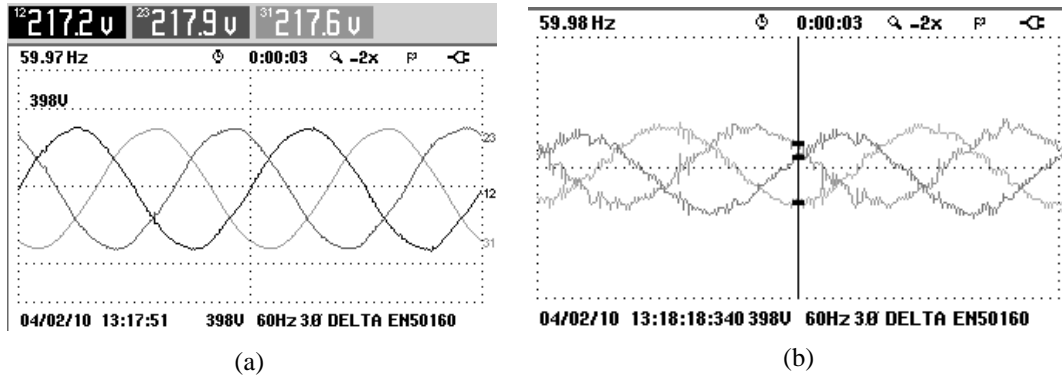


Figura 3.19 - (a) Tensões de fase; (b) correntes de linha, aplicadas a carga de 75W.

Observa-se que as tensões e correntes são trifásicas e defasada de  $120^\circ$  entre si, com frequência de 60Hz aproximadamente após a aplicação da carga aos terminais do GI.

A Figura 3.20 apresenta os valores das tensões e correntes de linha aplicadas à carga.

Volt/Amp/Hz			
	L12	L23	L31
Vrms	216.98	218.02	217.68
Vpk	311.7	312.1	309.7
CF	1.44	1.43	1.42
Hz	59.972		
	L1	L2	L3
Arms	0.2	0.2	0.2
Apk	0.4	0.4	0.4
CF	OL	OL	OL

04/02/10 13:18:56 398U 60Hz 3Ø DELTA EN50160

Figura 3.20 - Tensão, corrente e frequência da tensão gerada após aplicação de carga de 75W.

Observa-se na Figura 3.20 que assim como para o caso do gerador operando sem carga CA, há também um desequilíbrio das tensões. A maior diferença é de 1,07V. Observa-se também que o valor da corrente se apresenta equilibrado, com valor de 0,2A.

A Figura 3.21 apresenta a DHT da tensão gerada, assim como a tabela de harmônicos gerada pelo analisador de energia.

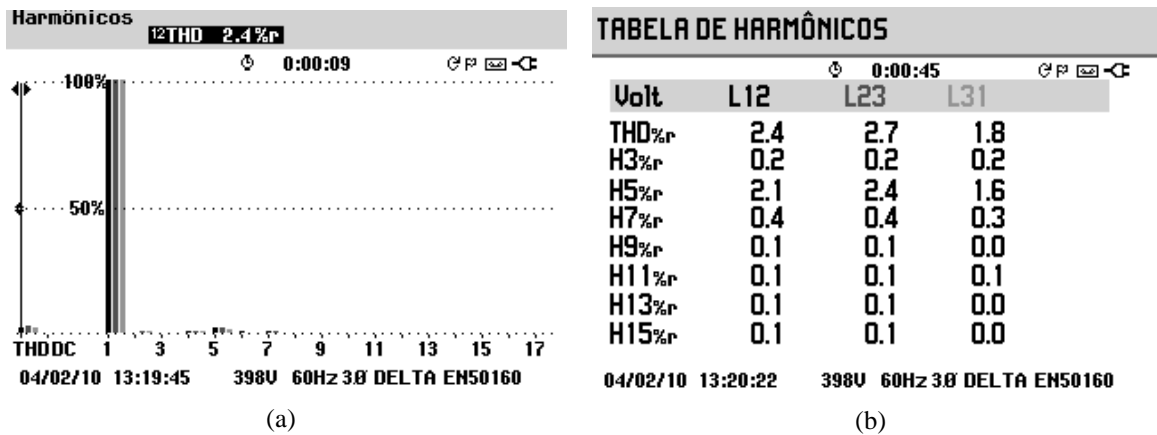


Figura 3.21 - (a) DHT das tensões e; (b) tabela de harmônicos gerada pelo analisador de energia.

Observa-se que a DHT apresenta um valor menor que o apresentado com o GI operando sem carga CA, e da mesma forma que para a operação sem carga CA, a tensão L31 apresenta a DHT menor que das outras duas tensões.

A Figura 3.22 apresenta as potências ativa, reativa e aparente consumidas pela carga resistiva aplicada aos terminais do gerador.

Potência e Energia				
FUND	0:00:15			
	L1	L2	L3	Total
kW				0.07
kVA				0.07
kVAR				± 0.01
PF				0.98
Cosφ				
A <sub>rms</sub>	0.2	0.2	0.2	
	L12	L23	L31	
V <sub>rms</sub>	217.05	217.80	217.55	
04/02/10 13:21:47 398V 60Hz 3Ø DELTA EN50160				

Figura 3.22 - Potência e energia consumida pela carga.

A potência consumida é equivalente a carga aplicada. O fator de potência capacitivo é devido às oscilações da tensão e da corrente, fazendo com que o fator de potência presente o valor de 0,98.

Observa-se também que as correntes apresentam-se equilibradas com o valor de 0,2A.

A corrente injetada a rede monofásica da concessionária, assim como a tensão da mesma são mostrados na Figura 3.23.

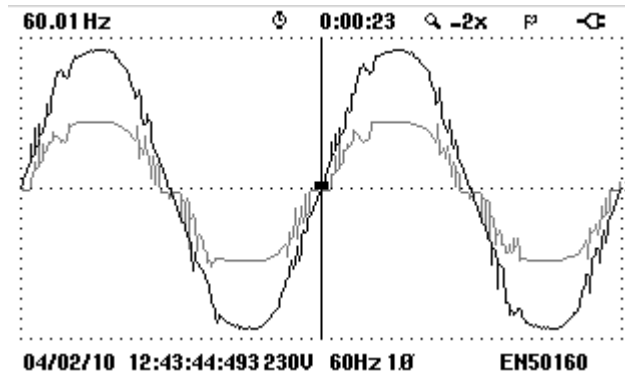


Figura 3.23 - Tensão elétrica da rede monofásica da concessionária e corrente injetada.

O valor eficaz da corrente injetada a rede monofásica foi reduzido de 3,5A para 2,6A, conforme apresenta a Figura 3.24.

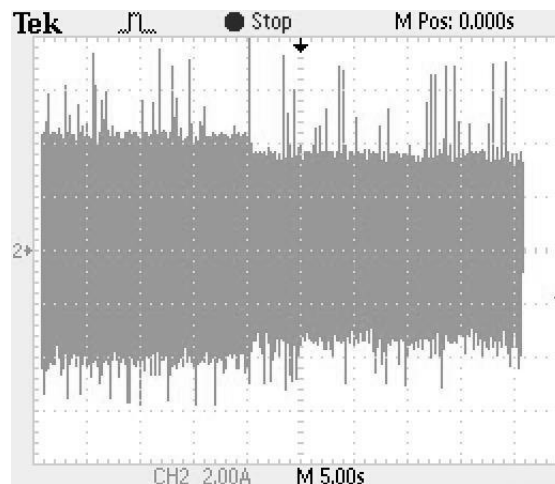


Figura 3.24 - Corrente injetada a rede monofásica da concessionária.

Após a aplicação da carga de 75W aos terminais do GI, a energia excedente da geração passa a ser menor, já que a carga consome parte desta. Desta forma, o conversor CC-CC abaixador e o IMC necessitam enviar uma menor quantidade de energia a rede monofásica. Os picos observados na Figura 3.24 são sinais espúrios produzidos pela taxa de aquisição do osciloscópio e não existem de fato.

O DHT da tensão da rede monofásica, assim como o da corrente injetada a mesma, são mostrados na Figura 3.25.

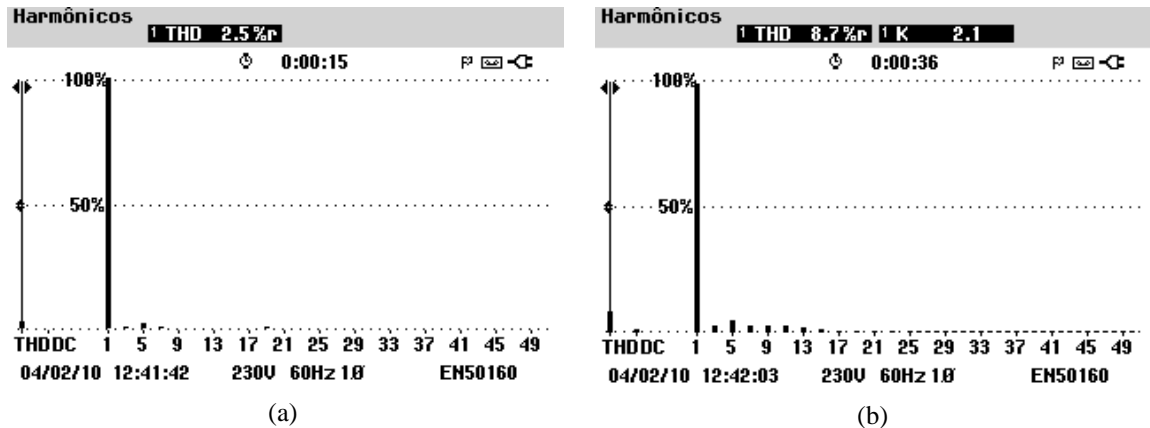


Figura 3.25 - (a) DHT da tensão da rede monofásica da concessionária; e (b) DHT da corrente injetada.

A DHT da rede monofásica da concessionária medido antes do início dos testes foi de 2,4%. Com o GI operando sem carga CA, a DHT medido da rede monofásica foi de 2,7%, e após a aplicação da carga de 75W o valor medido foi de 2,5%, mostrando que com a redução da amplitude da corrente injetada, diminui-se a distorção harmônica causada a rede pela corrente injetada a mesma.

A DHT da corrente apresenta o valor maior que o da tensão. No entanto, a corrente possui um ângulo mínimo de disparo que foi ajustado em  $7^\circ$ , conforme a Figura 3.3, e é chaveada em modo PWM pelo conversor CC-CC abaixador, onde nem todas as componentes harmônicas são suprimidas pelo filtro. Desta forma, a corrente apresenta uma maior distorção harmônica que a tensão da rede monofásica.

O diagrama fasorial da tensão da rede monofásica da concessionária e da corrente injetada a mesma são mostrados na Figura 3.26.

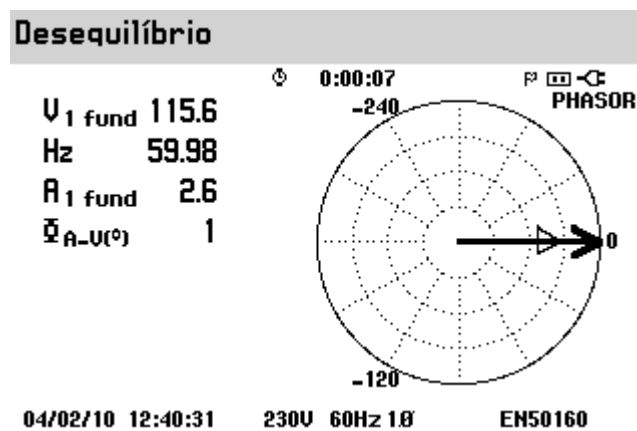


Figura 3.26 - Diagrama fasorial da tensão da rede monofásica da concessionária e da corrente injetada a rede.

O ângulo medido entre a corrente elétrica injetada à rede monofásica e a tensão da mesma é de  $1^\circ$ , conforme a Figura 3.26.

c) *Degrau de carga resistiva de 450W.*

A carga de 450W foi escolhida de acordo com a velocidade de rotação da máquina primária estabelecida anteriormente. Desta forma, 450W representa quase toda a capacidade de geração do GI para esta velocidade de acionamento.

A Figura 3.27 mostra o comportamento da tensão gerada antes e depois de aplicada a carga aos seus terminais.

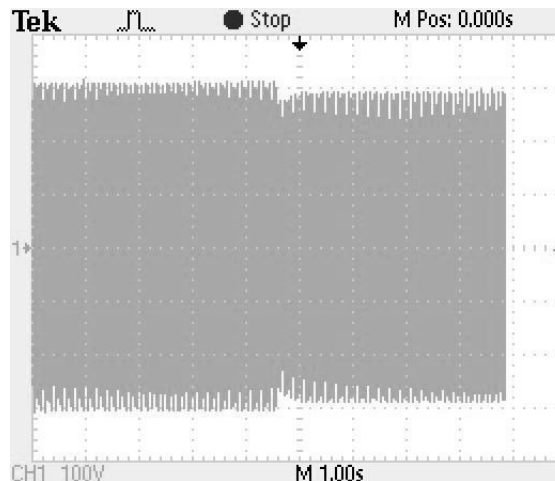


Figura 3.27 - Tensão gerada antes e após a aplicação da carga de 450W.

Pode-se observar a queda no valor da amplitude da tensão gerada após a aplicação da carga aos seus terminais. O valor anterior era de 220V aproximadamente, e foi reduzido para 208V. O valor apresentado ainda está dentro dos valores permitidos pela Resolução 505/2001 da ANEEL. A Figura 3.28 apresenta a forma de onda das tensões de linha após aplicada a carga aos terminais do gerador.

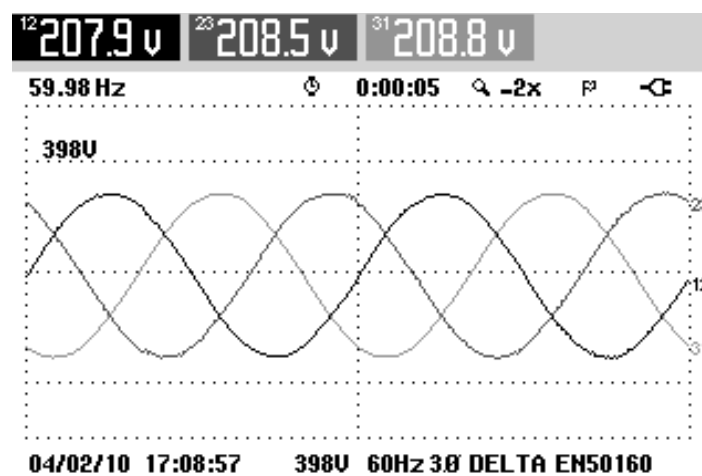


Figura 3.28 - Tensões de linha após aplicação de carga de 450W.

Pode-se observar que as tensões apresentam-se desequilibradas, porém a maior variação é de 0,9V em valor eficaz. A corrente de linha para a carga é apresentada na Figura 3.29.

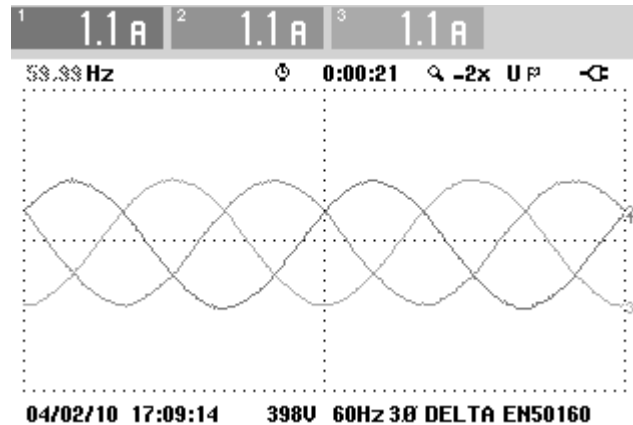


Figura 3.29 - Correntes de linha para a carga de 450W.

A corrente medida se manteve equilibrada e com valor de 1,1A. A DHT da tensão gerada, assim como a tabela de harmônicos gerada pelo analisador de energia são mostrados na Figura 3.30.

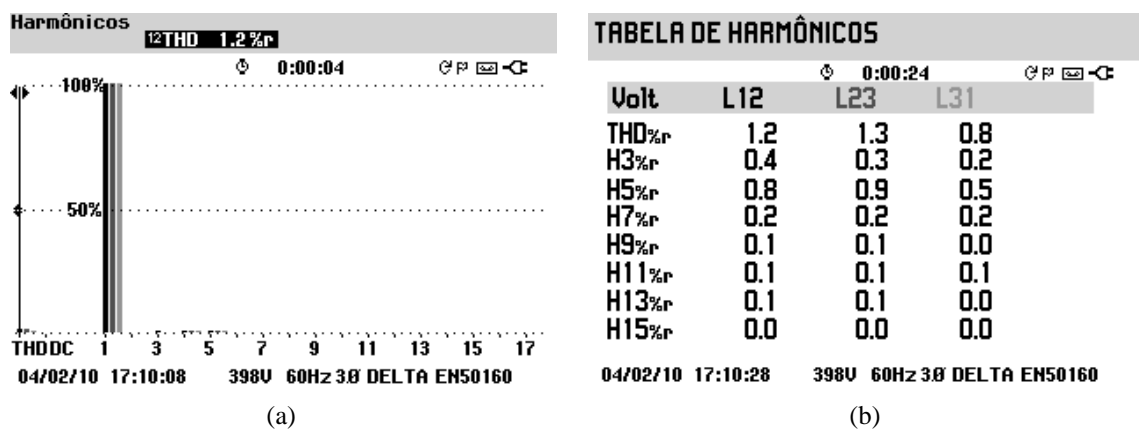


Figura 3.30 - (a) DHT das tensões de linha; e (b) tabela de harmônicos gerada pelo analisador de energia.

Pode-se observar novamente que a DHT medida de L31 é menor que o medido para as outras tensões linha, conforme explicado anteriormente. Observa-se também que o valor total de distorção harmônica para todas as tensões é menor que os valores observados para o GI operando sem carga CA e com carga de 75W.

A Figura 3.31 apresenta a potência consumida pela carga conectada aos terminais do GI.

Potência e Energia				
FUND	0:00:21	PF 1.00		
L1	L2	L3	Total	
kW			0.40	
kVA			0.40	
kVAR			0.01	
PF			1.00	
Cos $\phi$				
Arms	1.1	1.1	1.1	
L12	L23	L31		
V <sub>rms</sub>	207.63	208.28	208.69	
04/02/10 17:11:26 398V 60Hz 3Ø DELTA EN50160				

Figura 3.31 - Potencia consumida pela carga.

Pode-se observar novamente que o analisador de energia apresenta o valor de 0,01kVAR, no entanto o fator de potência é igual a 1.

A Figura 3.32.a apresenta a corrente injetada a rede monofásica em detalhe, e a Figura 3.32.b apresenta a tensão CC sobre o capacitor  $C_{cc}$ .

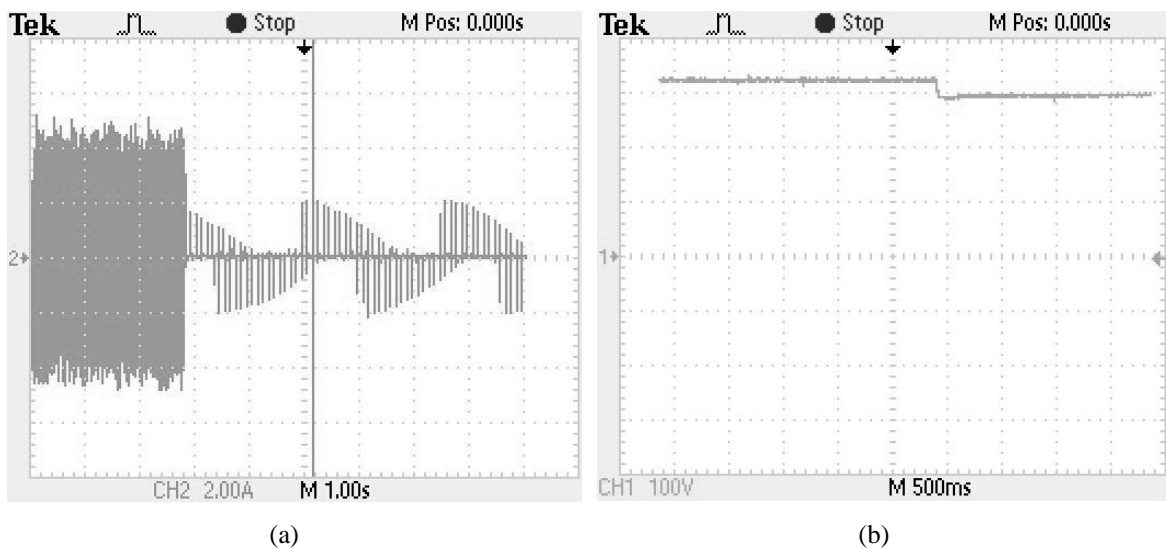


Figura 3.32 - (a) corrente injetada a rede monofásica; e (b) tensão sobre o capacitor CC.

Pode-se observar na Figura 3.32a que a corrente injetada é reduzida a um valor próximo de zero, mostrando que quase toda energia gerada está sendo consumida pela carga aplicada aos terminais do GI. E na Figura 3.32b a tensão CC se reduziu de 340V para 329V. Conforme já explicado anteriormente, o controle se ajusta a um novo ponto de equilíbrio, causando a redução no valor da tensão sobre o capacitor  $C_{cc}$ .

A Figura 3.33 apresenta a forma de onda da tensão da rede monofásica da concessionária e a corrente injetada a mesma.

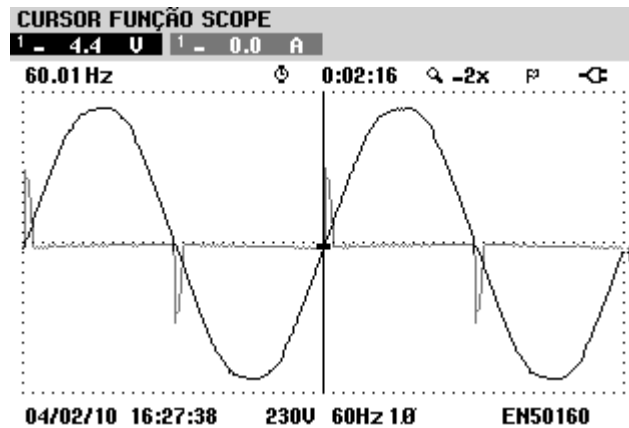


Figura 3.33 - Tensão da rede monofásica e corrente injetada a rede.

Observa-se que devido ao pequeno valor eficaz da corrente injetada, a mesma não atinge o valor da corrente de manutenção dos tiristores. Após retirado o pulso no gatilho dos tiristores, os mesmos são levados a região de corte novamente.

A Figura 3.34 apresenta a potência do sinal injetado à rede monofásica.

Potência e Energia			
	FUND	0:00:05	Total
	L1		
kW	0.00		0.00
kVA	0.01		0.01
kVAR	÷ 0.01		÷ 0.01
PF	0.04		0.04
Cos $\phi$	0.14		
A <sub>rms</sub>	0.3		
	L1		
V <sub>rms</sub>	112.53		

04/02/10 16:29:47 230V 60Hz 1Ø EN50160

Figura 3.34 - Potência do sinal injetado a rede.

Pode-se observar que a potência do sinal injetado a rede é aproximadamente zero, pois para a velocidade de rotação da máquina primária, a energia mecânica convertida em energia elétrica é aproximadamente igual a exigida pela carga conectada aos terminais do GI. No entanto, o analisador de energia ainda apresenta a potência reativa de 10Var, que é um calor praticamente desprezível.

A Figura 3.35 apresenta a DHT da tensão da rede monofásica da concessionária no ponto de aplicação da corrente elétrica.

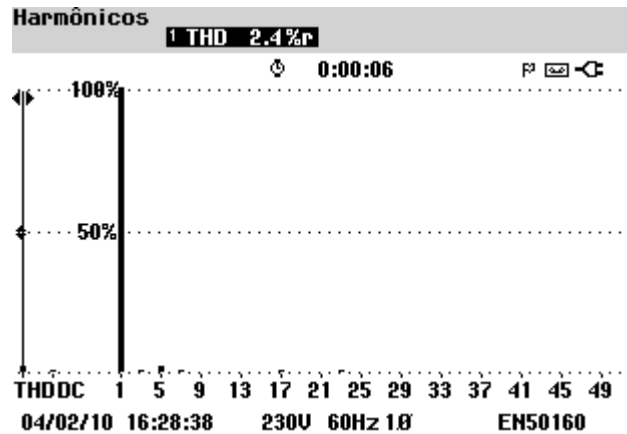


Figura 3.35 - DHT tensão da rede.

A DHT medida foi de 2,4%. A DHT da rede monofásica da concessionária medida antes da medição foi de 2,3%.

*d) Teste de rejeição carga resistiva*

O seguinte teste foi realizado para se verificar o comportamento do sistema de geração a rejeição de carga resistiva. Para isso foram usadas cargas de 180W e 120W aproximadamente.

Primeiro se verificou o comportamento sistema a aplicação das cargas, para se comparar os resultados obtidos antes de se aplicar as cargas e após retirá-las do sistema de geração. Para a aplicação das cargas, foi realizada a seguinte seqüência: primeiro foi aplicada a carga de 180W e depois a carga de 120W. A retirada das cargas foi: primeiro a carga de 180W e depois a carga de 120W. Esta seqüência de aplicação e retirada das cargas foi realizada com o intuito de se investigar se o sistema de geração se comportaria da mesma forma, antes e depois de uma perturbação assimétrica.

A Figura 3.36 mostra o comportamento do valor eficaz da tensão de linha do GI durante a aplicação e retirada das cargas.

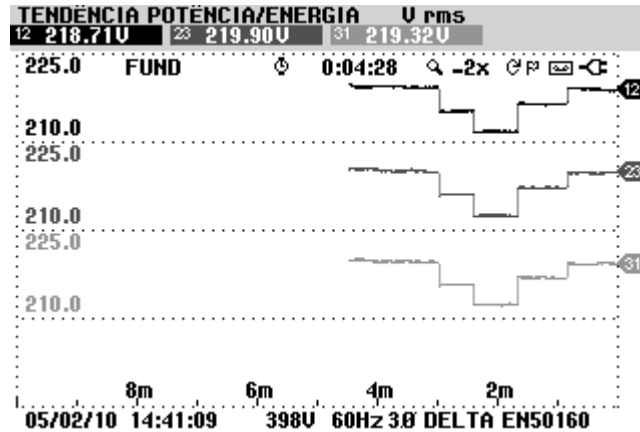


Figura 3.36 - Valor eficaz da tensão gerada durante o teste de rejeição de carga.

Observa-se novamente a queda no valor eficaz da tensão gerada em regime permanente durante a aplicação das cargas aos terminais do GI. No entanto, os valores estão dentro dos valores permitidos pela Resolução 505/2001 da ANEEL.

A Figura 3.37 apresenta o valor eficaz para cada uma das tensões de linha antes e depois da aplicação e retirada das cargas.

Volt/Amp/Hz				Volt/Amp/Hz			
0:00:03				0:00:47			
	L12	L23	L31		L12	L23	L31
$V_{rms}$	218.34	219.49	219.00	$V_{rms}$	218.43	219.45	219.24
$V_{pk}$	316.7	315.3	312.1	$V_{pk}$	316.4	314.1	312.6
CF	1.45	1.44	1.43	CF	1.45	1.43	1.43
Hz	59.978			Hz	59.990		
	L1	L2	L3		L1	L2	L3
$A_{rms}$	0.0	0.0	0.0	$A_{rms}$	0.0	0.0	0.0
$A_{pk}$	0.1	0.1	0.1	$A_{pk}$	0.1	0.2	0.1
CF	OL	OL	OL	CF	OL	OL	OL
05/02/10 14:45:28 398V 60Hz 3Ø DELTA EN50160				05/02/10 14:46:12 398V 60Hz 3Ø DELTA EN50160			
(a)				(b)			

Figura 3.37 - Tensão, corrente e frequência gerada (a) antes e (b) depois do teste de rejeição de carga resistiva.

A maior diferença nas medidas entre antes de se aplicar as cargas e após retirá-las foi de 0,24V para L31.

A Figura 3.38 apresenta o comportamento da corrente elétrica aplicada às cargas por meio dos terminais do GI.

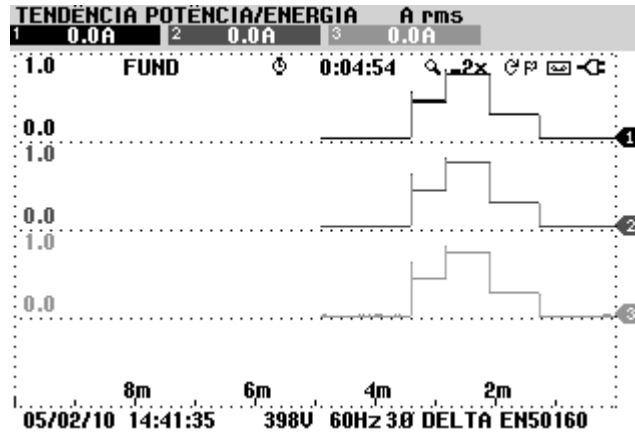


Figura 3.38 - Valor eficaz da corrente aplicada a carga durante o teste de rejeição de carga.

O comportamento da corrente elétrica durante o teste de rejeição de carga apresentou-se mais estável que o da tensão. A Figura 3.39 apresenta as medidas das tensões e correntes aplicadas às cargas para cada momento do teste de rejeição de carga.

Volt/Amp/Hz				Volt/Amp/Hz				Volt/Amp/Hz			
0:00:14				0:00:26				0:00:37			
L12	L23	L31		L12	L23	L31		L12	L23	L31	
Urms	214.44	215.49	215.29	Urms	210.89	211.68	211.70	Urms	215.89	216.79	216.46
Vpk	306.5	307.2	305.3	Vpk	298.6	299.4	298.8	Vpk	310.1	309.0	307.7
CF	1.43	1.43	1.42	CF	1.42	1.41	1.41	CF	1.44	1.43	1.42
Hz	59.989			Hz	59.989			Hz	59.990		
L1	L2	L3		L1	L2	L3		L1	L2	L3	
Arms	0.4	0.5	0.4	Arms	0.8	0.8	0.8	Arms	0.3	0.3	0.3
Apk	0.7	0.7	0.7	Apk	1.1	1.2	1.2	Apk	0.6	0.6	0.5
CF	1.57	1.63	1.66	CF	1.50	1.55	1.53	CF	OL	OL	OL
05/02/10 14:45:39 398U 60Hz 3Ø DELTA EN50160				05/02/10 14:45:51 398U 60Hz 3Ø DELTA EN50160				05/02/10 14:46:02 398U 60Hz 3Ø DELTA EN50160			
(a)				(b)				(c)			

Figura 3.39 - Tensão e corrente aplicadas as cargas de (a)180W; (b)180W+120W e (c) 180W+120W-180W.

Com a Figura 3.39 pode-se observar que há uma redução no valor da tensão gerada em regime permanente a aplicação de cargas. Observa-se também que a frequência sofre uma variação máxima de 0,009Hz.

A Figura 3.40 apresenta o comportamento do valor eficaz da corrente elétrica injetada a rede monofásica durante o teste de rejeição de carga.

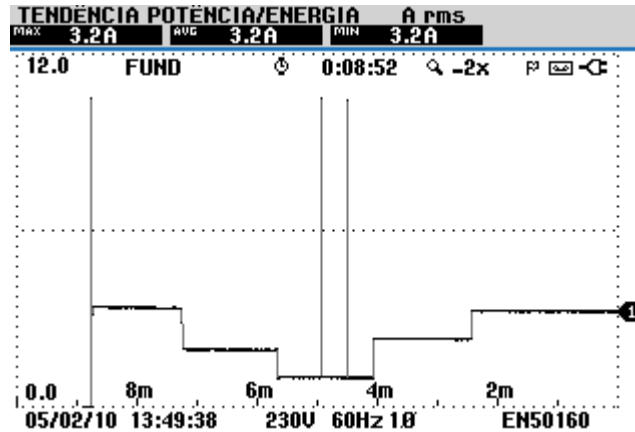


Figura 3.40 - Comportamento do valor eficaz da corrente injetada a rede monofásica.

Observa-se que apesar da assimetria entre a conexão e a desconexão das cargas aos terminais do GI, a corrente elétrica injetada a rede elétrica da concessionária como estratégia de controle do equilíbrio dinâmico do sistema apresenta os mesmos valores apresentados antes de se aplicar e retirar as cargas do mesmo.

A Figura 3.41 apresenta a potência elétrica do sinal enviado à rede monofásica da concessionária, assim como a quantidade de energia elétrica enviada a esta rede em um tempo de oito minutos.

Potência e Energia		
	FUND	Total
	L1	
kW	0.37	0.37
kVA	0.37	0.37
kVAR	0.01	0.01
PF	0.99	0.99
Cos $\phi$	1.00	
kWh	0.037	0.037
kVAh	0.037	0.037
kVARh	0.001	0.001
START	05/02/10 13:40:47	0:08:18

Figura 3.41 - Potência e Fator de Potência do sinal injetado a rede; Energia enviada à rede em 8 minutos.

Pode-se observar por meio dos valores apresentados pelo analisador de energia que a energia o sinal enviado a rede elétrica da concessionária possui o fator de potência próximo de 1, mesmo quando várias cargas são aplicadas e retiradas dos terminais do GI.

A Figura 3.42 ilustra a o momento da retirada da carga de 180W, onde observar-se a corrente injetada a rede monofásica bem como a tensão da rede monofásica no ponto de aplicação da corrente.

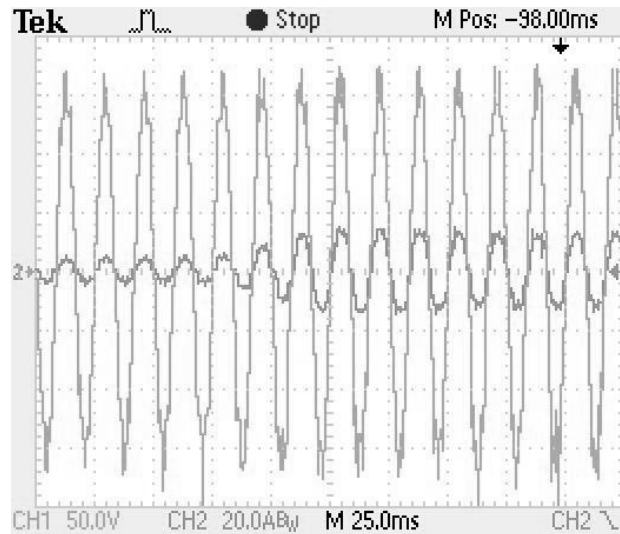


Figura 3.42 - Tensão da rede monofásica e corrente elétrica injetada a mesma.

Conforme mostrado anteriormente, a injeção de corrente a rede monofásica aumenta a distorção harmônica da mesma. Pode-se observar na Figura 3.42 esta distorção. Também se observa a atuação do controle a retirada da carga. A corrente se estabilizou após um ciclo aproximadamente.

A Figura 3.43 apresenta o comportamento da tensão sobre o capacitor  $C_{cc}$  do conversor PWM.

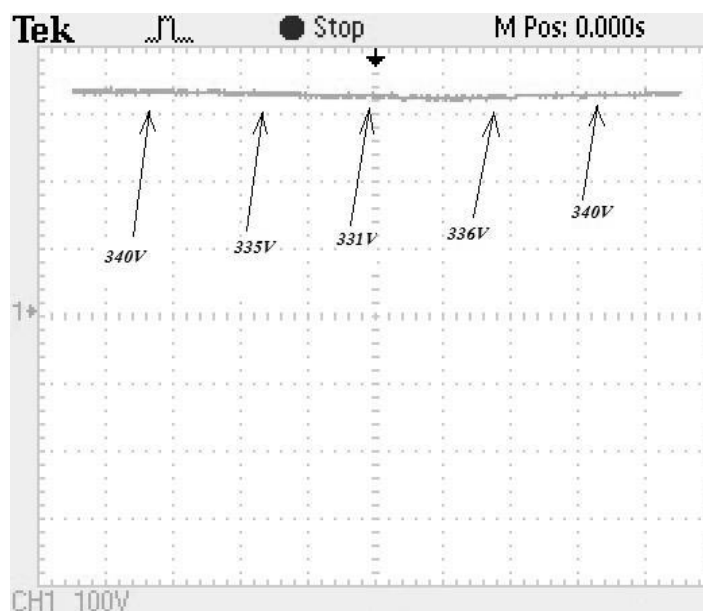


Figura 3.43 - Comportamento da tensão sobre capacitor  $C_{cc}$  durante teste de rejeição de carga.

Pode-se observar que a atuação do controle não é a esperada. A tensão CC do conversor PWM deveria se manter constante, no intuito de manter constante também a tensão do lado CA do conversor. Isso se deve ao ajuste do controle utilizado. O sistema reage à aplicação de uma carga obtendo um novo ponto de equilíbrio. No entanto, esta atuação se

mostra constante, já que os valores apresentados antes de se aplicar as cargas e depois de retirá-las não sofreram variações significativas.

*e) Degrau de carga desequilibrada.*

O teste foi realizado com uma carga trifásica resistiva desequilibrada de 310W aproximadamente, aplicada aos terminais do GI. A Figura 3.44 apresenta a forma de onda da tensão gerada antes e após a aplicação da carga desequilibrada.

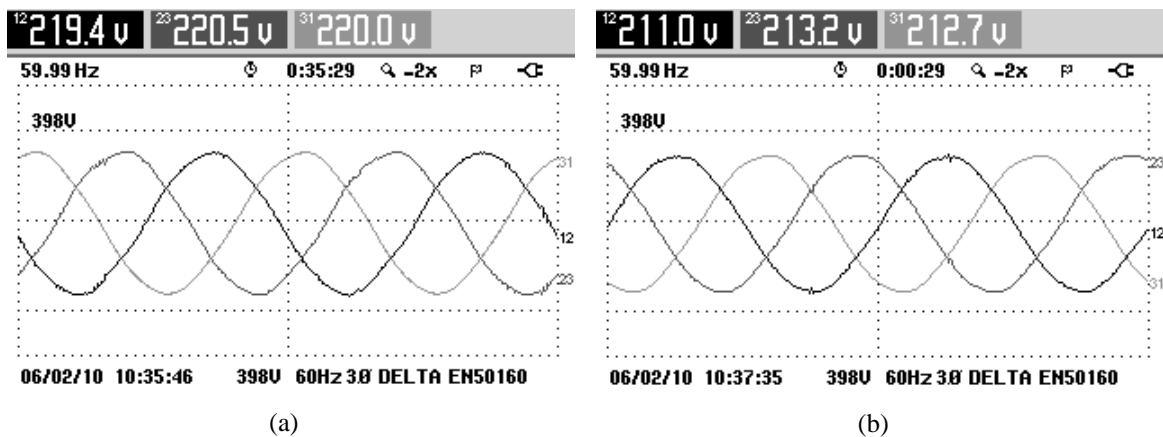


Figura 3.44 - Tensão de linha gerada antes (a) e após (b) aplicação de carga resistiva desequilibrada.

Observa-se que antes de se aplicar a carga desequilibrada aos terminais do GI, a maior diferença entre as tensões era de 1,1V. Após a aplicação da carga a maior diferença observada foi de 2,2V.

A Figura 3.45 apresenta a forma de onda das correntes de linha aplicadas à carga desequilibrada.

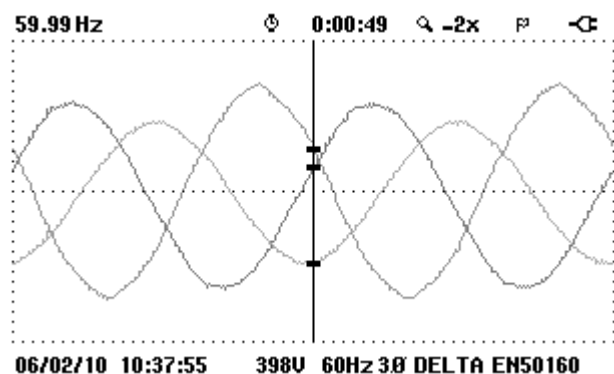


Figura 3.45 – Corrente de linha aplicada a carga desequilibrada.

A Figura 3.46 apresenta os valores eficazes das tensões e correntes apresentados nas figuras 3.44 e 3.45.

Volt/Amp/Hz			
	0:00:03		
	L12	L23	L31
V <sub>rms</sub>	210.96	213.08	212.74
V <sub>pk</sub>	299.3	302.1	301.8
CF	1.42	1.42	1.42
Hz	59.976		
	L1	L2	L3
A <sub>rms</sub>	0.8	0.9	0.6
A <sub>pk</sub>	1.2	1.4	1.0
CF	1.47	1.50	1.55
06/02/10 10:38:52 398V 60Hz 3Ø DELTA EN50160			

Figura 3.46 - Tensão e corrente.

Em L12 foi aplicada uma carga de 100W aproximadamente. Em L23 uma carga de 150W e em L31 uma carga de 60W. Como a carga é colocada em configuração  $\Delta$ , as tensões apresentadas são de fase e as correntes de linha. Observa-se que a amplitude das correntes de linha são diferentes (Figura 3.45). No entanto as tensões de linha (Figura 3.44.b) apresentaram uma diferença entre o maior e o menor valor de 0,99%, com relação ao maior valor. A diferença entre as correntes de maior e menor valor foi de 33,33% com relação ao maior valor.

A Figura 3.47 apresenta o monitoramento dos valores eficazes das tensões e correntes aplicadas à carga em um período de quatro minutos.

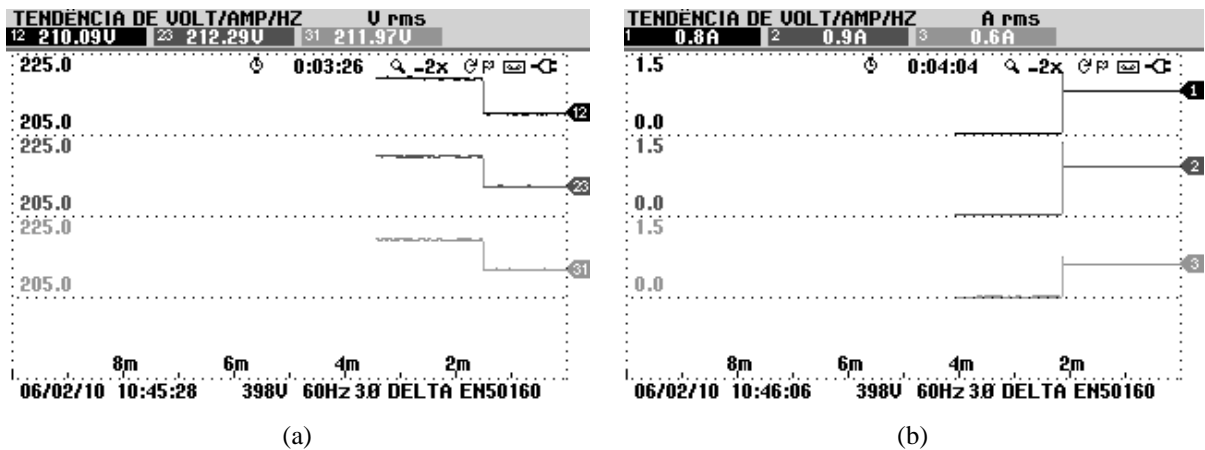


Figura 3.47 - Monitoramento da tensão (a) e corrente (b).

Pode-se observar a queda no valor eficaz da tensão em regime permanente, porém os valores ainda estão de acordo com a Resolução 505/2001 da ANEEL. Observa-se também a diferença entre os valores eficazes das correntes de linha, já que cada uma alimenta uma carga com potência diferente das outras.

A frequência da tensão gerada permanece em 59,990Hz durante o teste, conforme Figura 3.48

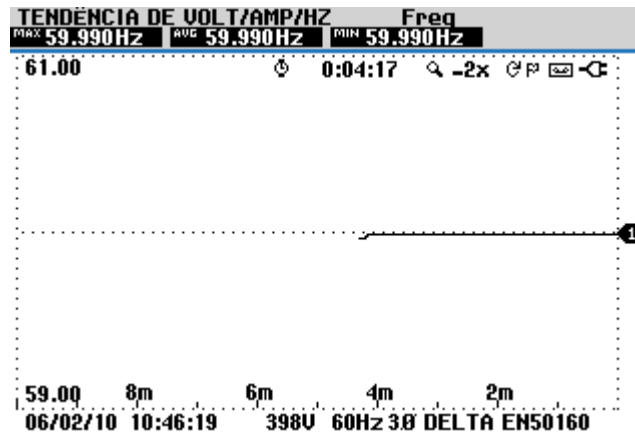


Figura 3.48 - Monitoramento da frequência durante teste de carga desequilibrada.

A frequência não sofre variações significativas apesar da queda da tensão em regime permanente, pois é garantida por meio do chaveamento em modo PWM do conversor PWM, controlado pelo processador digital de sinais ADSP 21992 EZ-KIT Lite. Desta forma, a manutenção da frequência síncrona no estator do GI não depende dos parâmetros de tensão e corrente que circula pelo sistema.

A Figura 3.49 apresenta a DHT para as três fases, assim como a tabela de harmônicos gerada pelo analisador de energia.

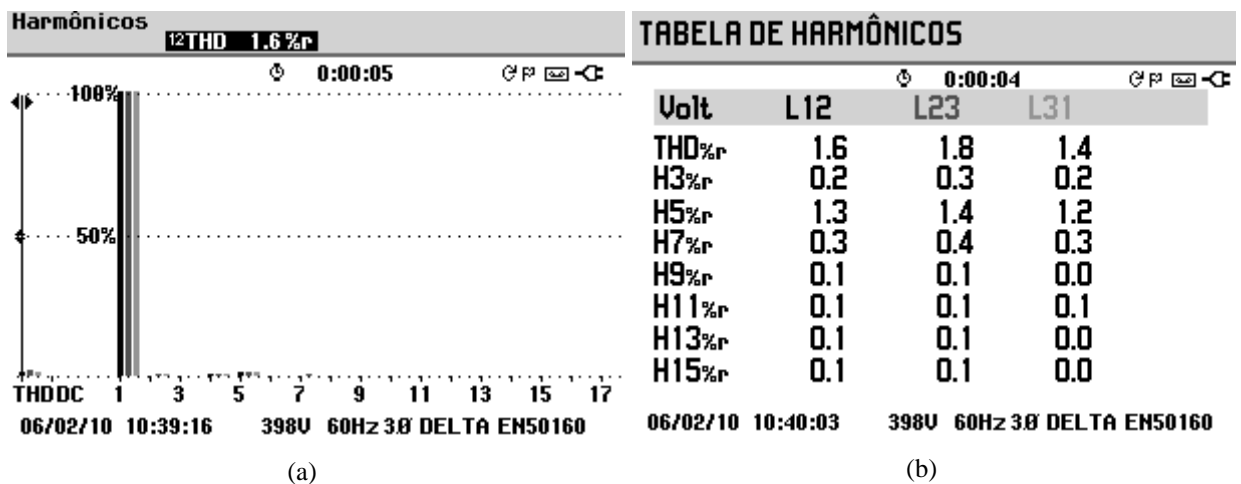


Figura 3.49 - (a) DHT das tensões de linha e; (b) Tabela de harmônicos gerada pelo analisador de energia.

Pode-se observar que os valores de DHT apresentam valores diferentes. Conforme mostrado anteriormente, a máquina apresenta valores diferentes de DHT mesmo quando aplicada uma carga equilibrada. Neste caso os dois fatores contribuem para esta diferença, tanto da máquina quanto a carga, que é desequilibrada. No entanto, se comparada com a tabela de harmônicos gerada pelo analisador de energia mostrado na Figura 3.11 para o GI

operando sem carga CA, percebe-se uma redução na distorção harmônica para as três tensões analisadas.

A Figura 3.50a apresenta o comportamento do valor eficaz da corrente injetada a rede monofásica da concessionária e a Figura 3.50b apresenta em detalhe a tensão da rede monofásica e a corrente injetada a mesma.

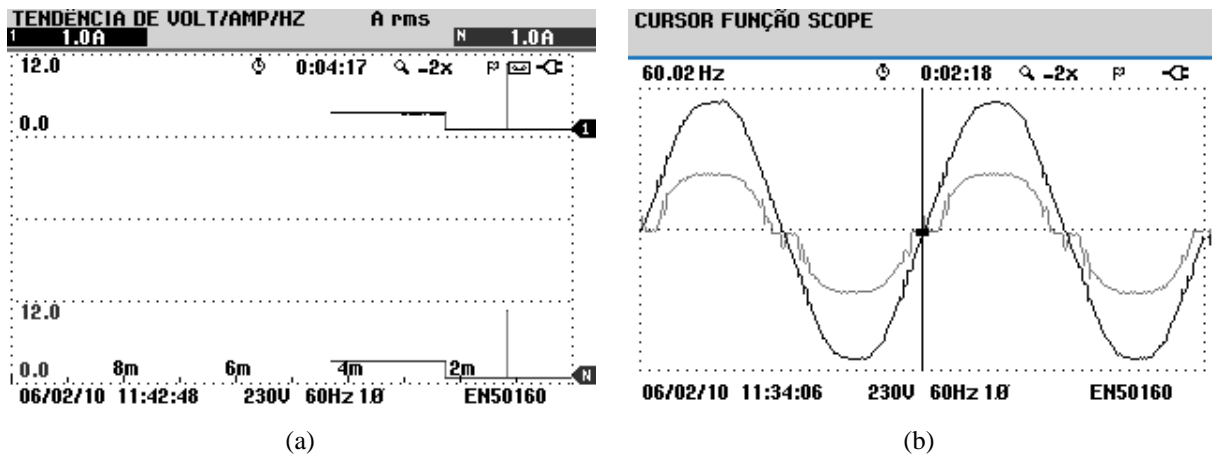


Figura 3.50 - (a) Monitoramento do valor eficaz da corrente injetada a rede monofásica e; (b) Formas de onda da tensão da rede monofásica e corrente injetada a mesma.

Observa-se que o valor eficaz da corrente elétrica foi monitorado durante quatro minutos. O valor se reduziu de 3,2A para 1,0A aproximadamente.

A Figura 3.51 apresenta o monitoramento da frequência do sinal de corrente injetado a rede monofásica da concessionária em um período de seis minutos.

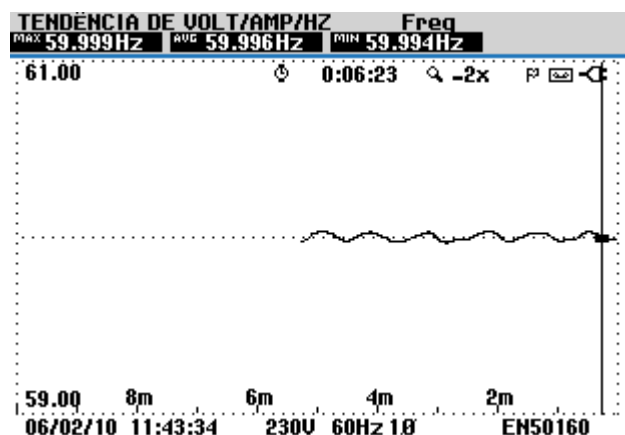


Figura 3.51 - Monitoramento da frequência do sinal de corrente injetado à rede monofásica.

A frequência do sinal de corrente apresenta um comportamento oscilante, conforme Figura 3.51, no entanto apresentou uma oscilação máxima de 0,005Hz, ou seja, 0,008% do valor da frequência fundamental.

O DHT da tensão da rede monofásica da concessionária medido antes do início do teste apresentou o valor de 2,6%. Com o sistema operando sem carga CA, a DHT da tensão da

rede medida no ponto de aplicação da corrente foi de 2,7%, e após a aplicação da carga desequilibrada aos terminais do GI, a DHT medida no ponto de aplicação da corrente foi de 2,6%, conforme Figura 3.52.

TABELA DE HARMÔNICOS	
0:01:25	
Volt	L1
THD% <sub>r</sub>	2.6
H3% <sub>r</sub>	0.7
H5% <sub>r</sub>	2.4
H7% <sub>r</sub>	0.3
H9% <sub>r</sub>	0.2
H11% <sub>r</sub>	0.1
H13% <sub>r</sub>	0.3
H15% <sub>r</sub>	0.1

06/02/10 11:37:37 230V 60Hz 1Ø

Figura 3.52 - Tabela de harmônicos gerada pelo analisador de energia.

O diagrama fasorial da tensão da rede monofásica da concessionária e da corrente injetada a mesma é mostrado na Figura 3.53.

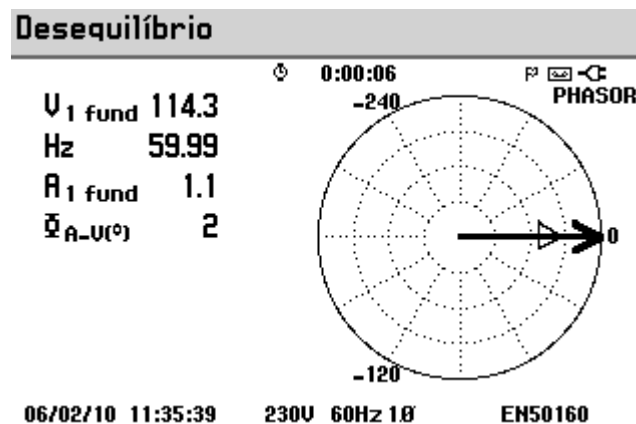


Figura 3.53 - Diagrama fasorial da tensão da rede monofásica e corrente injetada a mesma.

Conforme Figura 3.53, a defasagem entre a tensão da rede monofásica da concessionária e a corrente injetada a mesma é de 2°. Este diagrama apresenta o comportamento da corrente após a carga desequilibrada ser aplicada aos terminais do GI.

*f) Motor de indução de 1/4cv e carga resistiva de 300W.*

No teste a seguir foi verificado o comportamento do sistema de geração quanto à aplicação de uma carga indutiva em seus terminais. Para isso, foi usado um motor de indução de 1/4cv sem carga CA. Após a aplicação do motor de indução aos terminais do GI, também foi aplicada uma carga puramente resistiva de 300W.

A Figura 3.54 apresenta o comportamento da tensão L13 durante a aplicação das cargas.

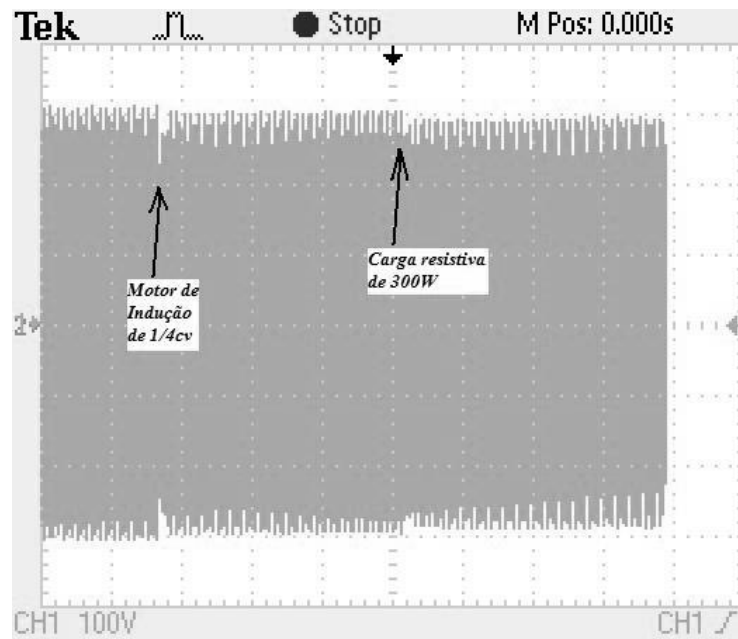


Figura 3.54 - Comportamento da tensão L13 durante a aplicação das cargas.

Observa-se que ao partir o motor de indução, ocorre um afundamento da tensão maior que o experimentado durante a aplicação de carga resistiva. Isto ocorre devido à energia requerida para acelerar a massa do rotor do motor (energia cinética). Esta energia é retirada dos capacitores  $C_{cc}$  do conversor PWM.

O controle da tensão nos terminais do GI é feito por meio do controle da tensão CC sobre o capacitor  $C_{cc}$ . Desta forma, o capacitor sofre uma rápida redução em sua tensão, pois o motor de indução é aplicado em degrau, e que conseqüentemente causa uma queda da tensão do lado CA do conversor. No entanto o controle atua de forma a manter esta tensão constante, adequando a tensão à nova carga aplicada aos terminais do GI alguns ciclos depois.

A Figura 3.55 apresenta a forma de onda das tensões de linha após aplicadas as cargas aos terminais do GI.

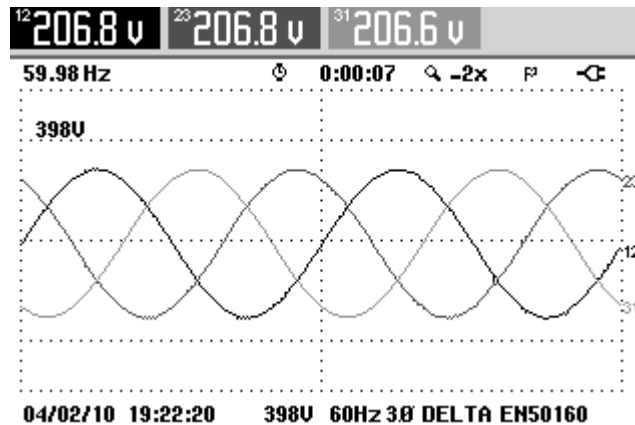


Figura 3.55 - Forma de onda das tensões de linha após aplicadas as cargas.

Pode-se observar que mesmo com cargas que necessitam de potências ativa e reativa, as tensões se mostram equilibradas e defasadas  $120^\circ$ , conforme pode ser visto na Figura 3.56.

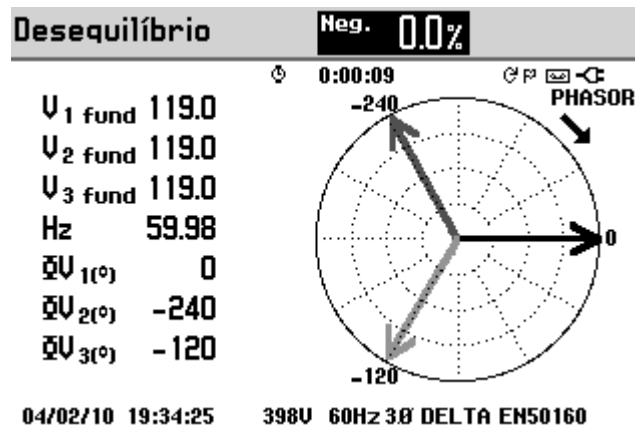


Figura 3.56 - Fasores das tensões.

Da mesma forma como as tensões, as correntes apresentam-se defasadas em  $120^\circ$  e equilibradas, conforme Figura 3.57.

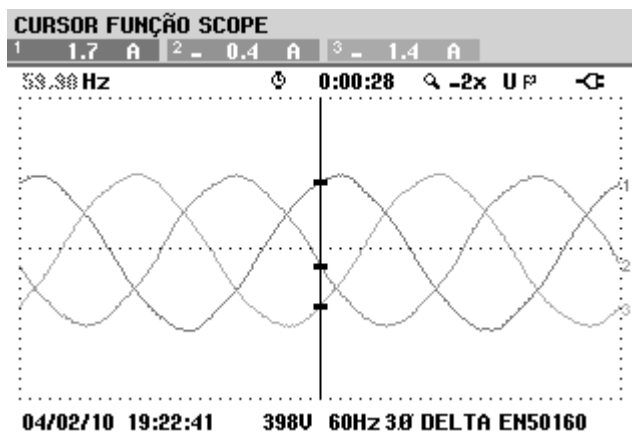


Figura 3.57 - Correntes de linha após aplicadas as cargas aos terminais do GI.

A Figura 3.58 apresenta os valores eficazes medidos das tensões e correntes nos terminais do GI.

Volt/Amp/Hz			
	0:00:33		
	L12	L23	L31
V <sub>rms</sub>	206.61	206.64	206.49
V <sub>pk</sub>	296.7	295.9	293.2
CF	1.44	1.43	1.42
Hz	59.990		
	L1	L2	L3
A <sub>rms</sub>	1.3	1.3	1.3
A <sub>pk</sub>	2.0	1.9	1.9
CF	1.50	1.47	1.48
04/02/10 19:23:33 398U 60Hz 3Ø DELTA EN50160			

Figura 3.58 - Valores eficazes das tensões e correntes medidas nos terminais do GI.

Pode-se observar que as tensões apresentam um desequilíbrio máximo de 0,15V, e as correntes não apresentam desequilíbrio em seus valores eficazes.

Os valores eficazes das tensões e correntes do GI foram monitoradas durante oito minutos, conforme mostra a Figura 3.59.

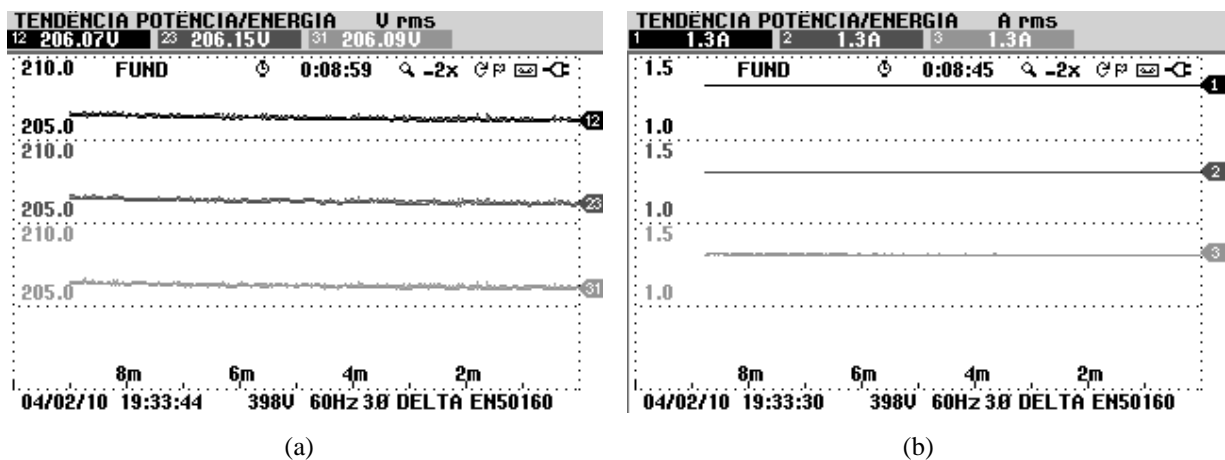


Figura 3.59 - Valores eficazes das tensões (a) e correntes (b) de linha.

Observa-se uma queda no valor das tensões. Este fato se dá devido ao início do funcionamento do sistema, que aumenta suas perdas com o aumento da temperatura do GI. No entanto, após quatro minutos de funcionamento pode-se observar que a tensão se estabiliza. O mesmo comportamento não foi observado nos valores eficazes das correntes de linha.

A Figura 3.60 a apresenta potência e energia consumida pelas cargas após oito minutos de sua aplicação.

Potência e Energia				
FUND	0:08:22			PF
L1	L2	L3	Total	
kW				0.35
kVA				0.47
kVAR				0.32
PF				0.74
Cos $\phi$				
kWh				0.048
kVAh				0.065
kVARh				0.045
START 04/02/10 19:24:45				0:08:21

Figura 3.60 - Potência e Energia consumidas pelo GI após oito minutos da aplicação as cargas.

Pode-se observar o baixo fator de potência das cargas e que o sistema de geração foi capaz de suprir satisfatoriamente as cargas durante o tempo analisado, comprovando assim a capacidade do conversor PWM de suprir cargas com potência reativa.

A DHT da tensão de linha é mostrada na Figura 3.62.

TABELA DE HARMÔNICOS			
Volt	L12	L23	L31
THD% <sub>r</sub>	1.1	1.2	0.8
H3% <sub>r</sub>	0.2	0.1	0.2
H5% <sub>r</sub>	0.8	0.9	0.6
H7% <sub>r</sub>	0.2	0.2	0.2
H9% <sub>r</sub>	0.1	0.0	0.0
H11% <sub>r</sub>	0.1	0.1	0.1
H13% <sub>r</sub>	0.1	0.1	0.0
H15% <sub>r</sub>	0.0	0.0	0.0
04/02/10 19:24:17 398V 60Hz 3Ø DELTA EN50160			

Figura 3.61 - Tabela de harmônicos gerada pelo analisador de energia.

Assim como para cargas puramente resistivas, a componente mais significativa é a de 5° ordem. Observa-se também que há a redução no valor total da distorção harmônica da tensão após aplicadas as cargas.

A Figura 3.62 apresenta a corrente elétrica injetada a rede monofásica da concessionária e a tensão sobre o capacitor  $C_{cc}$  durante a aplicação das cargas.

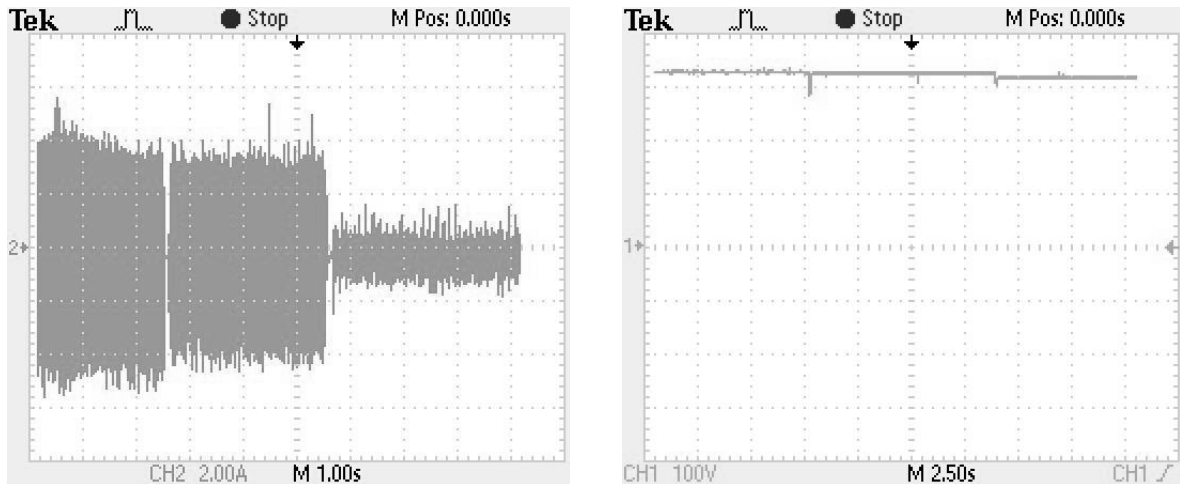


Figura 3.62 - (a) Corrente injetada a rede monofásica da concessionária; (b) Tensão sobre capacitor  $C_{cc}$ .

Após a aplicação do motor de indução, a corrente injetada a rede monofásica se reduziu de 3,5A para 2,8A. A tensão sobre o capacitor  $C_{cc}$  se reduziu de 339V para 338V. Após aplicada a carga resistiva de 300W, a corrente se reduziu para 0,6A e a tensão sobre o capacitor  $C_{cc}$  para 331V.

A Figura 3.63 mostra o diagrama fasorial da tensão da rede monofásica e da corrente injetada a mesma.

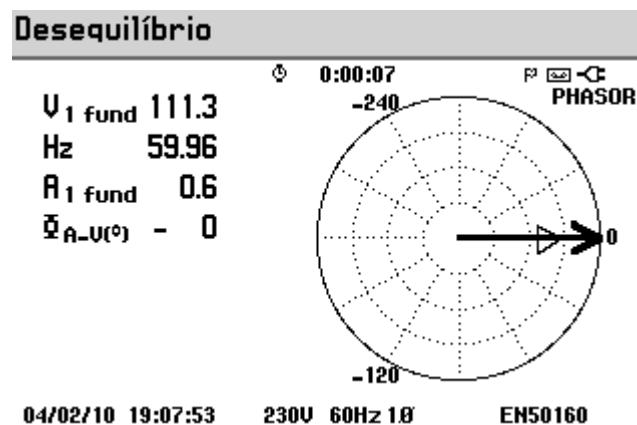


Figura 3.63 - Diagrama fasorial da tensão monofásica da concessionária e corrente injetada a mesma após aplicadas as cargas aos terminais do GI.

Observa-se novamente que o controle da corrente injetada a rede monofásica não é afetado pelo tipo de carga aplicada aos terminais do gerador de indução.

A Figura 3.64 apresenta a tabela de harmônicos gerada pelo analisador de energia.

TABELA DE HARMONICOS	
Volt	L1
THD%	2.4
H3%	0.8
H5%	2.0
H7%	0.4
H9%	0.2
H11%	0.2
H13%	0.2
H15%	0.1

04/02/10 19:07:10 230V 60Hz 1Ø

Figura 3.64 - Tabela de harmônicos gerada pelo analisador de energia.

A DHT medido da rede monofásica da concessionária antes do início dos testes foi de 2,4%, o mesmo apresentado após aplicadas as cargas aos terminais do GI.

*g) Alimentação de retificador trifásico não-controlado.*

Esse teste teve como objetivo verificar o comportamento do sistema de geração a mudanças bruscas de corrente. Para isso foi usado um retificador trifásico não controlado de onda completa (seis diodos) alimentando uma carga puramente resistiva de 384,6Ω.

A Figura 3.65 mostra o comportamento da tensão de linha gerada antes e depois de aplicada a carga.

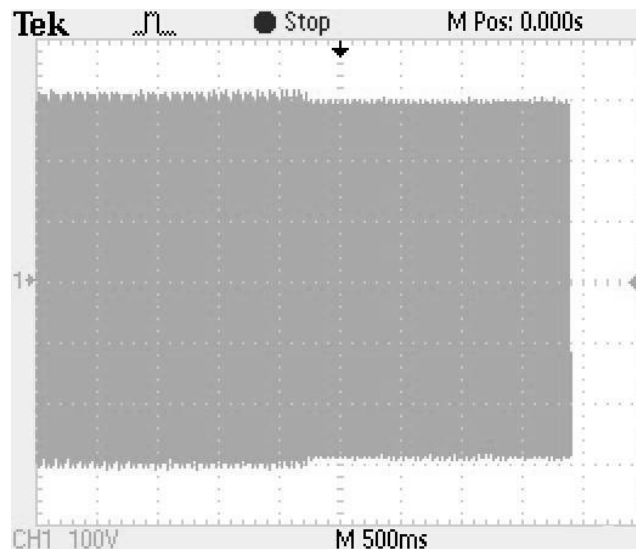


Figura 3.65 - Tensão de linha do GI antes e depois de aplicada a carga.

O valor eficaz da tensão se estabilizou em 217V aproximadamente, após aplicado o retificador trifásico aos terminais do GI.

A forma de onda das tensões de linha é apresentada na Figura 3.66.

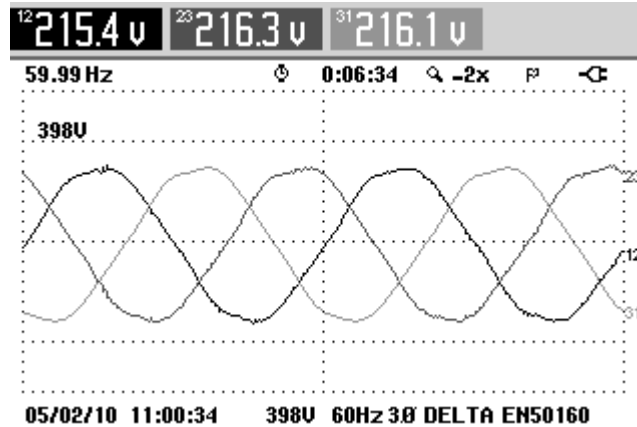


Figura 3.66 - Tensões de linha do GI após aplicação do retificador trifásico aos seus terminais.

As tensões permanecem defasadas  $120^\circ$  entre si. A maior diferença observada foi de 0,9V entre as tensões L12 e L23.

A DHT das tensões é mostrada na Figura 3.67.

TABELA DE HARMÔNICOS			
	L12	L23	L31
THD% <sub>r</sub>	3.2	3.5	3.1
H3% <sub>r</sub>	0.2	0.2	0.3
H5% <sub>r</sub>	3.0	3.2	2.9
H7% <sub>r</sub>	0.6	0.7	0.8
H9% <sub>r</sub>	0.1	0.1	0.0
H11% <sub>r</sub>	0.3	0.3	0.2
H13% <sub>r</sub>	0.2	0.2	0.1
H15% <sub>r</sub>	0.1	0.1	0.0

05/02/10 11:02:30 398U 60Hz 3Ø DELTA EN50160

Figura 3.67 - Tabela de harmônicos gerada pelo analisador de energia após a aplicação do retificador trifásico aos terminais do GI.

Como há um chaveamento da corrente, conseqüentemente há um aumento no valor da distorção harmônica total da tensão gerada de 2,7% sem carga CA para 3,2% após aplicado o retificador trifásico aos terminais do GI.

A Figura 3.68 apresenta a tensão retificada entregue à carga resistiva.

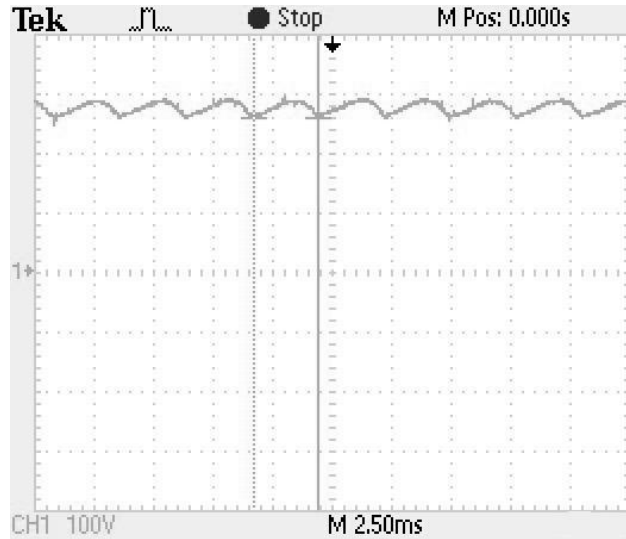


Figura 3.68 - Tensão retificada entregue a carga resistiva.

A frequência de oscilação é de aproximadamente 357Hz (conforme esperado) e a tensão CC medida na saída do retificador foi de 285V.

A Figura 3.69 apresenta o diagrama fasorial da tensão monofásica da concessionária e da corrente injetada a mesma.

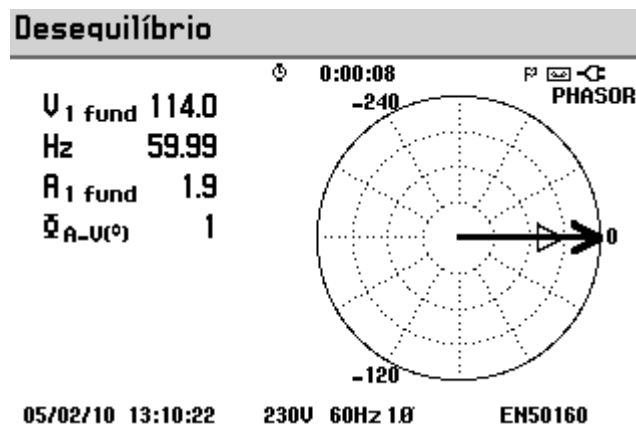


Figura 3.69 – Diagrama fasorial.

Observa-se que o ângulo entre a corrente injetada e a tensão da rede monofásica da concessionária é de  $1^\circ$ , e que o valor eficaz da corrente reduziu de 3,5A para 1,9A aproximadamente.

A Tabela 3.1 apresenta uma síntese dos valores experimentais obtidos para a tensão eficaz CA nos terminais do gerador, a tensão CC no conversor PWM e a corrente eficaz CA injetada na rede monofásica da concessionária.

Os valores obtidos satisfazem os critérios recomendados para a qualidade de fornecimento de energia elétrica segundo previsto pela Resolução 505/2001 da ANEEL.

Os valores das taxas de distorção harmônica total também foram satisfatórios em todas as circunstâncias analisadas, conforme recomendado pela norma IEEE Std 519-1992 do IEEE/ANSI.

A tensão CA produzida pelo sistema, embora atenda os critérios da ANEEL e do IEEE, apresenta distorção harmônica e desequilíbrio de tensão. Isto é até mesmo esperado, tendo-se em conta que a máquina de indução com rotor gaiola não é projetada para operar como gerador. No entanto, a qualidade da energia produzida não viola os requisitos técnicos aplicáveis.

Os principais aspectos e contribuições deste texto serão apresentados no capítulo de conclusões, a seguir.

TABELA 3.1 - Valores percentuais das tensões e correntes eficazes para cargas aplicadas.

Carga aplicada	$V_{ab\text{ eficaz}}$	$V_{cc\text{ eficaz}}$	$I_o\text{ eficaz}$
Sem carga CA	219V	340V	3,5A
Degrau carga resistiva de 75W	218V	338V	2,6A
Degrau carga resistiva de 120W	217V	336V	2,3A
Degrau carga resistiva de 180W	215V	335V	1,8A
Degrau carga resistiva de 300W	212V	332V	1,0A
Degrau carga resistiva de 450W	208V	329V	0,3A
Degrau carga resistiva desequilibrada de 310W	212V	332V	1,0A
Motor de indução trifásico de 1/4cv	214V	338V	2,8A
Degrau duplo Motor de indução trifásico de 1/4cv e carga resistiva de 300W	207V	331V	0,6A
Retificador trifásico	216V	334V	2,0A

## 4 – CONCLUSÃO

---

A partir das simulações feitas e dos resultados experimentais coletados, pode-se concluir que o sistema de geração proposto, baseado na MIT conectados assincronamente à rede monofásica, é capaz de suprir energia para uma carga CA de acordo com os requisitos da Resolução 505/2001 da ANEEL e da norma IEEE Std. 519-1992.

O IMC a tiristores SCRs foi capaz de estabelecer o fluxo de potência entre o lado CA do conversor PWM e a rede monofásica, embora o ângulo de disparo mínimo ajustado em 7° tenha causado um aumento na DHT da tensão da rede ao se injetar a corrente como estratégia de controle de balanço energético do sistema.

Para operação sem carga CA, a tensão gerada apresentou forma de onda senoidal com DHT de 2,5%. A corrente injetada na rede monofásica causou um aumento no valor da DHT da tensão da rede monofásica da concessionária no ponto de aplicação de 2,4% para 2,7%.

O sistema apresentou quedas no valor eficaz da tensão gerada ao se aplicar em seus terminais uma carga equilibrada puramente resistiva.

Os ajustes dos valores de  $K_p$  e  $K_i$  do circuito L4981A foram feitos mediante tentativa, e os melhores resultados obtidos são os apresentados.

A corrente injetada na rede monofásica apresentou uma queda no valor eficaz ao se aplicar na carga aos terminais do gerador, seguindo a proposta de operação do sistema. A corrente só deverá ser injetada na rede monofásica quando houver um excedente de energia gerada. Como a carga consome parte dessa energia, o IMC passa a enviar uma menor quantidade de energia à rede monofásica da concessionária. Observa-se também, que com a redução no valor da amplitude da corrente injetada, houve também uma redução no valor total de distorção harmônica causada a rede monofásica com relação ao gerador operando sem carga CA.

Comportamento semelhante à aplicação de degrau único de carga resistiva aos terminais do gerador apresentou o sistema ao se aplicar um degrau duplo de carga, indutiva e resistiva. A tensão gerada apresentou uma queda total ao final da aplicação das duas cargas (motor de indução de 1/4cv mais carga resistiva de 300W) de 5,90% em relação ao valor sem carga CA.

Para o teste da tensão gerada alimentando um motor de indução trifásico com gaiola de esquilo, as formas de onda da tensão e da corrente apresentaram-se equilibradas e defasadas  $120^\circ$ , mostrando que o sistema de geração é capaz de suprir cargas com potência reativa.

Para a aplicação aos terminais do GI de uma carga puramente resistiva e desequilibrada de 310W, a tensão gerada apresentou o DHT semelhante ao de carga equilibrada puramente resistiva de 300W, mostrando que este sistema tem a capacidade de alimentar cargas resistivas desequilibradas.

Foi aplicado também aos terminais do gerador de indução um retificador trifásico em ponte completa, alimentando uma carga resistiva. A DHT da tensão apresentou um aumento de 2,5% sem carga para 3,2% após a aplicação do retificador aos terminais do GI. Neste caso, o sistema apresentou queda no valor eficaz da tensão gerada em regime permanente de 4 V aproximadamente.

Com a intenção de se verificar o comportamento do controle implementado, foi realizado o teste de rejeição de carga. Observou-se que o sistema, após a perturbação, não apresenta mudança significativa em relação aos valores anteriormente apresentados. A aplicação da carga foi feita da seguinte forma: primeiramente foi aplicada a carga de 180W e posteriormente a carga de 120W. A retirada das cargas do sistema foi feita da seguinte forma: primeiramente se retirou a de 180W, depois a carga de 120W. Ao final, com o gerador operando sem carga no lado CA, o valor eficaz da tensão gerada apresentou o mesmo valor registrado antes de se aplicar as cargas ao sistema.

O sistema proposto mostrou que pode operar como co-gerador para a concessionária em localidades atendidas por linhas monofásicas e com recursos energéticos suficientes.

Como sugestão para investigações futuras tem-se a implantação deste sistema em laboratório como GI acionado por turbina hidráulica, ou acionado por bomba funcionando como turbina (BFT). Um desafio ainda maior seria a implantação de uma microcentral hidrelétrica piloto acionada por BFT ou por microturbina hidráulica, baseada no sistema proposto.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução N° 505. Estabelece de forma atualizada e consolidada, as disposições relativas à conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente.** Novembro 2001.
- ALGER, P. L. **Induction Machines – Their Behavior and Uses.** Gordon and Breach Science Publishers, New York, 2<sup>a</sup> ed., 1970.
- ANALOG DEVICES. **ADSP-21992 EZ-KIT Evaluation System Manual.** 1st. ed. Norwood, USA, 2002
- BASSET, D. E.; POTTER, M. F. **Capacitive Excitation for Induction Generators.** AIEE Transactions, v. 54, p.540-543, 1935.
- CHAPMAN, S. J. **Electric Machinery Fundamentals.** McGraw-Hill, 1985.
- DEMETRIADES, G. M. **The use of Induction Generator for Small-Scale Hydroelectric Schemes in Remote Areas, 10<sup>th</sup> Mediterranean Electrotechnical Conference, MELECON 2000, Vol. III, 2000.**
- DEWAN, S. B., SLEMON, G. R., STRAUGHEN, A. **Power Semiconductors Drives.** John Wiley & Sons, Singapore, 1984.
- FITZGERALD, A. E., KINGSLEY Jr., C., KUSKO, A. **Máquinas Elétricas: Conversão Eletromecânica de Energia, Processos, Dispositivos e Sistemas.** McGraw-Hill do Brasil, 1975.
- HANCOCK, N. N., **Matrix Analysis of Electrical Machinery.** Pergamon Press, London, 1974.
- KRAUSE, P. C.; WASYNCZUK, O.; SUDHOFF, S. D. **Analysis of Electric Machinery.** New York: MacGraw-Hill, 1986.
- MARRA, E. G. **Gerador de Indução Associado a Inversor PWM Operando com Frequência Constante. Tese (Doutorado), UNICAMP, 1999.**
- MARRA, E. G; POMILIO, J. A. **Self-Excited Induction Generator Controlled by a VS-PWM Bi-Directional Converter for Rural Applications.** APEC'98, Anaheim, EUA, 1998.
- MARRA, E. G; POMILIO, J. A. **Induction Generator Based System Providing Regulated Voltage With Constant Frequency.** Anais do 5° Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência – COBEP'99, Foz do Iguaçu, 1999.
- MARRA, E. G; POMILIO, J. A. **Sistemas de Geração Baseados em Gerador de Indução Operando com Tensão Regulada e Frequência Constante.** SBA Controle & Automação Vol 11 n°01, 2000.

- MCPHERSON, G.; LARAMORE, R. D. **Electrical Machines and Transformers**. Second edition. [S.I.]: John Wiley and Sons, 1990. ISBN 0-471-63529-4
- MELO, F. P. de, FELTES, J. W., HANNETT, L. N., WHITE, J. C. Application of Induction Generators in Power Systems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-101, No. 9, pp. 3385-3393, 1982.
- IEEE Std 519-1992. **IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems**, IEEE standards Board, New York, NY, 1993.
- ONG, C. M. **Dynamic Simulation of Electric Machinery: Using Matlab/Simulink**. 1<sup>st</sup> ed. [S.1.]: Prentice Hall PTR, 1998. ISBN 0-13-723785-5.
- SGS-THOMSON. L4981A/L4981B Datasheet. SGS-THOMSON, Italy, 1997.
- SLEMON, G. R. **Magnetolectric Devices: Transducers, Transformers and Machines**. John Willey & sons, New York, 1966.
- SIEMENS. **Integrated Phase Control TCA 780 for Power Electronics**. Applications Notes 45p.
- SIEMENS. **TCA 785 Datasheet**. SIEMENS Group, Germany, 1994.
- SZCZESNY, R.; RONKOWSKI, M. A. **A New Equivalent Circuit Approach to Simulation Converter – Induction Machine Associations**. European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'91), p. 4/356-4/361, 1991.alou
- WANG, L., CHING-HUEI, L. A Novel Analysis on the Performance of an Isolated Self-Excited Induction Generator. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 12, No. 2, pp. 109-117, Jun. 1997.
- WAGNER, C. F. **Self-Excitation of Induction Motors**. AIEE Transactions, v.58, p.47-51, 1939.

## ANEXO A

---

### Dados da Máquina de Indução.

Os parâmetros da MIT utilizados neste trabalho foram obtidos por meio de ensaios a vazio, de rotor bloqueado e determinação da resistência de estator em corrente contínua. Também foram usados os dados de placa fornecidos pelo fabricante.

$V_{nom} (\Delta/Y)$	220V/380V
Potência Nominal	1,0cv
$r_s$	9,96 $\Omega$
$r'_r$	5,05 $\Omega$
$r_m$	1,17k $\Omega$
M	345,9mH
$L_{ls}$	16,26mH
$L'_{ls}$	16,26mH
J (Inércia)	6.10 <sup>-4</sup> kg.m <sup>2</sup>
P (n° de pólos)	4
Frequência Nominal	60Hz
$n_f$ (n° de fases)	3
$n_r$	1720 RPM
Fabricante	WEG