

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



ANÁLISE DA PARTIDA DE MOTORES DE INDUÇÃO
EM SISTEMA ISOLADO DE GERAÇÃO SÍNCRONA

ELIAS FELIPE DE CARVALHO

Uberlândia, 19 de novembro de 2012

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

**ANÁLISE DA PARTIDA DE MOTORES DE INDUÇÃO
EM SISTEMA ISOLADO DE GERAÇÃO SÍNCRONA**

Dissertação apresentada por Elias Felipe de Carvalho
à FEELT-UFU para obtenção do título de Mestre em
Ciências.

Banca Examinadora:

Prof. Luciano Martins Neto, Dr. – UFU (Orientador)
Prof. Roberlam G. de Mendonça, Dr. – IFG
Prof. Adélio José de Moraes Dr. – UFU
Prof. Luiz C. G. de Freitas, Ph.D.– UFU

- C331e
2012 Carvalho, Elias Felipe de, 1964-
 Análise da partida de motores de indução em sistemas isolados de
 geração síncrona / Elias Felipe de Carvalho. -
 2012.
 98 p. : il.
 Orientador: Luciano Martins.
 Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia,
 Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
 Inclui bibliografia.
1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Máquinas elétricas síncronas -
Teses. 3. Energia elétrica - Controle de qualidade - Teses. 4. Moto-
res elétricos de indução - Teses. I. Martins, Luciano. II. Universida-
de Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenha-
ria Elétrica. III. Título.

ANÁLISE DA PARTIDA DE MOTORES DE INDUÇÃO EM SISTEMAS ISOLADOS DE GERAÇÃO SÍNCRONA

Elias Felipe de Carvalho

Dissertação apresentada por Elias Felipe de Carvalho à Universidade Federal de Uberlândia
para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Prof. Luciano Martins Neto, Dr.
Orientador

Prof. Edgard A. Lamounier Júnior, Ph.D.
Coordenador do Curso de Pós Graduação

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Maria Elita de Ávila (in memória) e João Ávila de Carvalho (in memória), minha esposa, Nilma de Oliveira, minha filha, Nicole Oliveira Ávila de Carvalho, todos os meus quatro irmãos e todos os meus familiares, pelo apoio e incentivo.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Luciano Martins, pela orientação.

À minha esposa, Nilma, e minha filha, Nicole, meus irmão e familiares, por todo amor, dedicação e pela paciência nessa jornada.

Aos meus pais, inspiração para sempre crescer e trabalhar.

A toda a minha família por sempre acreditarem no meu potencial.

Aos amigos Silvério e Sônia Penin, juntamente com Edval Delboni, por disponibilizar seus preciosos tempos, conhecimento e motivação para esse empreendimento.

Aos professores e colegas da pós-graduação pelo apoio e amizade.

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais volta ao seu tamanho original”

Albert Einstein

RESUMO

Qualidade da Energia Elétrica é um assunto que assumiu relevância primordial no setor de produção de Energia no Brasil e no exterior. Isso se deve em princípio à grande demanda de Energia Elétrica e a necessidade de um melhor controle na geração, transmissão e distribuição desse produto. Os maiores problemas para esse contexto são as ocorrências de distúrbios elétricos que comprometem o desempenho, a vida útil de equipamentos e dispositivos, produzir interrupções e prejudicar processos industriais e a rede doméstica.

Os transientes de tensão na linha, causado por acionamento de máquinas elétricas, que provocam afundamentos de tensão relevantes, é o tema mais destacado deste trabalho de dissertação. Dentre as máquinas elétricas mais importantes utilizadas pela indústria, está o Motor de Indução Trifásico (MIT). Portanto, um estudo elaborado e consistente sobre os efeitos do acionamento dessas máquinas pode revelar aspectos relevantes e definir como se pode melhorar a Qualidade da Energia, tomando decisões acertadas sobre custos e controle, conhecimento e muitos outros aspectos.

Este trabalho disserta sobre testes elaborados com metodologia científica e baseados em simulações computacionais, alicerçados por experimentos realizados em laboratórios da Universidade Santa Cecília (Santos, SP) e orientado pelo Prof. Dr. Luciano Martins, da FEELT da UFU (Uberlândia, MG), com a colaboração dos Engenheiros Prof. Dr. Silvério Penin y Santos (CDMC e UNISANTA, SP) e Prof. Dr. Edval Deoboni (EMAE, SP). Foram realizados ensaios de acionamentos de MIT com o auxílio de equipamentos de medição computacional e várias comparações com simulações.

Palavras chave: qualidade de energia; máquinas síncronas; motor de indução trifásico; transientes de partida de carga; banco de capacitores; simulação de partida de carga; campo desmagnetizante; tensão de teto; carga estática.

ABSTRACT

Power Quality is an issue that has assumed paramount importance in the sector of energy production in Brazil and abroad. This is due in principle to the great demand for electric energy and the need to better control the generation, transmission and distribution of this product. The biggest problems for this purpose are the occurrences of electrical disturbances that impair performance, service life of equipment and devices, produce disruptions and damage industrial processes and domestic network.

Voltage transients on the line, caused by activation of electrical machinery, causing voltage sags relevant, is the most prominent theme of this dissertation work. Among the most important electrical machines used by the industry, is the Phase Induction Motor (MIT). Therefore, a study prepared and consistent on the effects of activation of these machines can reveal important aspects and define how we can improve the quality of energy, taking decisions about costs and control, knowledge, and many other aspects.

This paper talks about tests made with scientific methodology and based on computer simulations, substantiated by experiments carried out in laboratories at the University Santa Cecilia (Santos, SP) and supervised by Prof.. Dr. Luciano Martins, FEELT of the UFU (Uberlândia, MG), with the collaboration of Prof. Engineers. Dr. Silverio Santos y Penin (CDMC and UNISANTA, SP) and Prof. Dr. Edval Deboni (EMAE, SP). Tests of MIT drives with the help of measuring equipment and several comparisons with computational simulations.

Key words:power quality, synchronous machines, three-phase induction motor; transient starting load, capacitor bank, simulation starting load; demagnetizing field; ceiling voltage, static load.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Usina geradora de 2MVA instalada na Sherwin Willians

Figura 1.2 Afundamento da tensão durante a partida de motor de indução – Comportamento da Tensão

Figura 1.3 Afundamento da tensão durante a partida de motor de indução – Comportamento da Corrente

Figura 2.1 Circuito equivalente simplificado de gerador CA [16]

Figura 2.2 Diagrama fasorial de regime de operação de geradores [17]

Figura 2.3 Curva de Capabilidade [17]

Figura 3.1 Diagrama de blocos de um sistema de excitação típico.

Figura 3.2 Excitação estática com controle puramente eletrônico [11].

Figura 3.3 Excitação estática compoundada [11].

Figura 3.4 Tipos de excitação: Estática e Rotativa [19]

Figura 3.5 Excitação sem escovas auto-excitado [11].

Figura 3.6 Diagrama de FMM's e fluxos [11].

Figura 3.7 Pólos Salientes [11].

Figura 3.8 Diagrama fasorial de tensão, corrente FEM's e fluxo

Figura 3.9 Comportamento do gerador com carga desmagnetizante [11].

Figura 3.10 Tensão do gerador com aplicação de carga desmagnetizante [11].

Figura 4.1 - partida do MI 100CV com V_n e $f_n=60\text{Hz}$

Figura 4.2- partida do MI 100CV com $V_n=1100,95$ e $f=54\text{ Hz}$

Figura 4.3- partida do MI 100CV com $V_n=978,6$ e $f=48\text{ Hz}$

Figura 4.4- partida do MI 100CV com $V_n=856,3$ e $f=42\text{ Hz}$

Figura 4.5- partida do MI 100CV com $V=616,6$ e $f=30\text{ Hz}$

Figura 4.6- partida do MI 100CV com $V_n=489,3$ e $f=24\text{ Hz}$

Figura 4.7- partida do MI 100CV com $V_n=376,7$ e $f=18\text{ Hz}$

Figura 4.8 - comportamento da corrente e do conjugado de partida

Figura 5.1 Representação do GS no MATLAB

Figura 5.2 Circuitos equivalentes extraídos do Help do SIMULINK

Figura 5.3 Sistemas de equações extraídos do Help do SIMULINK

Figura 5.4 Esquema

Figura 5.5 Esquema utilizando excitação rotativa

Figura 5.6 Máscara do GS com os parâmetros utilizados no experimento

Figura 5.7 Máscara do MIT com os parâmetros utilizados no experimento.

Figura 5.8 Partida do MIT de 2 CV no sistema de excitação estática: Corrente de Partida – tempo (seg.) x corrente (A)

Figura 5.9 Partida do MIT de 2CV no sistema de excitação estática: Afundamento de Tensão – tempo (seg.) x tensão (V)

Figura 5.10 Partida do MIT de 2CV no sistema de excitação rotativa: Corrente de Partida – tempo (seg.) x corrente (A)

Figura 5.11 Partida do MIT de 2CV no sistema de excitação rotativa: Afundamento de Tensão – tempo (seg.) x tensão (V)

Figura 5.12 Partida do MIT de 2CV no sistema de excitação rotativa: Afundamento de Tensão "zoom" da figura 5.11 – tempo (seg.) x tensão (V)

Figura 5.13 – Circuito com chaveamento de banco de capacitores e controle PI

Figura 5.14 – Afundamento de tensão do circuito da figura 5.13 sem acionamento do banco de capacitores.

Figura 5.15 – Afundamento de tensão do circuito da figura 5.13 com acionamento do banco de capacitores.

Figura 5.16 – Transiente da corrente do circuito da figura 5.13 sem o acionamento do banco de capacitores.

Figura 5.17 – Transiente da corrente do circuito da figura 5.13 com o acionamento do banco de Capacitores.

Figura 5.18 – Rotação (RPM) em função do tempo (s) do MIT, do circuito da figura 5.13 com o acionamento do banco de Capacitores durante a partida.

Figura 5.19 – Zoom da figura 5.18.

Figura 5.20 – Variação da Capacitância em função do tempo do banco de capacitores .

Figura 5.21 – Variação da capacitância em função da rotação do MIT.

Figura 6.1 Esquema de Ligação do Ensaio com Excitação Estática

Figura 6.2 Esquema de Ligação do Ensaio com Excitação Rotativa (Sem escovas)

Figura 6.3 Conjunto Moto Gerador

Figura 6.4 Motor Assíncrono

Figura 6.5 Máquina Síncrona-Gerador

Figura 6.6 Excitatriz Rotativa

Figura 6.7 Regulador de Tensão

Figura 6.8 Quadro de Cargas

Figura 6.9 Quadro com Resistências

Figura 6.10 Quadro com Indutores

Figura 6.11 MIT1 – 2CV

Figura 6.12 MIT2 – $\frac{1}{2}$ CV

Figura 6.13 MIT3 – $\frac{1}{2}$ CV

Figura 6.14 Tensão e corrente na armadura do gerador em vazio.

Figura 6.15 Tensão e corrente no campo do gerador em vazio no instante da ligação do regulador.

Figura 6.16 Ligação dos Resistores – Triângulo – Estrela

Figura 6.17 Curvas de tensão e corrente na armadura do gerador com carga resistiva.

Figura 6.18 Curva da tensão de campo do gerador com carga resistiva.

Figura 6.19 Curva da corrente de campo do gerador com carga resistiva

Figura 6.20 Ligação das Indutâncias – Triângulo – Estrela

Figura 6.21 Curva da tensão e corrente de armadura do gerador com carga fortemente indutiva

Figura 6.22 Tensão e corrente de armadura do gerador com carga indutiva e motor de $\frac{1}{2}$ CV conectados paralelamente à armadura do gerador.

Figura 6.23 Tensão e corrente de armadura do gerador com motor de 2,0 CV conectado à armadura do gerador.

Figura 6.24 Tensão e corrente de campo do Gerador com motor de 2,0 CV.

Figura 6.25 Tensão e corrente de armadura do gerador com carga indutiva conectada à armadura do gerador

Figura 6.26 Tensão e corrente de campo do gerador com carga indutiva

Figura 6.27 Tensão e corrente de armadura do gerador conectada com carga indutiva em paralela a MIT de 2,0 CV

Figura 6.28 Tensão e corrente de campo do gerador conectada com carga indutiva em paralela a MIT de 2,0 CV

Figura 6.29 Tensão e corrente de armadura do gerador conectada com carga indutiva em paralela com MIT's de 2,0 e $\frac{1}{2}$ CV

Figura 6.30 Tensão e corrente de campo do gerador conectada com carga indutiva em paralela com MIT's de 2,0 e $\frac{1}{2}$ CV

Figura 6.31 Tensão e corrente de armadura do gerador conectada com carga indutiva em paralela com MIT de $\frac{1}{2}$ CV.

Figura 6.32 Tensão e corrente de campo do gerador conectada com carga indutiva em paralela com MIT de $\frac{1}{2}$ CV.

Figura 6.33 Tensão e corrente de armadura do gerador conectada com carga indutiva em paralela com dois MIT's de $\frac{1}{2}$ CV.

Figura 6.34 Tensão e corrente de campo do gerador conectada com carga indutiva em paralela com dois MIT's de $\frac{1}{2}$ CV.

Figura 6.35 Tensão e corrente de armadura do gerador conectada com carga indutiva em paralela com dois MIT's de $\frac{1}{2}$ CV e um MIT de 2,0 CV

Figura 6.36 Tensão e corrente de campo do gerador conectada com carga indutiva em paralela com dois MIT's de $\frac{1}{2}$ CV e um MIT de 2,0 CV

Figura 6.37 Tensão e corrente de armadura do gerador conectada com carga resistiva

Figura 6.38 Tensão e corrente de campo do gerador conectada com carga resistiva

Figura 6.39 Tensão e corrente de armadura do gerador conectada com carga resistiva em paralelo com MIT de 2,0 CV

Figura 6.40 Tensão e corrente de campo do gerador conectada com carga resistiva em paralelo com MIT de 2,0 CV

Figura 6.41 Tensão e corrente de armadura do gerador conectada com carga resistiva em paralelo com MIT's de 2,0 e $\frac{1}{2}$ CV

Figura 6.42 Curva da tensão e corrente de campo do gerador conectada com carga resistiva em paralelo com MIT's de 2,0 e $\frac{1}{2}$ CV

Figura 6.43 Tensão e corrente de armadura do gerador conectada com carga resistiva em paralelo com dois MIT's de $\frac{1}{2}$ CV

Figura 6.44 Tensão e corrente de campo do gerador conectada com carga resistiva em paralelo com dois MIT's de $\frac{1}{2}$ CV

Figura 6.45 Tensão e corrente de armadura do gerador conectada com carga resistiva em paralelo com dois MIT's de $\frac{1}{2}$ CV e MIT de 2,0 CV

Figura 6.46 Tensão e corrente de campo do gerador conectada com carga resistiva em paralelo com dois MIT's de $\frac{1}{2}$ CV

Figura 6.47 Excitação Estática Tensão de Armadura (VA)

Figura 6.48 Excitação Estática Corrente de Armadura (IA)

Figura 6.49 Excitação Estática Tensão de Campo (Vf)

Figura 6.50 Excitação Estática Corrente de Campo (If)

Figura 6.51 Excitação Rotativa: Tensão de Armadura (VA)

Figura 6.52 Excitação Rotativa: Corrente de Armadura (IA)

Figura 6.53 Excitação Rotativa: Tensão de Campo (Vf)

Figura 6.54 Excitação Rotativa: Corrente de Campo (If)

Figura 6.55 Excitação Rotativa: Resistência de Campo em Ohms(Rf)

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Requisitos técnicos mínimos para a excitatriz – ONS

Tabela 4.1-comportamento da corrente e do conjugado de partida

Tabela 6.1 Dados Motor Assíncrono

Tabela 6.2 Dados do Gerador

Tabela 6.3 Dados da Excitatriz Rotativa

Tabela 6.4 Dados do Regulador de Tensão

Tabela 6.5 Dados Quadro com Resistências

Tabela 6.6 Dados Quadro com Indutores

Tabela 6.7 Dados MIT1 – 2CV

Tabela 6.8 Dados MIT2 – $\frac{1}{2}$ CV

Tabela 6.9 Dados MIT3 – $\frac{1}{2}$ CV

Tabela 6.10 Gerador Vazio (Excitação Estática)

Tabela 6.11 1a Ligação: Carga Resistiva – Excitação Estática

Tabela 6.12 2a Ligação: Carga Resistiva – Excitação Estática

Tabela 6.13 3a Ligação Carga Resistiva – Excitação Estática

Tabela 6.14 1a Ligação Carga Indutiva – Excitação Estática

Tabela 6.15 2a Ligação Carga Indutiva – Excitação Estática

Tabela 6.16 3a Ligação Carga Indutiva – Excitação Estática

Tabela 6.17 Valores na ocorrência de desmagnetização – Excitação Estática

Tabela 6.18 Gerador Vazio – Excitação Rotativa

Tabela 6.19 Ensaio com MIT de 2CV – Excitação Rotativa

Tabela 6.20 Ensaio com Carga Indutiva – Excitação Rotativa

Tabela 6.21 Ensaio com Carga Indutiva paralela com MIT de 2,0 CV

Tabela 6.22 Ensaio com Carga Indutiva em paralelo com MIT de 2,0CV e um MIT de $\frac{1}{2}$ CV – Excitação Rotativa

Tabela 6.23 Ensaio de Carga Indutiva em paralelo com MIT de $\frac{1}{2}$ CV – Excitação Rotativa

Tabela 6.24 Ensaio Carga Indutiva paralela a dois MIT's de $\frac{1}{2}$ CV

Tabela 6.25 Ensaio de Carga Indutiva em paralelo com dois MIT's de $\frac{1}{2}$ CV e um MIT de 2,0CV – Excitação rotativa

Tabela 6.26 Ensaio Carga Resistiva - Excitação Rotativa

Tabela 6.27 Ensaio Carga Resistiva em paralelo com MIT 2,0CV – Excitação Rotativa

Tabela 6.28 Ensaio Carga Resistiva em paralelo com um MIT de 2,0 CV e outro de $\frac{1}{2}$ CV – Excitação Rotativa

Tabela 6.29 Ensaio Carga Resistiva em Paralelo com Dois Motores de Indução de $\frac{1}{2}$ CV – Excitação Rotativa

Tabela 6.30 Ensaio Carga Resistiva em paralelo com dois MIT's de $\frac{1}{2}$ CV e um MIT de 2,0CV – Excitação Rotativa

Tabela 6.31 Comparativo dos valores de afundamento de Tensão

LISTA DE ABREVIACÕES/ACRÔNIMOS

QEE – Qualidade de Energia Elétrica

CC – Corrente Contínua

CA – Corrente Alternada

IEEE – Institute of Electric and Electronics Engineers

UPS – Uninterruptible Power Supply

IEAR – Interrupted Energy Assessment Rate

MIT – Motor de Indução Trifásico

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

P.U. – Por Unidade

VTCD – Variações de Tensão de Curta Duração

SCRs – Silicon Controlled Rectifier

IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor

PMG – Permanent Magnet Generator

SBQEE – Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica

CIGRÉ – Conseil International des Grands Réseaux Électriques

CIRED –Congresso Internacional de Redes Elétricas de Distribuição

IEC – International Electrotechnical Commission

ANEEL –Agência Nacional de Energia Elétrica

CPFL –Companhia Paulista de Força e Luz

fp –Fator de Potência

GS – Gerador Síncrono

UFU – Universidade Federal de Uberlândia

EDF – Eletricité de France

FEM – Força Eletromotriz

AVR – Automatic Voltage Regulator

C.V – Ceiling Voltage

LISTA DE SIMBOLOGIAS

N_s – Velocidade de rotação [rpm].

f – Frequência [Hz].

P – Número de pólos.

V_t – Tensão nos terminais, por fase.

X_s – Reatância Síncrona

$E_f = V_f$ – Tensão intrínseca do gerador.

I – Corrente fornecida pelo gerador.

δ – Ângulo de potência.

θ – Ângulo de defasagem entre a tensão nos terminais e a corrente fornecida pelo gerador.

I_f – Corrente de campo.

I_a – Corrente de armadura.

F_a – Força magneto motriz de reação de armadura.

F_f – Força magneto motriz de campo.

F_r – Força resultante de reação de armadura.

r_a – Resistência de armadura.

F_d – Força no eixo direto.

F_q – Força no eixo de quadratura.

ϕ_r – Fluxo resultante.

$x'_d = X'_r$ – Reatância transitória do eixo direto.

x''_d – Reatância subtransitória.

ΔV – Variação de tensão.

V_n – Tensão nominal do gerador.

V_{FA} – Tensão de fase na armadura.

V_A – Tensão de armadura.

R_f – Resistência de campo.

$V_{bob. exc.}$ – Tensão da bobina da excitatriz.

$R_{bob. exc.}$ – Resistência da bobina da excitatriz.

$I_{bob. exc.}$ – Corrente da bobina da excitatriz.

V_{PA} – Tensão de pico da armadura.

I_{PA} – Corrente de pico da armadura.

I_{ef} – Corrente eficaz do motor.

V_{rede} – Tensão de rede.

Z_{rede} – Impedância de rede.

V_{base} – tensão de base.

X_{base} – Reatância de base.

X_e – Reatância equivalente.

X – Reatância do gerador.

S – Potência do Gerador.

V_{reg} - Tensão que o regulador pode fornecer ao campo.

SUMÁRIO

<u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</u>	17
<u>1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS</u>	17
<u>1.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE ESTE TRABALHO</u>	18
<u>1.3. OBJETIVO DESTE TRABALHO</u>	20
<u>1.4. METODOLOGIA USADA</u>	21
<u>1.5. MOTIVAÇÃO DESTE TRABALHO</u>	21
<u>1.6. ESTADO DA ARTE</u>	21
<u>CAPÍTULO 2 - MÁQUINAS SÍNCRONAS</u>	23
<u>2.1. GERADORES SÍNCRONOS</u>	23
<u>2.1.1. Funcionamento sem conexão com a rede ou com outros geradores</u>	24
<u>2.2. LIMITES OPERACIONAIS – CURVA DE CAPABILIDADE</u>	25
<u>2.3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DOS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO</u>	27
<u>CAPÍTULO 3 - EXCITAÇÃO DE GERADORES SÍNCRONOS</u>	29
<u>3.1. EXCITAÇÃO ESTÁTICA</u>	30
<u>3.2. EXCITAÇÃO ROTATIVA SEM ESCOVAS</u>	32
<u>3.3. REGULADOR DE TENSÃO</u>	34
<u>3.4. TENSÃO DE TETO – CEILING VOLTAGE</u>	34
<u>3.5. DINÂMICA DOS GERADORES – APLICAÇÃO DE GRANDES BLOCOS DE CARGA</u>	35
<u>CAPÍTULO 4 - PARTIDA DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS</u>	40
<u>CAPÍTULO 5 - SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS</u>	45
<u>5.2 PARTIDA DO MIT DE 2 CV COM SEQUENCIAMENTO DE BANCO DE CAPACITORES</u>	51
<u>CAPÍTULO 6 - ENSAIOS LABORATORIAIS</u>	57
<u>6.1. EQUIPAMENTOS, MATERIAIS E MÉTODOS</u>	58
<u>6.1.1. Conjunto Moto Gerador</u>	58
<u>6.1.2. Regulador de Tensão</u>	61
<u>6.1.3. Quadro de Cargas</u>	61
<u>6.1.4. Motores de Indução</u>	63
<u>6.2. RESULTADOS</u>	64
<u>6.2.1. Excitação Estática</u>	65
<u>6.2.2. Excitação Rotativa</u>	70
<u>6.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS</u>	88
<u>6.3.1. Comparação dos Ceiling Voltage (C.V.) com relação ao aquecimento do GS</u>	93
<u>CAPÍTULO 7 - CONCLUSÃO</u>	95
<u>BIBLIOGRAFIA</u>	97

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais

O controle de tensão dos geradores síncronos experimenta uma visível inflexão nos anos 60 com a retificação controlada proporcionada pelos tiristores ou SCRs¹.

Anteriormente os controles eram efetuados por dispositivos eletromecânicos com respostas lentas, o que conferia aos sistemas de geração dificuldades para recuperação da tensão quando o gerador era submetido a cargas elevadas e com características indutivas como ocorre na partida de Motor de Indução Trifásico (MIT). Os retificadores de silício conferem aos reguladores de tensão uma alta velocidade de resposta, permitindo aplicação de maiores degraus de carga com afundamentos de tensão menores. Geradores sem escovas substituíram os geradores com excitação independente constituída por gerador CC. Sistemas de Excitação Estática começaram a ser usados com vantagens no que diz respeito à rapidez nas respostas. Os sistemas de regulação eletrônica com excitação rotativa ou estática adicionados a dispositivos que atuam em função da corrente, resultaram em sistemas compostos (*compound*) com capacidade de suportar cargas reativas extremamente altas. A Figura 1.1 mostra uma Usina Geradora. [1]



Figura 1.1 Usina geradora de 2MVA instalada na Sherwin Willians

¹SCR (Retificador Controlado de Silício) é um componente eletrônico semicondutor de quatro camadas.

Na década de 80 houve um avanço tecnológico na fabricação de semicondutores e no controle de velocidade dos MIT. Com o surgimento dos IGBTs² foram criados os Inversores de Frequência, com suas vertentes de controle por relação entre tensão e frequência ou o controle vetorial.

Com o controle de tensão e frequência efetuado por fontes chaveadas verificou-se o aumento da quantidade de harmônicas nas redes elétricas, obrigando os especialistas de qualidade de energia em esforços para mitigar a referida poluição elétrica, pois os diversos sistemas digitais de automação e controle existentes, não suportam componentes harmônicas de corrente em níveis excessivos. Aos distúrbios provocados pela poluição elétrica das cargas chaveadas, somam-se àqueles advindos da partida dos motores de indução. Embora não seja objeto deste trabalho pode-se ressaltar que as componentes harmônicas de corrente geram aquecimento nas máquinas, nos transformadores e nos alimentadores.

A má qualidade da energia pode provocar paradas nos processos produtivos, bem como a redução da vida útil de equipamentos e instalações, aumentando os custos oriundos de manutenção e incompatibilizando os custos dos investimentos.

Além dos distúrbios mencionados, outros podem ocorrer nas linhas de alimentação: Transitórios, Afundamentos (*Sag*), Elevação (*Swell* ou *Surge*) e Interrupção de Tensão.

Tendo em vista os impactos dos distúrbios já registrados, os fabricantes de equipamentos industriais estão conferindo certa imunidade a seus produtos no que se refere a variações na qualidade de energia elétrica, introduzindo filtros e sensores de tensão e corrente, onerando o produto e repassando custos ao consumidor final.

1.2. Considerações sobre este trabalho

O estudo apresentado enfoca principalmente o afundamento de tensão provocado pela partida dos MITs alimentados por usinas geradoras com potências limitadas a três ou quatro vezes a dos motores a serem acionados em partida direta. É comum a ocorrência deste distúrbio em geração distribuída em que a usina trabalha em ilha (geração própria). Em sistemas elétricos em que a usina geradora opera em regime de paralelismo permanente com a rede, os problemas de afundamento tornam-se menos graves, pois a rede poderá suportar a partida. Quando a rede possui um nível de curto-circuito elevado ou impedância de curto-circuito baixa pode-se afirmar que não ocorrerá afundamento de tensão significativo mesmo em partida direta dos MITs a serem acionados.

² IGBT (Transistor Bipolar de Gate Isolado) é um transistor cujo terminal (gate) é isolado o canal principal. Possui alta impedância de entrada e capacidade de trabalho com grandes potências em frequências elevadas.

A Figura 1.2 e a Figura 1.3 representam o comportamento típico da tensão durante a partida de motor de indução alimentados por gerador(es) trabalhando em ilha.

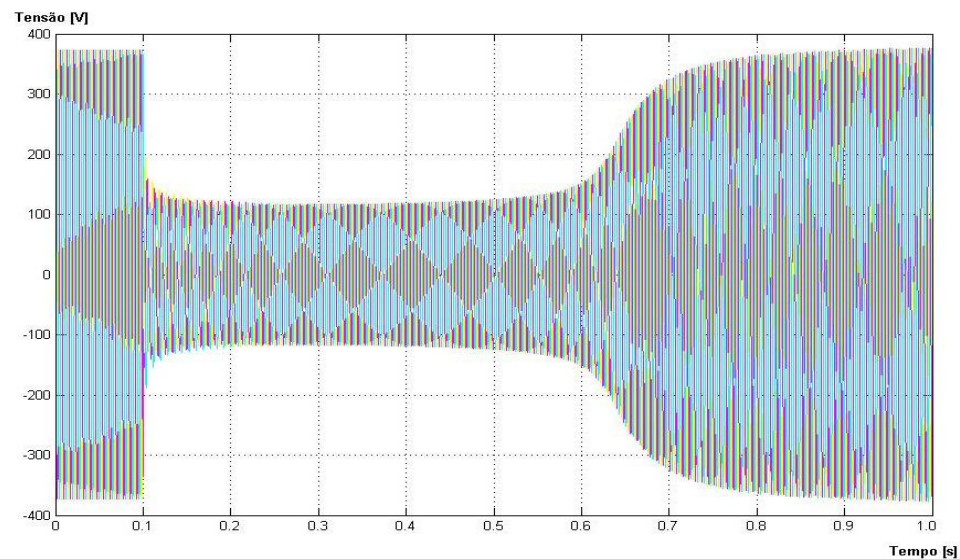


Figura 1.2 Afundamento da tensão durante a partida de motor de indução – Comportamento da Tensão

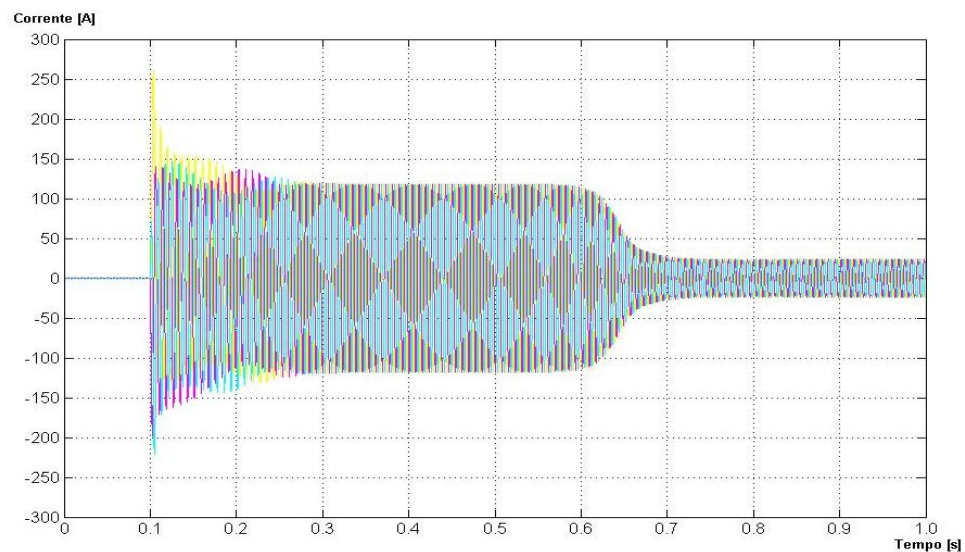


Figura 1.3 Afundamento da tensão durante a partida de motor de indução – Comportamento da Corrente

O Afundamento de Tensão é a redução no valor eficaz da tensão de alimentação em uma ou mais fases do sistema, um fenômeno magnético de curta duração, frequentemente presente em sistemas elétricos industriais com geração em ilha (geração distribuída) descritos por duas características essenciais: magnitude e duração [2].

As principais causas de afundamento de tensão são: conexão de grandes blocos de carga reativa, falhas no sistema elétrico, defeitos que provoquem curto-circuito em disjuntores, UPS³ instável, energização de transformadores e curto-circuito em qualquer ponto de fornecimento de energia. Chaveamentos de cargas pesadas, tais como motores de indução também causam tal efeito, pois se constituem em cargas reativas que se reduzem após a partida.

A recuperação do nível de tensão depende das dimensões da fonte e das características elétricas e mecânicas da carga. No caso de um MIT ser alimentado por um ou vários geradores desconectados da rede comercial, o afundamento e a recuperação depende de outros fatores como [3]:

- Rapidez de resposta do sistema de excitação;
- Tensão de teto (*Ceiling voltage*);
- Impedância interna dos Geradores Síncronos;
- Energia mecânica armazenada na parte rotativa ($\frac{1}{2} J\omega^2$).

As principais consequências da ocorrência do afundamento de tensão são [3]:

- Reinicialização da operação do gerador;
- Abertura de disjuntores em função da corrente de partida dos MITs;
- Atuação de proteção – Função ANSI 27⁴;
- Interrupção de processos;
- Operação inadequada do equipamento.

1.3. Objetivo deste trabalho

Analisar os afundamentos de tensão que os motores de indução causam durante suas partidas em sistemas de geração síncrona isolada com reguladores de tensão estático e rotativo. Esta análise compreende simulações digitais e ensaios experimentais em laboratório .

Ainda se referindo à partida de motores de indução em geração síncrona isolada, propor, através de estudos teóricos, uma solução não tradicional para a atenuação dos afundamentos de tensão, utilizando-se banco de capacitores acionados em sequência sincronizada com o tempo de aceleração do motor.

³ UPS (Uninterruptible Power Supply) é um sistema de alimentação elétrico que entra em ação, alimentando os dispositivos a ele ligado, quando há interrupção no fornecimento de energia.

⁴ Função ANSI 27 – Proteção contra Subtensão

1.4. Metodologia Usada

Neste trabalho foi realizada uma fundamentação teórica baseada no desenvolvimento do conhecimento de excitação de máquinas síncronas bem como da tensão de pico definida como [7],[9]: “a relação entre a tensão máxima de saída do sistema de excitação e a tensão requerida pelo campo do gerador para trabalho em condições nominais de carga” e a fundamentos de tensão em partidas de motores de indução, sendo que, a mesma será direcionada para modelagem das máquinas elétricas, reguladores de tensão, normas de qualidade de energia elétrica, simulações computacionais e ensaios laboratoriais.

Por meio das simulações computacionais e dos ensaios laboratoriais, realizou-se análises teóricas, consubstanciadas por dados experimentais, obtendo-se elementos conclusivos suficientes para a busca da proposição não tradicional anteriormente citada .

1.5. Motivação deste trabalho

O aumento dos problemas relacionados à qualidade de energia elétrica, bem como a solução para os mesmos, estimula estudos mais aprofundados sobre os fundamentos de tensão que ocorrem na partida dos motores de indução quando a instalação do usuário é alimentada por geração própria. Esta situação é denominada Geração Distribuída que vem crescendo de forma significativa no país e no mundo.

Geração distribuída constitui-se de pequenas centrais de energia elétrica, instaladas o mais próximo possível do consumidor final, independente de sua carga. A expansão desta forma de geração se justifica pela vantagem de não ser necessário a instalação de linhas de transmissão e de distribuição. Além disso, com a instalação de geração própria, há o benefício do suprimento de energia em caso da falta da mesma na rede da concessionária.

Há concessionárias, como a CPFL – Companhia Paulista de Força e Luz, que oferecem a implantação de um sistema de geração de energia, permitindo a diminuição de custos e a auto-suficiência energética a empreendimentos com alto consumo, que não podem parar ou reduzir sua atividade nos momentos em que a energia da rede elétrica se torna mais cara [4].

1.6. Estado da Arte

Em meados da década de 90, diante do aumento dos problemas relacionados à Qualidade de Energia Elétrica bem como o crescente interesse em avaliar a confiabilidade de sistemas elétricos, surgiram estudos visando aprimorar o conhecimento do assunto.

Em 1990, Burke, Griffith e Ward [5], publicaram um artigo que apresenta definições dos vários distúrbios da qualidade da energia elétrica, propostas e algumas soluções para o problema.

Em 1994, Lamoree et al [6] mostraram a atuação dos distúrbios em consumidores, e o aumento da sensibilidade dos equipamentos elétricos, mediante a resultados de diferentes investigações do afundamento de tensão.

Em 1995, o IEEE [7] sugere o monitoramento da qualidade da energia elétrica, onde pode ser encontrada a definição do afundamento de tensão, objetivos do seu monitoramento, instrumentos de medição, aplicação de técnicas e interpretação de resultados de medições.

Em 1996, Bollen [8] caracterizou o afundamento de tensão por meio de uma tensão complexa, o que resultou em quatro tipos de afundamento de tensão classificados em A, B, C e D. O tipo A é devido às faltas trifásicas e os tipos B, C e D, devido às faltas bifásicas e monofásicas.

Em 1998, o IEEE [9] sugere avaliar a relação de sistemas elétricos de potência com equipamentos de processos eletrônicos, onde é enfatizada a importância da preocupação com a qualidade da energia elétrica.

Em 2000, Leão, Rodrigues e Oliveira [10] apresentaram um estudo para os efeitos do afundamento de tensão em sistemas de acionamentos elétricos industriais, identificando os subsistemas mais suscetíveis ao efeito do afundamento de tensão.

Em 2003, Rosana e Selênio [2] apresentaram um artigo no V SBQEE (Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica), o qual investiga os limites de tolerância dos controladores lógico programáveis quando submetidos a afundamentos de tensão.

Em 2004, Penin y Santos, Silverio [11], descreveu os graves afundamentos de tensão que ocorrem em geradores síncronos ao alimentar motores de indução trifásicos que demandam elevadas correntes com baixo fator de potência durante a partida e a aceleração.

Em 2009, Bollen, [12] apresentou no 20º CIRED (Congresso Internacional de Redes Elétricas de Distribuição), realizado em Praga/ República Tcheca, um artigo que abordava principalmente a imunidade de equipamentos industriais frente a perturbações de tensão.

CAPÍTULO 2 - MÁQUINAS SÍNCRONAS

Como todas as máquinas elétricas rotativas, a máquina síncrona pode funcionar como gerador ou motor. Neste capítulo, são apresentadas as definições básicas de uma máquina síncrona funcionando como gerador e seus limites operacionais. Os geradores síncronos possuem fundamental importância na produção de energia elétrica, a maior parte da energia consumida nas indústrias, residências e cidades são provenientes destes geradores.

2.1. Geradores Síncronos

A velocidade de rotação dessas máquinas, quando em frequência constante, varia de acordo com o número de pólos. Isso pode ser observado na equação 2.1:

$$N_s = \frac{120f}{p} \quad (2.1)$$

Onde:

N_s – velocidade de rotação [rpm]

f – frequência [Hz]

p – número de pólos

A principal característica dos geradores síncronos é o fato de trabalharem com rotação constante, podendo ser construídos de duas formas:

- Pólos lisos;
- Pólos salientes.

As principais características do rotor cilíndrico, pólos lisos, são: operar em alta rotação, de 1800 rpm a 3600 rpm; comprimentos elevados quando comparadas com as de pólos salientes e conseqüentemente diâmetro relativamente pequeno, os condutores que formam o campo são alojados em ranhuras, ao longo do comprimento do rotor. Esse tipo de rotor é muito utilizado em Usinas Termoelétricas.

O rotor de pólos salientes é acionado principalmente por turbinas hidráulicas, mas também pode ser acionado por motores a diesel e gás.

Os geradores de pólos salientes possuem número de pólos igual ou superior a quatro, logo sua velocidade de rotação será sempre igual ou inferior a 1800 rpm.

Para que a máquina síncrona seja capaz de converter a energia mecânica em energia elétrica, é necessário que o enrolamento de campo seja alimentado por uma fonte de tensão contínua. Esta corrente recebe o nome de corrente de excitação.

2.1.1. Funcionamento sem conexão com a rede ou com outros geradores

A corrente de excitação tem a função de manter constante a tensão nos terminais do gerador. Esta tensão nos terminais do gerador é monitorada pelo sistema de excitação/regulação, que injeta corrente nos enrolamentos do campo sempre que a corrente de carga impõe uma componente desmagnetizante, o que ocorre com cargas indutivas.

Dependendo do nível de corrente de excitação aplicada ao enrolamento de campo o gerador síncrono pode operar sobreexcitado ou subexcitado [16].

O modelo da Figura 2.1 permite entender a descrição do comportamento efetuado a seguir.

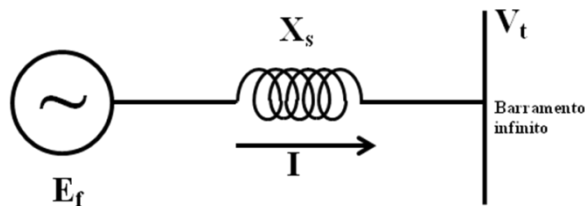


Figura 2.1 Circuito equivalente simplificado de gerador CA [16]

Onde:

V_t – Tensão nos terminais, por fase;

E_f – Tensão gerada, por fase;

X_s – Reatância Síncrona.

I – Corrente fornecida pelo gerador

Quando o gerador está sobreexcitado a corrente de excitação está acima da nominal, isto é, o gerador está fornecendo potência reativa para o sistema, atuando como um capacitor. Conforme diagrama da

Figura 2.2a e b pode-se observar que $|E_f| > |V_t|$ e que a corrente está atrasada em relação a tensão.

Quando a corrente de excitação está abaixo da nominal e adiantada em relação à tensão V_t , o gerador está operando em regime de subexcitação, isto é, absorvendo potência reativa do

sistema. Seu efeito físico é semelhante ao de um indutor. Neste caso observa-se que $|E_f| < |V_t|$ [17].

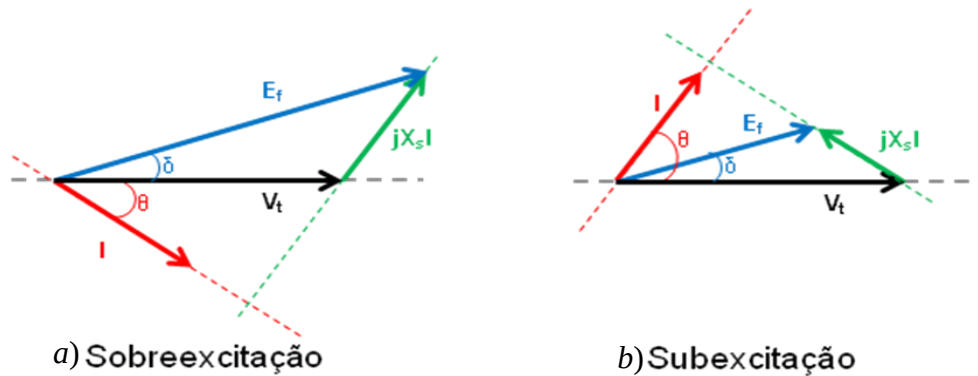


Figura 2.2a e b Diagrama fasorial de regime de operação de geradores [17]

Onde:

V_t – Tensão nos terminais, por fase;

E_f – Tensão gerada, por fase;

X_s – Reatância Síncrona.

I – Corrente fornecida pelo gerador

δ – ângulo de potência

θ – ângulo de defasagem entre tensão nos terminais (V_t) e corrente fornecida pelo gerador (I).

A

Figura 2.2 permite também interpretar o comportamento no momento de partida de um MIT quando a corrente além da elevada intensidade possui uma componente desmagnetizante elevada o que requer um esforço adicional do sistema de excitação/regulação. Por isso é necessário que a tensão de saída que o sistema pode proporcionar seja elevada.

Para que se possa operar um gerador de modo seguro, faz-se necessário conhecer seus limites térmicos por meio da curva de capacidade, que mostra de forma gráfica, na figura 2.3, os limites de operação.

2.2. Limites Operacionais – Curva de Capacidade

A curva de capacidade, também conhecida como curva de capacidade, nada mais é que a curva de operação de um gerador síncrono. Nela são definidos os limites operativos da

máquina em regime permanente e sob condições pré-determinadas. Estes limites são baseados nas características de projeto e construção da máquina.

Por meio da curva de capacidade é possível explorar as potencialidades do gerador observando suas faixas de operação. É possível estudar um plano de operação e também o comportamento da máquina de acordo com variações nos parâmetros do sistema.

Os trechos que formam a curva de capacidade correspondem às limitações operativas do gerador (Figura 2.3), conforme descritos a seguir [17].

- Limite de aquecimento do enrolamento de campo: é o valor máximo de corrente que poderá circular pelo enrolamento de campo ($I_{f\text{máx}}$), sem ultrapassar seus limites de sobreaquecimento. Este limite é fixado pelas perdas no cobre do circuito de campo.
- Limite de aquecimento da armadura: valor máximo de corrente de armadura (I_a) que pode circular pelo enrolamento de armadura sem exceder as limitações de perda no cobre desse enrolamento.
- Limite de Potência da Turbina: é a potência que o gerador pode receber da turbina, esse limite afeta totalmente a potência ativa.
- Limite de Estabilidade: o limite de estabilidade em condições permanentes se dá quando as tensões nos terminais do gerador estão constantes e o ângulo de potência (δ) é igual a 90° . A operação próxima ao limite de estabilidade leva a máquina a operar numa região de baixa excitação, provocando um desempenho bastante instável, o que pode levar à perda do sincronismo em relação ao sistema elétrico. Deve-se lembrar que elevadas excitações provocam aquecimento excessivo.
- Limite de excitação mínima: esse limite evita que o gerador seja levado a operar próximo aos pontos inferiores do limite de estabilidade, pois além da perda de sincronismo citada, também pode provocar sobreaquecimento de partes do estator e do rotor da máquina. Geralmente estabelece-se um limite mínimo de 5% a 10% da excitação nominal [17].

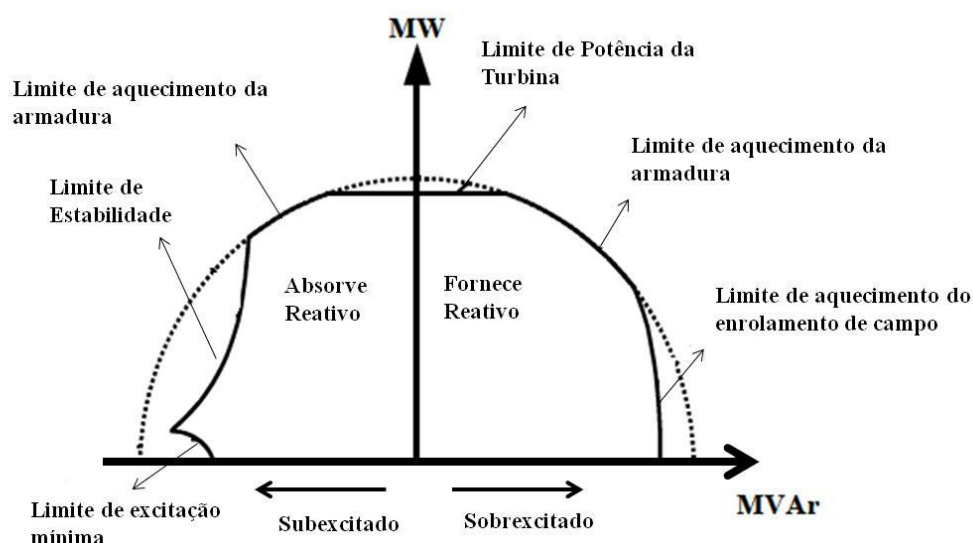


Figura 2.3 Curva de Capabilidade [17]

Os diagramas da Figura 2.2 e a curva de capacidade (Figura 2.3) são para regime permanente e, portanto utilizados para monitorar se o funcionamento está dentro dos limites térmicos do projeto.

Durante a partida de grandes motores de indução com demanda de elevadas correntes indutivas o estudo deve contemplar duas situações.

Quando o gerador síncrono está conectado com a rede o suprimento dessas elevadas correntes pode ser proporcionada pela rede. O afundamento pode ser determinado a partir da impedância de entrada da mesma.

Quando o gerador está trabalhando desconectado da rede, o afundamento é determinado pela impedância do mesmo e pela capacidade do sistema de excitação compensar a componente desmagnetizante da carga.

A definição da voltagem de teto ou *ceiling voltage*, que está detalhado no item 3.4, é uma variável de grande importância para mitigar estes tipos de afundamentos.

2.3. Fundamentação Teórica dos Afundamentos de Tensão

Neste item, são apresentadas as definições segundo as referências bibliográficas e normas para os afundamentos de tensão em máquinas síncronas.

Embora já exista um entendimento de que um afundamento de tensão é uma redução do valor eficaz da tensão de alimentação por um curto período de tempo, seguido de sua

restauração, há divergências nas normas quanto à metodologia para sua quantificação. Portanto, define-se “afundamento de tensão”, segundo as referências a seguir:

a) Segundo o IEEE:

A norma IEEE Std 1159-1995 [7] define afundamento de tensão como “um decréscimo entre 0,1 e 0,9 pu do valor eficaz da tensão nominal, com duração entre 0,5 ciclo e 1 minuto”. Segundo esta norma um afundamento de tensão que resulte em tensão com intensidade menor do que 0,1 pu são consideradas interrupções.

b) Segundo a IEC:

A norma IEC [13] define afundamento de tensão (nesta norma, denominado de “dip” ou “voltage dip”) como: “uma redução súbita da tensão de um ponto do sistema elétrico, seguido de seu restabelecimento após um curto período de tempo, de 0,5 ciclo a uns poucos segundos”.

c) Segundo o ONS:

No Brasil, nos Procedimentos de Rede elaborados pelo ONS [14], no item “Padrões de Desempenho da Rede Básica”, Submódulo 2.2, dentre os indicadores de avaliação da qualidade da energia elétrica, definem-se as “Variações de Tensão de Curta Duração” (VTCD), englobando os fenômenos de Interrupção, Afundamento e Elevação de Tensão. De acordo com esses procedimentos, entende-se por variação de tensão de curta duração: “um desvio significativo da amplitude da tensão por um curto intervalo de tempo”.

d) Segundo a ANEEL: A ANEEL [15] define Afundamento Momentâneo de Tensão como: “evento em que o valor eficaz da tensão do sistema se reduz, momentaneamente, para valores abaixo de 90% da tensão nominal de operação, durante intervalo inferior a 3 segundos”.

Nos estudos elaborados para este trabalho foi considerada a definição estabelecida pela ONS.

CAPÍTULO 3 - EXCITAÇÃO DE GERADORES SÍNCRONOS

O sistema de excitação tem como função estabelecer a tensão e corrente do enrolamento de campo do gerador síncrono. Isso faz com que esse sistema seja diretamente responsável pelos níveis da tensão de saída da máquina. Para garantir a estabilidade da tensão de saída, o sistema de excitação é composto por uma cadeia de elementos de controle denominado Controlador Automático de Tensão (CAT, ou AVR do inglês). O CAT age diretamente sobre a tensão de campo V_f do Gerador Síncrono (GS). O IEEE 421 [7],[9] classifica os diversos sistemas de excitação e regulação.

Os principais componentes de um sistema de excitação típico são:

- Excitatriz;
- Regulador de Tensão.

Conforme já mencionado no Capítulo 2, as máquinas síncronas necessitam de uma fonte de corrente contínua (corrente de excitação) para induzir a força eletromotriz no enrolamento de campo (enrolamento do rotor). O sistema responsável por promover a injeção dessa corrente contínua é denominado de excitatriz.

A intensidade de campo magnético é quem determina o valor de tensão na saída do gerador, para manter essa tensão constante necessitamos de um regulador de tensão.

A Figura 3.1 mostra o diagrama de blocos de um sistema de excitação típico.

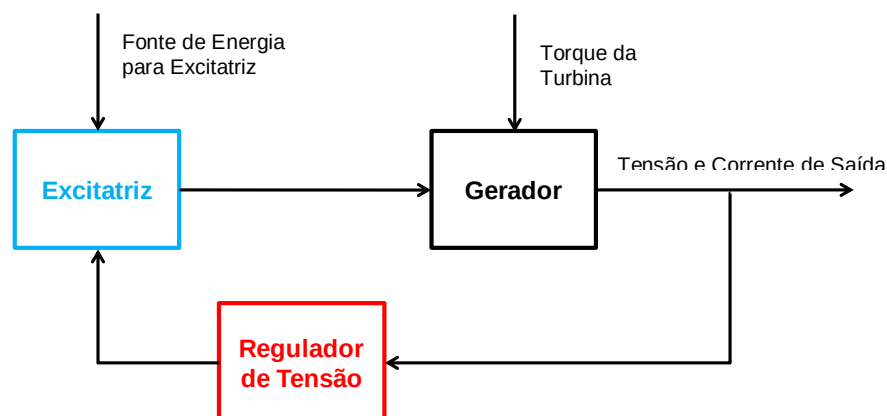


Figura 3.1 Diagrama de blocos de um sistema de excitação típico.

Nas décadas de 50 e 60 a excitação era realizada através de um gerador CC, denominada Excitação Independente, esse tipo de excitação inicialmente utilizava reguladores eletromecânicos, mas devido a lenta resposta do sistema, quando da utilização desse regulador,

os projetistas se viam obrigados a super dimensionar os geradores a fim de tentar compensar ainda que parcialmente esse comportamento. Posteriormente o sistema de excitação independente passou a ser feito com reguladores eletrônicos. O surgimento desse tipo de regulador deu início a uma nova fase nos sistemas de geração com respostas mais rápidas [11].

O uso do gerador cc como excitador foi reduzido após a disseminação dos geradores sem escovas (brushless) e dos sistemas com regulação eletrônica, no entanto o gerador cc como excitador ainda é utilizado em instalações mais antigas. Quando o gerador cc desempenha o papel de excitador além de grande manutenção no comutador, acarreta rádio interferência nos sistemas de comunicação, essa sem dúvida é a maior vantagem do surgimento dos reguladores eletrônicos [11].

Quanto às formas construtivas dos sistemas de excitação atualmente utilizados, conforme já mencionado anteriormente, duas são as configurações básicas aplicáveis:

- Excitação Rotativa: excitatriz girante sem escovas (brushless);
- Excitação Estática: normalmente o campo é suprido através de anéis coletores e escovas;

Ambos os sistemas são dotados de regulador de tensão preferencialmente digital.

3.1. Excitação Estática

No sistema de excitação estática, a corrente cc que alimenta o campo pode ser proveniente da tensão alternada gerada na armadura ou de outra fonte. O processo de início de geração denominado auto-excitação ou escorvamento é caracterizado pela necessidade de uma tensão inicial que é gerada pelo sistema de corrente contínua da usina geradora ou pelo magnetismo remanente durante a partida do alternador. A auto-excitação somente é iniciada caso a tensão de excitação devido ao campo remanente, seja suficiente para iniciar o processo de retificação e alimentação do enrolamento de campo. A corrente retificada é conduzida por meio de um par de anéis com escovas, localizado no eixo do alternador [11].

O fluxo de corrente é controlado por pulsos dos tiristores, que propiciam o controle direto da tensão de excitação do campo do gerador de forma confiável. Entretanto podem provocar algum pequeno transitório indesejável na tensão de saída do gerador no momento do seu disparo [11].

A vantagem mais evidente no sistema de excitação estática é o menor tempo de resposta de regulação que no sistema de excitação dinâmica. A diferença no tempo de resposta justifica-se pelo fato de que, nesse caso apenas a constante de tempo do campo do alternador precisa ser vencida pelo excitador, já no alternador com excitação dinâmica (rotativa) as constantes de

tempo do campo do alternador e do campo e armadura do gerador cc, precisam ser consideradas, o que lhe proporciona maior tempo de recuperação da sua tensão [11].

As desvantagens desse sistema são a manutenção das escovas e anéis, que apesar de ser menor que a nos geradores excitados por geradores cc requerem cuidados e, conforme já mencionado, o surgimento de surtos de tensão maiores do que os estabelecidos pelo NOS e que ocorrem no momento do disparo do tiristor [11].

O uso da excitatriz estática não é recomendado em ambientes que contenham gases explosivos, por exemplo, em plataformas de petróleo ou plantas químicas, que embora pequeno, sempre ocorrerá centelhamento [11].

A Figura 3.2 representa um exemplo típico de excitação estática com controle puramente eletrônico [11].

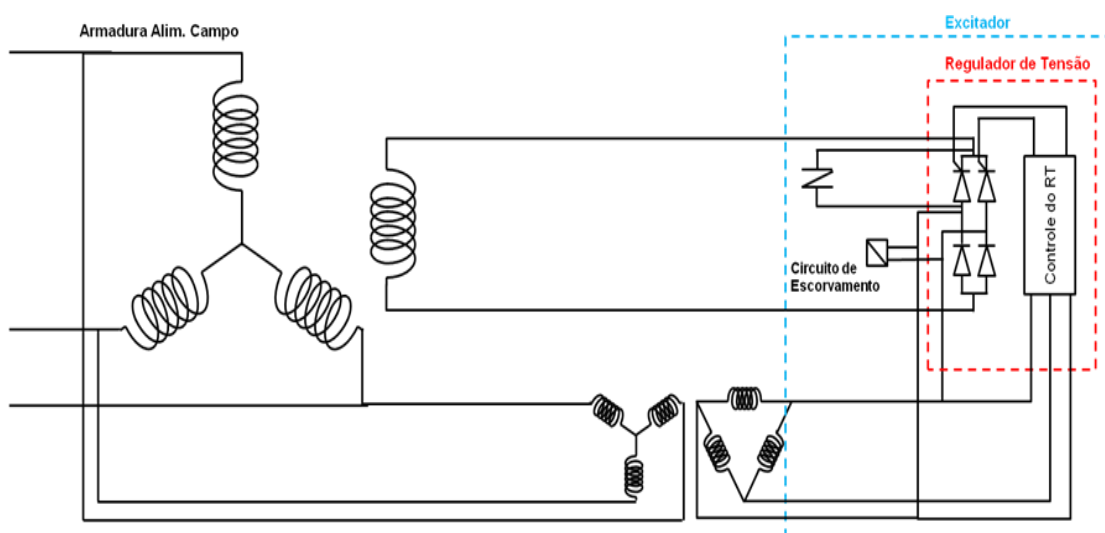


Figura 3.2 Excitação estática com controle puramente eletrônico [11].

Em sistemas puramente eletrônicos é comum ocorrer a desexcitação do gerador causada, por exemplo, no momento da partida de motores de indução ou ainda em caso de curto circuito, pois como em sistemas auto-excitados a corrente de campo é proporcional a tensão de saída do gerador, a alimentação da excitatriz no caso da ocorrência de um afundamento acaba sendo reduzida de maneira que a *corrente* de campo pode não alcançar a tensão necessária para compensar o distúrbio. A fim de mitigar esse inconveniente utiliza-se o módulo composto ou misto, representado através da figura 3.3, que tem como principal função compensar a queda de tensão durante a partida de motores [11].

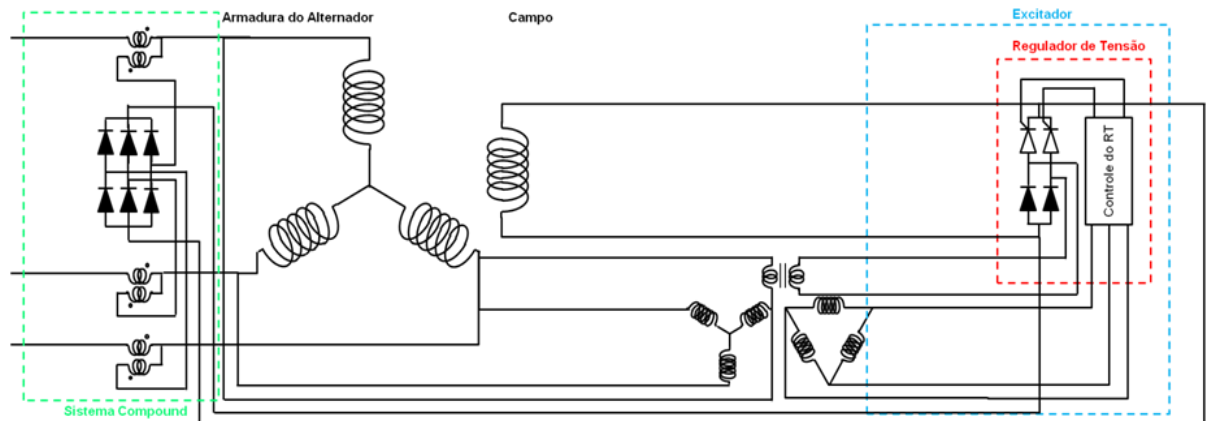


Figura 3.3 Excitação estática compoundada [11].

3.2. Excitação Rotativa sem Escovas

A aplicação do sistema de excitação rotativa sem escovas é realizada para eliminar o uso de escovas e anéis na condução de corrente CC para o campo do gerador.

Uma pequena parte da energia alternada gerada na armadura é retificada pela ponte retificadora e controlada no regulador que alimenta o campo de um gerador auxiliar (excitatriz) situado no estator. A armadura é montada no próprio eixo do alternador. Uma ponte de diodos retificadores acoplada no rotor retifica a corrente alternada que é conduzida diretamente para o campo do gerador principal, dispensando o uso de anéis e escovas. Esse sistema é comercialmente denominado sem escovas (do inglês, *brushless*). Através da Figura 3.4 observar-se as diferenças entre os dois tipos de excitação apresentados [19].

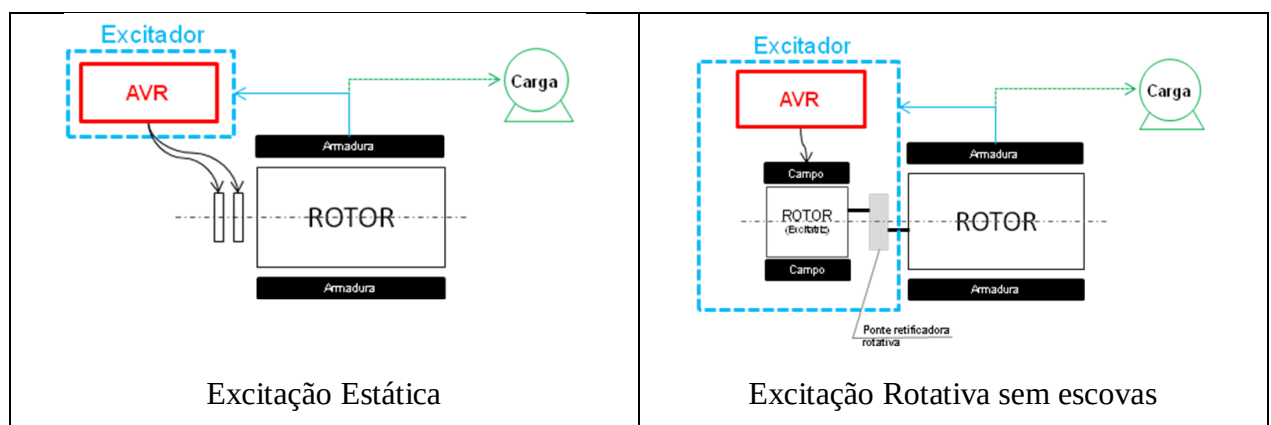


Figura 3.4 Tipos de excitação: Estática e Rotativa [19]

Onde:

AVR (*Automatic Voltage Regulator*) – *Regulador Automático de Tensão*

Uma das maiores vantagens desse tipo de excitação é o fato de não utilizar coletores ou comutadores e escovas na alimentação do campo. Isso diminui as paradas para manutenção,

permite que esse tipo de excitação seja utilizado em ambientes agressivos e com concentração de gases combustíveis [11], além de aumentar a eficiência do sistema.

A principal desvantagem da excitação sem escovas se comparada à estática é o aumento do tempo de resposta do sistema, provocado pela existência de uma máquina auxiliar para a excitação. A fim de se eliminar essa desvantagem os projetistas costumam super dimensionar o excitador [11].

A figura 3.5 representa o sistema sem escovas auto-excitado.

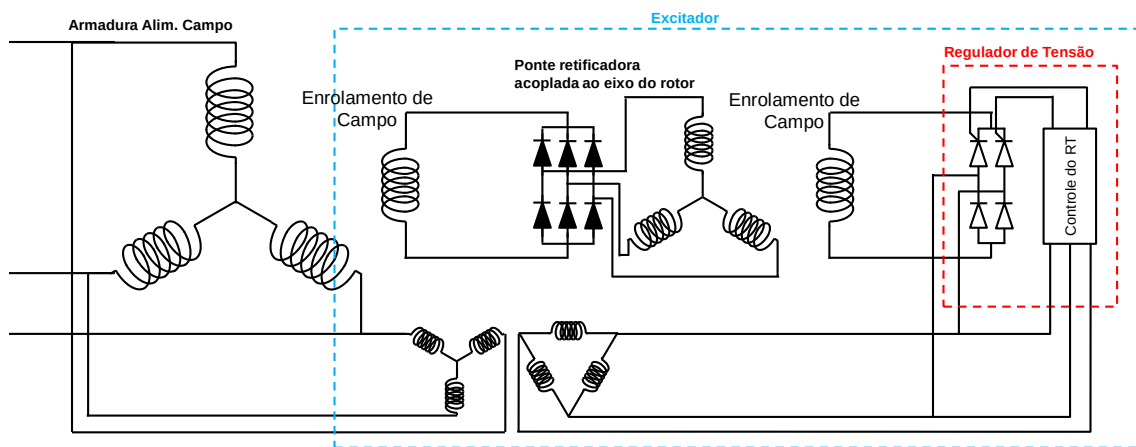


Figura 3.5 Excitação sem escovas auto-excitado [11].

Outra desvantagem dos sistemas auto-excitados é que em malha fechada, a queda de tensão provocada pelo aumento repentino da corrente de campo solicitada pela carga também provoca redução na tensão que alimenta o regulador e, portanto redução da corrente de excitação agravando ainda mais a queda de tensão nos terminais do gerador. Para solucionar esse inconveniente recomenda-se que o regulador utilizado seja dimensionado de forma que em condições nominais de operação possa disponibilizar uma tensão muito maior que a necessária [11].

Mesmo assim no primeiro instante do distúrbio poderá ocorrer redução na capacidade de resposta, por isso é usual colocar um excitador auxiliar com o intuito de manter a tensão de alimentação do regulador constante, eliminando desta forma a desvantagem acima citada [11].

Os excitadores auxiliares mais utilizados são [11]:

- Gerador de Ímã Permanente (PMG, da sigla em inglês)
- Armadura auxiliar e pólos constituídos por prolongamento de barra inserida no pólo principal
- Bobina auxiliar colocada na armadura do gerador.

Outro sistema de excitação auxiliar muito usual é o composto ou misto. Através do qual sistema dota-se o gerador de capacidade de sustentação da corrente de curto circuito. Essa solução compensa a queda de tensão na alimentação do regulador provocada no momento do distúrbio e ainda possibilita o projeto de um sistema de seletividade do circuito alimentado pelo gerador [11].

3.3. Regulador de Tensão

Na Figura 3.2 e na Figura 3.5, o regulador de tensão é um dos dispositivos que compõe o sistema de excitação, que tem por finalidade controlar a corrente de saída da excitatriz e a potência reativa da máquina. Geralmente são associados ao regulador de tensão os controles auxiliares que incluem funções como adição de amortecimento ao sistema de controle, compensação de corrente reativa e estabelecimento de limites de sobre e subexcitação, melhorando assim o comportamento dinâmico de todo o processo envolvido no controle de tensão.

Atualmente o controle da tensão de saída do gerador é realizado de forma automática, através do regulador de tensão.

O controle manual da tensão de saída do gerador, realizado com o ajuste do reostato de campo da excitatriz foi substituído pelo controle automático, através do regulador de tensão.

3.4. Tensão de Teto – Ceiling Voltage

A relação entre a tensão máxima que o sistema de excitação/regulação de uma máquina síncrona é capaz de fornecer e a tensão de campo para condições nominais é denominada de tensão de teto, em inglês *ceiling voltage*. Esta relação pode ser usada para avaliar a capacidade do sistema de excitação conduzir a corrente de campo do valor nominal ao valor máximo atual (teto). A variação do valor da tensão de excitação é realizada através do regulador de tensão.

De acordo com a norma IEEE 421[7],[9] alguns sistemas de excitação terão valores positivos e negativos da tensão de teto, sendo que em aplicações especiais, o sistema de excitação pode ser obrigado a fornecer ao campo corrente positiva e negativa para a máquina síncrona. No entanto na prática não é usual encontrar sistemas com excitação negativa.

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) através dos “Procedimentos⁵ - Módulo 3 Sub-módulo 3.6” estabelece os limites da tensão de teto – ceiling voltage – entre outros requisitos conforme

Tabela 3.1 [14].

⁵Ver www.ons.org.br/procedimentos . Módulo 3 sub-módulo 3.6 item 7.3.2 quadro 2

Tabela 3.1 Requisitos técnicos mínimos para a excitatriz – ONS

Descrição	Requisito técnico mínimo
1. Capacidade nominal de excitação	A capacidade de condução de CC não deve ser inferior a 110% da corrente de excitação necessária para manter o gerador operando com potência máxima e 105% de tensão nominal.
2. Tensão de teto	(a) Teto positivo: não menor que 2,5 vezes a tensão de campo nominal (nas condições nominais de potência ativa, tensão e fator de potência). (b) Teto negativo: não menor que 80% do teto positivo. Obs.: 1,0 pu de tensão corresponde à tensão de campo necessária para gerar a tensão nominal na linha do entreferro a vazio.
3. Tempo de resposta de tensão de campo (1)	Menor ou igual a 0,1 s.
4. Máximo valor da curva de resposta da tensão terminal (<i>overshoot</i>) (2)	Menor ou igual a 10%.
5. Tempo de estabilização da tensão terminal (2)	Menor ou igual a 1 s.
6. Capacidade contínua do transformador de excitação	Não deve ser menor que o requerido quando a excitatriz estiver operando continuamente.
7. Alimentação	(a) O sistema de excitação de cada gerador deve ser totalmente independente, ou seja, não deve depender de outro gerador nem de alimentação auxiliar externa em corrente alternada (CA). (b) A exceção é para: (1) a excitação inicial do campo; (2) os serviços auxiliares que sejam essenciais à partida do gerador ou não a limitem; e (3) os ensaios.

Quando os geradores trabalham em paralelo, o fluxo de potência reativa de um gerador síncrono pode ser regulada através do controle da tensão de saída do mesmo, que por sua vez é realizada através da corrente ou tensão de excitação de controle. A qualidade do controle do gerador síncrono depende dos parâmetros do gerador, da dinâmica da excitação e o respectivo *Ceiling Voltage* disponível para forçar a corrente de excitação quando necessário, a fim de obter uma rápida recuperação da tensão sob severa variação de carga reativa.

3.5. Dinâmica dos Geradores – Aplicação de Grandes Blocos de Carga

A maior parte das especificações bem como os estudos no domínio da frequência considera apenas a magnitude do afundamento, mas outro quesito que deve merecer atenção é a duração deste fenômeno.

Existem componentes dos sistemas de alimentação de cargas que admitem até mesmo quedas totais de energia, como filtros de carga, contadores, volantes mecânicos e outros aparelhos que também suportam o afundamento por maior tempo [1].

Cargas indutivas provocam elevada Força Magneto Motriz de reação de Armadura (F_A), que é desmagnetizante, pois se opõe à Força Magneto Motriz de Campo (F_f) provocando uma Força Resultante (F_R) da interação de F_f com F_A de reação de armadura significativamente menor e, conseqüentemente uma tensão nos terminais (V_t) menor. Este fenômeno ocorre na partida dos MITs, assim como de outras cargas, e pode ser facilmente compreendido no diagrama fasorial da Figura 3.6 [11].

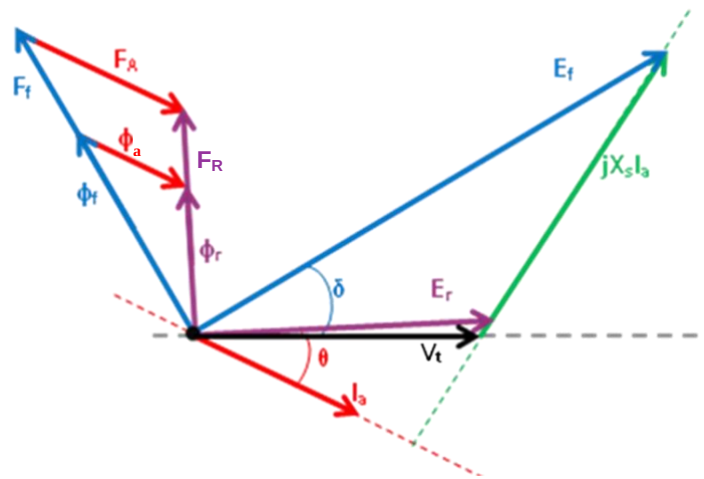


Figura 3.6 Diagrama de FMM's e fluxos [11].

Onde:

V_t – Tensão nos Terminais

X_s – Reatância Síncrona

I_a – Corrente de Armadura

ϕ_a – Fluxo de Reação da armadura

E_f – Tensão no enrolamento de campo

ϕ_f – Fluxo de campo

E_r – Tensão resultante

ϕ_r – Fluxo de resultante

A análise da figura permite escrever a equação 3.1 da tensão E_f , abaixo representada:

$$E_f = V_t + r_a \times I_a + jX_s I_a \quad (3.1)$$

Onde:

r_a – resistência de Armadura

Na Figura 3.7 representa-se um gerador de pólos salientes, no qual para cada posição de F_A existe uma relutância diferente. A soma direta de F_f e F_A implica em erro que facilmente pode ser evitado decompondo F_A em duas componentes: F_d no eixo direto e F_q no eixo em quadratura. A relutância oferecida a cada componente é constante, desde que desconsiderada a saturação [11]. Porém vale salientar que a F_A depende de duas variáveis: da intensidade e do ângulo, daí vem a ocorrência ou não do efeito desmagnetizante.

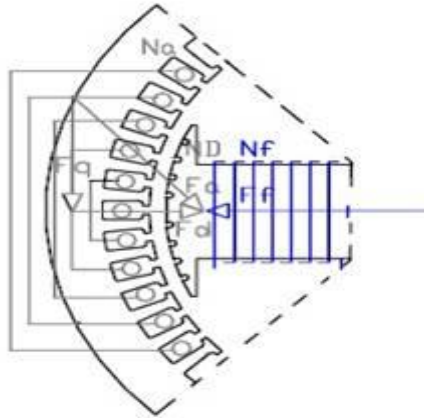


Figura 3.7 Pólos Salientes [11].

A Figura 3.8 mostra o diagrama fasorial com carga indutiva de efeito fortemente desmagnetizante, o que corresponde ao fator de potência zero. Este diagrama representa os tipos da carga indutiva estática utilizada para a realização dos ensaios deste estudo.

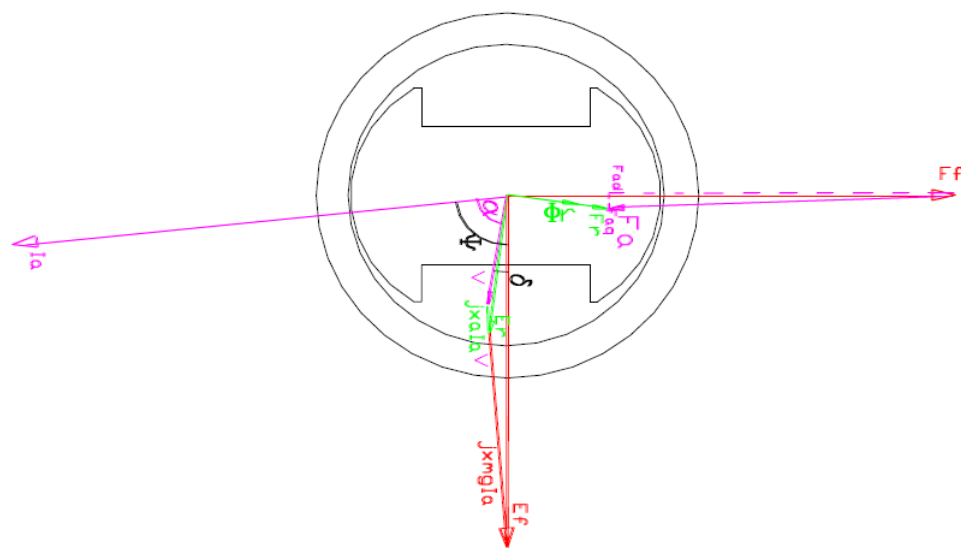


Figura 3.8 Diagrama fasorial de tensão, corrente FEM's e fluxo resultante do gerador com carga fortemente indutiva [11].

A determinação da queda instantânea de tensão, bem como a recuperação desta queda é ditada pela carga e restaurado pelo sistema de excitação com sua respectiva regulação. Os reguladores eletromecânicos são lentos devido a seus mecanismos e seu uso pode implicar em quedas instantâneas maiores que a determinada pela reatância transitória. A inexistência do regulador é representada na Figura 3.9 [6].

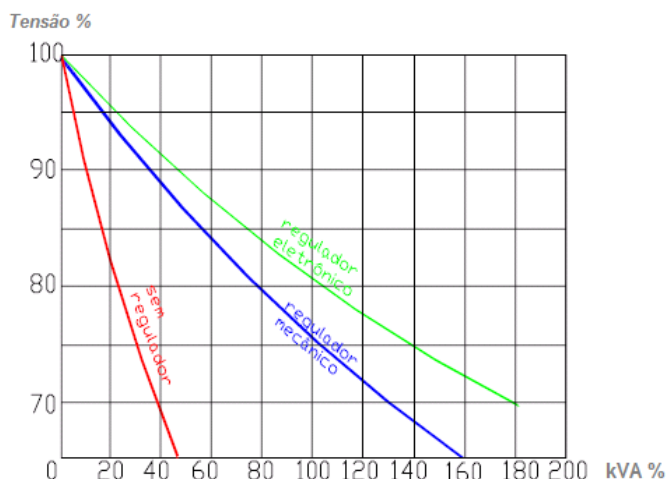


Figura 3.9 Comportamento do gerador com carga desmagnetizante[11].

A Figura 3.10 apresenta os quatro tipos de curvas que demonstram o comportamento da tensão do gerador no momento em que é efetuada a partida de um MIT conforme WEG⁶.

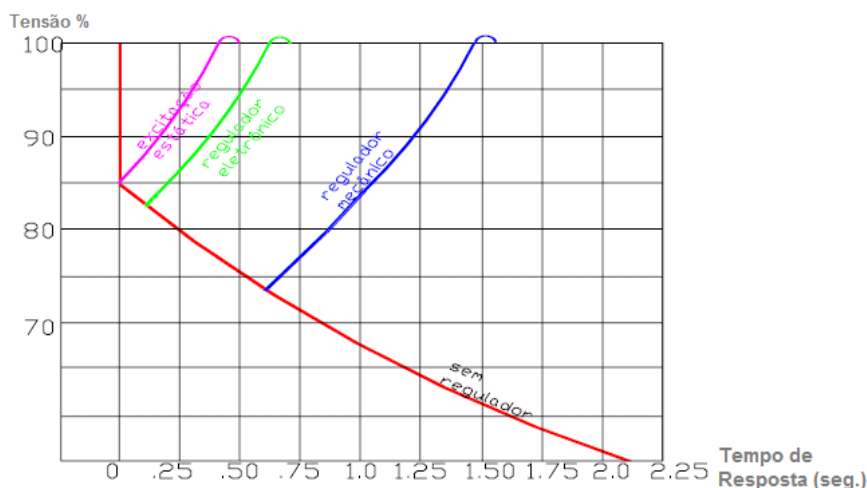


Figura 3.10 Tensão do gerador com aplicação de carga desmagnetizante[11].

⁶ Catálogo eletrônico da Weg apostila Geração e Distribuição de Energia figura 5.3.2

Importa examinar a atuação de reguladores eletrônicos de ação rápida: desconsiderando o seu próprio tempo de atuação, ou seja, diminuição do ângulo de disparo dos tiristores deve-se examinar quais outras formas de obter-se rápida a aplicação de tensão no campo do gerador. O aumento da relação tensão máxima disponibilizada pelo regulador/tensão de campo implica em incrementar a taxa de injeção de corrente no referido campo e, portanto em recuperar a tensão mais rapidamente. [11]

CAPÍTULO 4 - PARTIDA DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

4.1. Introdução

O método de partida mais tradicional para os motores de indução trifásicos em gaiola corresponde à diminuição da tensão de fase do motor durante o período da partida. As chaves de partida que se baseiam neste método são as tradicionais: estrela/triângulo, compensadora, e Soft Starter. O fato deste método reduzir a tensão de alimentação do motor, apresenta o inconveniente da correspondente redução, inclusive na proporção ao quadrado do valor eficaz da tensão, do conjugado durante a partida, frequentemente isto inviabiliza a aplicação para o caso da geração isolada. Uma forma de eliminar este inconveniente é utilizar um inversor de frequência como dispositivo de partida. Com o inversor de frequência a corrente de partida pode ser reduzida de forma significativa quando comparada com a mesma tensão plena, porém o conjugado pode permanecer igual ou até maior que o correspondente à tensão plena.

A justificativa pode ser encontrada a partir de (4.1).

$$V = 4,44 f N \Phi \quad (4.1)$$

Esta equação mostra que se ocorrer redução da frequência deverá ocorrer igual à redução da tensão para manter o fluxo sem alteração. Portanto deve-se respeitar (4.2).

$$V/f = K \quad (4.2)$$

A equação (4.3) permite entender o comportamento da corrente durante a partida.

$$I'_r = V / (r_s + r'_r + j2\pi f L_e) \quad (4.3)$$

Quando a frequência f é reduzida V será reduzida proporcionalmente. A parcela $j2\pi f L_e$ também é reduzida proporcionalmente, porém a parcela $r_s + r'_r$ permanece constante o que permite concluir que quando a frequência é reduzida I_p também o será.

O conjugado, entretanto terá um comportamento diferente. A equação 4.4 permite entendê-lo.

$$T = 3(V^2 \cdot r'_r) / \{2\pi f [(2\pi f L_e)^2 + (r_s + r'_r)^2]\} \quad (4.4)$$

O numerador de (4.4) varia com o quadrado da tensão de alimentação por fase mas o denominador possui dois termos, o indutivo variando com o cubo da frequência e o resistivo variando linearmente.

A simulação a seguir para um MI de 100 CV 4 polos mostra a variação da corrente e do conjugado de 60 Hz a 15 Hz.

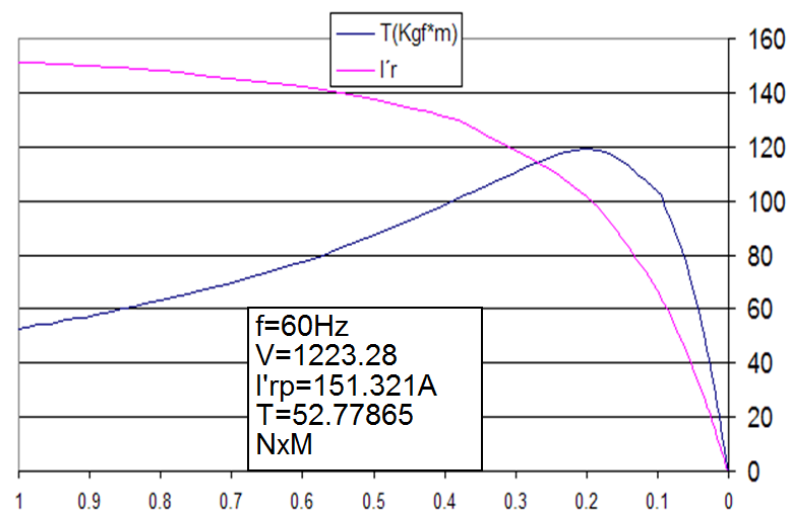


Figura 4.1- partida do MI 100CV com V_n e $f_n=60\text{Hz}$

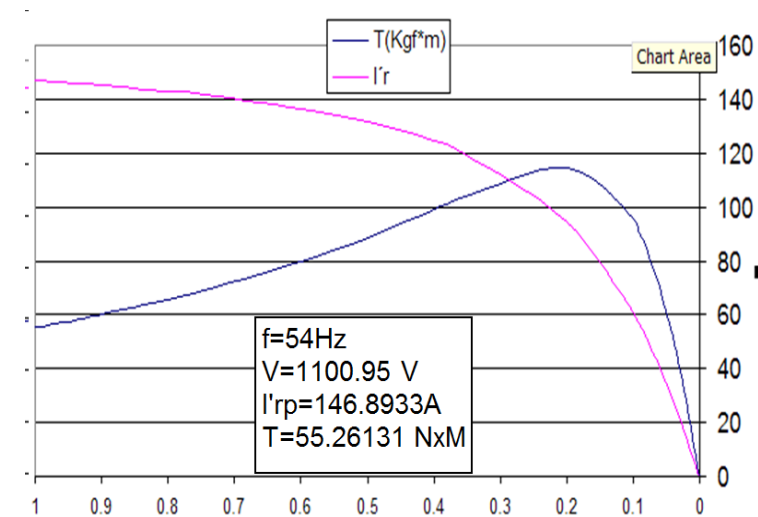


Figura 4.2- partida do MI 100CV com $V_n=1100,95$ e $f=54\text{ Hz}$

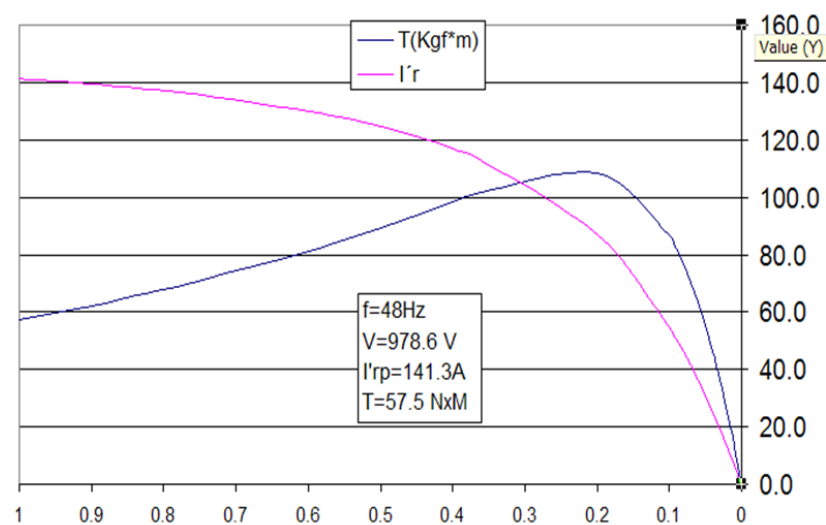


Figura 4.3- partida do MI 100CV com $V_n=978,6$ e $f=48\text{ Hz}$

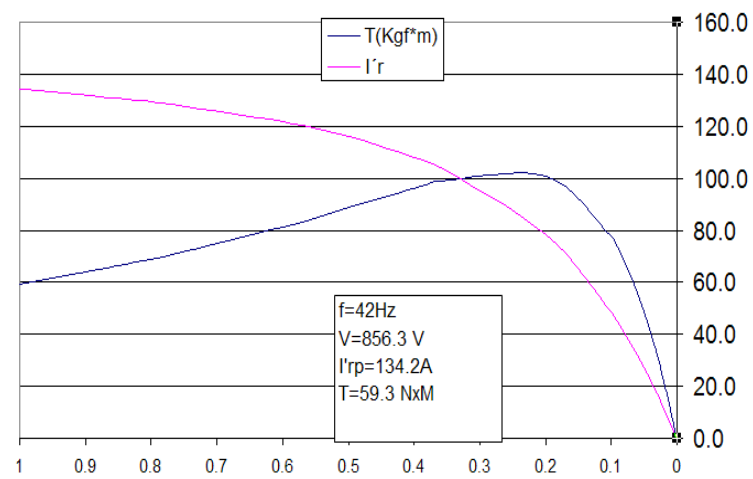


Figura 4.4- partida do MI 100CV com $V_n=856,3$ e $f=42\text{ Hz}$

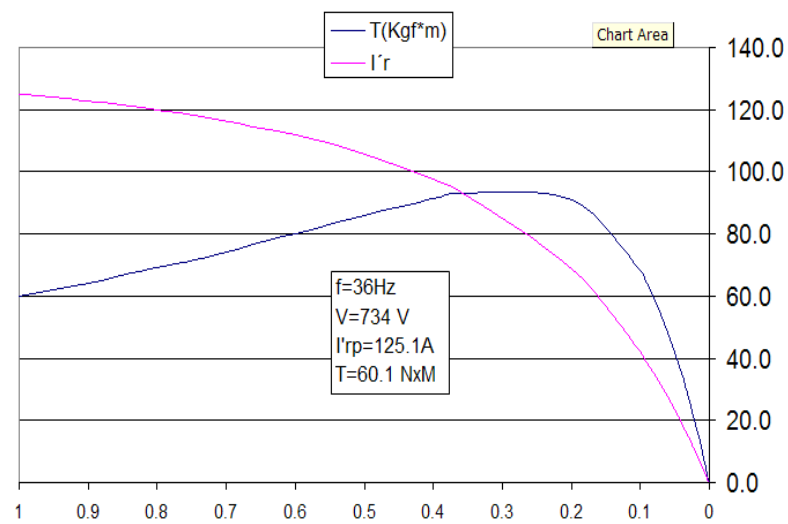


Figura 4.5- partida do MI 100CV com $V=616,6$ e $f=30\text{ Hz}$

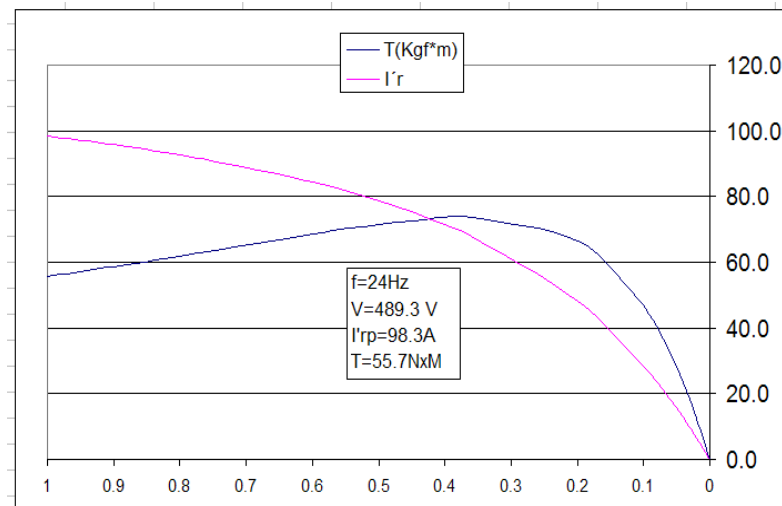


Figura 4.6- partida do MI 100CV com $V_n=489,3$ e $f=24\text{ Hz}$

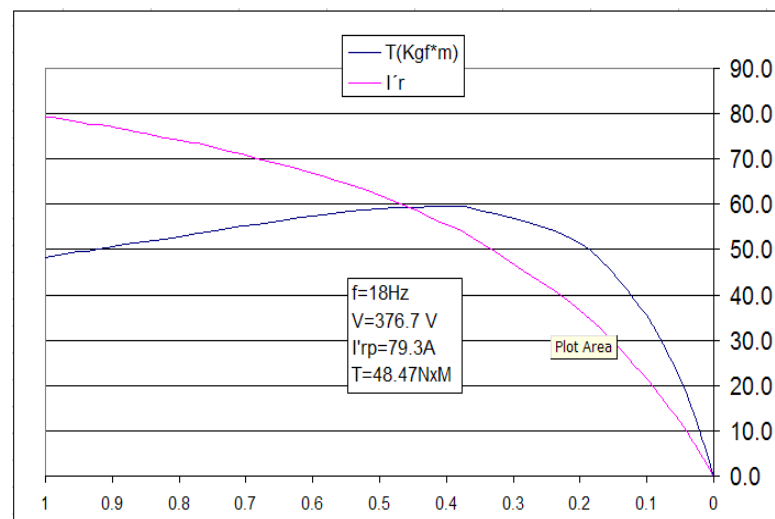


Figura 4.7- partida do MI 100CV com $V_n=376,7$ e $f=18\text{ Hz}$

Tabela 4.1-comportamento da corrente e do conjugado de partida

	f	V	I'_{rp}	T_p
1	60	1223,28	151,32	52,77
2	54	1100,95	146,89	55,26
3	48	978,6	141,3	57,5
4	42	856,3	134,2	59,2
5	36	734	125,1	60,1
6	30	616,6	113,2	59,2
7	24	489,3	98,3	55,7
8	18	376,7	79,3	48,47

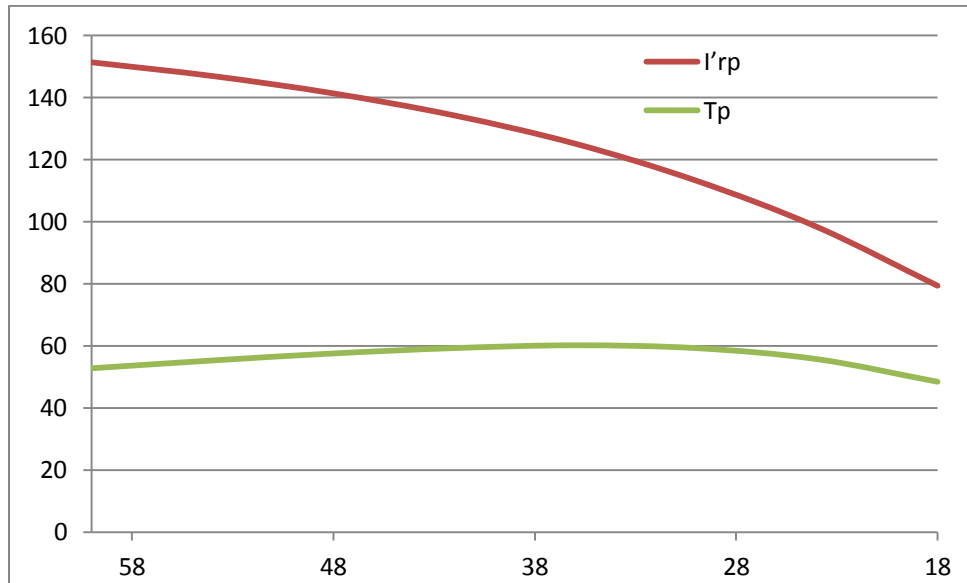


Figura 4.8 - comportamento da corrente e do conjugado de partida

4.2 Partida do MI com banco capacitivo

Durante a aceleração de um motor de indução a demanda de energia reativa é bem maior que a da ativa, principalmente no início da partida, ou seja, ainda com baixas velocidades em relação a nominal. No caso específico deste trabalho, ou seja, o gerador síncrono alimentando o motor de indução em sistema isolado, a princípio a demanda de energia reativa, como anteriormente mencionada, deve vir do gerador síncrono, e o consequente aumento na corrente produz queda de tensão interna ao gerador provocando um afundamento de tensão nos terminais do motor. Como a questão está diretamente relacionada com a energia reativa, ao colocar um banco de capacitores em paralelo com o gerador e o motor, fazendo um controle temporal do valor da capacitância do banco é possível aliviar a energia reativa provinda do gerador, compensando com a energia no banco capacitivo. Pode-se fazer um controle adequado do valor temporal da referida capacitância de modo a diminuir, e pode ser significativo, o afundamento de tensão, tanto no seu valor como na sua duração. Simulações digitais que serão feitas no próximo capítulo mostram teoricamente a veracidade desta análise.

CAPÍTULO 5 - SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

A modelagem a ser utilizada nas simulações pertence ao MATLAB/SIMULINK, ou seja o modelo Standard de todos os componentes dos circuitos analisados, ou seja, máquinas síncrona e de indução, cargas, reguladores, etc .

As figuras 5.1 e 5.2 mostram a representação do GS no simulador SIMULINK do MATLAB.

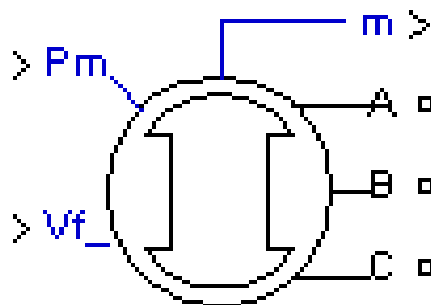


Figura 5.1 Representação do GS no MATLAB

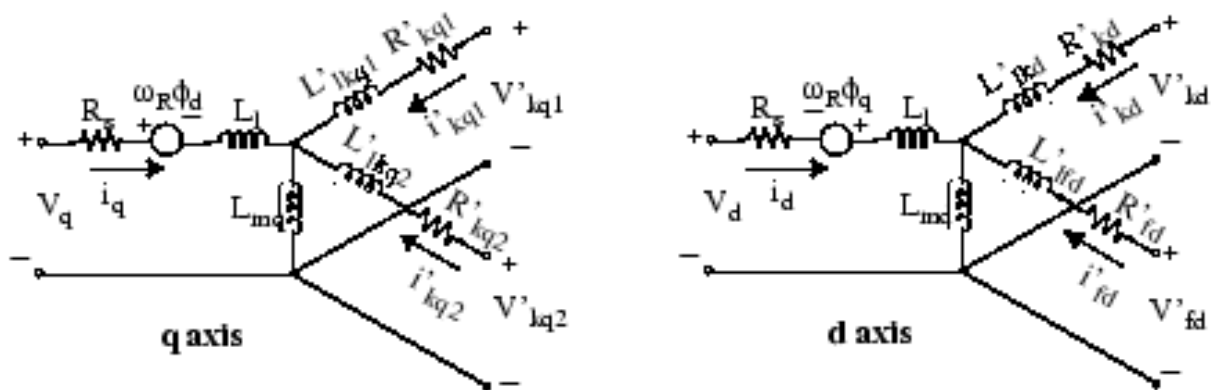


Figura 5.2 Circuitos equivalentes extraídos do Help do SIMULINK

O conjunto de equações da Figura 5.3 representa a máquina síncrona decomposta nos eixos direto e quadratura.

$$\begin{aligned}
 V_d &= R_s i_d + \frac{d}{dt} \Phi_d - \omega_R \Phi_q \\
 V_q &= R_s i_q + \frac{d}{dt} \Phi_q + \omega_R \Phi_d \\
 V'_{fd} &= R'_{fd} i'_{fd} + \frac{d}{dt} \Phi'_{fd} \\
 V'_{kd} &= R'_{kd} i'_{kd} + \frac{d}{dt} \Phi'_{kd} \\
 V'_{kq1} &= R'_{kq1} i'_{kq1} + \frac{d}{dt} \Phi'_{kq1} \\
 V'_{kq2} &= R'_{kq2} i'_{kq2} + \frac{d}{dt} \Phi'_{kq2}
 \end{aligned}
 \quad
 \begin{aligned}
 \Phi_d &= L_d i_d + L_{md} (i'_{fd} + i'_{kd}) \\
 \Phi_q &= L_q i_q + L_{mq} i'_{kq} \\
 \Phi'_{fd} &= L'_{fd} i'_{fd} + L_{md} (i_d + i'_{kd}) \\
 \Phi'_{kd} &= L'_{kd} i'_{kd} + L_{md} (i_d + i'_{fd}) \\
 \Phi'_{kq1} &= L'_{kq1} i'_{kq1} + L_{mq} i_q \\
 \Phi'_{kq2} &= L'_{kq2} i'_{kq2} + L_{mq} i_q
 \end{aligned}$$

Figura 5.3 Sistemas de equações extraídos do Help do SIMULINK

A Figura 5.4 apresenta o esquema utilizado no MATLAB para as simulações de partida de MIT alimentado por Gerador Síncrono com excitação estática.

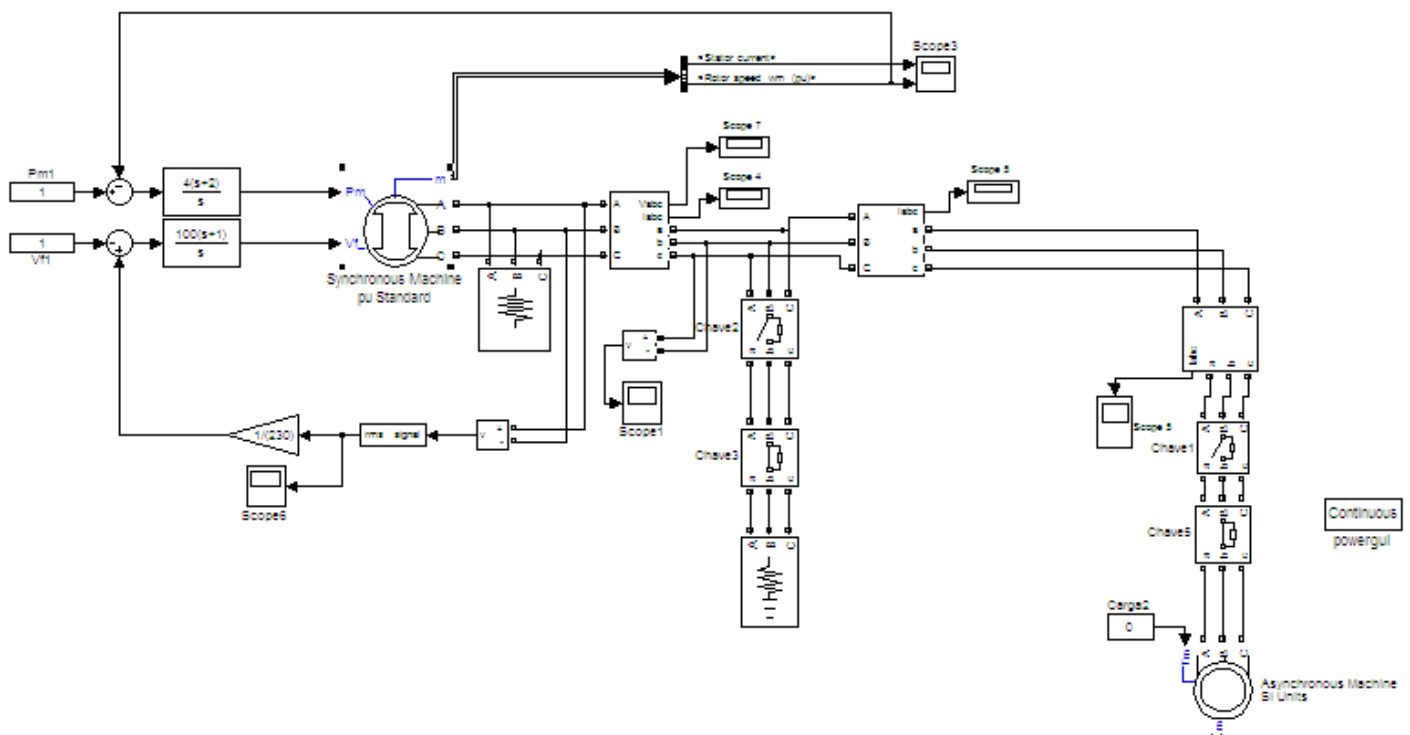


Figura 5.4 Esquema utilizando excitação estática

A Figura 5.5 apresenta o esquema utilizado no MATLAB para as simulações de partida de MIT alimentado por Gerador Síncrono com excitação rotativa.

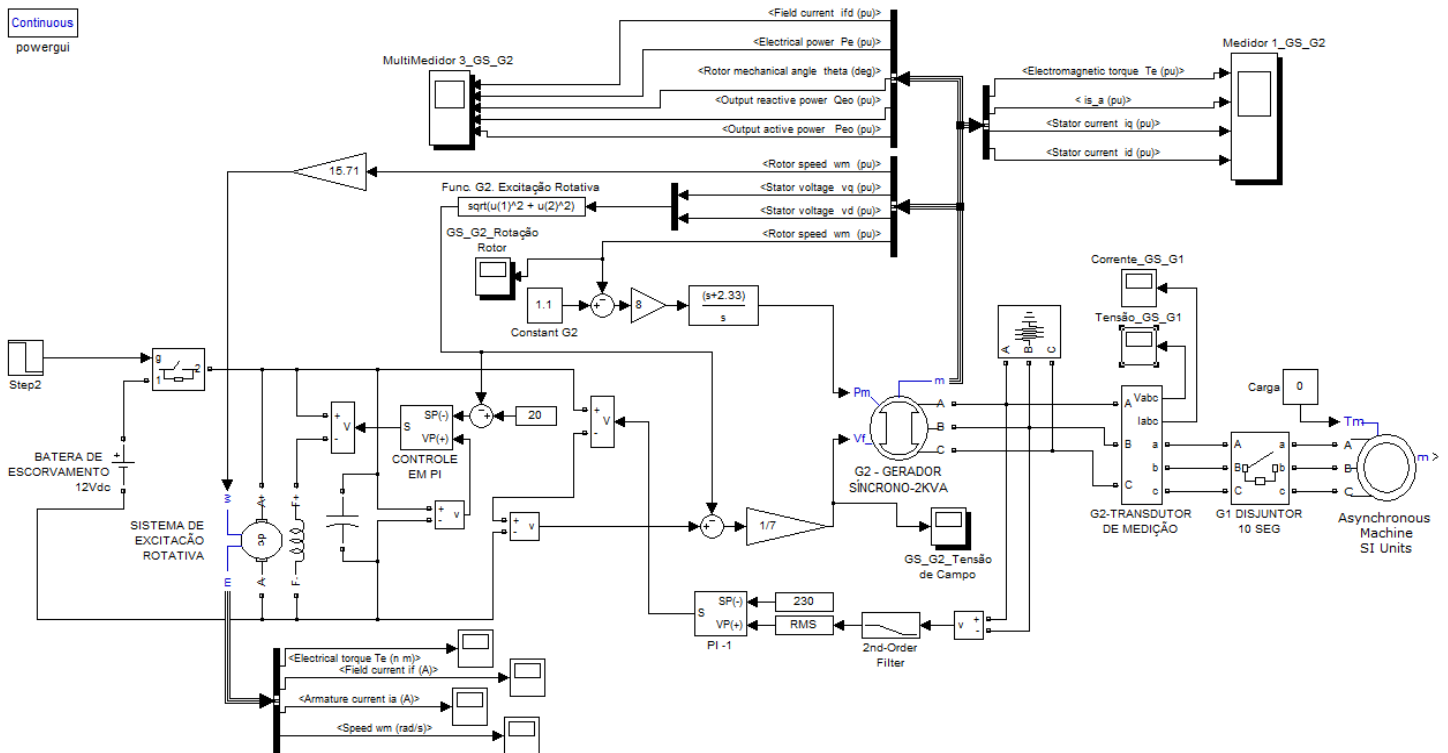


Figura 5.5 Esquema utilizando excitação rotativa

A Figura 5.6 mostra os parâmetros do gerador utilizado nos ensaios laboratoriais, para efeito de simulação computacional.

Synchronous Machine (mask) (link)	
Implements a 3-phase synchronous machine modelled in the dq rotor reference frame.	
Stator windings are connected in wye to an internal neutral point.	
Configuration	Parameters
Nominal power, line-to-line voltage, frequency [Pn(VA) Vn(Vrms) fn(Hz)]:	
[2.0e+003 0.22e+003 60]	
Reactances [Xd Xd' Xd'' Xq Xq'' Xl] (pu):	
[1.966 0.2 0.126 0.977 0.225 0.079]	
d axis time constants:	Short-circuit
q axis time constants:	Short-circuit
Time constants [Td' Td'' Tq''] (s):	
[0.018 0.0045 0.0045]	
Stator resistance Rs (pu):	
0.003	
Inertia coefficient, friction factor, pole pairs [H(s) F(pu) p()]:	
[0.1136 0.02842 2]	
Initial conditions [dw(%) th(deg) ia,ib,ic(pu) pha,phb,phc(deg) Vf(pu)]:	
[0 0 0 0 0 0 0 0 1]	

Figura 5.6 Máscara do GS com os parâmetros utilizados no experimento

A Figura 5.7 mostra os parâmetros utilizados no ensaio de partida do MIT de 2CV WEG, para efeito de simulação computacional.

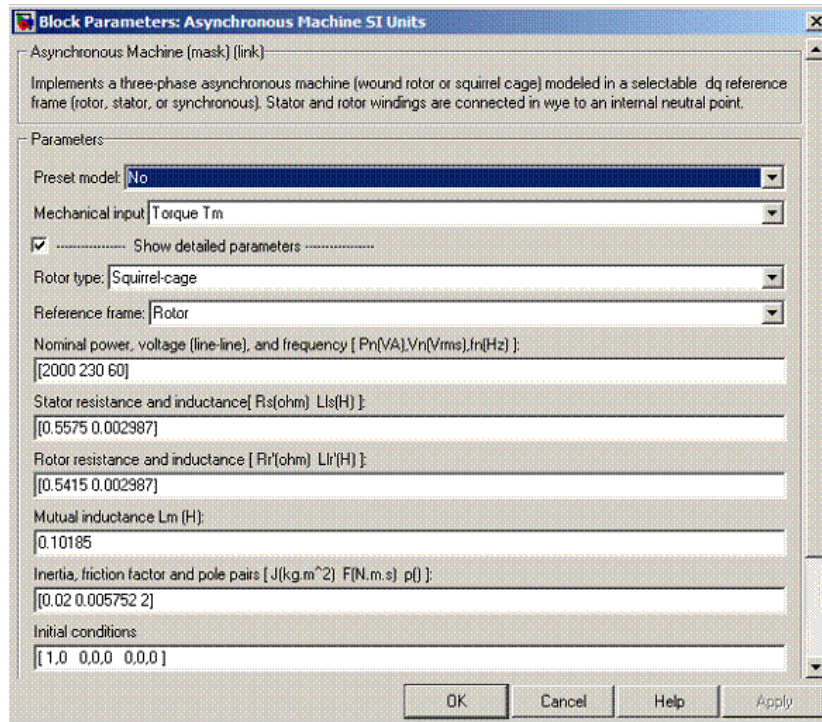


Figura 5.7 Máscara do MIT com os parâmetros utilizados no experimento.

5.1 Partida do MIT 2CV WEG

A Figura 5.8 mostra as correntes de partida para um motor de 2CV e o respectivo afundamento de tensão apresentado na Figura 5.9, para o sistema de excitação estática, circuito da Figura 5.4.

Por meio desses gráficos é possível observar que a corrente de partida produzida pelo MIT eleva-se acima dos 40A, apresentando uma instabilidade durante 0,2s.

A Figura 5.10 mostra as correntes de partida para o mesmo motor e o respectivo afundamento de tensão é apresentado nas figuras 5.11 e 5.12, para o sistema de excitação rotativo, circuito da Figura 5.5.

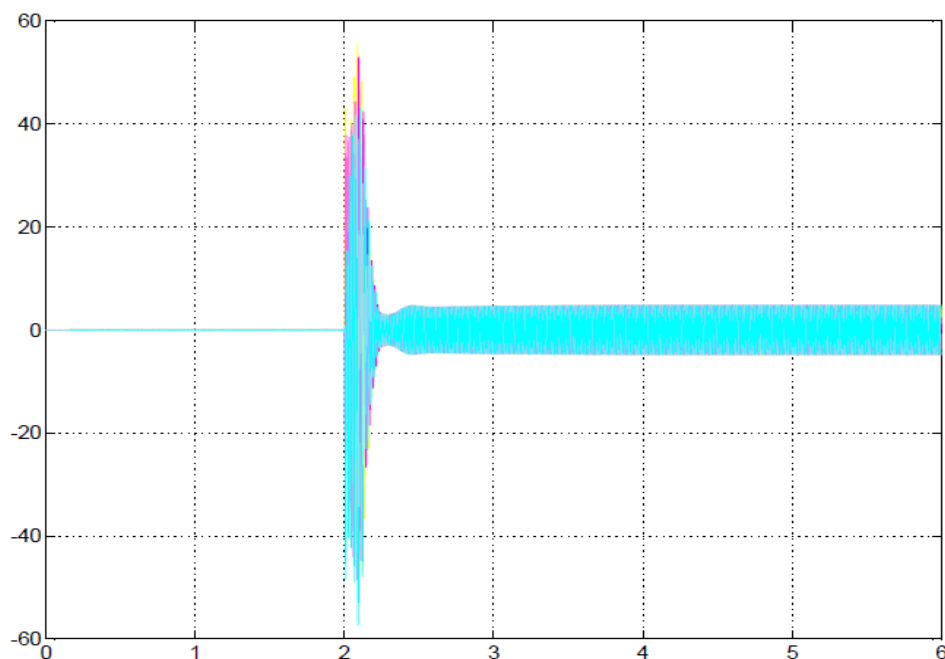


Figura 5.8 Partida do MIT de 2CV no sistema de excitação estática: Corrente de Partida – tempo (seg.) x corrente (A)

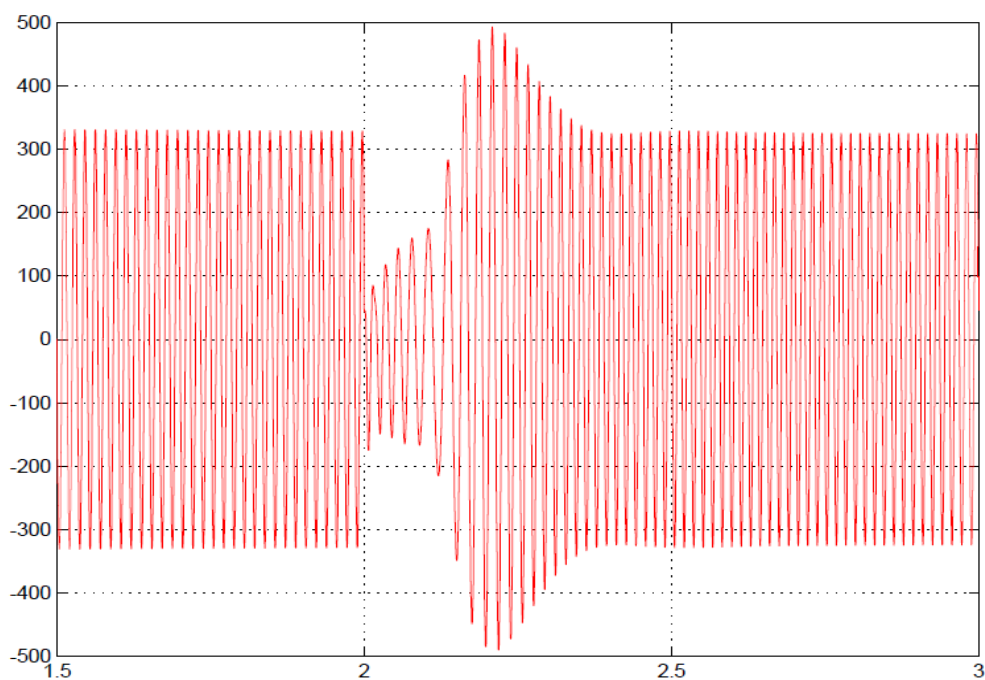


Figura 5.9 Partida do MIT de 2CV no sistema de excitação estática: Afundamento de Tensão – tempo (seg.) x tensão (V)

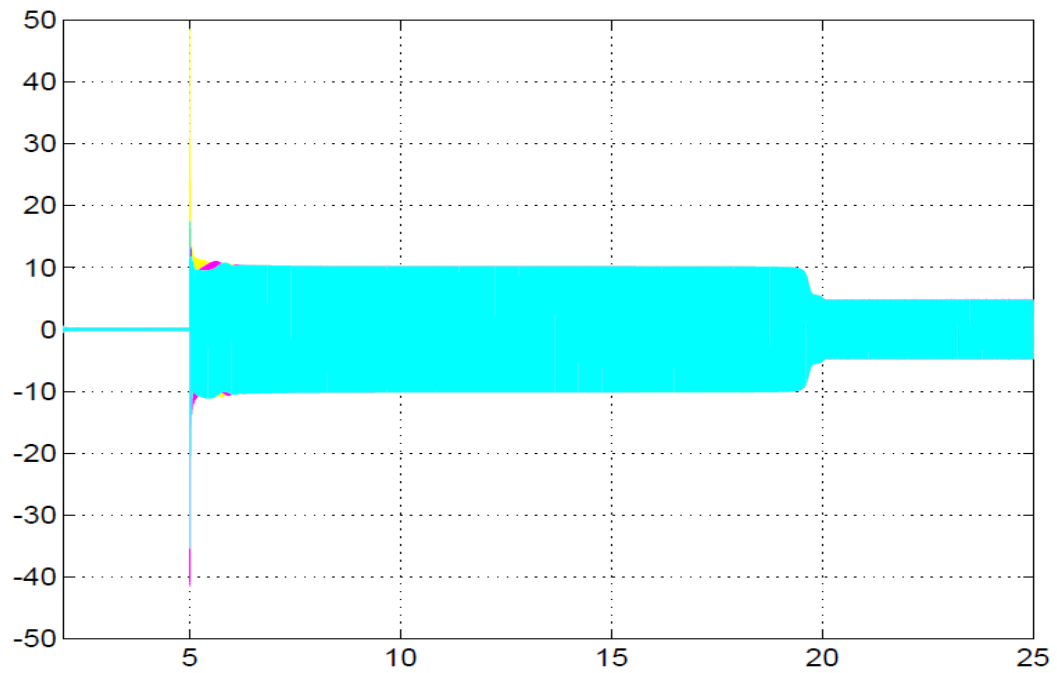


Figura 5.10 Partida do MIT de 2CV no sistema de excitação rotativa: Corrente de Partida – tempo (seg.) x corrente (A)

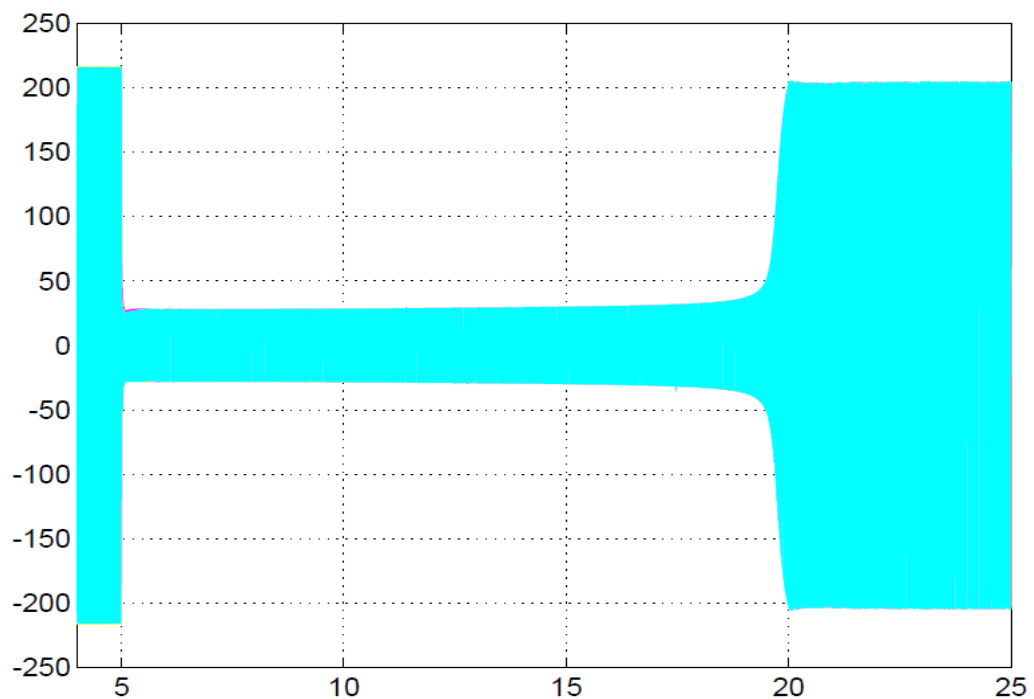


Figura 5.11 Partida do MIT de 2CV no sistema de excitação rotativa: Afundamento de Tensão – tempo (seg.) x tensão (V)

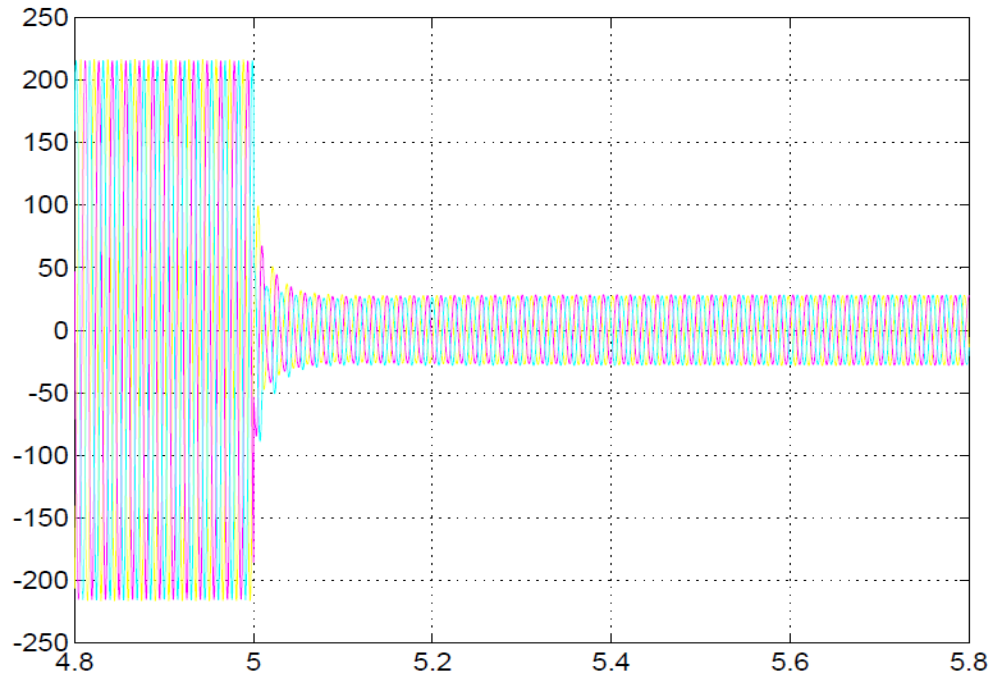


Figura 5.12 Partida do MIT de 2CV no sistema de excitação rotativa: Afundamento de Tensão "zoom" da figura 5.11 – tempo (seg.) x tensão (V) -

5.2 Partida do MIT de 2 CV com sequenciamento de banco de capacitores

Os resultados obtidos no item 5.1 correspondem aos procedimentos comuns de partida do MIT com geradores isolados . A atuação para a recuperação da tensão no gerador é basicamente feito pelo controle do seu sistema de excitação, no caso estático e rotativo . Uma proposta apresentada nesse trabalho, apenas no seu tratamento teórico, se refere ao uso de um banco de capacitores com controle do sequenciamento dos valores de capacitância com o objetivo de criar condições menos severas, na recuperação da tensão, para o sistema de excitação do gerador . Esta proposta se baseia na interpretação física feita no item 4.3 .

A análise teórica foi realizada no simulador SIMULINK .A Figura 5.13 apresenta um circuito preparado com um controle PI para evitar o *overshoot* que é comum em sistemas sem controle. O banco de capacitores possui um sequenciamento que permite diminuir o afundamento de tensão a limites estáveis para o sistema.

Os resultados da simulação sem os bancos de capacitores, Figura 5.14, mostram que o tempo de recuperação do sistema é demasiado longo. Com os bancos de capacitores há uma resposta mais eficiente do regulador de tensão, comose observa na Figura 5.15.

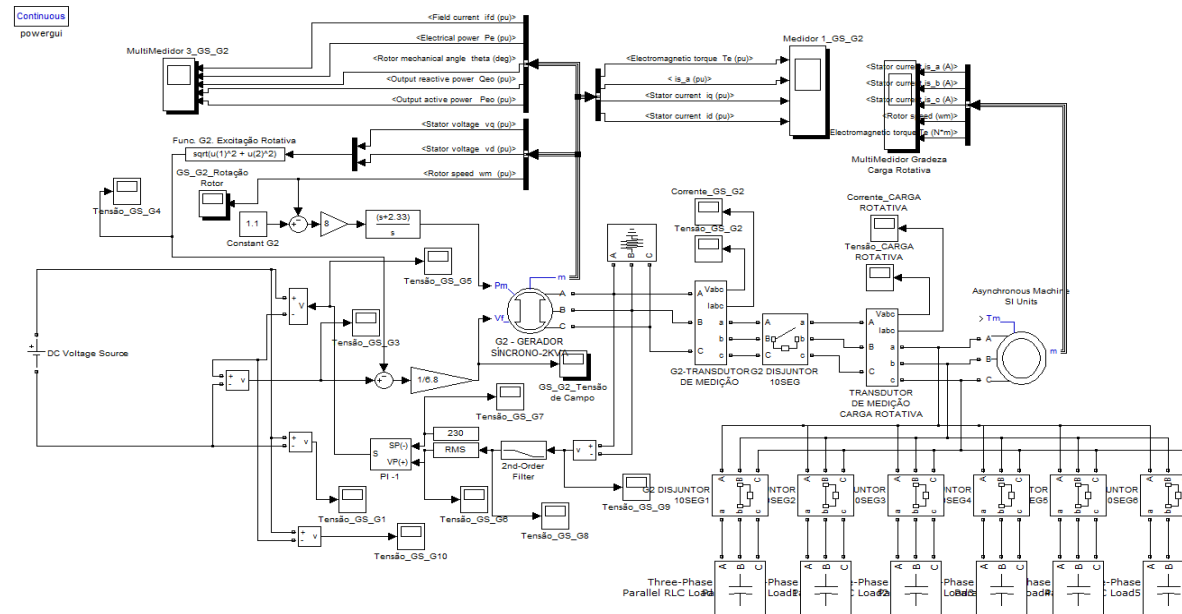


Figura 5.13 – Circuito com chaveamento de banco de capacitores e controle PI

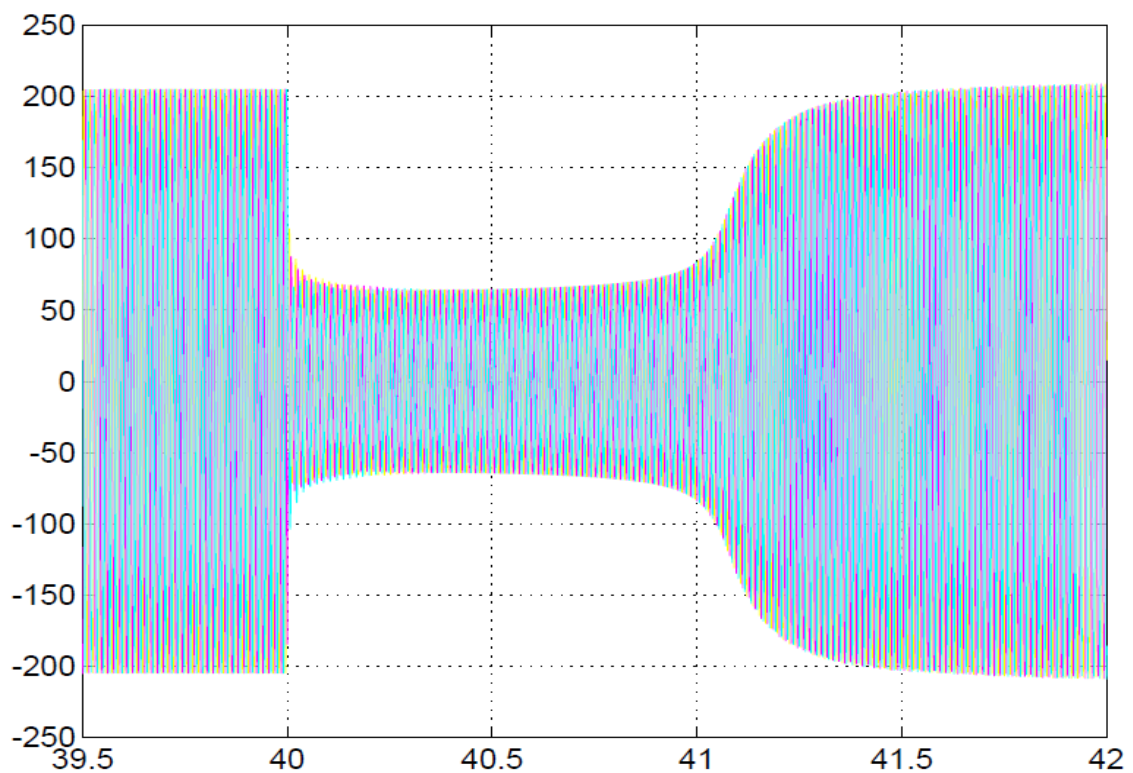


Figura 5.14 – Afundamento de tensão do circuito da figura 5.13 sem acionamento do banco de capacitores.

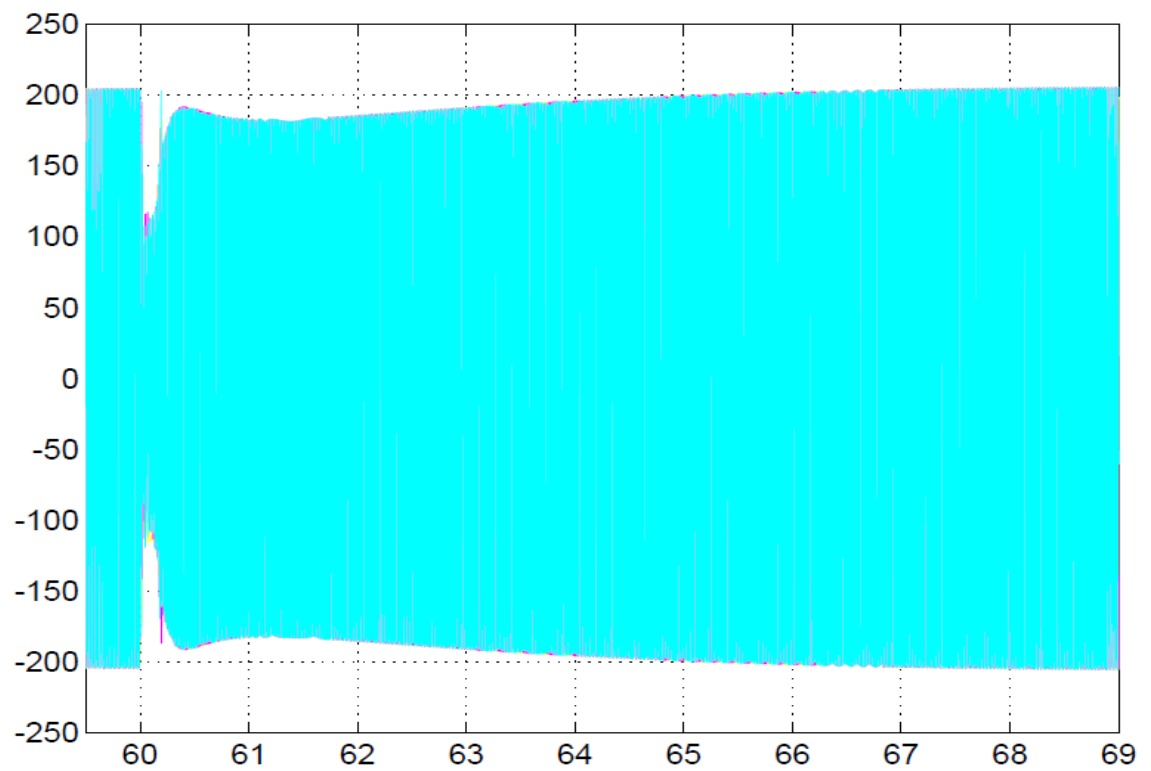


Figura 5.15 – Afundamento de tensão do circuito da figura 5.13 com acionamento do banco de capacitores.

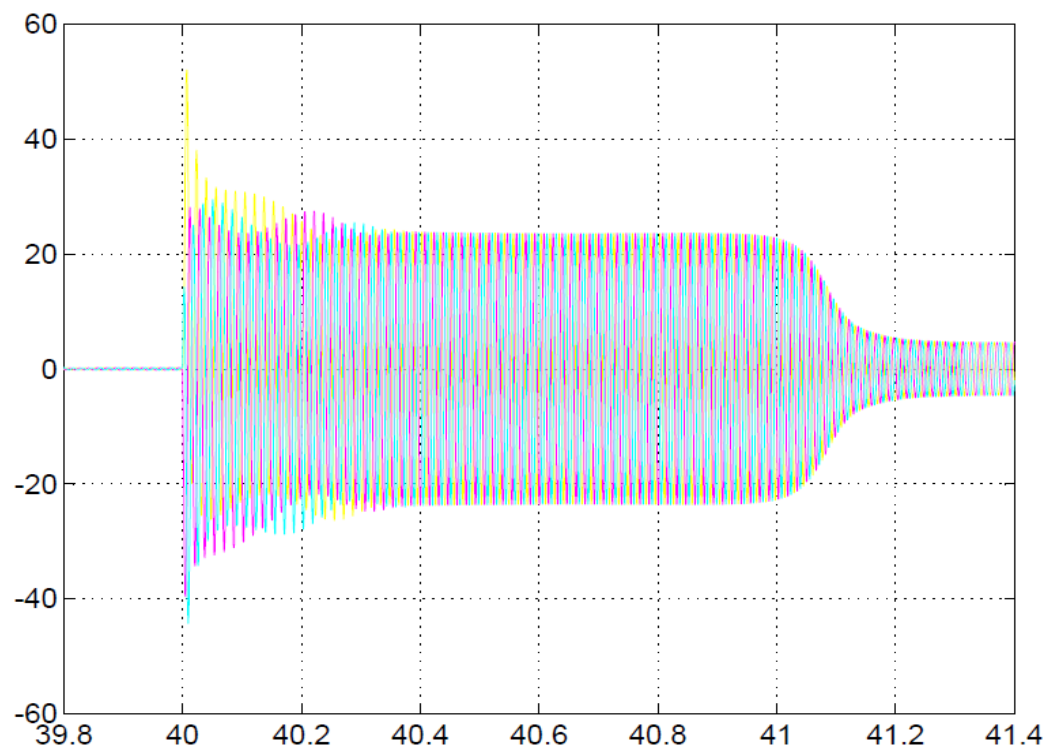


Figura 5.16 – Transiente da corrente do circuito da figura 5.13 sem o acionamento do banco de capacitores.

As correntes do sistema sem o banco de capacitores são apresentadas na Figura 5.16 e com o banco de capacitores acionado sequencialmente são apresentadas na Figura 5.17.

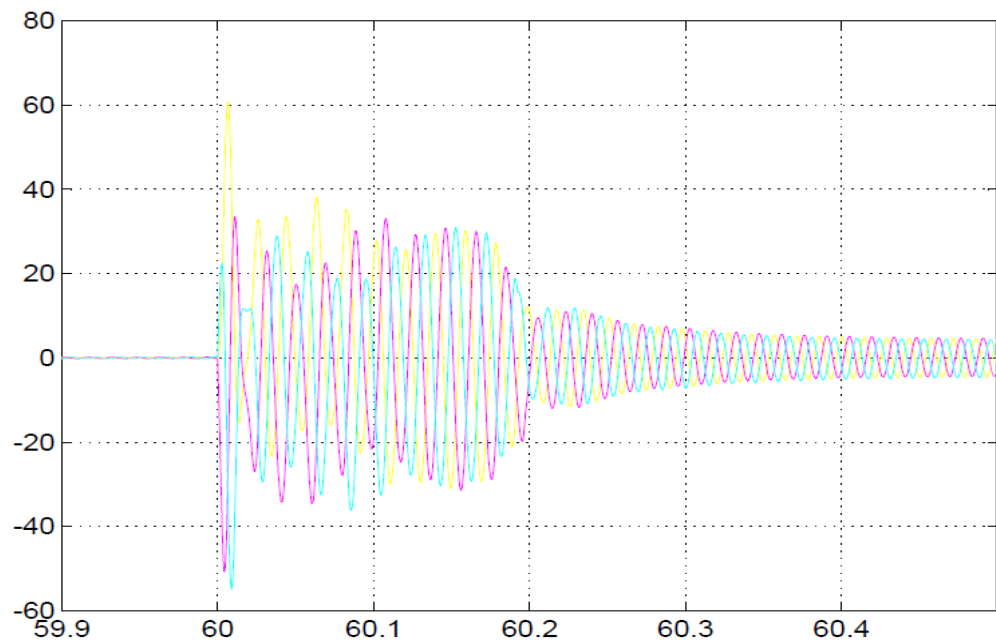


Figura 5.17 – Transiente da corrente do circuito da figura 5.13 com o acionamento do banco de Capacitores.

Conforme observado, este tipo de partida possibilita um afundamento de tensão com uma duração extremamente reduzida em relação aos tipos estudados anteriormente. Evidentemente

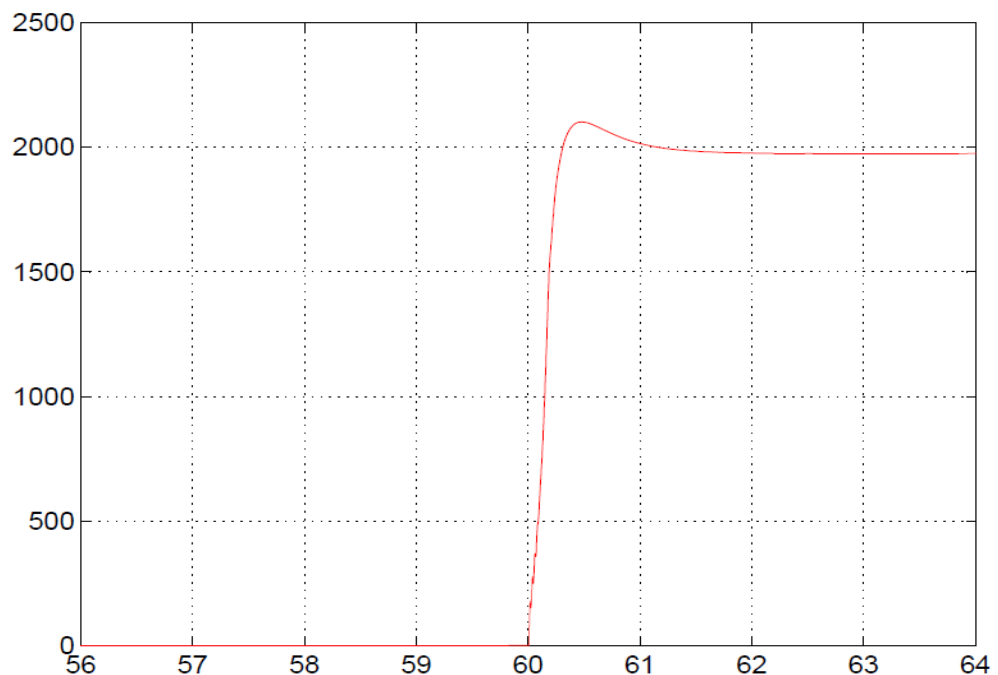


Figura 5.18 – Rotação(RPM) em função do tempo (s) do MIT, do circuito da figura 5.13 com o acionamento do banco de Capacitores durante a partida.

que esta proposição, comprovada teoricamente, é de implementação prática não imediata, pois a variação de capacitância foi modelada matematicamente de uma forma ideal.

Nas Figuras 5.18 e 5.19 observa-se a resposta do MIT, tomando como referência sua rotação com o sistema acionado por banco de capacitores. Na figura 5.18 é destacada a rampa de variação da velocidade do motor com um pequeno “overshoot” ao atingir a rotação nominal.

Na figura 5.19 é destacada a oscilação que ocorre durante o chaveamento do banco de capacitores.

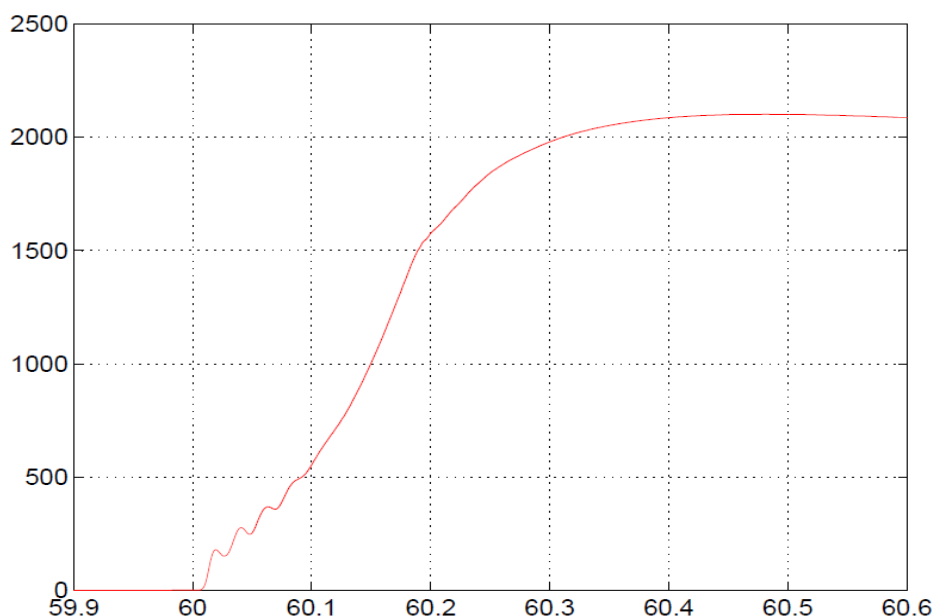


Figura 5.19 – Zoom da figura 5.18.

A rampa da figura 5.18 possui um amortecimento superamortecido no seu “overshoot” devido a ação do controle PI do sistema. As oscilações observadas na figura 5.19 são pequenas devido também a ação do controlador PI.

Na figura 5.19 é destacada a oscilação que ocorre durante o chaveamento do banco de capacitores.

A rampa da figura 5.18 possui um amortecimento superamortecido no seu “overshoot” devido a ação do controle PI do sistema. As oscilações observadas na figura 5.19 são pequenas devido também a ação do controlador PI.

Na Figura 5.20 é apresentada a variação da capacitância em função do tempo de chaveamento do banco de capacitores após o instante de chaveamento em 60s. Na Figura 5.21 é apresentada a variação da capacitância em função da rotação do MIT, após seu chaveamento.

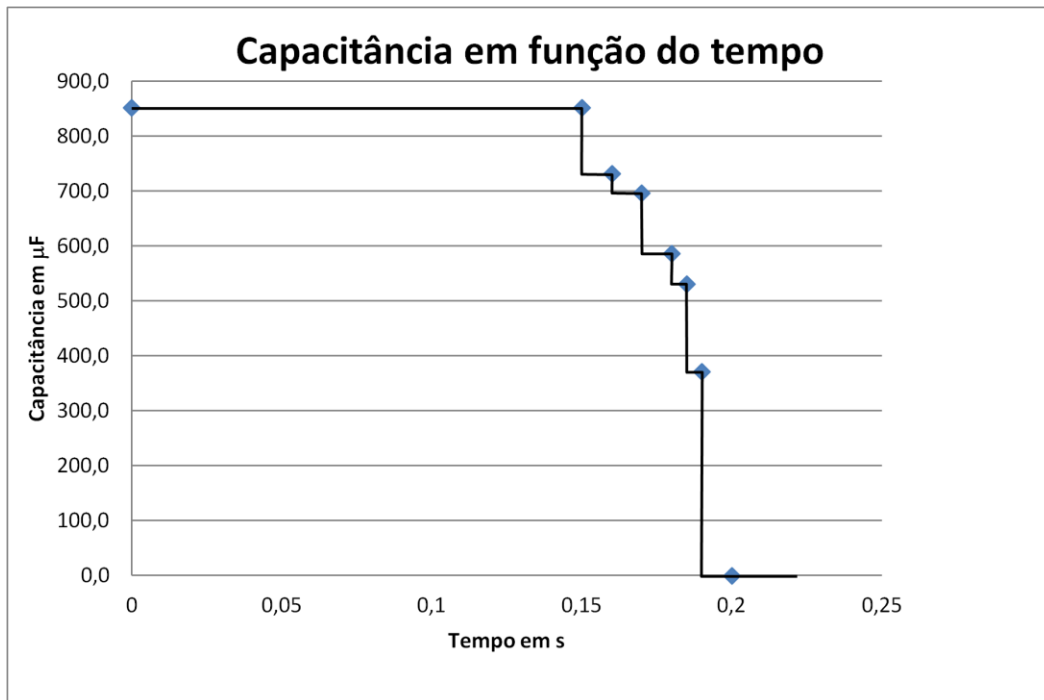


Figura 5.20 – Variação da Capacitância em função do tempo do banco de capacitores .

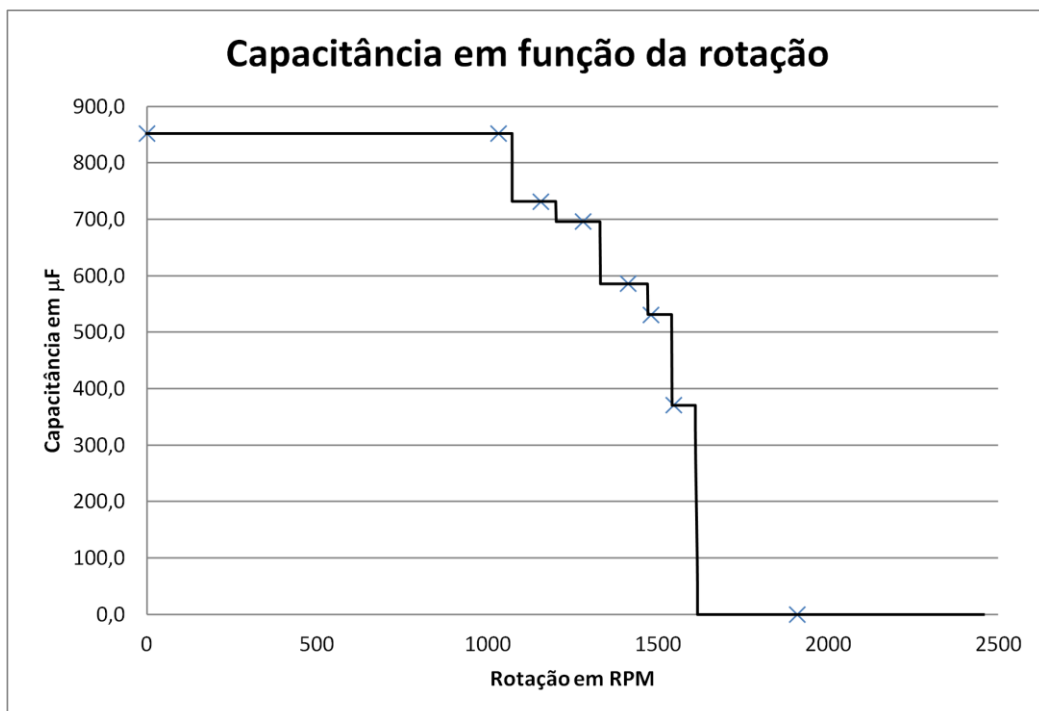


Figura 5.21 – Variação da capacitância em função da rotação do MIT.

CAPÍTULO 6 - ENSAIOS LABORATORIAIS

Neste capítulo, são expostos os resultados obtidos através de ensaios laboratoriais na partida de um gerador de 2,0 KVA com excitação Estática e com excitação Rotativas. Foi realizado um aumento gradual das cargas com o objetivo de avaliar o comportamento dos distúrbios provocados pelos afundamentos de tensão do gerador na partida de motores. Foi utilizado regulador de tensão para redução/ mitigação do afundamento de tensão.

O caso mais persuasivo deste estudo é o gerador acionado por um MIT, sendo o campo do gerador alimentado por um sistema de excitação (excitatriz de corrente contínua auto excitada) que injeta tensão no referido campo.

Os ensaios e testes foram realizados no Laboratório de Máquinas Elétricas da Universidade Santa Cecília, no período de 15/08 a 20/10/2011, cujos esquemas estão nas figuras abaixo.

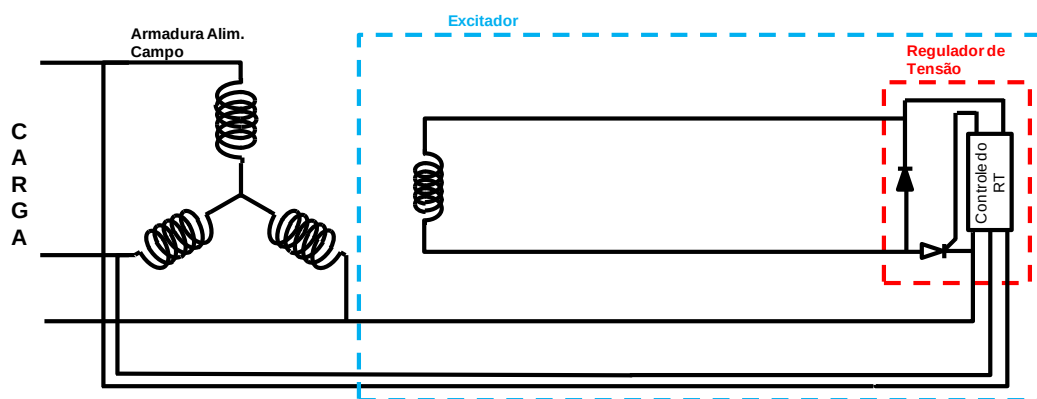


Figura 6.1 Esquema de Ligação do Ensaio com Excitação Estática

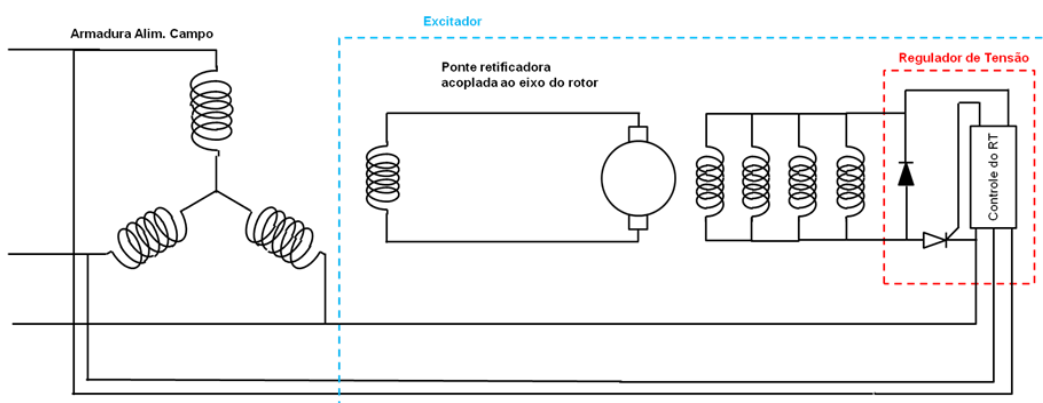


Figura 6.2 Esquema de Ligação do Ensaio com Excitação Rotativa (Sem escovas)

6.1. Equipamentos, Materiais e Métodos

6.1.1. Conjunto Moto Gerador

Para os testes apresentados neste trabalho foi utilizado o conjunto de Máquinas elétricas rotativas do laboratório de Máquinas elétricas da faculdade de Engenharia Elétrica. O conjunto é composto de Motor, Gerador e Excitatriz (Figura 6.3) cujos dados estão descritos a seguir:



Figura 6.3 Conjunto Moto Gerador

6.1.1.1 Motor

A seguir estão apresentados os dados (Tabela 6.1) e a imagem (Figura 6.4) do motor assíncrono utilizado para realização dos ensaios:

Tabela 6.1 Dados Motor Assíncrono

Marca	Anel
Potência em 1800 rpm (KW)	2,0
Nº de Polos	4
Torque	

A figura abaixo ilustra o motor assíncrono utilizado.



Figura 6.4 Motor Assíncrono

6.1.1.2 Gerador

Dados (Tabela 6.2) e foto (Figura 6.5) da Máquina Síncrona utilizada como gerador:

Tabela 6.2 Dados do Gerador

Marca	Equacional
Potência (KVA)	2,0
Tensão (V)	133/230/266/460
Tensão de Excitação (V)	220
Rotação (RPM) / Frequência (Hz)	1800/60
Corrente de Armadura (A)	5
Corrente de Campo (A)	0,6
Rendimento	0,88
Isolação	F
Nº de Polos	4

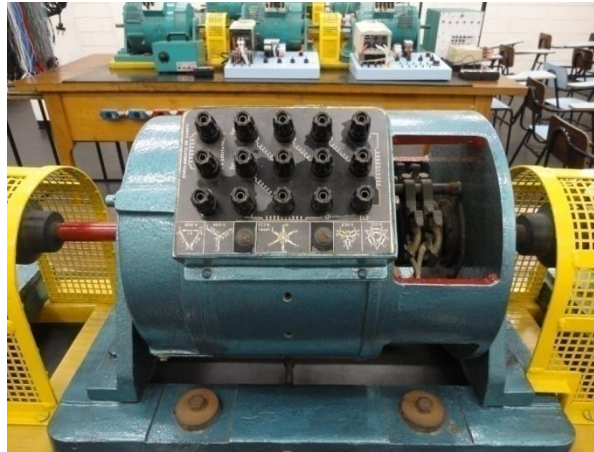


Figura 6.5 Máquina Síncrona-Gerador

6.1.1.3. Excitatriz Rotativa

Dados (Tabela 6.3) e foto (Figura 6.6) da Excitatriz Rotativa:

Tabela 6.3 Dados da Excitatriz Rotativa

Tensão de entrada (V)	220
Frequência (Hz)	60
Ajuste de Tensão (V)	0 a 220
Corrente Máxima (A)	0,6



Figura 6.6 Excitatriz Rotativa

6.1.2. Regulador de Tensão

Os dados representados na tabela a seguir são referentes ao regulador de tensão utilizado nos ensaios.

Tabela 6.4 Dados do Regulador de Tensão

Marca	Grameyer
Ponte Retificadora Controlada	Meia Onda
Tensão de Alimentação(V)	220
Frequência (Hz)	60
Tensão de Excitação (V)	99
Tensão Máxima (V)	250
Corrente Máxima (A)	1,25

A figura a seguir mostra o regulador de tensão utilizado.



Figura 6.7 Regulador de Tensão

6.1.3. Quadro de Cargas

Durante os testes o Moto Gerador alimenta cargas resistivas e indutivas através de quadro de Cargas com Resistências e Indutores (Figura 6.8), cujos dados estão nos subitens a seguir.



Figura 6.8 Quadro de Cargas

6.1.3.1. Quadro com Resistências

O quadro com resistências para utilização com carga resistiva é composto por seis resistências, cujos dados estão representados através da tabela abaixo:

Tabela 6.5 Dados Quadro com Resistências

Potencia Máxima do quadro (W)	2000
Valor de cada Resistência (Ω)	125
Potencia Nominal (W)	500

A figura abaixo ilustra o quadro com resistências acima citado.



Figura 6.9 Quadro com Resistências

6.1.3.2. Quadro com Indutores

O quadro com indutores para utilização com carga indutiva é composto por seis indutâncias, cujos dados estão representados através da tabela abaixo:

Tabela 6.6 Dados Quadro com Indutores

Potencia Máxima do quadro (VA)	580
Valor de cada Indutância (H)	1,5

A figura abaixo ilustra o quadro com indutâncias acima citado.



Figura 6.10 Quadro com Indutores

6.1.4. Motores de Indução

As tabelas e figuras abaixo apresentam os motores de indução que foram utilizados durante os ensaios:

Tabela 6.7 Dados MIT1 – 2CV

MIT 1 – 2 CV	
Modelo:	W22 Plus
Marca:	WEG
Nº de Polos:	4
FP:	0,85
Rendimento:	83,7 %
Inominal (A):	5,51
Ip/In:	6,9



Figura 6.11 MIT1 – 2CV

Tabela 6.8 Dados MIT2 – ½ CV

MIT 2 – ½ CV	
Modelo:	AD71HC
Marca:	THOSHIBA
Nº de Polos:	4
FP:	0,64
Rendimento:	65 %
Inominal (A):	2,2
Ip/In	5



Figura 6.12 MIT2 – ½ CV

Tabela 6.9 Dados MIT3 – ½ CV

MIT 3 – ½ CV	
Modelo:	711296
Marca:	WEG
Nº de Polos:	4
FP:	0,77
Inominal(A):	2,25
Ip/In	6

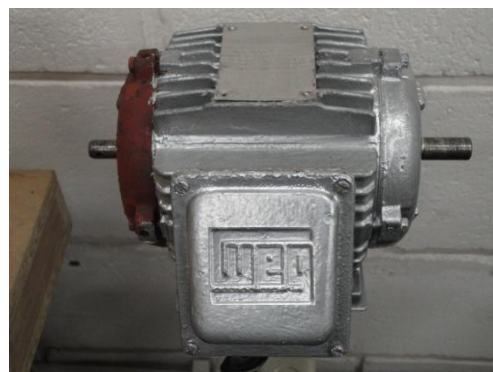


Figura 6.13 MIT3 – ½ CV

6.2. Resultados

Neste item são apresentados os resultados dos ensaios realizados com os diferentes tipos de cargas conectadas aos terminais do gerador.

Foram realizados os ensaios com excitação estática e com excitação rotativa, com objetivo de analisar o afundamento de tensão na partida dos motores, bem como sua mitigação através do melhor valor da tensão de teto (ceiling voltage) adquirida durante os ensaios.

Na análise de um distúrbio provocado pela partida de um MIT é considerado o fenômeno subtransitórios no sistema elétrico.

Para visualização das curvas foi utilizado o Canal 1 do osciloscópio para os valores de tensão e o Canal 2 do osciloscópio para de corrente.

6.2.1. Excitação Estática

6.2.1.1. Ensaio 1 – Gerador em Vazio

O objetivo deste teste foi verificar se os valores de tensão e corrente no campo e nos terminais de armadura do gerador estavam coerentes e em funcionamento adequado a partir do momento em que a chave de alimentação do regulador de tensão fosse fechada.

Na Figura 6.14 é possível visualizar as curvas de tensão (V_{A0}) e corrente (I_{A0}) na armadura do gerador. A Tensão de Campo (V_{f0}) e Corrente de Campo (I_{f0}) são visualizadas na Figura 6.15. A Tabela 6.10 Gerador Vazio (Excitação Estática) apresenta o resumo dos valores deste ensaio.

Tabela 6.10 Gerador Vazio (Excitação Estática)

V_{A0}	I_{A0}	V_{f0}	I_{f0}	ΔV (V)	ΔV (%)
221,53 (V)	0,0 (A)	60,0 (V)	275,0 (mA)	-	-

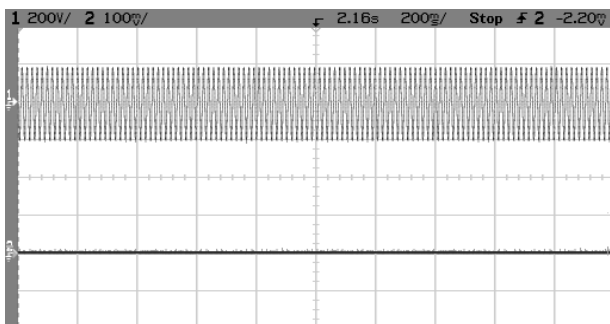


Figura 6.14 Tensão e corrente na armadura do gerador em vazio.

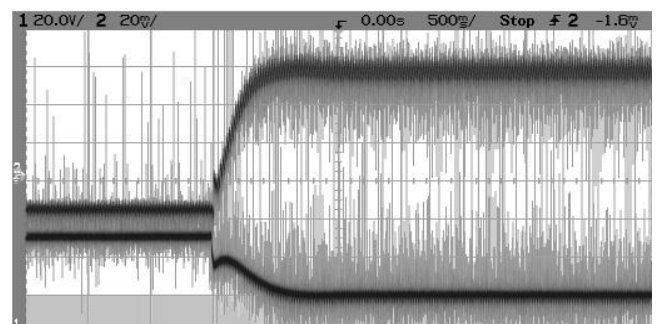


Figura 6.15 Tensão e corrente no campo do gerador em vazio no instante da ligação do regulador.

6.2.1.2. Ensaio 2 – Carga Resistiva

Este ensaio apresenta a análise do fenômeno afundamento de tensão, na alimentação de carga resistiva.

Pelo fato de a carga resistiva utilizada nos ensaios permitir alguns tipos de configurações, foi realizado as ligações indicadas na Figura 6.16a fim de apresentar resultados meramente comparativos para este tipo de carga.

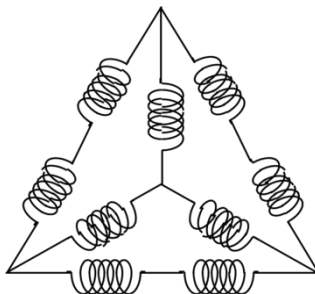


Figura 6.16 Ligação dos Resistores – Triângulo – Estrela

A Tabela 6.11 mostra os resultados obtidos durante o ensaio de carga resistiva com a 1ª Ligação:

Tabela 6.11 1ª Ligação: Carga Resistiva – Excitação Estática

$V_{A \text{ Res.}}$	$I_{A \text{ Res.}}$	$V_{f \text{ Res.}}$	$I_{f \text{ Res.}}$	$\Delta V \text{ (V)}$	$\Delta V \text{ (\%)}$
220,0 (V)	2,5 (A)	80,0 (V)	360,0 (mA)	1,53	0,0

A Tabela 6.12 mostra os resultados obtidos durante o ensaio com a 2ª Ligação:

Tabela 6.12 2ª Ligação: Carga Resistiva – Excitação Estática

$V_{A \text{ Res.}}$	$I_{A \text{ Res.}}$	$V_{f \text{ Res.}}$	$I_{f \text{ Res.}}$	$\Delta V \text{ (V)}$	$\Delta V \text{ (\%)}$
210,0 (V)	3,65 (A)	85,0 (V)	370,0 (mA)	11,53	5,0

A Tabela 6.13 mostra os resultados obtidos durante o ensaio com a 3ª Ligação:

Tabela 6.13 3ª Ligação Carga Resistiva – Excitação Estática

$V_{A \text{ Res.}}$	$I_{A \text{ Res.}}$	$V_{f \text{ Res.}}$	$I_{f \text{ Res.}}$	$\Delta V \text{ (V)}$	$\Delta V \text{ (\%)}$
100,0 (V)	3,0 (A)	47,5 (V)	220,0 (mA)	121,53	55,0

Na Figura 6.17 é possível visualizar as curvas de tensão e corrente na armadura do gerador e, a Figura 6.18 apresenta a curva de Tensão de Campo ($V_{f \text{ Res.}}$) e a Figura 6.19 a Corrente de Campo ($I_{f \text{ Res.}}$).

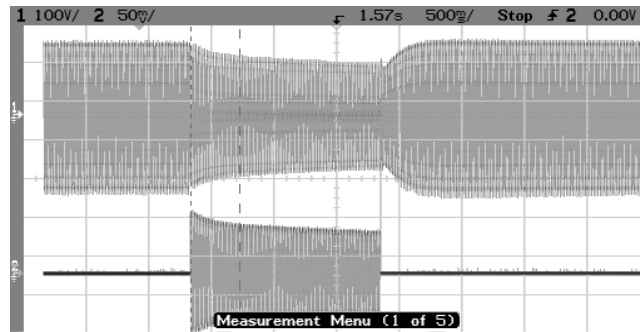


Figura 6.17 Curvas de tensão e corrente na armadura do gerador com carga resistiva.

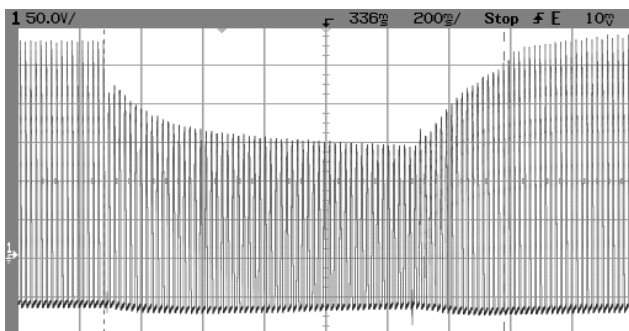


Figura 6.18 Curva da tensão de campo do gerador com carga resistiva.

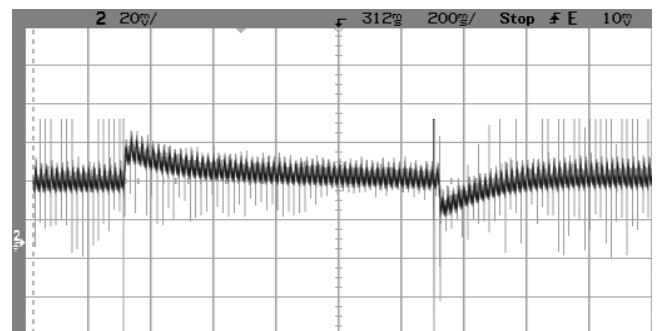


Figura 6.19 Curva da corrente de campo do gerador com carga resistiva

O elevado afundamento ocorre, pois de a tensão e corrente de campo não corresponderem ao restabelecimento da tensão nos terminais do gerador. Deve ser compreendido que não há maneira de o regulador fornecer a tensão de campo suficiente, se na entrada de alimentação dele, ou seja, se os terminais do gerador não fornecem a tensão estável sem distúrbio.

6.2.1.3. Ensaio 3 – Carga Indutiva

Este ensaio apresenta a análise do fenômeno afundamento de tensão, na alimentação de carga indutiva.

Assim como para a carga resistiva, para a carga indutiva foi realizado as ligações indicadas na Figura 6.20a fim de apresentar resultados meramente comparativos para este tipo de carga.

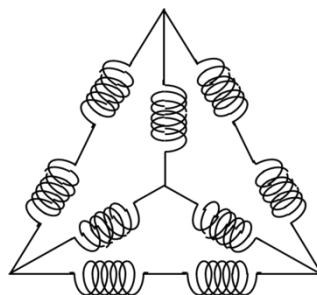


Figura 6.20 Ligação das Indutâncias – Triângulo - Estrela

As tabelas a seguir apresentam somente os valores de tensão e corrente no campo do gerador síncrono:

Tabela 6.14 1ª Ligação Carga Indutiva – Excitação Estática

$V_{A \text{ Res.}}$	$I_{A \text{ Res.}}$	$V_{f \text{ Res.}}$	$I_{f \text{ Res.}}$	$\Delta V \text{ (V)}$	$\Delta V \text{ (\%)}$
-	-	80,0 (V)	365,0 (mA)	-	-

Tabela 6.15 2ª Ligação Carga Indutiva – Excitação Estática

$V_{A \text{ Res.}}$	$I_{A \text{ Res.}}$	$V_{f \text{ Res.}}$	$I_{f \text{ Res.}}$	$\Delta V \text{ (V)}$	$\Delta V \text{ (\%)}$
-	-	77,0 (V)	350,0 (mA)	-	-

Tabela 6.16 3ª Ligação Carga Indutiva – Excitação Estática

$V_{A \text{ Res.}}$	$I_{A \text{ Res.}}$	$V_{f \text{ Res.}}$	$I_{f \text{ Res.}}$	$\Delta V \text{ (V)}$	$\Delta V \text{ (\%)}$
12,5 (V)	6,0 (A)	5,0 (V)	20,0 (mA)	209,03	94,0

Com os dados apresentados, observa-se que, caso a bobina do estator do gerador estivesse com um considerável aquecimento e/ou a carga permanecesse por um período maior ligada aos terminais do gerador, ocorre o efeito desmagnetizante de reação de armadura.

Na Figura 6.21 é possível visualizar as curvas de tensão (canal 1 do osciloscópio) e corrente (canal 2 do osciloscópio) na armadura do gerador.

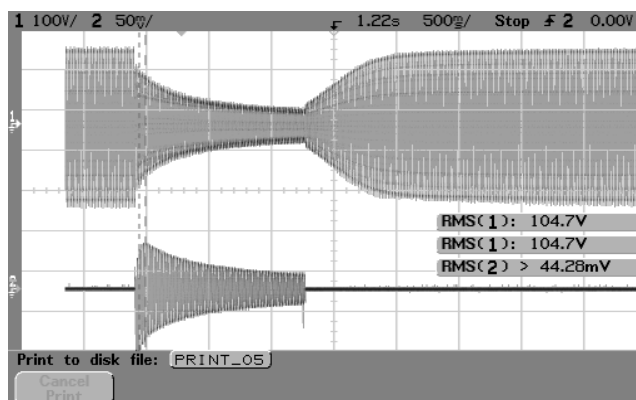


Figura 6.21 Curva da tensão e corrente de armadura do gerador com carga fortemente indutiva.

O elevado afundamento ocorre, pois a tensão e corrente de campo não corresponderem ao restabelecimento da tensão nos terminais do gerador. Deve ser compreendido que não há maneira de o regulador fornecer a tensão de campo suficiente, se na entrada de alimentação do próprio, ou seja, se os terminais do gerador não fornecem a tensão estável sem distúrbio, visto que a corrente demandada pelas cargas indutivas provoca o indesejado efeito desmagnetizante.

6.2.1.4. Ensaio 4 – Carga Indutiva em Paralelo com MIT de $\frac{1}{2}$ (CV)

Para comprovar que o efeito desmagnetizante no item anterior iria ocorrer a medida que o aquecimento do estator aumentasse, ou com a inserção de qualquer carga de efeito dinâmico nos terminais do gerador, foi inserido o MIT de apenas $\frac{1}{2}$ (CV), o que foi o suficiente para provocar o afundamento permanente da tensão, ou seja, o efeito desmagnetizante.

Neste ensaio, ocorreu a partida do MIT que por alguns poucos segundos partiu, e em seguida houve a queda total da tensão de armadura, pois a corrente e tensão injetas no campo não foram suficientes para que o gerador chegasse em seu funcionamento de regime permanente.

O fato é concretizado com o simples entendimento de que, quando o gerador está em regime e alimenta cargas que possuem componentes reativos e indutivos elevados (como ocorre na partida dos motores de indução), o sistema de regulação do gerador tem o efeito corretivo, tentando eliminar as consequências negativas do efeito desmagnetizante que por sua vez é superior ao sistema de regulação. A Figura 6.22 representa a ocorrência do fenômeno e a

Tabela 6.17 apresenta o resumo do afundamento de tensão e a perda total da tensão de armadura do gerador síncrono.

A Tabela 6.17 apresenta os valores do ensaio adquiridos durante o ensaio que demonstra a ocorrência da desmagnetização do gerador síncrono.

Tabela 6.17 Valores na ocorrência de desmagnetização – Excitação Estática

V_A Res.	I_A Res.	V_f Res.	I_f Res.	ΔV (V)	ΔV (%)
-	-	43,0 (V)	250,0 (mA)	-	-

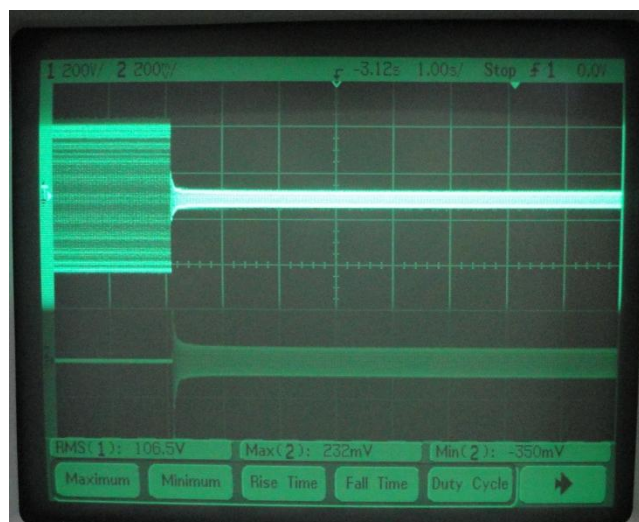


Figura 6.22 Tensão e corrente de armadura do gerador com carga indutiva e motor de ½ CV conectados paralelamente à armadura do gerador.

6.2.2. Excitação Rotativa

Conforme mencionado no Capítulo 4, esta é uma configuração de um sistema de excitação com excitatriz de corrente contínua, pelo fato de as máquinas geradoras do laboratório permitirem somente este tipo de configuração de excitação rotativa.

Os ensaios foram realizados utilizando cargas resistivas e indutivas. Para cada uma delas, foram inseridos motores de indução em paralelo a fim de analisar o comportamento do fenômeno para ambos os tipos de carga.

De forma a atribuir maior facilidade na compreensão dos resultados obtidos neste tipos de excitação, também foram inseridos os valores de Resistência de Campo do Gerador

Síncrono Calculada (R_f CALCULADO) e Tensão da Bobina da Excitatriz Calculada ($V_{BOB. EXC. CALCULADA}$) nas tabelas.

6.2.2.1. Ensaio 1 – Gerador em Vazio

Apesar de este tipo de ensaio já ter sido relatado anteriormente, vale salientar que os parâmetros levantados são para fins de análise comparativa.

As curvas de tensão (V_{A0}) e corrente (I_{A0}) na armadura do gerador, assim como a Tensão de Campo (V_{f0}) e Corrente de Campo (I_{f0}) foram obtidas novamente devido à mudança do tipo de excitação.

A Tabela 6.18 apresenta o resumo dos valores deste ensaio acima mencionados de forma a atribuir maior facilidade de compreensão dos resultados obtidos.

Tabela 6.18 Gerador Vazio – Excitação Rotativa

V_{A0}'	I_{A0}'	V_{f0}'	I_{f0}'	ΔV (V)	ΔV (%)
230 (V)	50,0 (mA)	63,0 (V)	280,0 (mA)	-	-

6.2.2.2. Ensaio 2 – Motor de 2,0 (CV).

Este ensaio tem o objetivo de apresentar o afundamento da tensão e seus respectivos parâmetros apenas no motor de indução de 2,0 CV a fim de apresentar a ocorrência do distúrbio causado no gerador síncrono frente à partida de uma carga indutiva dinâmica. Além disso, também foi possível observar com maior ênfase a ocorrência do fenômeno numa carga rotativa sem que haja a ligação de outras cargas em paralelo.

Na Figura 6.23 é possível visualizar as curvas de tensão (V_A) e Corrente (I_A) na armadura do gerador e a Figura 6.24 apresenta as curvas de Tensão de Campo (V_f) e Corrente de Campo (I_f). Também foram adquiridos os valores de pico da tensão ($V_{PAafundamento}$) e corrente ($I_{PAafundamento}$) de armadura durante o afundamento. Com os valores de resistência ($R_{BOB. EXC.}$) e corrente ($I_{BOB. EXC.}$) na bobina da excitatriz é possível calcular a tensão ($V_{BOB. EXC. CALCULADA}$), a fim de saber quantos Volts o regulador fornece no momento da ocorrência do afundamento.

A Tabela 6.19 apresenta o resumo dos valores deste ensaio acima mencionados.

Tabela 6.19 Ensaio com MIT de 2CV – Excitação Rotativa

V_A	I_A	V_{PA} Afundamento	I_{PA} Afundamento	V_f	I_f
-------	-------	-------------------------	-------------------------	-------	-------

227,8 (V)	3,55 (A)	135,0 (V)	48,0 (A)	135,0 (V)	0,55 (A)
R_f CALCULADO	R_{BOB. EXC.}	I_{BOB. EXC.}	V_{BOB. EXC.} CALCULADA	ΔV (V) Ref. VA0	ΔV (%)
245,45 (Ω)	21,6 (Ω)	0,8 (A)	17,28 (V)	2,20	58,0

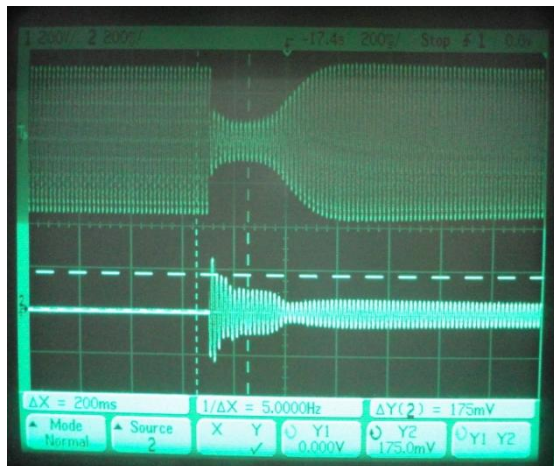


Figura 6.23 Tensão e corrente de armadura do gerador com motor de 2,0 CV conectado à armadura do gerador.

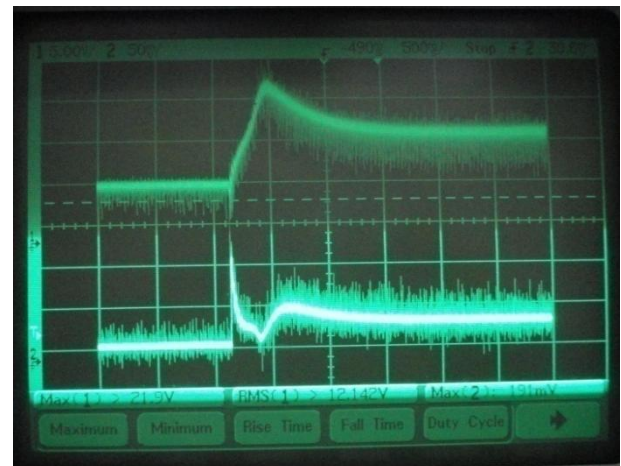


Figura 6.24 Tensão e corrente de campo do Gerador com motor de 2,0 CV.

Para este caso, o afundamento da tensão foi de 58%, o que já é considerado crítico pelo fato de estar acima do valor máximo admissível (de 20 a 25%). Embora a ocorrência do distúrbio tenha tal magnitude de afundamento, a tensão de teto (ceiling voltage) obtida foi de 1,4, que é uma importante e eficaz resposta para o restabelecimento da tensão de armadura pelo fato do afundamento ter sido “corrigido” num tempo razoavelmente curto.

6.2.2.3. Ensaio 3 – Carga Indutiva.

Esta foi o tipo de carga vilã utilizada para a maioria dos ensaios por se tratar de uma carga de um efeito fortemente desmagnetizante.

Na Figura 6.25 é possível visualizar as curvas de tensão e corrente na armadura do gerador e a Figura 6.26 apresenta as curvas de Tensão de Campo ($V_{f\text{ IND.}}$) e Corrente de Campo ($I_{f\text{ IND.}}$). Assim como no ensaio anterior, para todos os ensaios realizados com o tipo de excitação rotativa, foram adquiridos os valores de pico da tensão ($V_{PA\text{ afundamento}}$) e corrente ($I_{PA\text{ afundamento}}$) de armadura durante o afundamento. Além desses parâmetros, foi efetuada a medição

da Corrente da Bobina da Excitatriz ($I_{BOB. EXC.}$). Com os valores de resistência e corrente na bobina da excitatriz é possível calcular a tensão ($V_{BOB. EXC.}$), a fim de obter o conhecimento de quantos Volts o regulador fornece no momento da ocorrência do afundamento.

A Tabela 6.20 apresenta o resumo dos valores deste ensaio acima mencionados de forma a atribuir maior facilidade de compreensão dos resultados obtidos.

Tabela 6.20 Ensaio com Carga Indutiva – Excitação Rotativa

$V_A IND.$	$I_A IND.$	V_{PA} Afundamento	I_{PA} Afundamento	$V_f IND.$	$I_f IND.$
220,0 (V)	6,5 (A)	225,0 (V)	11,3 (A)	210,0 (V)	0,85 (A)
$R_f IND.$ CALCULADO	$R_{BOB. EXC.}$	$I_{BOB. EXC.}$	$V_{BOB. EXC.}$ CALCULADA	ΔV (V) Ref. VA0	ΔV (%)
247,06 (Ω)	21,6 (Ω)	1,5 (A)	32,4 (V)	10,0	34,0

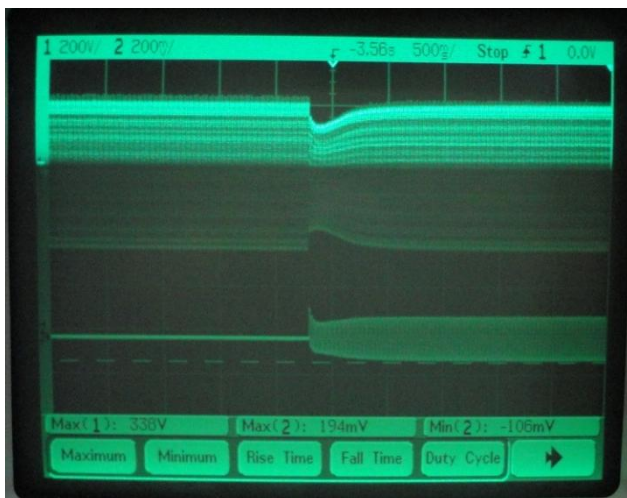


Figura 6.25 Tensão e corrente de armadura do gerador com carga indutiva conectada à armadura do gerador.

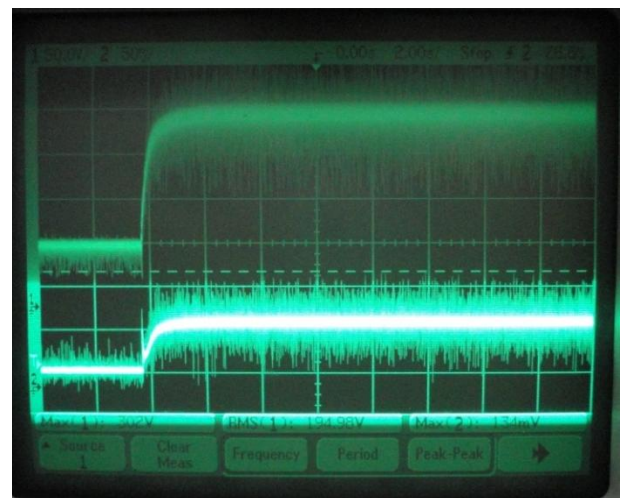


Figura 6.26 Tensão e corrente de campo do gerador com carga indutiva.

Para este ensaio, o afundamento da tensão foi de 34%. Embora seja uma queda inferior (em termos de porcentagem do afundamento) ao registrado no ensaio com o motor de indução de 2,0 CV, este também é considerado crítico pelo fato de estar acima do valor máximo admissível (de 20 a 25%). Embora a ocorrência do distúrbio tenha tal magnitude de afundamento, a tensão de teto (ceiling voltage) obtida foi de 1,4, que é uma importante e eficaz

resposta para o restabelecimento da tensão de armadura pelo fato do afundamento ter sido “corrigido” num tempo razoavelmente curto.

6.2.2.4. Ensaio 4 – Carga Indutiva em Paralela com Motor de Indução de 2,0 CV.

Embora uma carga indutiva não tenha o mesmo efeito de um motor de indução pelo fato de a mesma ser estática, ela também provoca um grande efeito desmagnetizante no gerador e, por esse motivo foi realizada a partida da carga indutiva simultaneamente aos demais motores de indução, a fim de obter de uma maneira mais concreta o nível de saturação do gerador de corrente contínua e conseqüentemente o afundamento de tensão permanente. O gerador de corrente contínua foi utilizado como um tipo de excitação auxiliar ao gerador síncrono.

Na Figura 6.27 é possível visualizar as curvas de tensão e corrente na armadura do gerador e a Figura 6.28 apresenta as curvas de Tensão de Campo (V_f) e Corrente de Campo (I_f).

Com o “novo” valor obtido da tensão ($V_{BOB. EXC.}$) torna-se clara a visualização da tensão produzida no campo da excitatriz pelo regulador de tensão e, conseqüentemente a abertura do ângulo de disparo de seus tiristores de maneira simbólica.

A Tabela 6.21 apresenta o resumo dos valores deste ensaio acima mencionados de forma a atribuir maior facilidade de compreensão dos resultados obtidos.

Tabela 6.21 Ensaio com Carga Indutiva paralela com MIT de 2,0 CV

$V_{A IND.}$	$I_{A IND.}$	V_{PA} Afundamento	I_{PA} Afundamento	$V_{f IND.}$	$I_{f IND.}$
220,0 (V)	9,5 (A)	106,0 (V)	27,0 (A)	302,0 (V)	1,15 (A)
$R_{f IND.}$ CALCULADO	$R_{BOB. EXC.}$	$I_{BOB. EXC.}$	$V_{BOB. EXC.}$ CALCULADA	ΔV (V) Ref. V_{A0}	ΔV (%)
262,61 (Ω)	21,6 (Ω)	3,4 (A)	73,74 (V)	10,0	74,0

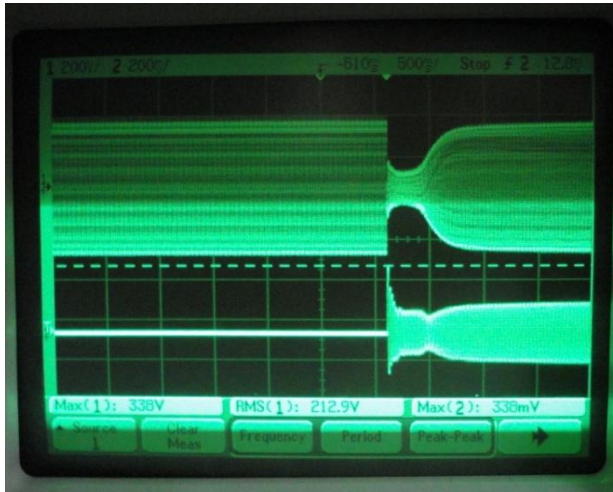


Figura 6.27 Tensão e corrente de armadura do gerador conectada com carga indutiva em paralela a MIT de 2,0 CV.



Figura 6.28 Tensão e corrente de campo do gerador conectada com carga indutiva em paralela a MIT de 2,0 CV.

Neste ensaio, o afundamento da tensão foi de 74% o que também é considerado crítico pelo fato de estar praticamente três vezes acima do valor máximo admissível (de 20 a 25%).

6.2.2.5. Ensaio 5 – Cargas Indutivas em Paralelo com um MIT de 2,0 CV e um MIT de $\frac{1}{2}$ CV.

Em consequência do ensaio anterior, foi acrescentada outra carga nos terminais do gerador. O objetivo deste também é partir as cargas simultaneamente e registrar todos os parâmetros analisados anteriormente e, novamente obter a melhor resposta do regulador de tensão em relação ao ceiling voltage, a fim de proporcionar uma redução significativa no afundamento da tensão e evitar a saturação precoce da excitatriz ou do regulador de tensão.

Na Figura 6.29 é possível visualizar as curvas de tensão e corrente na armadura do gerador e a Figura 6.30 apresenta as curvas de Tensão de Campo (V_f) e Corrente de Campo (I_f).

Com o “novo” valor obtido da tensão ($V_{BOB. EXC.}$) torna-se clara a visualização da tensão produzida no campo da excitatriz pelo regulador de tensão e, consequentemente a abertura do ângulo de disparo de seus tiristores de maneira simbólica.

A Tabela 6.22 apresenta o resumo dos valores deste ensaio acima mencionados de forma a atribuir maior facilidade de compreensão dos resultados obtidos.

Tabela 6.22 Ensaio com Carga Indutiva em paralelo com MIT de 2,0CV e um MIT de ½CV – Excitação Rotativa

$V_{A \text{ IND.}}$	$I_{A \text{ IND.}}$	V_{PA} Afundamento	I_{PA} Afundamento	$V_{f \text{ IND.}}$	$I_{f \text{ IND.}}$
210,0 (V)	10,5 (A)	87,5 (V)	35,0 (A)	307,0 (V)	1,2 (A)
$R_{f \text{ IND.}}$ CALCULADO	$R_{BOB. \text{ EXC.}}$	$I_{BOB. \text{ EXC.}}$	$V_{BOB. \text{ EXC.}}$ CALCULADA	ΔV (V) Ref. VA0	ΔV (%)
255,83 (Ω)	21,6 (Ω)	3,6 (A)	77,76 (V)	20,0	71,0

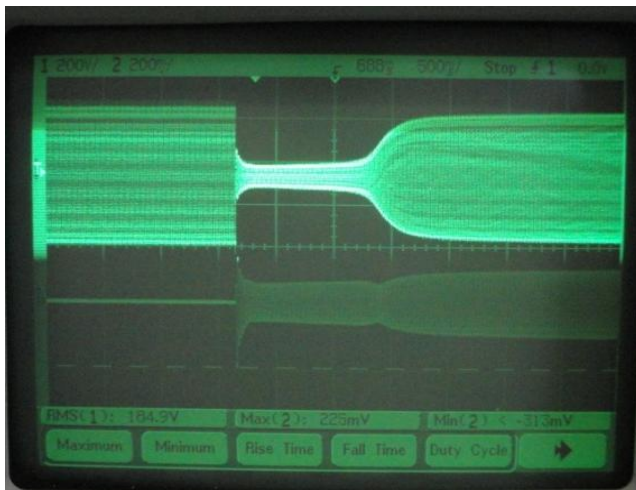


Figura 6.29 Tensão e corrente de armadura do gerador conectada com carga indutiva em paralela com MIT's de 2,0 e ½ CV.

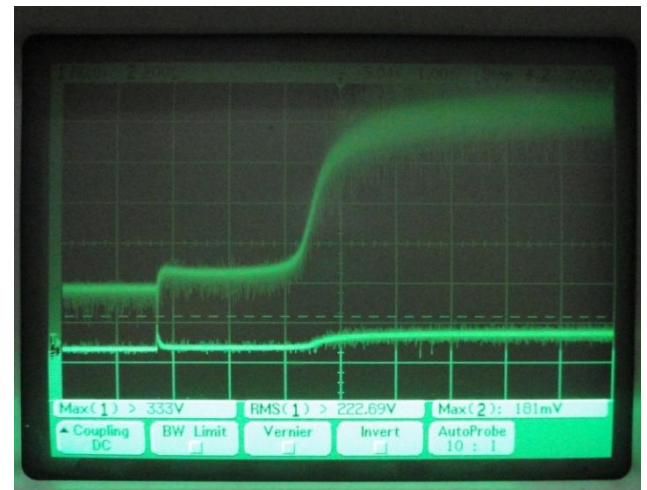


Figura 6.30 Tensão e corrente de campo do gerador conectada com carga indutiva em paralela com MIT's de 2,0 e ½ CV.

Neste ensaio, o afundamento da tensão foi de 81%. Assim como nos ensaios anteriores, este valor é considerado crítico, pois ainda continua acima do valor máximo admissível (de 20 a 25%). Embora a ocorrência do distúrbio sofreu considerável afundamento em termos de magnitude e longo período de duração de recuperação, a tensão de teto (ceiling voltage) obtida foi de 1,4, que é uma importante e eficaz resposta para o restabelecimento da tensão de armadura pelo fato de afundamento ter sido “corrigido”.

6.2.2.6. Ensaio 6 – Carga Indutiva em Paralelo com Motor de Indução de ½ CV.

Para a realização deste ensaio, ao invés de acrescentar outra carga nos terminais do gerador, foi retirado o motor de indução de 2,0 CV. O objetivo é partir essas cargas simultaneamente e analisar o comportamento do fenômeno relativo à este tipo de “configuração”, e assim registrar todos os parâmetros analisados durante o ensaio.

Na Figura 6.31 é possível visualizar as curvas de tensão e corrente na armadura do gerador e a Figura 6.32 apresenta as curvas de Tensão de Campo (V_f) e Corrente de Campo (I_f). A partir da Lei de Ohm, com os valores de corrente e resistência da bobina da excitatriz, é possível encontrar o valor da tensão ($V_{BOB. EXC.}$). Com isso, torna-se clara a visualização da tensão produzida no campo da excitatriz pelo regulador de tensão.

A Tabela 6.23 apresenta o resumo dos valores deste ensaio acima mencionados de forma a atribuir maior facilidade de compreensão dos resultados obtidos.

Tabela 6.23 Ensaio de Carga Indutiva em paralelo com MIT de ½CV – Excitação Rotativa

V_A	I_A	V_{PA} Afundamento	I_{PA} Afundamento	V_f	I_f
217,0 (V)	8,0 (A)	168,29 (V)	21,25 (A)	259,0 (V)	0,95 (A)
$R_{f IND.}$ CALCULADO	$R_{BOB. EXC.}$	$I_{BOB. EXC.}$	$V_{BOB. EXC.}$ CALCULADA	ΔV (V) Ref. V_{A0}	ΔV (%)
272,63 (Ω)	21,6 (Ω)	2,5 (A)	54,0 (V)	13,0	41,0

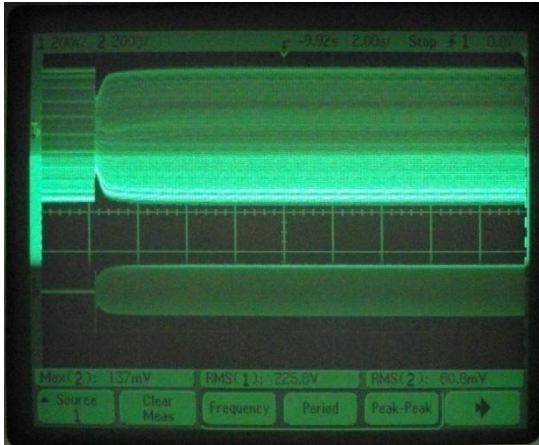


Figura 6.31 Tensão e corrente de armadura do gerador conectada com carga indutiva em paralelo com MIT de $\frac{1}{2}$ CV.

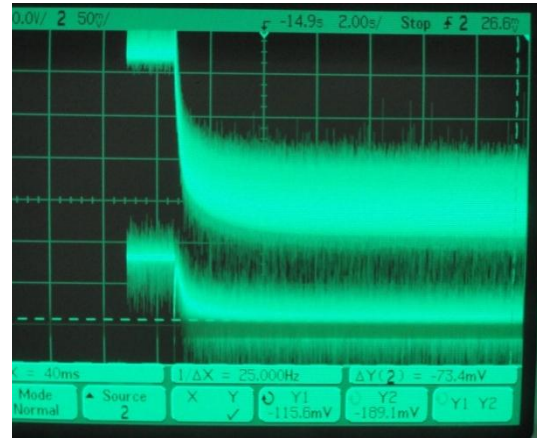


Figura 6.32 Tensão e corrente de campo do gerador conectada com carga indutiva em paralelo com MIT de $\frac{1}{2}$ CV.

Neste ensaio, o afundamento da tensão foi de 41%. Embora sua magnitude não for tão elevada, este percentual ainda é considerado crítico, pelo fato de permanecer acima do valor máximo admissível (de 20 a 25%). Todavia, este distúrbio pode ser considerado aceitável devido ao curto tempo de duração do afundamento, ou seja, a ceiling voltage de 1,4 correspondeu perfeitamente à ocorrência do fenômeno.

6.2.2.7. Ensaio 7 - Carga Indutiva em Paralelo com Dois Motores de Indução de $\frac{1}{2}$ CV.

Neste ensaio, assim como nos demais, todas as cargas estão conectadas em paralelo. Embora existam dois motores de indução de $\frac{1}{2}$ CV, é possível dizer que os mesmos ligados paralelamente correspondem a um motor de indução de 1,0 CV.

Na Figura 6.33 é possível visualizar as curvas de tensão e corrente na armadura do gerador e a Figura 6.34 apresenta as curvas de Tensão de Campo (V_f) e Corrente de Campo (I_f). A partir da Lei de Ohm, uma vez obtidos os valores de corrente e resistência da bobina da excitatriz, é possível calcular o valor da tensão ($V_{BOB. EXC.}$). Com isso, torna-se clara a visualização da tensão produzida no campo da excitatriz pelo regulador de tensão

A Tabela 6.24 apresenta o resumo dos valores deste ensaio acima mencionados de forma a atribuir maior facilidade de compreensão dos resultados obtidos.

Tabela 6.24 Ensaio Carga Indutiva paralela a dois MIT's de ½ CV

V_A	I_A	V_{PA} Afundamento	I_{PA} Afundamento	V_f	I_f
220,0 (V)	9,0 (A)	150,0 (V)	22,2 (A)	297,0 (V)	1,15 (A)
$R_{f IND.}$ CALCULADO	$R_{BOB. EXC.}$	$I_{BOB. EXC.}$	$V_{BOB. EXC.}$ CALCULADA	ΔV (V) Ref. VA0	ΔV (%)
258,26 (Ω)	21,6 (Ω)	3,2 (A)	69,12 (V)	10,0	58,0

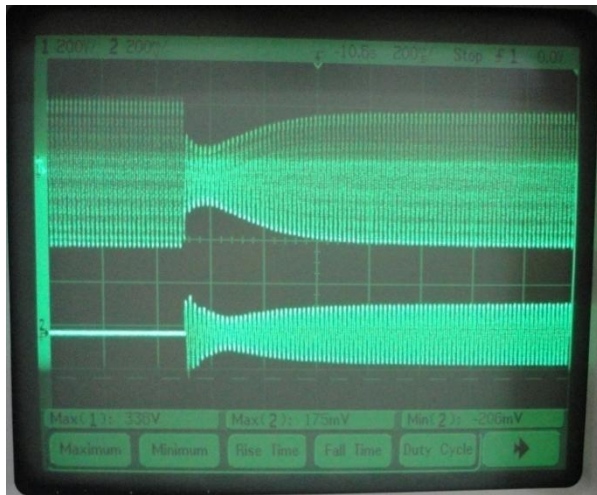


Figura 6.33 Tensão e corrente de armadura do gerador conectada com carga indutiva em paralela com dois MIT's de ½ CV.

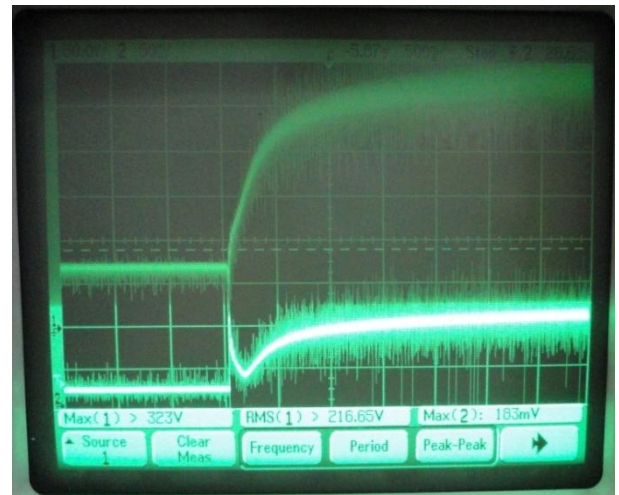


Figura 6.34 Tensão e corrente de campo do gerador conectada com carga indutiva em paralela com dois MIT's de ½ CV.

Neste ensaio, o afundamento da tensão foi de 58%. Embora um percentual de magnitude elevada e tempo de restabelecimento significativamente curto, o distúrbio ainda é considerado crítico, pois ainda continua a permanecer acima do valor máximo admissível (de 20 a 25%). Todavia, este distúrbio pode ser considerado aceitável devido ao curto tempo de duração do afundamento, ou seja, a ceiling voltage de 1,4 correspondeu perfeitamente à ocorrência do fenômeno.

6.2.2.8. Ensaio 8 – Carga Indutiva em Paralela com Dois MIT's de ½ CV e Um MIT de 2,0 CV.

Neste ensaio foram conectadas todas as cargas indutivas nos terminais do gerador. O intuito foi observar se o regulador de tensão poderia oferecer um ângulo de disparo dos tiristores (regulador de tensão) maior que os obtidos nos ensaios anteriores. Além disso, verificar o ponto de saturação do sistema.

Na Figura 6.35 é possível visualizar as curvas de tensão e corrente na armadura do gerador e a Figura 6.36 apresenta as curvas de Tensão de Campo (V_f) e Corrente de Campo (I_f). A partir da Lei de Ohm, uma vez obtidos os valores de corrente e resistência da bobina da excitatriz, é possível calcular o valor da tensão ($V_{BOB. EXC.}$). Com isso, torna-se clara a visualização da tensão produzida no campo da excitatriz pelo regulador de tensão.

A Tabela 6.25 apresenta o resumo dos valores deste ensaio acima mencionados de forma a atribuir maior facilidade de compreensão dos resultados obtidos.

Tabela 6.25 Ensaio de Carga Indutiva em paralelo com dois MIT's de ½ CV e um MIT de 2,0CV – Excitação rotativa

V_A	I_A	V_{PA} Afundamento	I_{PA} Afundamento	V_f	I_f
204,6 (V)	11,13 (A)	93,8 (V)	38,7 (A)	284,0 (V)	1,2 (A)
$R_{f IND.}$ CALCULADO	$R_{BOB. EXC.}$	$I_{BOB. EXC.}$	$V_{BOB. EXC.}$ CALCULADA	ΔV (V) Ref. VA0	ΔV (%)
236,67 (Ω)	21,6 (Ω)	3,2 (A)	69,12 (V)	25,4	85,0

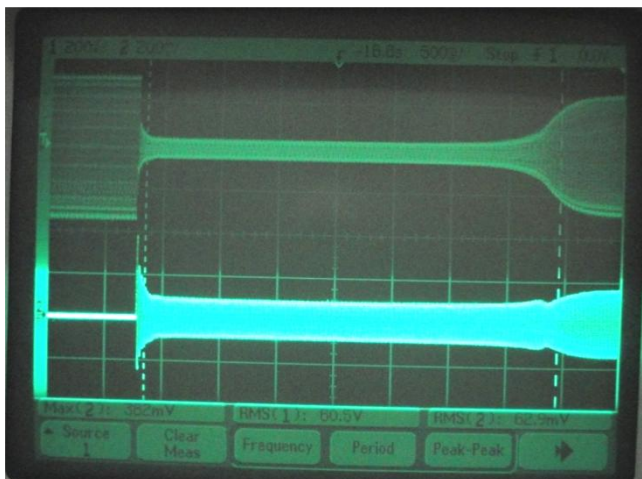


Figura 6.35 Tensão e corrente de armadura do gerador conectada com carga indutiva em paralela com dois MIT's de $\frac{1}{2}$ CV e um MIT de 2,0 CV.

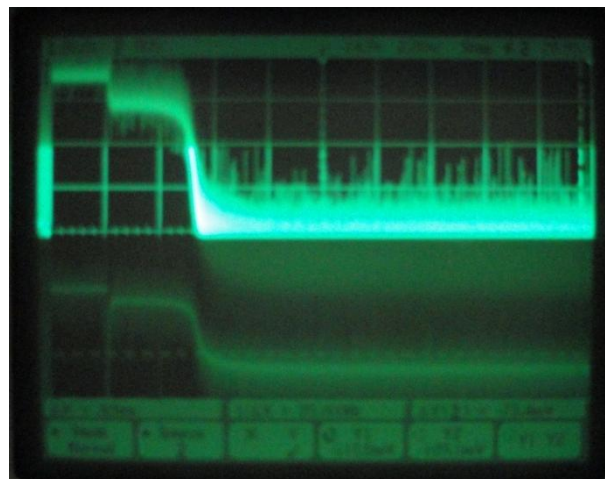


Figura 6.36 Tensão e corrente de campo do gerador conectada com carga indutiva em paralela com dois MIT's de $\frac{1}{2}$ CV e um MIT de 2,0 CV.

Neste ensaio, o afundamento da tensão foi de 85%. Embora tenha sido possível partir o gerador com todas essas cargas, vale salientar que houve a ocorrência de uma forte ação desmagnetizante durante vários segundos, ou seja durante o tempo de aceleração dos motores. Todavia, este distúrbio é considerado crítico e, portanto, não é aceito num sistema devido o longo tempo de duração do afundamento. Neste ensaio é evidente que a Ceilingvoltage de 1,4 não correspondeu perfeitamente à ocorrência do fenômeno, ou seja, não manteve a tensão de armadura estável.

Após efetuar as medições acima mencionadas, foram desligadas todas as cargas do sistema e, ao tentar parti-las novamente ocorreu o afundamento permanente da tensão do gerador.

6.2.2.9. Ensaio 9 – Carga Resistiva.

Embora não seja o objetivo deste estudo a análise do afundamento de tensão com a utilização de cargas resistivas, apenas para métodos comparativos, os mesmos tipos de ligações realizados nos testes com carga indutiva também foram utilizados nos teste com carga resistiva.

Na Figura 6.37 é possível visualizar as curvas de tensão e corrente na armadura do gerador e a Figura 6.38 apresenta as curvas de Tensão de Campo (V_f) e Corrente de Campo (I_f). A partir da Lei de Ohm, uma vez obtidos os valores de corrente e resistência da bobina da

excitatriz, é possível calcular o valor da tensão ($V_{BOB. EXC.}$). Com isso, torna-se clara a visualização da tensão produzida no campo da excitatriz pelo regulador de tensão.

A Tabela 6.26 apresenta o resumo dos valores deste ensaio acima mencionados de forma a atribuir maior facilidade de compreensão dos resultados obtidos.

Tabela 6.26 Ensaio Carga Resistiva - Excitação Rotativa

V_A	I_A	V_{PA} Afundamento	I_{PA} Afundamento	V_f	I_f
216,38 (V)	6,5 (A)	256,64 (V)	5,75 (A)	146,0 (V)	0,6 (A)
$R_{f IND.}$ CALCULADO	$R_{BOB. EXC.}$	$I_{BOB. EXC.}$	$V_{BOB. EXC.}$ CALCULADA	ΔV (V) Ref. VA0	ΔV (%)
243,33 (Ω)	21,6 (Ω)	1,0 (A)	21,6 (V)	13,62	16,0

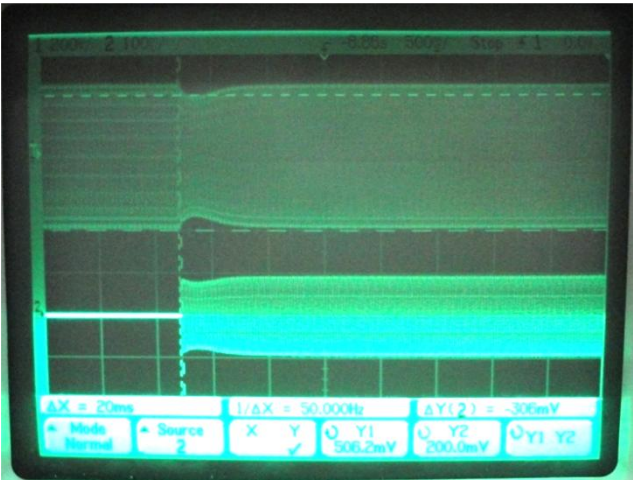


Figura 6.37 Tensão e corrente de armadura do gerador conectada com carga resistiva.

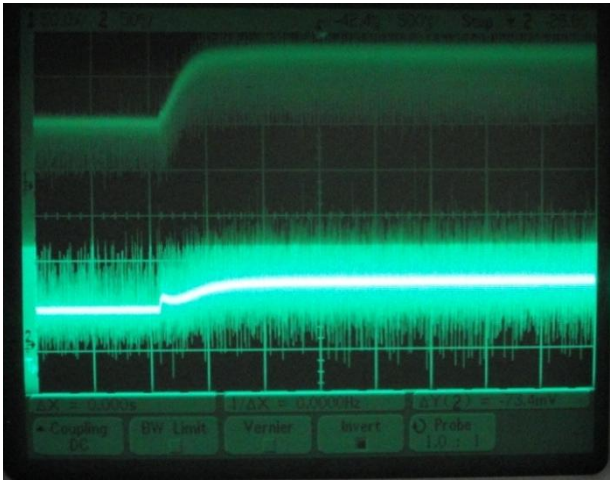


Figura 6.38 Tensão e corrente de campo do gerador conectada com carga resistiva.

Neste ensaio, o afundamento da tensão foi de 16%. Um percentual que, além de baixa magnitude, é considerado aceitável, pois está abaixo do limite de tolerância admissível (de 20 a 25%). Além disso, o curto tempo de duração do afundamento, ou seja, a ceiling voltage de 1,4 correspondeu perfeitamente à ocorrência do fenômeno.

6.2.2.10. Ensaio 10 – Carga Resistiva em Paralelo com Motor de Indução de 2,0 CV.

Este ensaio tem como objetivo apresentar a ocorrência do afundamento da tensão no momento da partida simultânea das cargas. Embora seja esperado que o distúrbio para esta “configuração” seja menor em comparação à utilização da carga indutiva.

Na Figura 6.39 é possível visualizar as curvas de tensão e corrente na armadura do gerador e, a Figura 6.40 apresenta as curvas de Tensão de Campo (V_f) e Corrente de Campo (I_f).

A Tabela 6.27 apresenta o resumo dos valores deste ensaio acima mencionados de forma a atribuir maior facilidade de compreensão dos resultados obtidos.

Tabela 6.27 Ensaio Carga Resistiva em paralelo com MIT 2,0CV – Excitação Rotativa

V_A	I_A	V_{PA} Afundamento	I_{PA} Afundamento	V_f	I_f
215,4 (V)	7,96 (A)	66,33 (V)	31,3 (A)	212,0 (V)	0,9 (A)
R_f IND. CALCULADO	$R_{BOB. EXC.}$	$I_{BOB. EXC.}$	$V_{BOB. EXC.}$ CALCULADA	ΔV (V) Ref. VA0	ΔV (%)
235,56 (Ω)	21,6 (Ω)	1,8 (A)	38,88 (V)	14,6	75,0

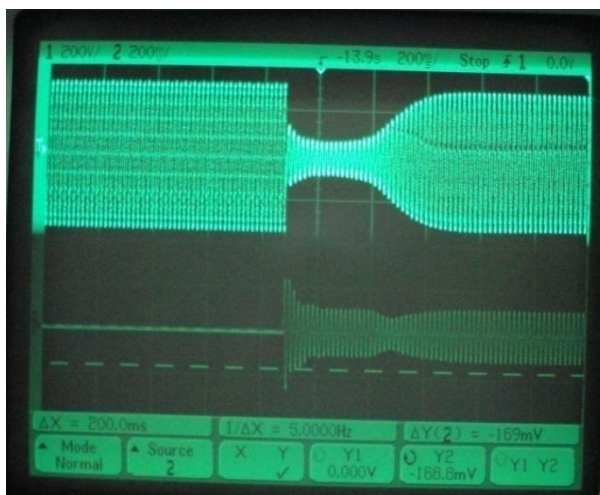


Figura 6.39 Tensão e corrente de armadura do gerador conectada com carga resistiva em paralelo com MIT de 2,0 CV.

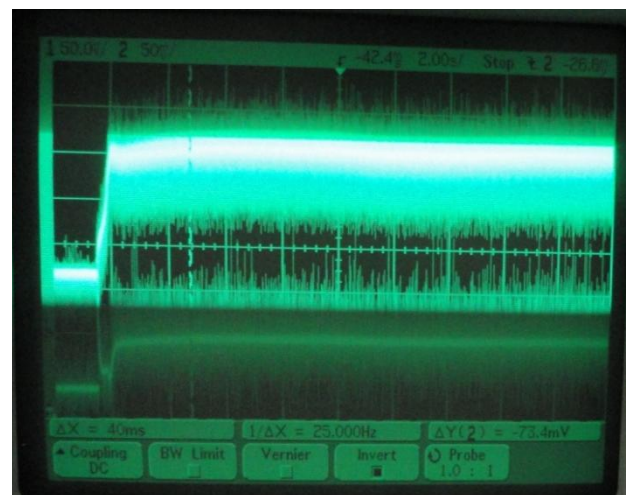


Figura 6.40 Tensão e corrente de campo do gerador conectada com carga resistiva em paralelo com MIT de 2,0 CV

Neste ensaio, o afundamento da tensão foi de 75%. Um percentual que está acima do limite máximo de tolerância admissível (de 20 a 25%), e obteve longo tempo de duração durante o afundamento, ou seja, embora a ceiling voltage de 1,4 tenha correspondido à ocorrência do fenômeno, é possível visualizar que durante o período do afundamento, a força magneto motriz de campo foi menor que a força magneto motriz de reação de armadura.

6.2.2.11. Ensaio 11 – Carga Resistiva em Paralelo com um MIT de 2,0 CV e um MIT de $\frac{1}{2}$ CV.

Embora este ensaio tenha sido realizado com carga resistiva, o efeito da mesma não traz grandes impactos ao sistema em comparação à carga indutiva, pois os testes foram realizados como o gerador aquecido.

Na Figura 6.41 é possível visualizar as curvas de tensão e corrente na armadura do gerador e, a Figura 6.42 apresenta as curvas de Tensão de Campo (V_f) e Corrente de Campo (I_f).

A Tabela 6.28 apresenta o resumo dos valores deste ensaio acima mencionados de forma a atribuir maior facilidade de compreensão dos resultados obtidos.

Tabela 6.28 Ensaio Carga Resistiva em paralelo com um MIT de 2,0 CV e outro de $\frac{1}{2}$ CV – Excitação Rotativa

V_A	I_A	V_{PA} Afundamento	I_{PA} Afundamento	V_f	I_f
205,7 (V)	8,88 (A)	84,0 (V)	35,0 (A)	240,0 (V)	1,0 (A)
$R_{f\text{ IND.}}$ CALCULADO	$R_{BOB. \text{ EXC.}}$	$I_{BOB. \text{ EXC.}}$	$V_{BOB. \text{ EXC.}}$ CALCULADA	ΔV (V) Ref. V_{A0}	ΔV (%)
240,0 (Ω)	21,6 (Ω)	2,8 (A)	60,48 (V)	24,3	71,0

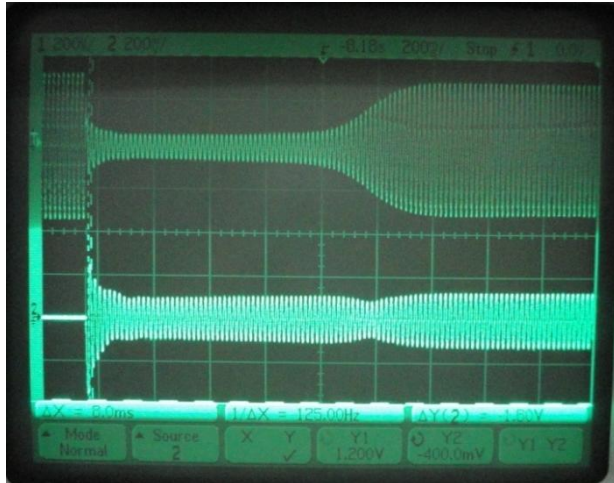


Figura 6.41 Tensão e corrente de armadura do gerador conectada com carga resistiva em paralelo com MIT's de 2,0 e ½ CV.

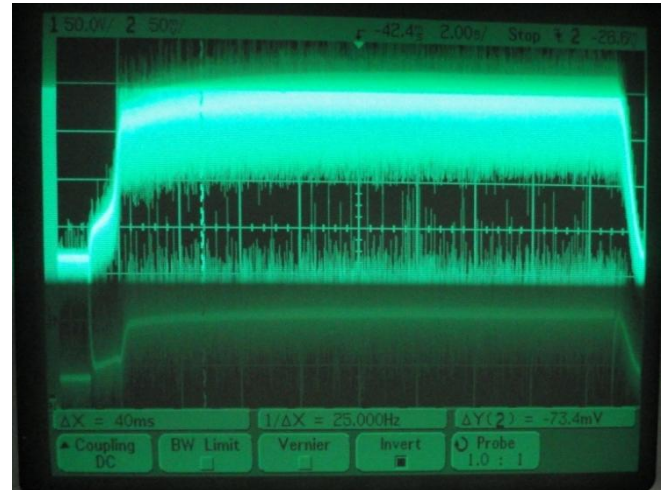


Figura 6.42 Curva da tensão e corrente de campo do gerador conectada com carga resistiva em paralelo com MIT's de 2,0 e ½ CV.

Neste ensaio, o afundamento da tensão foi de 82%. Um percentual que, além de alta magnitude, pois está acima do limite máximo de tolerância admissível (de 20 a 25%), também obteve longo tempo de duração durante o afundamento, ou seja, embora a ceiling voltage de 1,4 tenha correspondido à ocorrência do fenômeno, é possível visualizar à medida que é acrescentada mais carga aos terminais do gerador síncrono, o afundamento é mais acentuado e sua duração maior, isso explica-se pelo fato de a força magneto motriz de campo ser menor do que a força magneto motriz de reação de armadura.

6.2.2.12. Ensaio 12 – Carga Resistiva em Paralelo com Dois Motores de Indução de ½ CV.

Neste ensaio, foram conectados os MIT's de ½ CV em paralelos com a carga resistiva, com chaveamento simultâneo dos mesmos a fim de analisar o comportamento do gerador síncrono frente os diferentes tipos de cargas conectadas aos seus terminais.

Na Figura 6.43 é possível visualizar as curvas de tensão e corrente na armadura do gerador e a Figura 6.44 apresenta as curvas de Tensão de Campo (V_f) e Corrente de Campo (I_f).

A Tabela 6.29 apresenta o resumo dos valores deste ensaio acima mencionados de forma a atribuir maior facilidade de compreensão dos resultados obtidos.

Tabela 6.29 Ensaio Carga Resistiva em Paralelo com Dois Motores de Indução de $\frac{1}{2}$ CV – Excitação Rotativa

V_A	I_A	V_{PA} Afundamento	I_{PA} Afundamento	V_f	I_f
215,5 (V)	7,98 (A)	137,2 (V)	24,4 (A)	205,0 (V)	0,85 (A)
$R_{f\text{ IND.}}$ CALCULADO	$R_{BOB. \text{ EXC.}}$	$I_{BOB. \text{ EXC.}}$	$V_{BOB. \text{ EXC.}}$ CALCULADA	ΔV (V) Ref. VA0	ΔV (%)
241,18 (Ω)	21,6 (Ω)	1,8 (A)	38,88 (V)	14,5	55,0

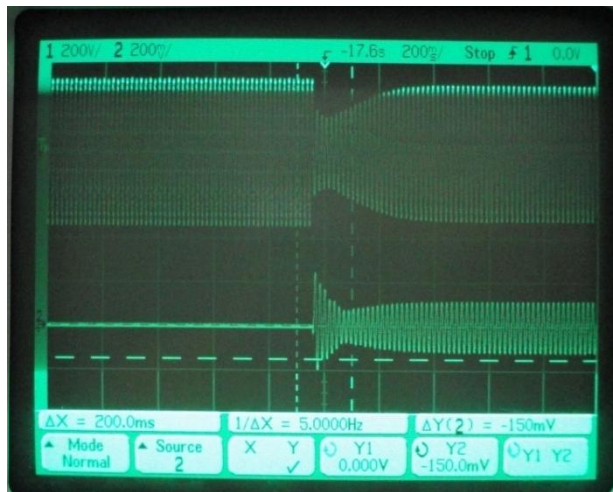


Figura 6.43 Tensão e corrente de armadura do gerador conectada com carga resistiva em paralelo com dois MIT's de $\frac{1}{2}$ CV.

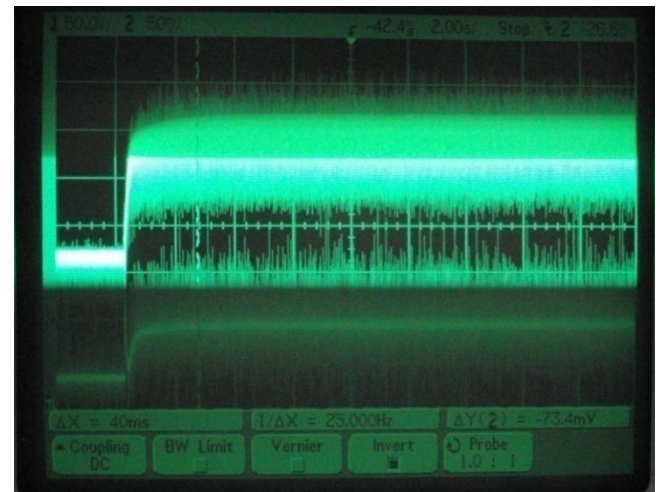


Figura 6.44 Tensão e corrente de campo do gerador conectada com carga resistiva em paralelo com dois MIT's de $\frac{1}{2}$ CV.

Neste ensaio, o afundamento da tensão foi de 52%. Um percentual elevado, por isso, o distúrbio torna-se inaceitável, pois está acima do valor máximo admissível (de 20 a 25%). Embora a magnitude do afundamento tenha sido elevada, é relevante considerar que o tempo de duração da ocorrência do fenômeno foi baixo, ou seja, o ceiling voltage de 1,4 correspondeu de forma aceitável à ocorrência do distúrbio.

6.2.2.13. Ensaio 13 – Carga Resistiva em Paralelo com Dois MIT's de ½ CV e um MIT de 2,0 CV.

Para finalizar os ensaios, foram conectados os três motores de indução em paralelo com a carga resistiva. Assim como no ensaio com carga indutiva, o gerador enfrentou um elevado efeito desmagnetizante, pois ao efetuar o chaveamento simultâneo das cargas, os motores partiam numa rotação muito baixa. Somente após certo período os motores partiam.

Na Figura 6.45 é possível visualizar as curvas de tensão e na armadura do gerador e, a Figura 6.46 apresenta as curvas de Tensão de Campo (V_f) e Corrente de Campo (I_f).

A Tabela 6.30 apresenta o resumo dos valores deste ensaio acima mencionados de forma a atribuir maior facilidade de compreensão dos resultados obtidos.

Tabela 6.30 Ensaio Carga Resistiva em paralelo com dois MIT's de ½CV e um MIT de 2,0CV
– Excitação Rotativa

V_A	I_A	V_{PA} Afundamento	I_{PA} Afundamento	V_f	I_f
199,0 (V)	9,1	79,9 (V)	26,2,0 (A)	249,0 (V)	1,0 (A)
$R_{f\text{ IND.}}$ CALCULADO	$R_{BOB. EXC.}$	$I_{BOB. EXC.}$	$V_{BOB. EXC.}$ CALCULADA	ΔV (V) Ref. VA0	ΔV (%)
249,0 (Ω)	21,6 (Ω)	3,0 (A)	64,8 (V)	31,0	71,6

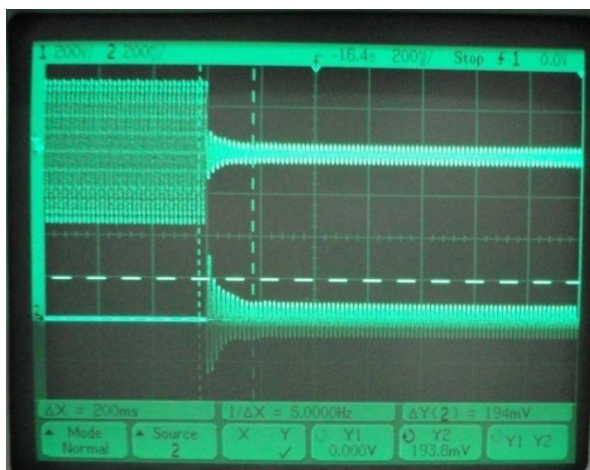


Figura 6.45 Tensão e corrente de armadura do gerador conectada com carga resistiva em paralelo com dois MIT's de ½ CV e MIT de 2,0 CV.

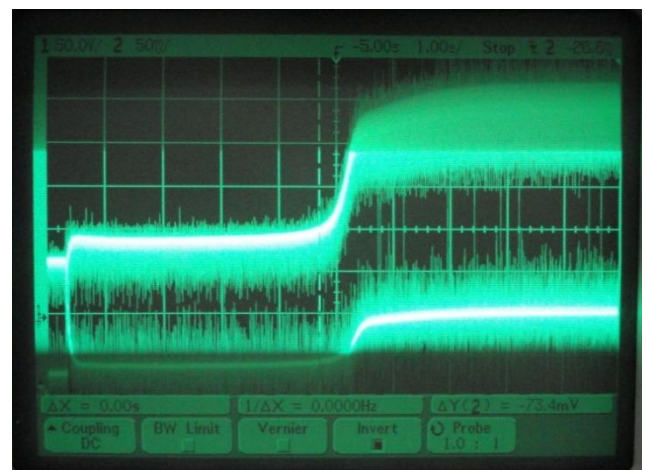


Figura 6.46 Tensão e corrente de campo do gerador conectada com carga resistiva em paralelo com dois MIT's de ½ CV.

Neste ensaio, o afundamento da tensão foi de 85%. Um percentual que, além de uma magnitude extremamente alta, pois está muito acima do limite máximo de tolerância admissível (de 20 a 25%), também obteve longo tempo de duração durante o afundamento, ou seja, embora a ceiling voltage de 1,4 tenha correspondido à ocorrência do fenômeno, é possível visualizar à medida que é acrescentada mais carga aos terminais do gerador síncrono, o afundamento é mais acentuado e sua duração é maior, isso explica-se pelo fato de a força magneto motriz de campo ser menor do que a força magneto motriz de reação de armadura.

Assim como no ensaio realizado somente com cargas indutivas, após efetuar as medições acima mencionadas, a mesmas foram desligadas do sistema e, ao tentar parti-las novamente ocorreu o afundamento permanente da tensão do gerador.

6.3. Análise dos Resultados

A tensão demandada pelo fabricante do Regulador de Tensão é 99,0 V, o que corresponde à uma equação integral(Equação 6.1), conforme segue:

Equação 6.1 Tensão que o regulador pode fornecer ao campo

$$\begin{aligned}
 V_{\text{reg}} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} V_{\text{max}} \times \sin \theta d\theta \\
 V_{\text{reg}} &= \left(\frac{220 \times \sqrt{2}}{2\pi} \right) \times (-\cos \theta) \Big|_0^{\pi} \\
 V_{\text{reg}} &= \left(\frac{220 \times \sqrt{2}}{2\pi} \right) \times 2 \\
 V_{\text{reg}} &= 99V
 \end{aligned}$$

Os resultados obtidos nos ensaios evidenciaram o que se esperava. Estudos anteriores têm demonstrado que o ângulo de disparo não consegue atingir o ângulo zero e, portanto o SCR não atinge a abertura máxima.

Analisando somente os dados da tensão de armadura (V_A) nos ensaios realizados na excitação estática, é possível visualizar que os valores das tensões de armadura com cargas indutivas apresentadas no Gráfico da Figura 6.47, tiveram maior instabilidade, o que já era esperado por ser uma carga de efeito fortemente desmagnetizante, embora eram cargas estáticas e não dinâmicas. Somente um ensaio com carga indutiva estática e dinâmica (motor Toshiba ½ CV) foi realizado, o que já provocou o afundamento permanente da tensão nos terminais do gerador. No Gráfico da Figura 6.48 que apresenta a corrente de armadura (I_A), é possível visualizar que a corrente e tensão de armadura demandadas estão diretamente relacionadas ao tipo de carga ao qual o gerador está alimentando. Para finalizar, o Gráfico da Figura

6.49 demonstra os valores da tensão de campo (V_f) e o da Figura 6.50 os de corrente de campo (I_f), onde é possível visualizar que a máxima tensão de campo obtida foi de 85 (Vcc) (Figura 6.49) com a maior corrente de campo de 370 (mA) também apresentada (Figura 6.50).

Com isso, conclui-se que o valor da tensão de campo de 85,0 Vcc obtida no ensaio em excitação estática, mostrado na Tabela 6.12, demonstra que a tensão máxima que o regulador de tensão pode fornecer é de 90 Vcc.

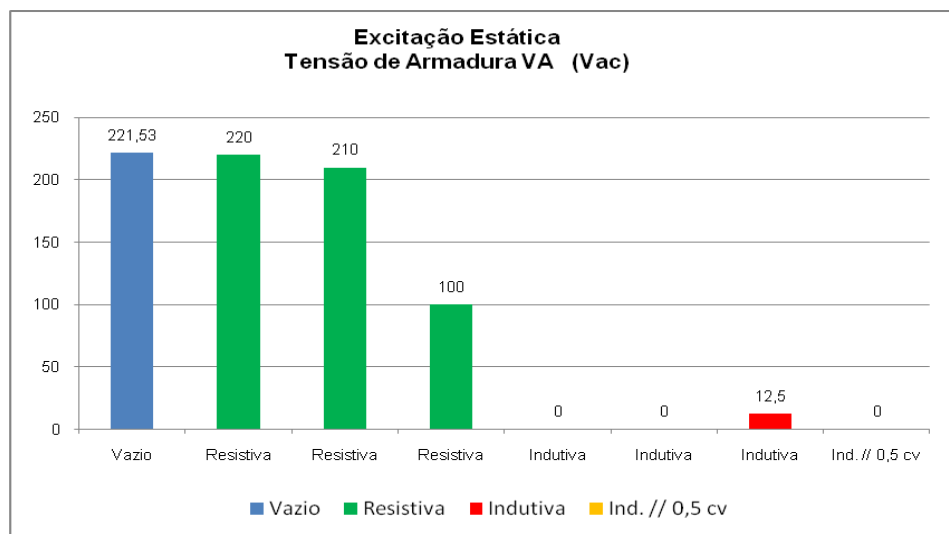


Figura 6.47 Excitação Estática Tensão de Armadura (V_A)

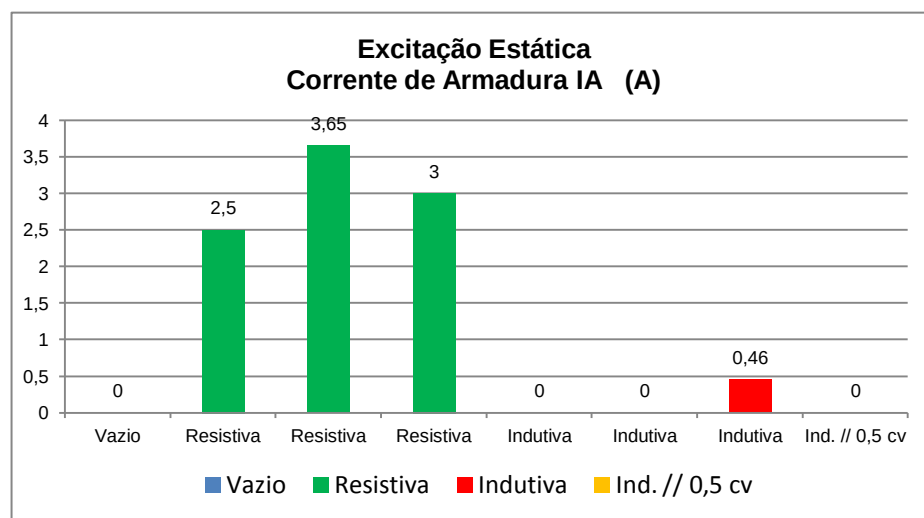


Figura 6.48 Excitação Estática Corrente de Armadura (I_A)

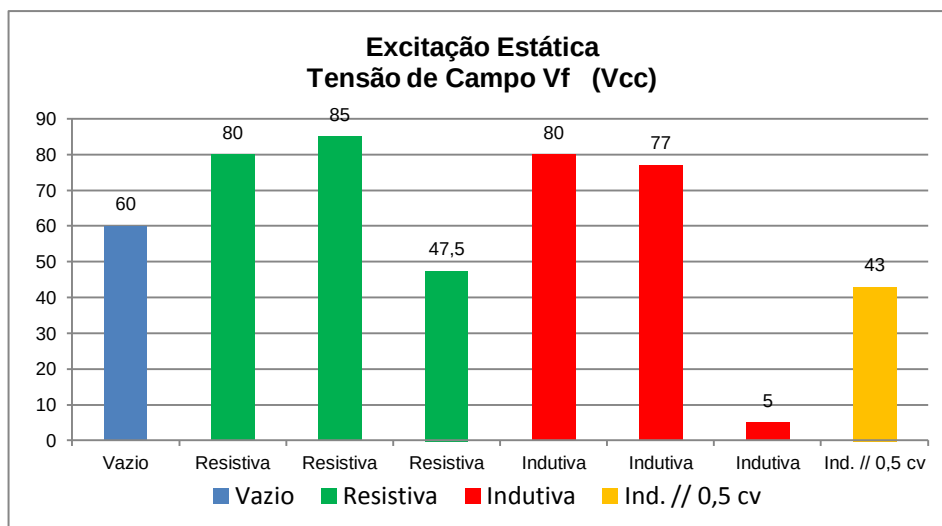


Figura 6.49 Excitação Estática Tensão de Campo (V_f)

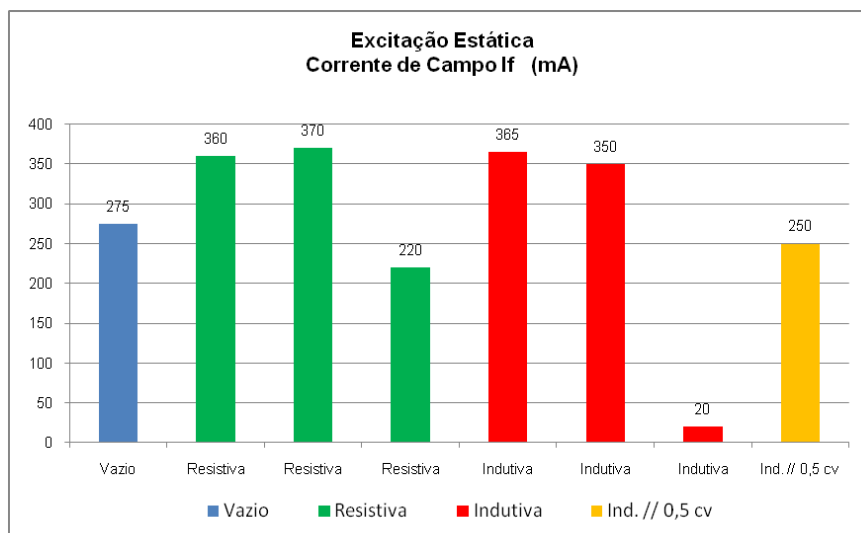


Figura 6.50 Excitação Estática Corrente de Campo (I_f)

Quanto aos ensaios realizados em excitação rotativa, é possível visualizar que o Gráfico da Figura 6.51 representa os valores da tensão de armadura (V_A) e que os resultados obtidos com carga resistiva tiveram ligeiramente valores inferiores em comparação com os realizados somente com cargas indutivas. Isso ocorre pelo fato de que todos os ensaios com a carga resistiva foram realizados no mesmo dia, ou seja, com o “esforço” do gerador síncrono demandado pelas cargas, houve o aquecimento do mesmo provocando o aumento da resistência das bobinas do enrolamento, ocasionando considerável interferência nos parâmetros como é possível visualizar. Este fenômeno é possível de ser compreendido ao analisar o Gráfico da Figura 6.55, onde a resistência de campo de $R_f = 255,83 \, (\Omega)$ que corresponde ao valor máximo

da tensão de campo ($V_{f\text{ MAX.}} = 307\text{ Vcc}$) obtida nos ensaios de excitação rotativa é conforme demonstrado no item 6.2.2.5.

O Gráfico da Figura 6.52, representa os valores das correntes de armadura para o ensaio em vazio e para os diferentes tipos de cargas conectadas aos terminais do gerador. Neste gráfico, é possível visualizar que a corrente de armadura demandada somente nas ligações de cargas indutivas tem maior efeito desmagnetizante, embora não seja possível ser demonstrado tão nitidamente na Figura 6.51, pelo fato de que os ensaios com as cargas indutivas não terem sido realizados todos no mesmo dia.

O Gráfico da Figura 6.53 apresenta os valores da tensão de campo (V_f) e o da Figura 6.54 corrente de campo (I_f) respectivamente. Neles, é demonstrando de uma forma simplificada que a ceiling voltage obtida foi de 1,4 a partir da tensão de campo máxima no ensaio realizado com cargas indutivas.

Na Figura 6.55, foram apresentados os valores das resistências de campo (R_f) (obtida através do calculo da tensão de campo (V_f) e corrente de campo (I_f)) a fim de facilitar a compreensão da causa do distúrbio no sistema e, conseqüentemente, uma redução pouco significativa, porém não desprezível, na ceiling voltage em comparação com o ensaio realizado sem o aquecimento do gerador síncrono.

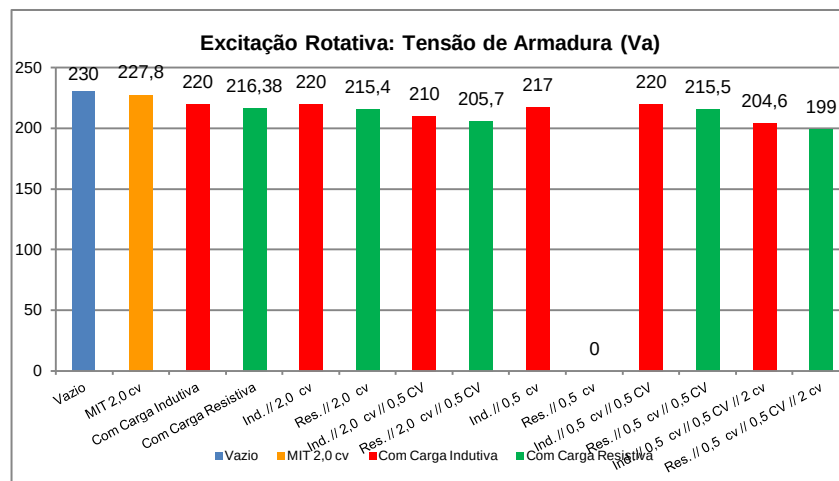


Figura 6.51 Excitação Rotativa: Tensão de Armadura (V_A)

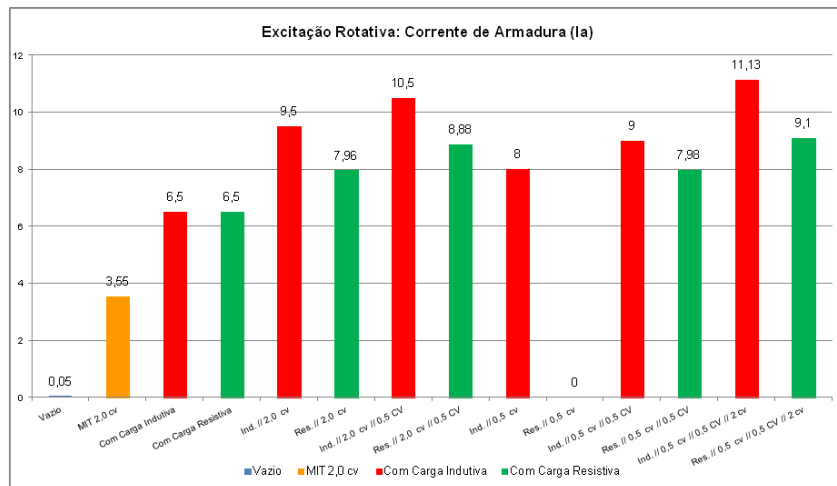


Figura 6.52 Excitação Rotativa: Corrente de Armadura (I_a)

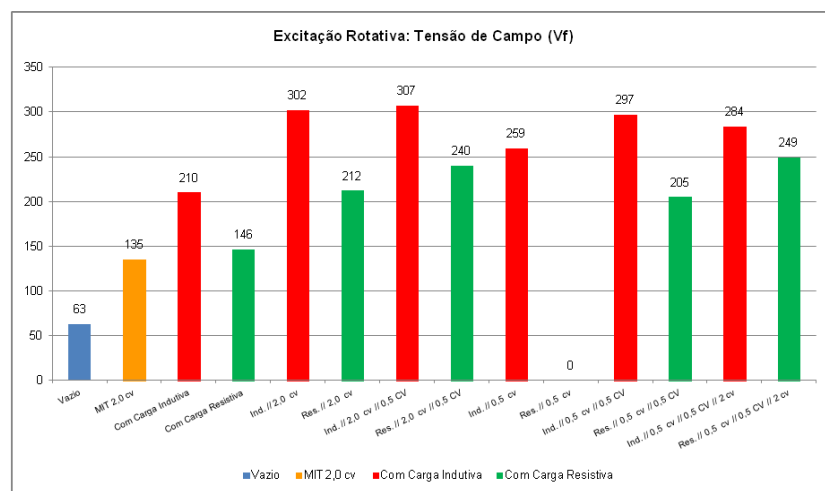


Figura 6.53 Excitação Rotativa: Tensão de Campo (V_f)

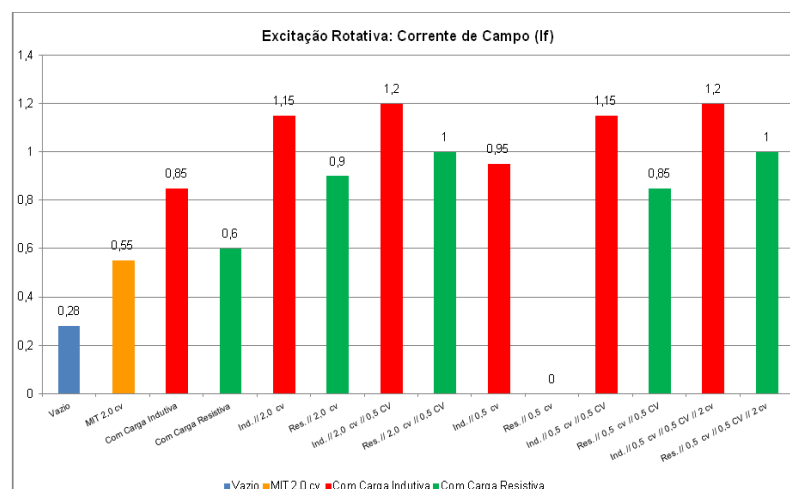


Figura 6.54 Excitação Rotativa: Corrente de Campo (I_f)

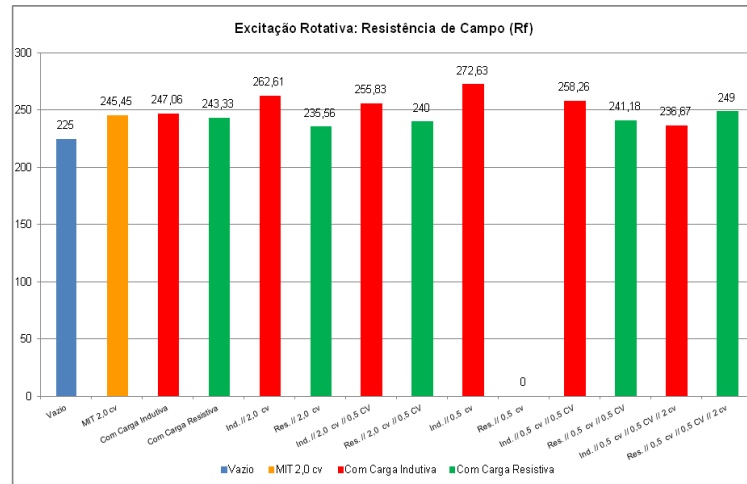


Figura 6.55 Excitação Rotativa: Resistência de Campo em Ohms(R_f)

A partir dos valores adquiridos nos ensaios, é possível concluir que foram obtidos dois tipos de ceiling voltage, sendo que houve uma diferença de apenas 0,2 entre os valores, e isso apresentado no Gráfico da Figura 6.55.

6.3.1. Comparação dos Ceiling Voltage (C.V.) com relação ao aquecimento do GS

A fim de visualizar a pequena diferença entre os dois valores de ceiling voltage (C.V.), sendo um obtido quando o gerador síncrono estava frio e outro quando estava aquecido, segue a demonstração equacional:

- Ceiling Voltage a Frio (C.V. $frio$):**

Neste caso, a tensão de campo em vazio a frio ($V_{f0\,frio}$), obtida foi de 63 (Vcc). A Ceiling Voltage a frio é representada através da equação abaixo:

Equação 6.2 Cálculo do C.V. a frio

$$\begin{aligned}
 C.V.frio &= \frac{V_{reg}}{V_{f0frio}} \\
 C.V.frio &= \frac{99}{63} \\
 C.V.frio &= 1,6
 \end{aligned}$$

- Ceiling Voltage a Quente (C.V. $quente$):**

Neste caso, a tensão de campo em vazio a quente ($V_{f0 \text{ quente}}$) obtida foi de 71,6 (Vcc), Equação 6.3, um valor de 13,65% maior em relação aos 63 (Vcc) obtidos no ensaio a frio. Esta variação ocorre pelo fato de que, com o aumento da temperatura interna do gerador, há o aumento da resistência do campo e, conseqüentemente da tensão de campo.

Foi analisado que a tensão máxima fornecida ao campo pelo sistema de excitação/regulação obtida no ensaio realizado no item 6.2.2.5 foi de $V_{\text{max reg/exc}} = 307,0$ (Vcc). O valor da tensão de campo nominal é 220 (Vcc).

Com isso, foi tomada a referência da resistência de campo calculada neste item ($R_{f \text{ calculada}} = 255,83 \, \Omega$) com o valor da corrente de campo em vazio para a excitação rotativa ($I_{f0} = 0,28 \text{ A}$). A partir desses valores, foi obtida a tensão de campo em vazio (V_{f0}). Vale salientar que a tensão de 99,0 (Vcc) corresponde à tensão de campo máxima que o regulador de tensão pode fornecer.

Equação 6.3 Cálculo da Tensão de campo em vazio a quente ($V_{f0 \text{ quente}}$)

$$V_{f0 \text{ quente}} = R_{f \text{ calculada}} \times I_{f0}$$

$$V_{f0 \text{ quente}} = 255,83(\Omega) \times 0,28(\text{A})$$

$$V_{f0 \text{ quente}} = 71,6(\text{Vcc})$$

A seguir esta sendo representada através da Equação 6.3 a Ceiling Voltagem a quente.

Equação 6.3 Cálculo do C.V. a quente

$$\text{C.V. atual} = \frac{V_{\text{máxreg/exc}}}{V_{\text{fn}}}$$

$$\text{C.V. atual} = \frac{307}{220}$$

$$\text{C.V. atual} = 1,4$$

CAPÍTULO 7 - CONCLUSÃO

O trabalho realizado é consequência de uma série de ensaios a fim de analisar detalhadamente o comportamento do fenômeno do afundamento de tensão frente aos diversos tipos de cargas, bem como suas ligações; levando em consideração a utilização do regulador de tensão em sistemas de excitações estática e rotativa. Para cada tipo de excitação, assim como para cada ensaio realizado, foi considerada a tensão de teto (ceiling voltage) que o sistema poderia fornecer.

A análise dos ensaios realizados, cujos valores foram resumidos e apresentados de forma gráfica, Figura 6.51 a Figura 6.55, comprova a afirmação central deste trabalho, onde a queda de tensão provocada por um MIT provoca considerável perturbação ao sistema de geração, porém o fato agrava-se quando são inseridas as cargas resistivas e indutivas, que embora não sejam dinâmicas provocam grandes efeitos no distúrbio. Nestas figuras, as barras de cor vermelha indicam que foram utilizadas somente as cargas indutivas, sendo apenas estática e estática com dinâmica. As barras de cor verde indicam a utilização de carga resistiva, sendo apenas resistiva estática e resistiva estática com MIT's.

A Figura 6.51 apresenta os valores das tensões de armadura obtidas nos ensaios em excitação rotativa de forma gráfica. Nela é possível visualizar a ocorrência de um fato incomum, uma vez que o efeito do afundamento teve maior grau quando conectado às cargas resistivas em que foram partidos os MIT's simultânea e paralelamente às cargas resistivas estáticas. Embora inusitado, um acontecimento interessante neste estudo é que, partindo da análise teórica o afundamento deveria ser maior nos ensaios em que foram envolvidas cargas somente do mesmo tipo. Uma possível explicação para a ocorrência de tal fenômeno é o fato de o regulador de tensão possuir um controlador PID (Proporcional Integral e Derivativo), que tem por principal função a minimização de um possível erro ocasionado pela ação proporcional, zerado pela ação integral e obtido com uma velocidade antecipativa pela ação derivativa. Ou seja, para o ensaio apresentado na Figura 6.51 os valores são próximos devido à ação do controlador PID, ser eficiente para executar tal correção a fim de manter a tensão do terminal próxima ao valor apresentado quando o sistema está em vazio. Outro fato que pode ser levado em consideração com referência à situação apresentada na Figura 6.44 é a elevação da resistência de campo do gerador síncrono, conforme apresentado na Figura 6.48.

As Figuras 6.45 a 6.47 demonstram de forma coerente a ocorrência do fenômeno em que as cargas indutivas possuem maior força magneto motriz de reação de armadura e, portanto

o distúrbio causado por elas é maior, uma vez que a corrente de armadura, bem como a tensão e corrente de campo foram maiores quando foram realizados os ensaios com as cargas indutivas (estática e dinâmica).

De todos os casos experimentais analisados, e confirmados teoricamente, uma constatação foi sempre constante e problemática, o valor significativo do afundamento de tensão e do seu tempo de permanência. Para se obter melhores condições de partida do motor, deve-se procurar soluções que diminuam tanto o valor do referido afundamento, como do seu tempo de permanência. As soluções atuais são direcionadas para o sistema de excitação de modo a proporcionar um aumento transitório na corrente de excitação do gerador, compensando em parte o aumento na queda de tensão interna do gerador, no superdimensionamento do gerador, as vezes possibilitando uma redução razoável neste superdimensionamento escolhendo um gerador com um valor menor de reatância sub-transitória.

Na tentativa de procurar uma outra solução, propõe-se, com base nos resultados teóricos animadores e obtidos neste trabalho, um estudo sobre a implementação prática da partida do MIT com sequenciamento de capacitores.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, "IEEE Standard 421.5-1992, August, 1992
- [2] SANTOS, Rosana F. S. Dos; SILVA, Selênio Rocha. **Sensibilidade de Controlador Lógico Programável frente a afundamentos de tensão**. In: V SBQEE, 5., 2003, Aracaju. Compatibilidade Eletromagnética. Aracaju: CiIGRÉ - Brasil, 2003. p. 509 - 510.
- [3] ALDABÓ, Ricardo. **Qualidade na Energia Elétrica**. São Paulo: Artliber, 2001.
- [4] COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ. **Geração de Energia**. Disponível em: <[http://www.solucoescpfl.com.br/secao6/14/13/4/Geracao-de-Energia-no-Horario -de-Ponta](http://www.solucoescpfl.com.br/secao6/14/13/4/Geracao-de-Energia-no-Horario-de-Ponta)>. Acesso em: 10 jun. 2011.
- [5] Burke, James J.; Griffith, David C. e Ward, Daniel J.; **Power Quality Two Different Perspectives**, IEEE Transaction on Power Delivery, Julho 1990, pages 5-13.
- [6] Jeff Lamoree et al. **Voltage Sag Analysis Case Studies**, IEEE Transactions on Industry Applications, Julho 1994, pages 4-7.
- [7] IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, 1159- 1995.
- [8] Math H. J. Bollen, **Fast Assessment Methods for Voltage Sags in Distribution Systems**, IEEE Transactions on Industry Applications, Dezembro 1996, pages 1414–1423.
- [9] IEEE Recommended Practice for Evaluating Electric Power System Compatibility with Electronic Process Equipment, Maio 1998, pages 1346-1998.
- [10] Leão, Paulo C. A. e Oliveira, José C. de e Rodrigues, Kleiber D. **Conversores de Frequência VSI-PWM Submetidos a Afundamentos Temporários de Tensão ("Voltage Sags")**. Sba Controle& Automação, Mar 2003, vol.14, no.1, p.50-57. ISSN 0103-1759
- [11] SANTOS, Silverio Penin Y. **DISTÚRBIOS EM GERADORES SÍNCRONOS EM OPERAÇÃO ISOLADA: AFUNDAMENTOS DE TENSÃO, DURANTE A PARTIDA DE MOTORES DE INDUÇÃO**. 2004. 208 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia-UFU, Uberlândia, 2004.

- [12] BOLLEN, Math H. J.. Main Contributions and Conclusions. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION, 20., 2009, Praga. **VOLTAGE DIP IMMUNITY OF EQUIPMENT IN INSTALLATIONS**. Praga: CIGRÉ/ CIRED/ UIE, 2009. p. 2 - 4.
- [13] IEC, 1996 International **Electrotechnical Commision** – IEC, “Electromagnetic Compatibility”, IEC Standard 61000, 1996.
- [14] ONS, Procedimentos de Rede, Assunto Verificação da Conformidade das Novas Instalações de Transmissão aos Requisitos Mínimos, Submódulo 2.2, Revisão 1.1, Data Vigência 16/09/2010.
- [15] ANEEL, Resolução N° 676, de 19 de Dezembro de 2003.
- [16] LIMA, Júlio César Marques De. **ASPECTOS DE PROTEÇÃO E CONTROLE DO GERADOR SÍNCRONO SUBEXCITADO**. 2002. 130 f. Dissertação (Metrado) - Pontifícia Universidade Católica De Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.
- [17] RAGNEV, Walter. **ESTUDO DE POTÊNCIA REATIVA, TENSÃO, CONTINGÊNCIA E PERDAS EM EMPRESAS DE ENERGIA ELÉTRICA LOCALIZADAS NA GRANDE SÃO PAULO**. 2005. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia-UFU, Uberlândia, 2005.
- [18] WEG. **Motores Elétricos**. Disponível em: <<http://catalogo.weg.com.br/files/wegnet/WEG-motores-eletricos-baixa-tensao-mercado-brasil-050-catalogo-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 10 nov. 2011.
- [19] CLAUDIO, Eng. Jose. **Motores e Geradores**. Disponível em: <<http://www.joseclaudio.eng.br/>>. Acesso em: 15 out. 2011.
- [20] BEEMAN, Donald. **Industrial Power Systems Handbook**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1955. 971 p.