



Universidade de São Paulo - USP

Escola de Engenharia de São Carlos – EESC

Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação

Trabalho de Conclusão de Curso

Modelagem e Validação de um Pequeno Sistema Elétrico de Potência

Autor:

Gustavo Cattermol Cabizuca

Número USP:

7173497

Orientador:

Prof. Dr. Elmer Pablo Tito Cari

São Carlos, Novembro de 2016.

Gustavo Cattermol Cabizuca

Modelagem e Validação de um Pequeno Sistema Elétrico de Potência

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de
Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase
em Sistemas de Energia e Automação

ORIENTADOR: Prof. Dr. Elmer Pablo Tito Cari

São Carlos

201

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Cabizuca, Gustavo Cattermol
C115m Modelagem e validação de um pequeno sistema
elétrico de potência / Gustavo Cattermol Cabizuca;
orientador Elmer Pablo Tito Cari. São Carlos, 2016.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com
ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2016.

1. Modelagem de um sistema elétrico de potência. 2.
Validação de um sistema elétrico de potência. 3.
Análise estática. 4. Análise dinâmica. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Gustavo Cattermol Cabizuca

Título: "Validação de um Pequeno Sistema Elétrico de Potência"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 29 / 11 / 2016,

com NOTA 8,0 (oito , zero), pela Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Elmer Pablo Tito Cari - Orientador - SEL/EESC/USP

*Prof. Associado João Bosco Augusto London Júnior -
SEL/EESC/USP*

Mestre Taylon Gomes Landgraf - Doutorando - SEL/EESC/USP

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado José Carlos de Melo Vieira Júnior

Agradecimentos

Agradeço a Deus por ter me dado forças durante toda a minha caminhada.

Agradeço à minha namorada Renata por todo seu amor e apoio incondicional em todos os estes anos juntos. Agradeço também pela paciência e companheirismo em todos os momentos, bons ou ruins.

Agradeço também aos meus pais Raquel e Giuliano por acreditarem em mim, em meu potencial, e me privilegiaram com a oportunidade de estudar em uma faculdade. Agradeço também pelo amor e carinho depositados em mim durante minha vida.

Agradeço ao meu irmão João David pela amizade, companheirismo e por toda confiança que deposita em mim.

Agradeço aos meus avós Laura e Silvio que tanto me ajudaram durante a minha graduação.

Agradeço a todos os amigos que fiz na República Paieiro: Díógenes da Silva, Isaac Prates, Diego Botelho, Felipe Falcão, Cleiton Ambrósio, Vitor Albuquerque e todos outros que fizeram parte dessa conquista. Obrigado pela amizade e todos os momentos de descontração.

Agradeço ao meu orientador professor Elmer Pablo T. Cari pela paciência, ajuda e todas as oportunidades que me ofereceu durante a graduação.

Agradeço ao aluno Taylon Landgraf pela ajuda nos testes experimentais e nas simulações.

Agradeço a funcionária da Engenharia Elétrica da USP, Jussara por sempre me atender com toda educação e bom humor possíveis.

Agradeço ao funcionário da Graduação da USP, João Betoni por sempre me ajudar nas horas necessitadas

Agradeço ao técnico César por disponibilizar o Laboratório de Máquinas durante os testes experimentais.

Resumo

Cabizuca, Gustavo Cattermol (2016). Modelagem e Validação de um Pequeno Sistema Elétrico de Potência. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

Nesse trabalho é feita a modelagem e a validação de um pequeno sistema elétrico de potência (SEP) analisando o seu comportamento nos regimes estático e dinâmico. Esse SEP é composto por geradores síncronos trifásicos acionados por motores de corrente contínua; linhas de transmissão representadas a partir de bancos de transformadores monofásicos; e uma carga com características estáticas (banco de resistores e banco de capacitores) e dinâmicas (motor de indução trifásico).

Na análise estática, mostra-se como foi modelado cada elemento a fim de se determinar o estado da operação desse sistema em regime permanente. Posteriormente os valores de fluxo de carga encontrados experimentalmente são comparados com os obtidos computacionalmente.

Na análise dinâmica serão mostrados os modelos utilizados em cada elemento do sistema. Em seguida, todos os ensaios e testes serão indicados a fim de obter os parâmetros de cada um dos modelos. Posteriormente, perturba-se o sistema e relata-se o comportamento do gerador amostrando os seus valores de tensão e corrente de armadura. Por último, compararam-se os comportamentos dos geradores obtidos experimentalmente e computacionalmente.

No final, mostra-se que a validação desse SEP ocorre apesar de algumas divergências nas medidas experimentais e computacionais, e também sugerem-se alguns procedimentos para que os resultados saiam ainda mais satisfatórios.

Palavras-Chave: Validação de um sistema elétrico de potência. Modelagem de um sistema elétrico de potência. Análise estática. Análise dinâmica.

Abstract

Cabizuca, Gustavo Cattermol (2016). Modeling and Validation of a Short Electric Power System. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

In this work the validation and modeling of a short Electric Power System (EPS) are made by analyzing its behavior in static and dynamic states. This EPS is composed of three-phase synchronous generators triggered by direct current motors; transmission lines represented single-phase transformer banks; and a load with static characteristics (bank of resistors and capacitors) and dynamic characteristics (three-phase induction motor).

The steady state analysis shows how each element was modeled in order to determine the operation state of the system on permanent regime. Posteriorly, the experimentally load flow values are compared to the computationally obtained.

In the dynamic analysis, the used models in each system element will be shown. Then, all the trials and tests will be indicated in order to obtain the parameters of each model. Posteriorly, the system was disturbed, so the generator behavior was reported sampling your tension and current values. Lastly, the generator behaviors obtained experimentally and computationally were compared.

In the end, the validation of this EPS occurs despite some divergences in experimental and computational measures. This work also suggests some procedures in order to make the results more satisfying.

Keywords: Validation of an electric power system. Modeling of an electric power system. Steady state analysis. Dynamic analysis.

Lista de Figuras

Figura 2.1: Diagrama Unifilar do SEP	3
Figura 2.2: Circuito equivalente da linha de transmissão	5
Figura 2.3: Banco de resistores	6
Figura 2.4: Banco de capacitores.....	6
Figura 3.1: Circuito Equivalente de um Transformador	9
Figura 3.2: Circuito Esquemático do Ensaio em Vazio do Transformador.....	9
Figura 3.3: Circuito Equivalente do Transformador em Vazio.....	10
Figura 3.4: Circuito Esquemático do Ensaio em Curto-Circuito no Transformador	11
Figura 3.5: Circuito Equivalente do Transformador no Ensaio em Curto-Circuito	11
Figura 3.6: Ensaio de Circuito Aberto Gerador Síncrono em Regime Permanente	15
Figura 3.7: Ensaio de Curto-Circuito no Gerador Síncrono em Regime Permanente	16
Figura 3.8: Curva teórica de curto-circuito no gerador síncrono	17
Figura 3.9: Média das envoltórias das correntes de curto-circuito.....	17
Figura 3.10: Ensaio de Escorregamento	19
Figura 3.11: Circuito Equivalente MIT	22
Figura 3.12: Circuito Equivalente do MIT no Ensaio em Corrente Contínua	23
Figura 3.13: Circuito Esquemático do Ensaio em Vazio no MIT	24
Figura 3.14: Circuito Equivalente do MIT no Ensaio em Vazio.....	24
Figura 3.15: Circuito Equivalente do MIT no Ensaio com Rotor Bloqueado	25
Figura 3.16: Tabela de X_1 e X_2 em função de X_{RB} do Motor de Indução.....	26
Figura 4.1: Gráfico do Ensaio em Circuito Aberto no Gerador	28
Figura 4.2: Gráfico do Ensaio de Curto-Circuito no Gerador.....	29
Figura 4.3: Curva experimental das Correntes de Curto-Circuito.....	30
Figura 4.4: Valores de máximo e mínimo da corrente curto-circuito	30
Figura 4.5: Média das envoltórias da corrente de curto-circuito.....	31
Figura 4.6: Ferramenta <i>cftool</i> do <i>MATLAB</i>	32
Figura 4.7: Curva em vazio do gerador após a inserção dos pontos W e Z no procedimento de Potier.....	34
Figura 4.8: Curva em vazio do gerador após a inserção de uma reta tangente a origem e uma reta paralela a essa com origem no ponto W	34
Figura 5.1: Diagrama unifilar do 1º caso	40
Figura 5.2: Diagrama unifilar do 2º caso	41
Figura 5.3: Modelo do SEP utilizado no <i>Simulink</i> para a análise estática do sistema	42
Figura 5.4: Análise Dinâmica da Tensão de Armadura no Gerador 1 (1º Caso).....	44
Figura 5.5: Análise Dinâmica da Corrente de Armadura no Gerador 1 (1º Caso)	45

Figura 5.6: Análise Dinâmica da Tensão de Armadura no Gerador 1 (2º Caso).....	45
Figura 5.7: Análise Dinâmica da Corrente de Armadura no Gerador 1 (2º Caso)	46
Figura 5.8: Circuito Equivalente do Sistema utilizado no <i>Simulink</i>	47
Figura 5.9: Parâmetros do Modelo do Gerador utilizado pelo <i>Simulink</i>	48
Figura 5.10: Parâmetros do Modelo do MIT utilizado pelo <i>Simulink</i>	48
Figura 5.11: Comportamento da Tensão de Linha do Gerador no 1º Caso	49
Figura 5.12: Comportamento da Corrente de Armadura do Gerador no 1º Caso	49
Figura 5.13: Comportamento da Tensão de Linha do Gerador no 2º Caso	50
Figura 5.14: Comportamento da Corrente de Armadura do Gerador no 2º Caso	50

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Dados nominais do Motor de Corrente Contínua.....	4
Tabela 2.2: Dados nominais do Gerador Síncrono	4
Tabela 2.3: Dados nominais do transformador monofásico.....	5
Tabela 2.4: Dados nominais do Motor de Indução Trifásico	7
Tabela 3.1: Testes e ensaios para os parâmetros do gerador síncrono	14
Tabela 3.2: Momento de Inércias para as potências normalizadas	21
Tabela 4.1: Dados obtidos para o ensaio em circuito aberto.....	27
Tabela 4.2: Dados obtidos no Ensaio de Curto Circuito no Gerador Síncrono	28
Tabela 4.3: Dados do Ensaio de Escorregamento no Gerador	33
Tabela 4.4 - Dados dos Ensaio da Reatância de Potier	33
Tabela 4.5: Quadro dos parâmetros do gerador	35
Tabela 4.6: Quadro dos parâmetros do gerador em p.u. selecionados da tabela 4.5	36
Tabela 4.7: Dados do Ensaio em Vazio na Linha de Transmissão	36
Tabela 4.8: Dados do Ensaio em Curto-Circuito na Linha de Transmissão.....	37
Tabela 4.9: Dados do Ensaio com Rotor Bloqueado no MIT	38
Tabela 4.10: Quadros dos parâmetros do MIT	39
Tabela 4.11: Quadro dos parâmetros do MIT em p.u. selecionados da tabela 4.10	39
Tabela 5.1: Simulação do Gerador 1 alimentando as cargas.....	42
Tabela 5.2: Simulação do Gerador 1 e Gerador 2 alimentando as cargas com potências equilibradas	43
Tabela 5.3: Quadro de Comparações do Regime Permanente	43

Lista de Símbolos

R_a – Resistência de armadura.

X_d – Reatância de eixo direto.

X'_d - Reatância transitória de eixo direto.

X''_d - Reatância subtransitória de eixo direto.

X_l – Reatância de dispersão.

X_q – Reatância de eixo em quadratura.

X_s – Reatância síncrona.

τ'_d - Constante de tempo transitória de curto-circuito de eixo direto.

τ''_d - Constante de tempo subtransitória de curto-circuito de eixo direto.

H – Constante de inércia.

D – Constante de amortecimento.

Sumário

Agradecimentos	vii
Resumo	ix
Abstract	xi
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xv
Lista de Símbolos	xvii
1. Introdução	1
1.1. Objetivos	1
1.2. Organização do Trabalho	2
2. Descrição do SEP	3
2.1. Conjunto Motor de Corrente Contínua – Gerador Síncrono	4
2.2. Linha de Transmissão.....	5
2.3. Banco de Resistores.....	6
2.4. Banco de Capacitores	6
2.5. Motor de Indução Trifásico	7
3. Modelagem dos Elementos do Sistema	8
3.1. Modelagem da Análise Estática.....	8
3.1.1. Modelo do Gerador em Regime Estático	8
3.1.2. Modelo da Linha de Transmissão em Regime Estático	8
3.1.3. Modelo da Carga em Regime Estático.....	12
3.2. Modelagem da Análise Dinâmica.....	12
3.2.1. Modelagem do Gerador no Regime Dinâmico	12
3.2.2. Modelagem da Carga no Regime Dinâmico	21
4. Resultados dos Testes e Ensaios	27
4.1. Resultados dos Geradores Síncronos.....	27
4.1.1. Resultado do Ensaio de Corrente Contínua	27
4.1.2. Resultados do Ensaio de Circuito Aberto e Curto-Circuito em Regime Permanente	27
4.1.3. Resultados do Ensaio de Curto-Circuito Instantâneo	29

4.1.4. Resultados do Ensaio de Escorregamento	32
4.1.5. Resultado da Reatância de Potier.....	33
4.1.6. Resultados dos Parâmetros Mecânicos	35
4.1.7. Quadro dos Parâmetros do Gerador.....	35
4.2. Resultados da Linha de Transmissão.....	36
4.2.1. Resultado do Ensaio em Vazio do Transformador.....	36
4.2.2. Resultado do Ensaio em Curto-Circuito do Transformador.....	37
4.3. Resultados do Motor de Indução Trifásico	37
4.3.1. Resultado do Ensaio em Corrente Contínua do MIT	37
4.3.2. Resultado do Ensaio em Vazio do MIT	38
4.3.3. Resultado do Ensaio com Rotor Bloqueado do MIT	38
4.3.4. Quadro dos Parâmetros do Motor.....	39
5. Validação do SEP	40
5.1. Análise Estática do Sistema.....	40
5.1.1. Dados Experimentais.....	40
5.1.2. Simulações Computacionais.....	41
5.1.3. Discussão dos Resultados da Análise Estática.....	43
5.2. Análise Dinâmica do Sistema.....	44
5.2.1. Dados Experimentais da Análise Dinâmica.....	44
5.2.2. Simulações Computacionais da Análise Dinâmica	46
5.2.3. Discussão dos Resultados da Análise Dinâmica	50
6. Conclusões.....	52
Referências Bibliográficas	53

Capítulo 1

1. Introdução

Atualmente, com o aumento do tamanho e da complexibilidade dos sistemas elétricos de potência (SEP), tem-se feito cada vez mais necessária a representação do comportamento do sistema frente a uma perturbação (chaveamentos de cargas, faltas, etc.)

A fim de retratar o sistema nesses casos, utilizam-se programas que simulam computacionalmente essas situações. Assim, as empresas do setor elétrico vêm utilizando cada dia mais softwares especializados, que servem como base para as tomadas de decisões dos engenheiros e para o planejamentos da operação do SEP.

Esses softwares possuem modelos detalhados de diferentes elementos do sistema, entretanto, os parâmetros desses modelos devem ser fornecidos pelos usuários e sua indisponibilidade pode comprometer a confiabilidade dos resultados. A fim de contornar esta dificuldade, na literatura científica foram propostos diferentes procedimentos para obtenção de modelos em sistemas de energia elétrica. Os procedimentos tradicionais foram padronizados pelo Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) em [1] onde propõe alguns ensaios para se obter os parâmetros de máquinas síncronas, e em [2] para determinar os parâmetros de máquinas assíncronas.

Nesse trabalho será feita a modelagem e a validação de um pequeno SEP montado no laboratório de Máquinas do departamento de Engenharia Elétrica e de Computação da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP). A validação desse SEP é um projeto da disciplina de Laboratório de Máquinas Elétricas (SEL0423) que os estudantes fazem no oitavo semestre da graduação.

A análise é feita de duas maneiras: análise estática e análise dinâmica. Na análise estática é determinado o ponto de operação (ângulos e tensões) em todas as barras e é feito o fluxo de carga em todas as linhas. Já na análise dinâmica, o gerador síncrono é representado pelo seu modelo equivalente transitório e subtransitório. O software empregado será o *Simulink* tanto para a análise estática quanto para a dinâmica.

1.1. Objetivos

Os objetivos desse trabalho serão:

- Conhecer o comportamento de um SEP frente a uma perturbação.
- Familiarizar-se com os testes e ensaio convencionais feitos nos geradores síncronos, transformadores monofásicos e motor de indução trifásico.
- Modelar um SEP computacionalmente utilizando o software *Simulink*.
- Servir como referência aos alunos da disciplina de Laboratório de Máquinas da EESC/ USP.

1.2. Organização do Trabalho

O trabalho foi organizado como mostrado a seguir:

O Capítulo 2 apresenta o SEP montado no laboratório e é mostrado os dados nominais de placa de cada elemento desse sistema.

O Capítulo 3 apresenta como foi feita a modelagem de cada um dos elementos do sistema (Gerador, Linhas de Transmissão e Motor de Indução) e quais ensaios são necessários para obter os parâmetros desses elementos.

O Capítulo 4 apresenta os resultados dos parâmetros de todos os elementos desse sistema obtidos através dos testes e ensaios.

O Capítulo 5 apresenta as análises estática e dinâmica do SEP, ilustrando o comportamento do sistema nos regimes permanente e transitório. Tem-se também uma discussão sobre os resultados obtidos nessas análises.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões e algumas sugestões para trabalhos posteriores.

Capítulo 2

2. Descrição do SEP

Nesta seção descreve-se todos os elementos do SEP que serão utilizados na parte experimental. O SEP utilizado nesse trabalho foi montado no laboratório de máquinas elétricas do Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação da EESC/ USP. O sistema é composto por três barras: uma barra swing (1), uma barra PV (2) e uma barra PQ (2).

Na primeira barra estão ligados um gerador síncrono acionado por um motor de corrente contínua (CC), e duas linhas de transmissão (LT1 e LT2); na segunda barra estão ligados um módulo de sincronização de geradores conectado a um gerador síncrono acionado por um motor CC, e duas linhas de transmissão (LT1 e LT3); já na terceira barra estão ligados duas linhas de transmissão (LT2 e LT3) e uma carga com características estáticas (banco de resistores e banco de capacitores) e dinâmicas (motor de indução trifásico). Além disso, os chaveamento é feito pelo acionamento dos disjuntores trifásicos S1, S2 e S3.

O diagrama unifilar do SEP montado no laboratório está representado pela figura 2.1 situada a seguir:

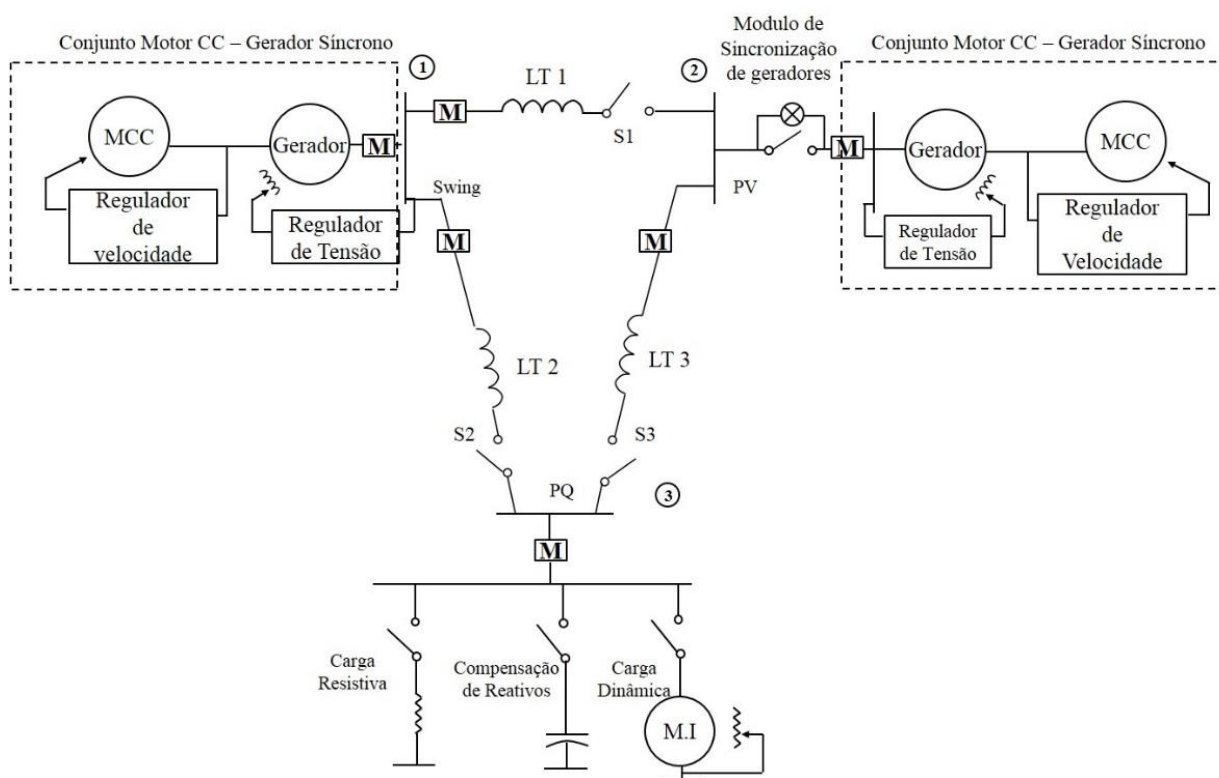


Figura 2.1: Diagrama Unifilar do SEP

2.1. Conjunto Motor de Corrente Contínua – Gerador Síncrono

Primeiramente, liga-se o motor de corrente contínua à tensão nominal respeitando o limite da corrente máxima que o enrolamento de campo suporta. Nesse caso, a tensão de armadura do motor CC servirá como regulador de velocidade do gerador, pois ela controla a potência mecânica que é consumida pelo gerador que, como mostrado em [3] e [4], está ligada diretamente à sua velocidade síncrona, ou seja, o motor CC serve como uma turbina para o gerador síncrono (máquina primária). Os dados nominais de placa do motor CC estão indicados na tabela 2.1.

Tabela 2.1: Dados nominais do Motor de Corrente Contínua

Motor de Corrente Contínua		
Potência	370	[W]
$V_{armadura}$	220	[V]
$I_{armadura}$	2,2	[A]
V_F	220	[V]
I_F	0,3	[A]
$\omega_{nominal}$	1800	[rpm]

Como o motor de corrente contínua está acoplado ao eixo do gerador síncrono, temos que prover corrente contínua aos terminais do enrolamento de campo do gerador para que seja gerado tensão nos seus terminais de armadura. Nesse caso, como demonstrado em [5], a corrente de campo servirá como regulador de tensão, pois essa serve para estabelecer a tensão interna do gerador síncrono ao ser excitada.

O gerador síncrono utilizado no laboratório é de polos salientes, possui 4 polos e está na configuração Δ . A tabela 2.2 ilustra os dados nominais de placa dessa máquina síncrona.

Tabela 2.2: Dados nominais do Gerador Síncrono

Gerador Síncrono Trifásico		
$V_{nominal}$	220	[V]
Configuração	Δ	
Potência	500	[VA]

$I_{campo_{m\acute{a}x}}$	3	[A]
$\omega_{nominal}$	1.800	[rpm]
fp	0,8	

Embora o gerador esteja ligado em Δ , os parâmetros e os ensaios deste elemento serão considerados do equivalente fase-neutro para padronizar todos os testes.

2.2. Linha de Transmissão

As linhas de transmissão foram obtidas usando um banco de transformadores monofásicos, representado pela figura 2.2, em que os seus secundário estão em curto-circuito. Isto permite que a impedância equivalente seja elevada suficientemente para representar uma linha de transmissão. Os dados nominais do banco de transformadores monofásicos estão dados pela tabela 2.3 a seguir:

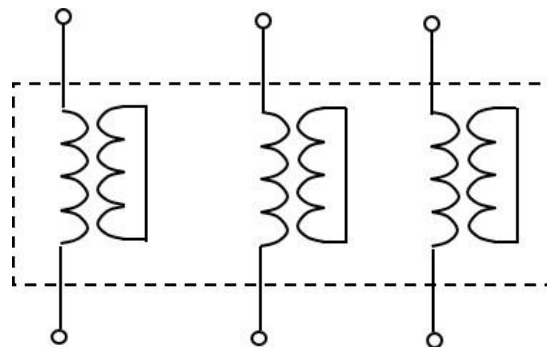


Figura 2.2: Circuito equivalente da linha de transmissão

Tabela 2.3: Dados nominais do transformador monofásico

Transformador Monofásico		
<i>Potência</i>	100	VA
Relação de Tensão	220 : 220	[V]:[V]
$I_{nominal}$	0,45	[A]

2.3. Banco de Resistores

O banco de resistores trifásico, que é um componente da carga desse SEP, está na configuração Y e tem como valor nominal de resistência (R_L) $500\ \Omega$. e de tensão de linha $220\ V$. A figura 2.3 representa esse elemento:

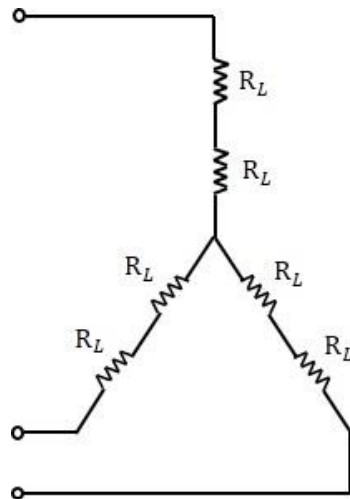


Figura 2.3: Banco de resistores

2.4. Banco de Capacitores

O banco de capacitores trifásico, que é um componente da carga desse SEP utilizado como compensador de reativo, está na configuração Y e tem como valor nominal de capacitância (C) $20\ \mu f$ e de tensão de linha $220\ V$. A figura 2.4 ilustra esse elemento:

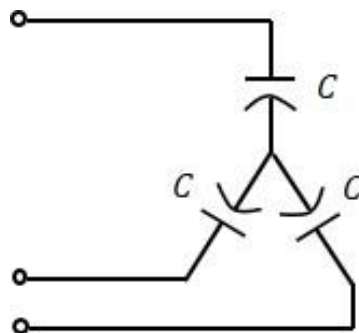


Figura 2.4: Banco de capacitores

Para condições nominais ($V_L = 220\ V$), a reatância capacitiva por fase terá como valor:

$$X_C = 132\ \Omega$$

2.5. Motor de Indução Trifásico

O motor de indução trifásico (MIT) é um componente dinâmico da carga. Esse tem a configuração Δ e é de rotor bobinado. A tabela 2.4 ilustra os dados nominais de placa desse motor:

Tabela 2.4: Dados nominais do Motor de Indução Trifásico

Motor de Indução Trifásico		
$V_{nominal}$	220	[V]
Potência	500	[VA]
$I_{campo_{m\acute{a}x}}$	0,3	[A]
$\omega_{nominal}$	1.700	[rpm]
fp	0,8	

Embora o MIT esteja ligado em Δ , os parâmetros e medidas serão obtidos do equivalente fase-neutro a fim de padronizar todos os testes e parâmetros.

:

Capítulo 3

3. Modelagem dos Elementos do Sistema

Neste capítulo são detalhados para cada regime (estático/dinâmico) os parâmetros de cada elemento do SEP mantido no laboratório e os testes necessários para determiná-los.

3.1. Modelagem da Análise Estática

Na primeira fase é necessário fazer a análise estática do SEP a fim de se obter os ângulos e tensões em todas as barras. Após isto, será necessário determinar os fluxos de carga. A modelagem dos elementos desse sistema para a análise estática está representado nas seções 3.1.1 (Modelo do Gerador), 3.1.2 (Modelo da Linha de Transmissão) e 3.1.3 (Modelo da Carga).

3.1.1. Modelo do Gerador em Regime Estático

Na modelagem do gerador síncrono não é preciso se conhecer os seus parâmetros, apenas deve-se identificar o tipo de barra (swing ou PV). Assim, considera-se o gerador como uma fonte alternada trifásica ideal já que a análise é feita apenas nos terminais do mesmo.

3.1.2. Modelo da Linha de Transmissão em Regime Estático

Na modelagem de uma linha de transmissão, geralmente, utiliza-se o modelo pi-equivalente, como explicitado em [6]. Mas como nesse SEP a linha de transmissão é feita usando transformadores com o secundário em curto-circuito, então ela será representada como uma impedância série em paralelo com um ramo shunt, como mostrado na figura 3.1:

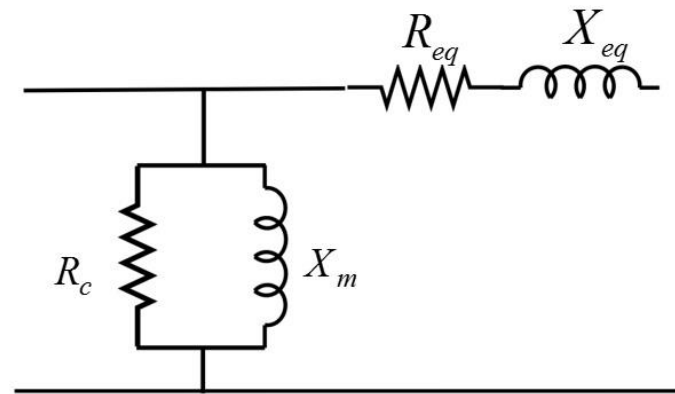


Figura 3.1: Circuito Equivalente Fase-neutro de um Transformador

Onde:

- R_{eq} : Resistência série equivalente referida do primário.
- X_{eq} : Reatância série equivalente referida do primário.
- R_c : Resistência do núcleo.
- X_m : Reatância de magnetização.

Esses parâmetros podem ser determinados utilizando os ensaios em vazio e em curto-circuito do transformador citados em [7].

3.1.2.1. Ensaio em Vazio do Transformador

O ensaio em vazio consiste em deixar o secundário do transformador aberto e aplicar tensão nominal a frequência nominal nos terminais do primário do transformador. Assim, mede-se a tensão, a corrente e a potência ativa nos terminais do primário. A figura 3.2 demonstra o esquemático do ensaio.

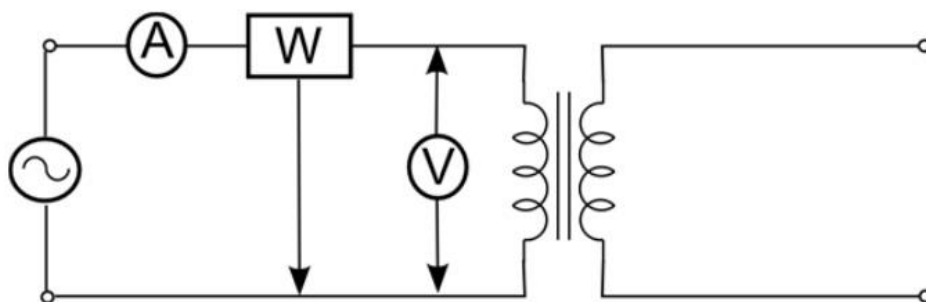


Figura 3.2: Circuito Esquemático do Ensaio em Vazio do Transformador

Como a corrente do primário é composta somente pela corrente de excitação, cujo valor é pequeno, fazendo com que a queda de tensão na impedância série possa ser desprezada, então o circuito equivalente do transformador se resume ao seguinte:

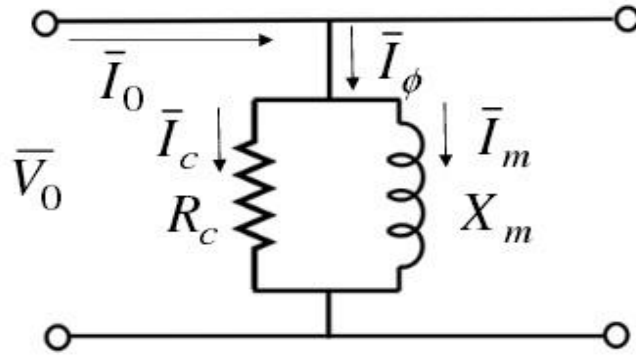


Figura 3.3: Circuito Equivalente do Transformador em Vazio

Onde:

- $\bar{V}_0$: Tensão nominal por fase.
- $\bar{I}_0$: Corrente de Excitação.
- P_0 : Potência Ativa no Primário.
- $\bar{I}_c$: Corrente de Perdas no Núcleo.
- $\bar{I}_m$: Corrente de Magnetização.

Portanto, temos que:

$$R_c = \frac{V_0^2}{P_0} \quad (1)$$

$$I_c = \frac{V_0}{R_c} \quad (2)$$

Logo,

$$I_m = \sqrt{(I_0^2 - I_c^2)} \quad (3)$$

$$X_m = \frac{V_0}{I_m} \quad (4)$$

3.1.2.2. Ensaio em Curto-Circuito do Transformador

Esse ensaio consiste em deixar os terminais do secundário em curto-circuito, aplicando-se assim uma tensão no primário gradualmente até se obter a corrente nominal no primário. Mede-se então, a tensão, a corrente e a potência ativa no primário. A figura a seguir mostra o esquemático das ligações feitas nesse ensaio.

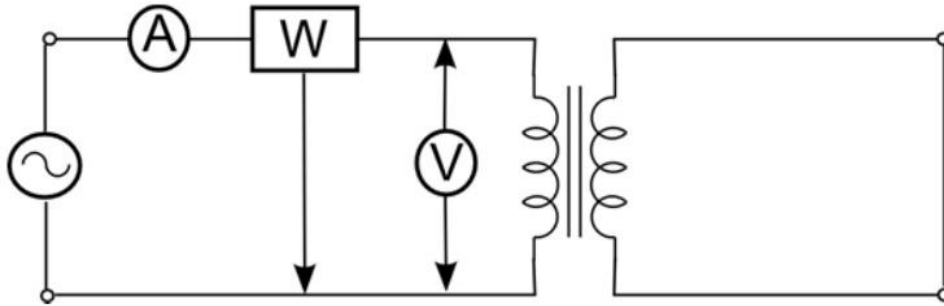


Figura 3.4: Circuito Esquemático do Ensaio em Curto-Circuito no Transformador

Sabendo que a impedância shunt é desprezada devido à pequena tensão aplicada aos terminais do primário e, conseqüentemente, à baixa corrente de magnetização comparada a corrente da carga. Por conseguinte temos o seguinte circuito equivalente:

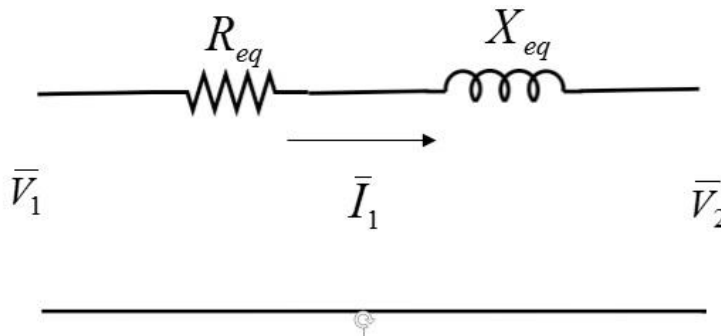


Figura 3.5: Circuito Equivalente do Transformador no Ensaio em Curto-Circuito

Assim,

$$R_{eq} = \frac{P_1}{I_1^2} \quad (5)$$

$$Z_{eq} = \frac{V_1}{I_1} \quad (6)$$

A reatância série é, portanto:

$$X_{eq} = \sqrt{(Z_{eq}^2 - R_{eq}^2)} \quad (7)$$

3.1.3. Modelo da Carga em Regime Estático

A carga na análise estática será considerada como uma barra PQ, pois somente é necessário se conhecer as potências ativa e reativa que serão obtidas pelas medidas. Portanto, não será necessário determinar nenhum dos parâmetros da carga nesse estágio.

3.2. Modelagem da Análise Dinâmica

Para a análise dinâmica, os parâmetros dependerão do grau de precisão que se deseja trabalhar. Entretanto, uma boa aproximação pode ser obtida representando o gerador por um modelo transitório e/ou subtransitório, e os outros elementos pelos seus modelos com parâmetros em regime permanente para facilitar a análise.

O modelo utilizado para linha de transmissão na análise dinâmica será o mesmo usado na análise estática, portanto os parâmetros da linha de transmissão (impedância série com um ramo shunt em paralelo) são os encontrados de acordo com a seção 3.1.2.

Todavia, no modelo da carga serão utilizados para o banco de resistores e o banco de capacitores os seus valores nominais relatados anteriormente na seção 2. Já para o motor de indução trifásico, o modelo usado será o descrito em [2] e [7].

Assim, a análise detalhada dos modelos do gerador síncrono e do motor de indução trifásico (MIT) serão descritas nas subseções a seguir:

3.2.1. Modelagem do Gerador no Regime Dinâmico

A modelagem do gerador síncrono é feita utilizando os modelo transitório.

3.2.1.1. Modelo Transitório

O modelo transitório utilizado será o modelo de um eixo que é um simplificado para geradores com polos salientes. Nesse trabalho não se fará um maior detalhamento

das equações que regem esse modelo, recomenda-se ao leitor estudar as referências [9] e [10]. Assim, as equações desse modelo são apresentadas a seguir:

$$\dot{\delta} = \omega_e \quad (8)$$

$$\dot{\omega}_e = \frac{\omega_o}{2H} [P_m - E'_q - E'_d I_d - (X_d - X'_q) I_d I_q - \frac{D}{\omega_o} \omega_m] \quad (9)$$

$$\dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{do}} [E_{fd} - E'_q + (X_d - X'_d) I_d] \quad (10)$$

$$V_q = E'_q - R_a I_q + X'_d I_d \quad (11)$$

$$V_d = -R_a I_d - X'_q I_q \quad (12)$$

Os parâmetros desse modelo são: $p = [R_a, X_d, X'_d, X_q, X'_q, T'_{do}, H, D]$.

Onde,

- R_a : Resistência de armadura.
- X_d : Reatância de eixo direto.
- X'_d : Reatância transitória de eixo direto.
- X_q : Reatância de eixo em quadratura.
- X'_q : Reatância transitória de eixo em quadratura.
- T'_{do} : Constante de tempo de circuito aberto de eixo direto do período transitório.
- H : Constante de inércia.
- D : Constante de amortecimento.

Os parâmetros do regime subtransitório não serão obtidos devido à grande dificuldade dos testes, entretanto, apenas os parâmetros T''_d e X''_d . Mais informações da obtenção dos parâmetros subtransitório podem ser adquiridas de [1].

3.2.1.2. Testes Padronizados

A tabela 3.1 mostra quais os parâmetros a serem obtidos, e os testes e ensaios que devem ser feito a fim de obtê-los. Na literatura há vasto conteúdo que abarcam tais testes e ensaios, assim como em [1], [9] e [11].

Tabela 3.1: Testes e ensaios para os parâmetros do gerador síncrono

Parâmetro	Teste/ Ensaio
R_a	• Ensaio em Corrente Contínua
X_d	• Circuito aberto e curto-circuito • Escorregamento • Curto-circuito Instantâneo
X_q	• Escorregamento
X_l	• Método de Potier
X'_d	• Curto-circuito Instantâneo
X''_d	• Curto-circuito Instantâneo
T'_d	• Curto-circuito Instantâneo
T''_d	• Curto-circuito Instantâneo
H	• “Run down test” • Método de sensibilidade de trajetória
D	• “Run down test” • Método de sensibilidade de trajetória

A. Ensaio em Corrente Contínua

Esse teste tem como finalidade obter a resistência de armadura por fase (R_a). Primeiramente, aplica-se uma tensão CC entre dois terminais do estator (V_{cc}), posteriormente mede-se a corrente que passa pelo estator (I_{cc}). Assim, a resistência de armadura é dada por:

$$R_a = \frac{V_{cc}}{2.I_{cc}} \quad (13)$$

B. Ensaio de Circuito Aberto e Curto-Circuito em Regime Permanente

Realizam-se esses ensaios a fim de se obter a reatância síncrona do gerador (X_s) que, nesse caso, já que o gerador é de polos salientes, é a reatância de eixo direto (X_d).

Ensaio em Circuito Aberto

Para realizar esse ensaio, tem-se necessidade em acionar o gerador a velocidade síncrona, variando assim a corrente de campo e medindo os valores de tensão de armadura em circuito aberto. A figura a seguir mostra como dever ser o comportamento esperado da curva da tensão da armadura (V_L) em função da corrente de campo (I_f), sabendo que a curva com a linha pontilhada mostra o comportamento da curva se não houvesse saturação do núcleo.

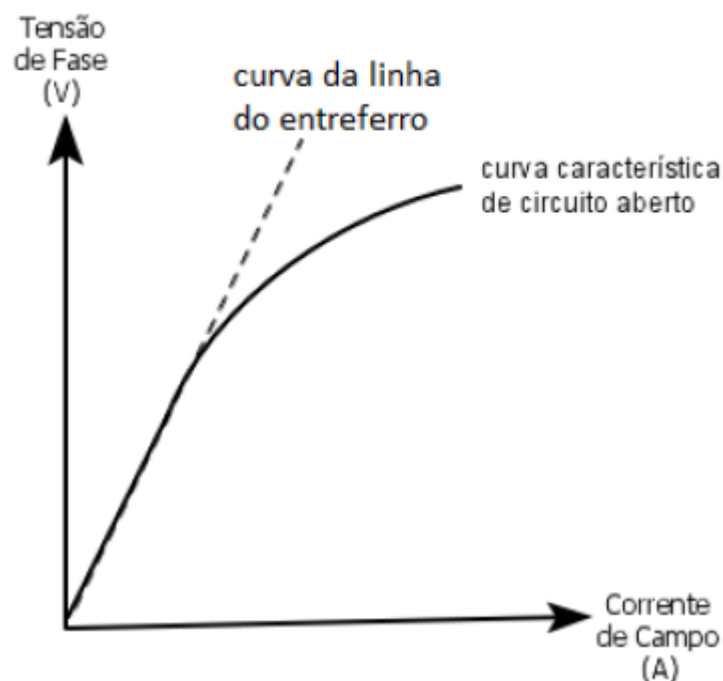


Figura 3.6: Ensaio de Circuito Aberto Gerador Síncrono em Regime Permanente

Ensaio de Curto-Circuito

Ao realizar este ensaio, deve-se acionar o gerador a velocidade síncrona e curto-circuitar os seus terminais de armadura. A priori, varia-se a corrente de campo até que o valor da corrente de armadura atinja o seu valor nominal. Durante esse processo, deve-se criar uma tabela com os valores dessas correntes.

A figura a seguir demonstra o comportamento esperado da curva da corrente de armadura (I_a) em função da corrente de campo (I_f).

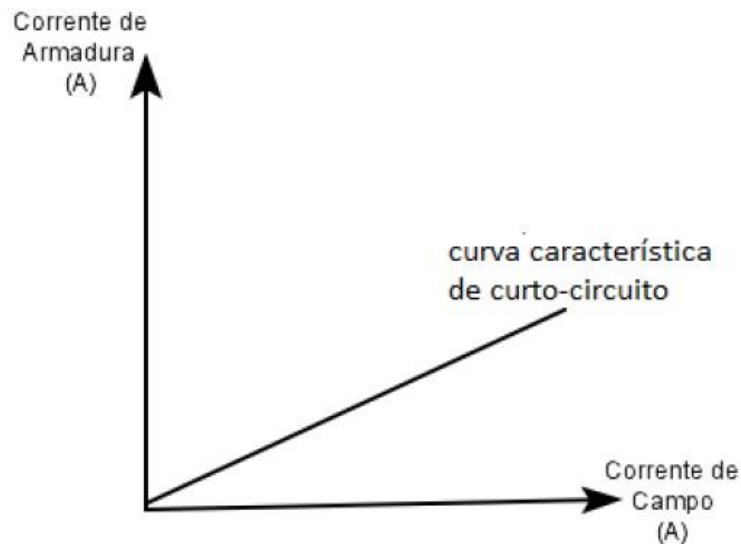


Figura 3.7: Ensaio de Curto-Circuito no Gerador Síncrono em Regime Permanente

O valor da reatância síncrona é determinado encontrando o valor da tensão de fase-neutro da armadura para um determinado valor de corrente de campo, no gráfico $V_L \times I_f$ da figura 3.6, e encontrando no gráfico $I_{arm} \times I_f$ da figura 3.7 o valor da corrente de armadura correspondente a mesma corrente de campo.

Assim, a impedância síncrona é dada por:

$$Z_s = \frac{V_L}{\sqrt{3} \cdot I_a} \quad (14)$$

Portando a reatância síncrona será dada pela seguinte equação:

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_a^2} \quad (15)$$

C. Ensaio de Curto-Circuito Instantâneo

O ensaio de curto-circuito instantâneo nos enrolamentos da armadura é feito para se determinar os parâmetros de eixo direto da máquina.

Em [11] analisa-se as curvas de curto-circuito e mostra-se que há três períodos bem definidos para o comportamento da corrente de armadura após esse curto-circuito:

Regime subtransitório: período inicial de pequena duração onde a corrente decai rapidamente.

Regime transitório: período subsequente ao subtransitório, onde a corrente decai mais lentamente.

Regime permanente: período posterior ao transitório onde a corrente permanece permanente.

A figura a seguir demonstra-se a curva de curto-circuito com os três períodos supracitados demarcados:

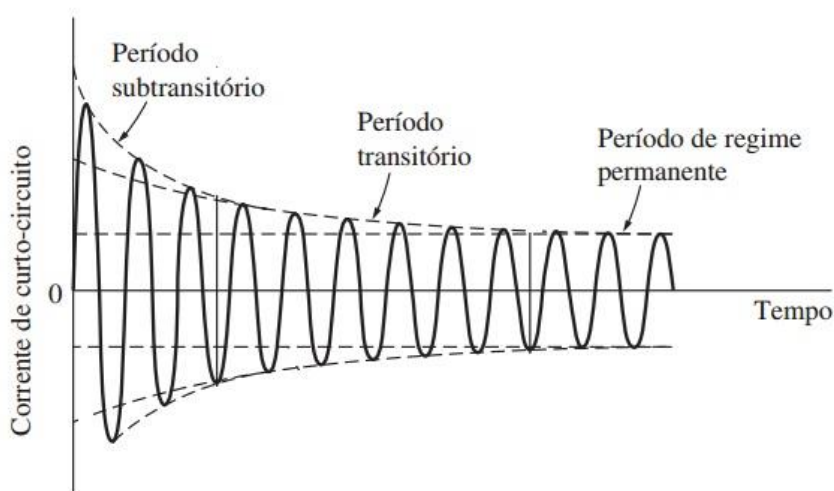


Figura 3.8: Curva teórica de curto-circuito no gerador síncrono

Depois de se obter a curva de curto-circuito instantâneo, deve-se encontrar a curva da média das envoltórias das correntes de curto-circuito utilizando o procedimento feito em [9]. A figura a seguir demonstra a curva da média das envoltórias:

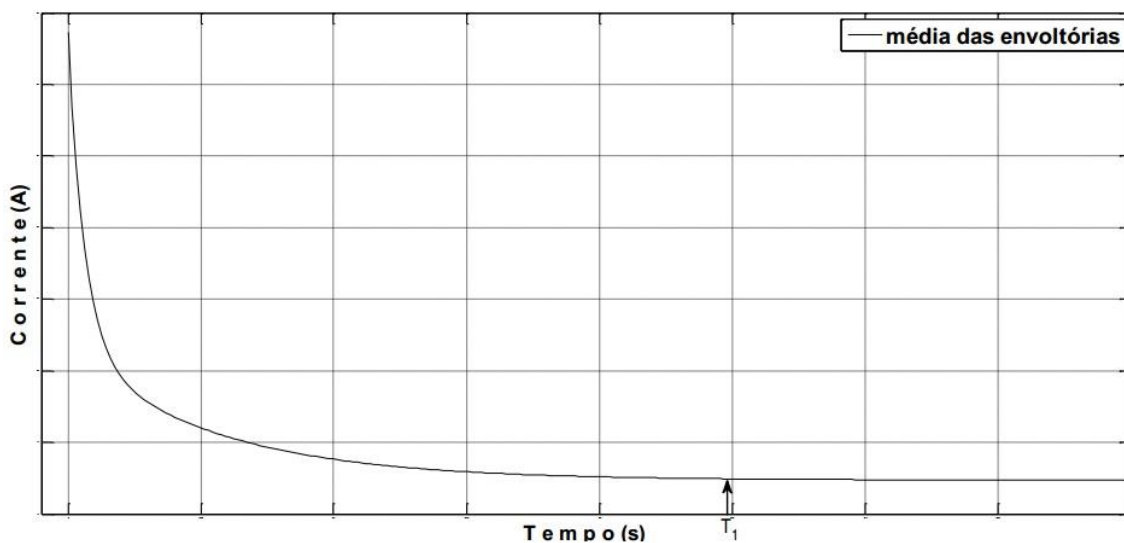


Figura 3.9: Média das envoltórias das correntes de curto-circuito

Essa curva é regida pela equação (16), onde se nota os 3 períodos discutidos anteriormente: o primeiro termo representa a corrente em regime permanente (I_{ss}), o segundo termo em regime transitório que decai com uma constante de tempo (T_d'), e o terceiro termo em regime subtransitório que decai com uma constante de tempo (T_d''). O instante de tempo T_1 presente na figura 3.9 é o tempo em que a corrente atinge o seu valor em regime permanente.

$$i_s(t) = I_{ss} + I' e^{-\frac{t}{T_d'}} + I'' e^{-\frac{t}{T_d''}} \quad (16)$$

Como mostrado em [11], o valor de I_{ss} é identificado na curva da média das envoltórias e sabendo o valor da tensão da armadura fase-neutro (E) antes do curto-circuito, temos que a reatância X_d é encontrada utilizando a equação (17).

$$X_d = \frac{E}{I_{ss}} \quad (17)$$

Após identificar o valor da corrente em regime permanente, subtrai-se este valor da curva da média das envoltórias. Assim só restarão os termos transitórios e subtransitório da equação (16). Os valores dos parâmetros (I', I'', T_d', T_d'') da equação (18) serão encontrados utilizando a ferramenta *cftool* do *MATLAB 2013*.

$$i(t) = I' e^{-\frac{t}{T_d'}} + I'' e^{-\frac{t}{T_d''}} \quad (18)$$

Portanto os valores das reatâncias transitória (X_d') e subtransitória (X_d'') serão encontrados por meio das equações (19) e (20) contidas em [11].

$$I' = \frac{E}{X_d'} - \frac{E}{X_d} \quad (19)$$

$$I'' = \frac{E}{X_d''} - \frac{E}{X_d'} \quad (20)$$

D. Ensaio de Escorregamento

No ensaio de escorregamento, são determinados as reatâncias de eixo direto (X_d) e de eixo em quadratura (X_q).

Esse ensaio é concebido acionando o gerador com uma velocidade diferente da velocidade síncrona, deixando os terminais do campo em aberto e conectando nos

terminais de armadura uma fonte trifásica variável. O gerador não pode entrar em sincronismo com a fonte. Posteriormente, medem-se os valores de tensão e corrente de armadura.

As curvas de tensão e corrente de armadura como exemplificadas em [11] estão representadas na figura a seguir:

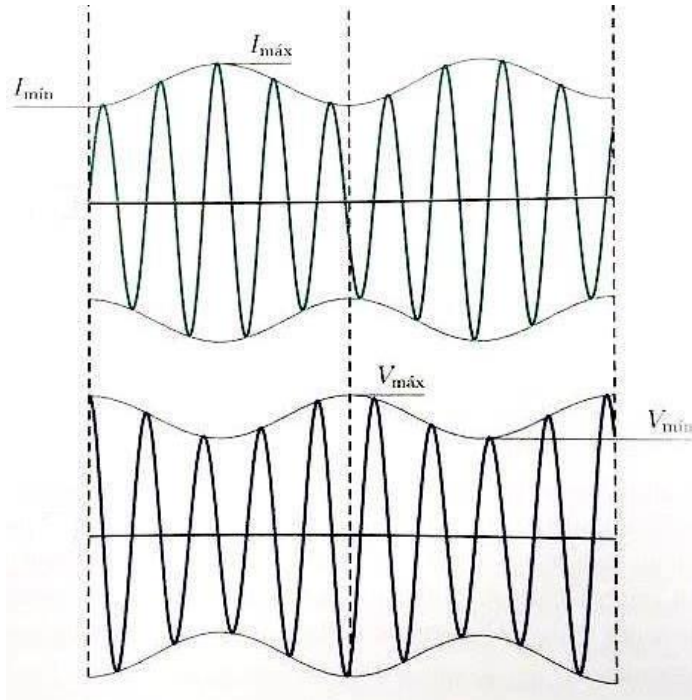


Figura 3.10: Ensaio de Escorregamento

Assim, encontrando os valores mínimos e máximos de tensão ($V_{máx}$ e $V_{mín}$) corrente de armadura ($I_{máx}$ e $I_{mín}$), temos que as reatâncias de eixo direto e de eixo em quadratura são dadas pelas equações a seguir:

$$X_d = \frac{V_{máx}}{I_{mín}} \quad (21)$$

$$X_q = \frac{V_{mín}}{I_{máx}} \quad (22)$$

E. Reatância de Potier

A reatância de Potier (X_P) será calculada via método gráfico. Primeiramente, aciona-se o gerador síncrono a velocidade nominal, posteriormente, liga-se ao gerador uma carga totalmente indutiva representada pelo motor de indução. Nesse ensaio, mede-se as correntes de campo (I_f) e de armadura (I_a) do gerador, e a tensão na carga (V_l).

O procedimento feito em [11] para o cálculo da reatância de Potier consiste nos seguintes passos:

- **1º Passo:** Utilizando a curva de curto-circuito da máquina síncrona representada pela figura 4, encontra-se no gráfico o valor da corrente de campo (I'_f) para a corrente de armadura medida (I_a).
- **2º Passo:** Utilizando a curva no ensaio de circuito aberto da máquina síncrona representada pela figura 3, insere-se o ponto W, que tem como valores do eixo horizontal e vertical, respectivamente, a corrente de campo (I_f) e a tensão na carga (V_l) mensurados no ensaio.
- **3º Passo:** Insere na curva do 2º passo um ponto Z que dista I'_f do ponto W no eixo horizontal com sentido à origem desse gráfico. Traça-se uma reta entre esses dois pontos.
- **4º Passo:** Utilizando esse mesmo gráfico, traçam-se uma reta tangente ao início da curva de circuito aberto e uma reta paralela a essa com origem no ponto Z que interceptará a curva no ponto X.
- **5º Passo:** Encontrando o ponto X geramos um triângulo XWZ. Dessa forma, utilizando a seguinte equação encontra-se o valor da reatância de Potier:

$$X_P = \frac{h}{\sqrt{3} \cdot I_a} \quad (23)$$

Onde:

- h : altura do triângulo XWZ [V].
- I_a : corrente de armadura medido no ensaio [A].

F. Ensaio para determinar os parâmetros mecânicos

Os parâmetros mecânicos podem ser determinados via testes *off-line* (máquina fora de operação) ou via testes *online* (máquina em operação). Mais informações podem ser obtidas do Trabalho de Conclusão do Curso (TCC) do aluno Matheus C. S. Bezerra encontradas em [12].

Outra maneira de estimar os parâmetros mecânicos é utilizando uma tabela (3.2) onde se pode obter o momento de inércia segundo a potência da máquina [13].

Tabela 3.2: Momento de Inércias para as potências normalizadas

Potência nominal		Número de polos			
KW	cv	2	4	6	8
		J Kgm ²	J Kgm ²	J Kgm ²	J Kgm ²
0,18	1/4	0,008	0,048	0,133	0,273
0,25	1/3	0,011	0,064	0,179	0,367
0,37	1/2	0,016	0,092	0,255	0,523
0,55	3/4	0,023	0,132	0,364	0,747
0,75	1	0,031	0,175	0,481	0,988
1,1	1,5	0,044	0,247	0,679	1,39
1,5	2	0,058	0,326	0,898	1,84
2,2	3	0,081	0,46	1,27	2,6
3	4	0,108	0,608	1,68	3,44
3,7	5	0,13	0,735	2,02	4,16
4,5	6	0,155	0,876	2,41	4,95
5,5	7,5	0,186	1,05	2,89	5,94
7,5	10	0,242	1,37	3,78	7,75
9,2	12,5	0,295	1,67	4,59	9,43
11	15	0,346	1,96	5,4	11,1
15	20	0,458	2,59	7,13	14,6
18,5	25	0,553	3,13	8,62	17,7
22	30	0,646	3,65	10,1	20,7
30	40	0,854	4,83	13,3	27,3

3.2.2. Modelagem da Carga no Regime Dinâmico

A representação do motor na análise dinâmica pode ser aproximado usando o modelo de regime permanente proposto em [2], [7] e [8] que pode ser representado pela figura a seguir:

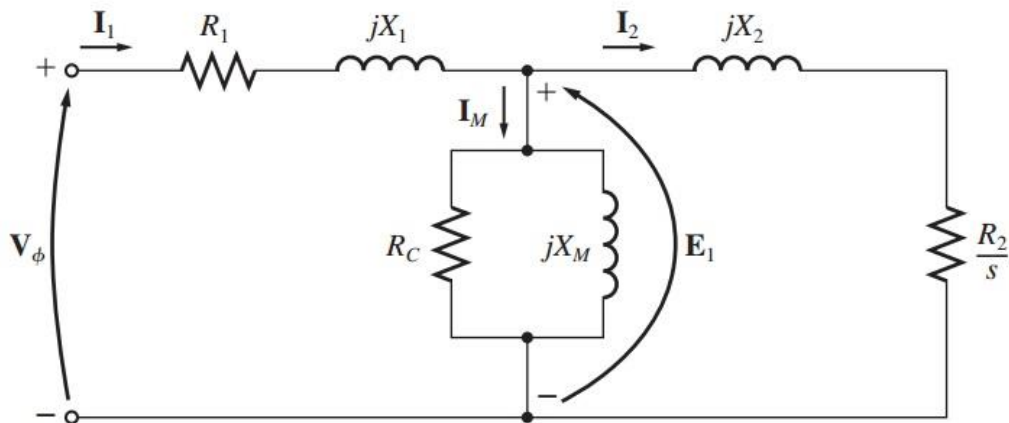


Figura 3.11: Circuito Equivalente MIT

Onde:

- V_ϕ : Tensão nominal por fase.
- E_1 : Tensão induzida no estator por fase.
- R_1 : Resistência do enrolamento do estator por fase.
- X_1 : Reatância de dispersão do estator por fase
- X_m : Reatância de magnetização por fase
- R_c : Resistência do núcleo por fase.
- R_2 : Resistência do enrolamento do rotor por fase.
- X_2 : Reatância de dispersão do rotor por fase.
- s : Escorregamento.

A fim de determinar os parâmetros do MIT, serão realizados 3 ensaios: ensaio em corrente contínua, ensaio em vazio ensaio com rotor bloqueado.

3.2.2.1. Ensaio em Corrente Contínua

Esse ensaio consiste na aplicação de um tensão CC nos enrolamentos do estator. Como a corrente é contínua, não haverá tensão induzida no circuito do rotor e fluxo resultante de corrente no rotor. A reatância do motor também terá valor nulo, devido a corrente CC passando pelo estator. Portanto, o único limitante do circuito é a resistência R_1 do estator.

A figura a seguir ilustra o circuito para o ensaio CC. Tem-se que a fonte CC é ligada a dois dos três terminais de um MIT ligado em Y. A corrente aplicada aos enrolamentos do estator é ajustada até o seu valor nominal.

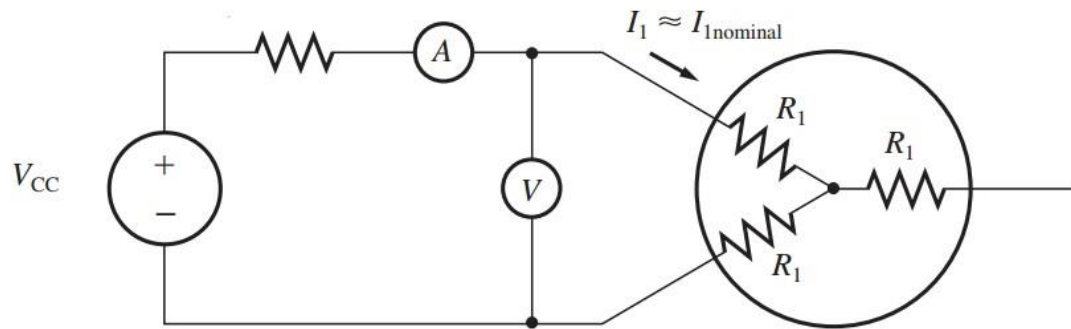


Figura 3.12: Circuito Equivalente do MIT no Ensaio em Corrente Contínua

Por conseguinte, temos que a resistência do estator será:

$$R_1 = \frac{V_{cc}}{2.I_{cc}} \quad (24)$$

3.2.2.2. Ensaio em Vazio

Nesse ensaio, o procedimento consiste em se deixar os terminais do rotor sem nenhuma carga, fazendo com que o escorregamento do motor tenda a zero. A figura a seguir demonstra o circuito esquemático desse ensaio, onde se aplicará tensão nominal trifásica e se medirão a potência de entrada, um tensão de linha e as três correntes de fase.

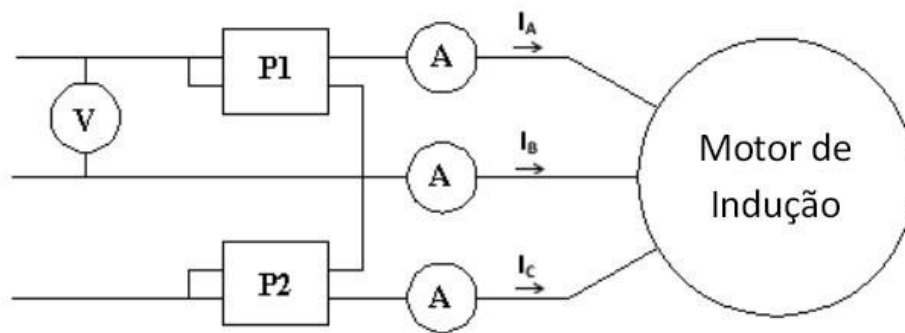


Figura 3.13: Circuito Esquemático do Ensaio em Vazio no MIT

Devido ao fato do escorregamento tender a zero, desconsideram-se as perdas ôhmicas do rotor, pois a resistência R_2/s terá um valor muito elevado que fará com que a corrente do rotor tenda a zero. Assim, a corrente de magnetização será igual a corrente que passa pelo estator. O circuito simplificado do MIT está explicitado a seguir:

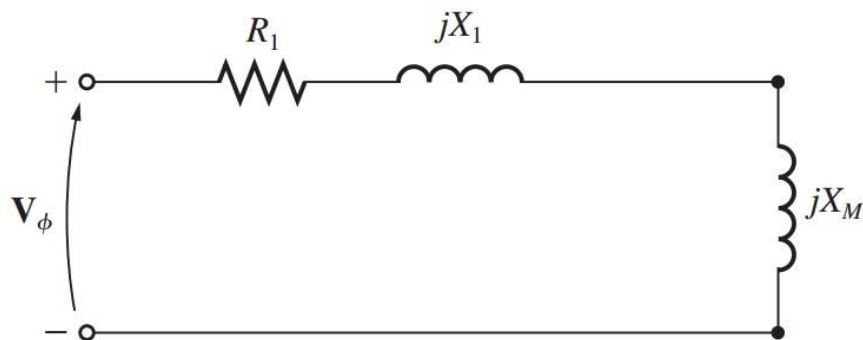


Figura 3.14: Circuito Equivalente do MIT no Ensaio em Vazio

Onde:

V_ϕ : Tensão de linha nominal aplicado na armadura.

I_1 : Corrente de fase medida na armadura.

O equacionamento desse circuito é feito desconsiderando o valor da resistência R_1 , pois esse valor é muito pequeno em relação às indutâncias. Portanto:

$$X_1 + X_m = \frac{V_\phi}{\sqrt{3}I_1} \quad (25)$$

3.2.2.3. Ensaio com Rotor Bloqueado

Esse ensaio usa o mesmo esquemático representado pela figura 3.13, porém, agora, bloqueia-se o rotor mecanicamente. Esse procedimento fará com que o escorregamento seja unitário devido a velocidade do rotor ser nula. Nesse caso os valores de resistência e reatância do estator serão significativamente menores do que a indutância de magnetização, fazendo com que a última seja desconsiderada do circuito equivalente, portanto a corrente do estator será a mesma que passa pelo rotor. A figura a seguir demonstra o circuito do MIT simplificado [8]

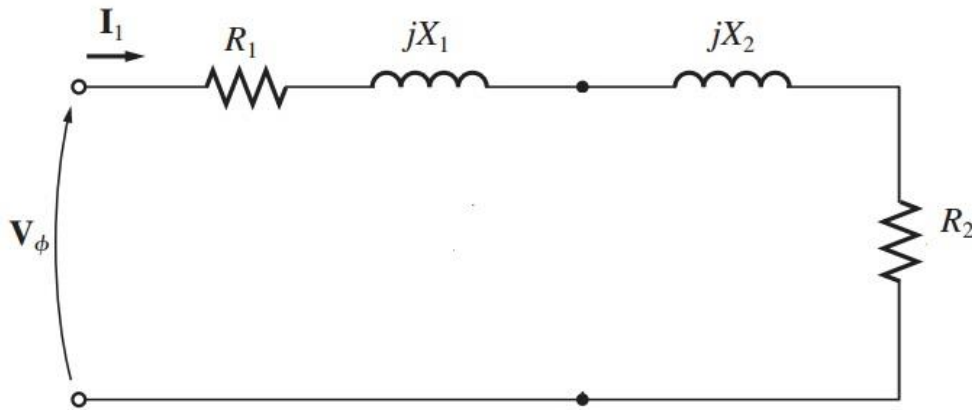


Figura 3.15: Circuito Equivalente do MIT no Ensaio com Rotor Bloqueado

Medem-se a tensão de armadura (V_ϕ), a corrente de armadura (I_1) e a potência trifásica de entrada ($P_{entrada}$). Calculando-se o fator de potência, temos que:

$$FP = \cos \theta = \frac{P_{entrada}}{\sqrt{3} \cdot V_\phi \cdot I_1} \quad (26)$$

O valor do módulo da impedância total do motor com rotor bloqueado é dado por:

$$|Z_{RB}| = \frac{V_\phi}{\sqrt{3}I_1} \quad (27)$$

$$Z_{RB} = R_1 + R_2 + jX_1 + jX_2 \quad (28)$$

$$Z_{RB} = |Z_{RB}| \cdot \cos \theta + j|Z_{RB}| \cdot \sin \theta \quad (29)$$

Temos então que:

$$R_{RB} = R_1 + R_2 = |Z_{RB}| \cdot \cos \theta \quad (30)$$

$$X_{RB} = X_1 + X_2 = |Z_{RB}| \cdot \sin \theta \quad (31)$$

A partir do valor da resistência R_1 calculado no item b, encontra-se o valor de R_2 .

$$R_2 = R_{RB} - R_1 \quad (32)$$

Sabendo que a relação de X_1 e X_2 com X_{RB} é dada de acordo com a seguinte tabela:

	X_1 e X_2 em função de X_{RB}	
Tipo de rotor	X_1	X_2
Rotor bobinado	$0,5 X_{RB}$	$0,5 X_{RB}$
Classe A	$0,5 X_{RB}$	$0,5 X_{RB}$
Classe B	$0,4 X_{RB}$	$0,6 X_{RB}$
Classe C	$0,3 X_{RB}$	$0,7 X_{RB}$
Classe D	$0,5 X_{RB}$	$0,5 X_{RB}$

Figura 3.16: Tabela de X_1 e X_2 em função de X_{RB} do Motor de Indução

E como o motor utilizado nesse sistema teste é do tipo rotor bobinado, então temos que:

$$X_1 = X_2 = \frac{X_{RB}}{2} \quad (33)$$

Capítulo 4

4. Resultados dos Testes e Ensaaios

4.1. Resultados dos Geradores Síncronos

Os valores dos parâmetros obtidos nos ensaios estão ilustrados a seguir:

4.1.1. Resultado do Ensaio de Corrente Contínua

Sabendo que o valores obtidos nesse ensaio são:

$$V_{cc} = 10 \text{ V}$$

$$I_{cc} = 0,88 \text{ A}$$

Utilizando a equação (13), temos que o valor da resistência de armadura é:

$$R_a = \frac{10}{2 \cdot 0,88} = 5,7 \Omega$$

4.1.2. Resultados do Ensaio de Circuito Aberto e Curto-Circuito em Regime Permanente

- **Ensaio em Circuito Aberto**

Os valores de tensão de linha (V_L) e corrente de campo (I_F) medidos estão representados na tabela a seguir:

T
Tabela 4.1: Dados obtidos para o ensaio em circuito aberto

I_F [A]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3,0
V_L [V]	2,8	79,5	144,1	191,2	229,9	253,4	277,2

O gráfico obtido está ilustrado na figura a seguir:

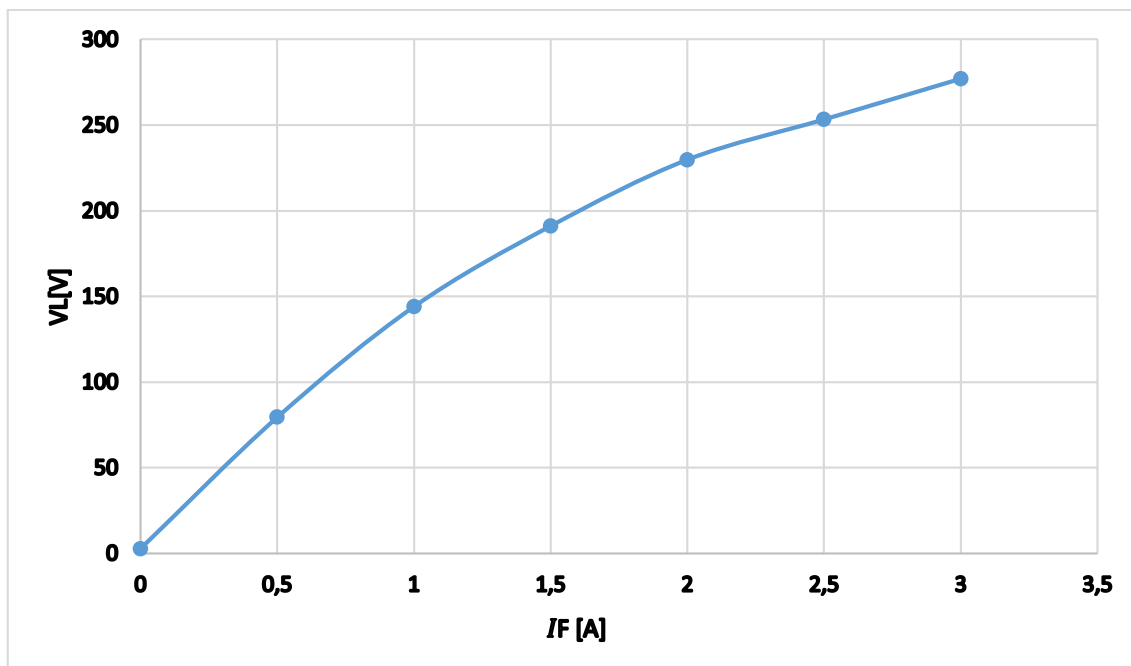


Figura 4.1: Gráfico do Ensaio em Circuito Aberto no Gerador

- **Ensaio em Curto- Circuito**

Os valores medidos de corrente de armadura (I_a) e de corrente de campo (I_F) estão dados na tabela a seguir:

Tabela 4.2: Dados obtidos no Ensaio de Curto Circuito no Gerador Síncrono

I_a [A]	0,14	0,43	0,64	0,80	0,91	1,05
I_F [A]	0,25	0,75	1,25	1,5	1,75	2,0

O gráfico obtido de acordo com essa tabela está representado na figura a seguir:

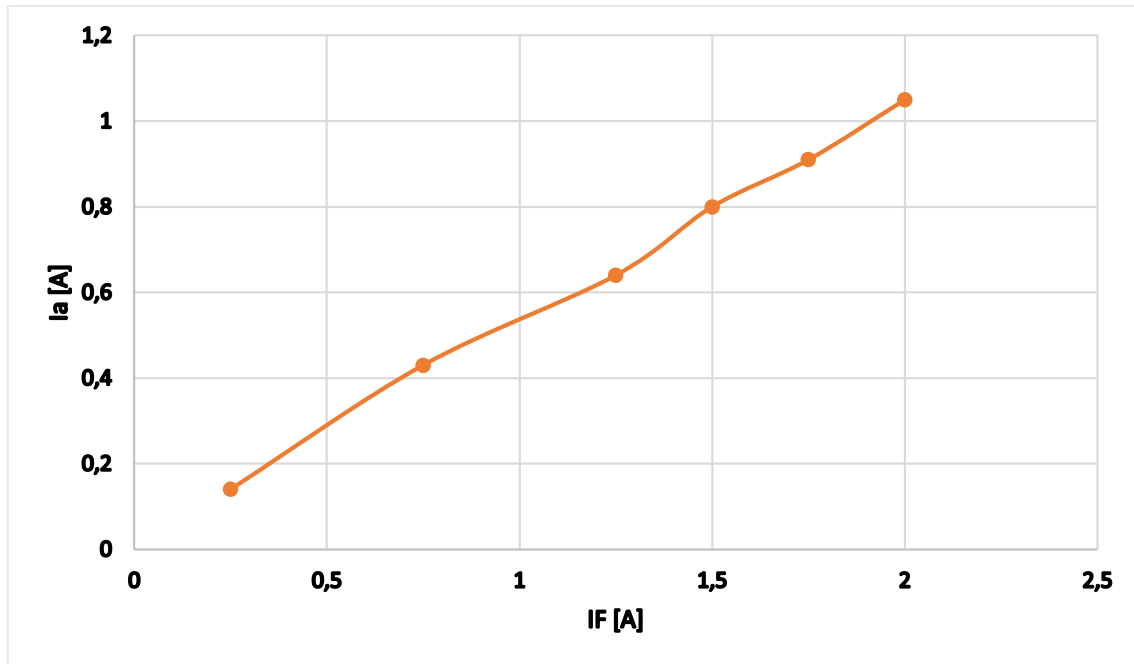


Figura 4.2: Gráfico do Ensaio de Curto-Circuito no Gerador

Utilizando o valor da corrente de campo de 1,5 [A], temos que o valor da tensão de linha pela tabela 4.1 é de 191,2 [V] e o valor da corrente de armadura pela tabela 4.2 é de 0,80 [A], portanto o valor da impedância síncrona é:

$$Z_s = \frac{191,2}{\sqrt{3} \cdot 0,8} = 138 \, \Omega$$

Assim, temos que o valor da reatância síncrona é de:

$$X_s = \sqrt{138^2 - 5,7^2} = 137,88 \, \Omega$$

4.1.3. Resultados do Ensaio de Curto-Circuito Instantâneo

Para realizar esse ensaio, o gerador síncrono foi acionado a velocidade nominal de 1800 rpm e aplicou-se uma corrente de campo de forma a se obter alguma tensão de fase ($E = 37,6 \, V_{pico}$). Então, foi colocado em curto-circuito o gerador. A figura 4.3 mostra as forma de ondas obtidas pelo osciloscópio:

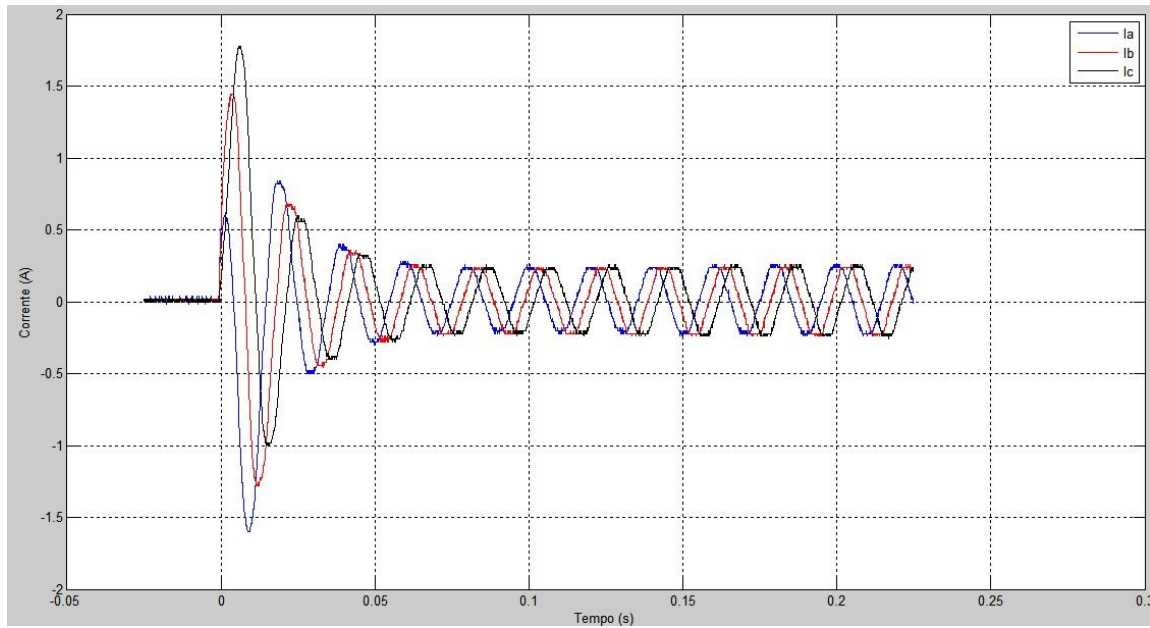


Figura 4.3: Curva experimental das Correntes de Curto-Circuito

Baseando-se no procedimento feito em [9], identificam-se os pontos de máximo e mínimo para uma corrente de fase (I_c) na figura 4.4, e utiliza-se a equação 33 para criar a curva da média das envoltórias. Foi necessário encontrar pontos intermediários da envoltória superior para que todos os pontos estejam na mesma escala de tempo como mostra a figura 4.4.

$$I_{envoltoria} = \frac{I_{m\acute{a}x} - I_{m\acute{i}n}}{2} \quad (33)$$

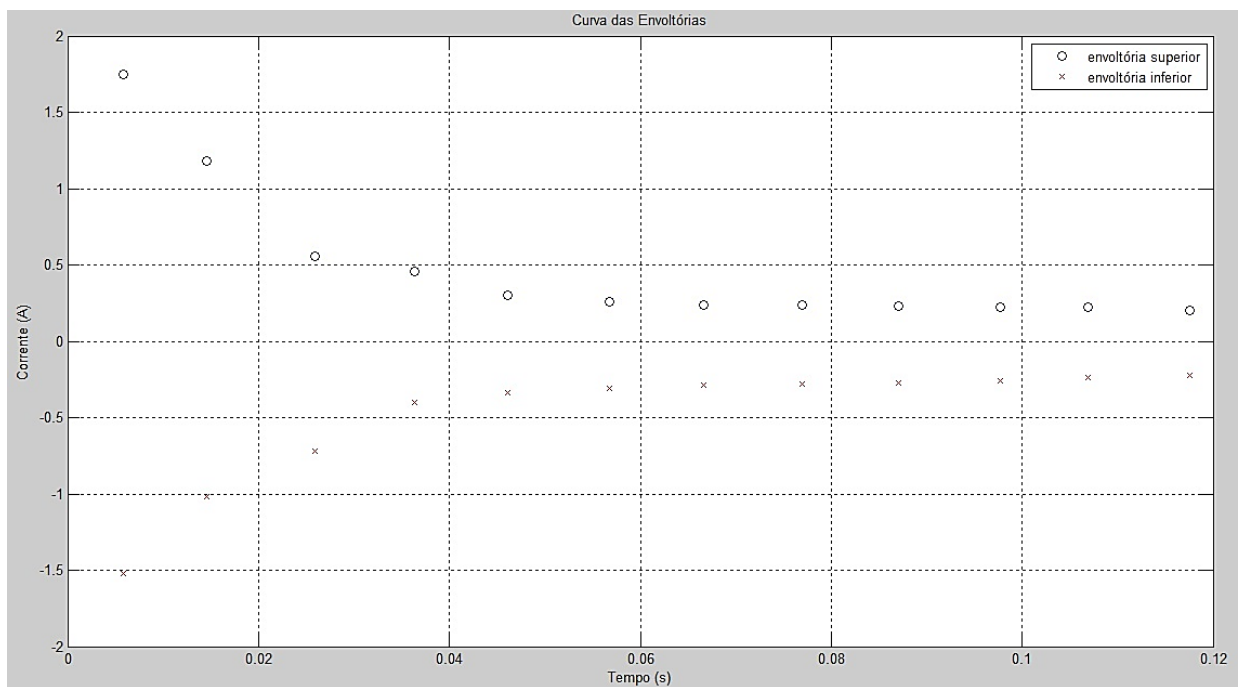


Figura 4.4: Valores de máximo e mínimo da corrente curto-circuito

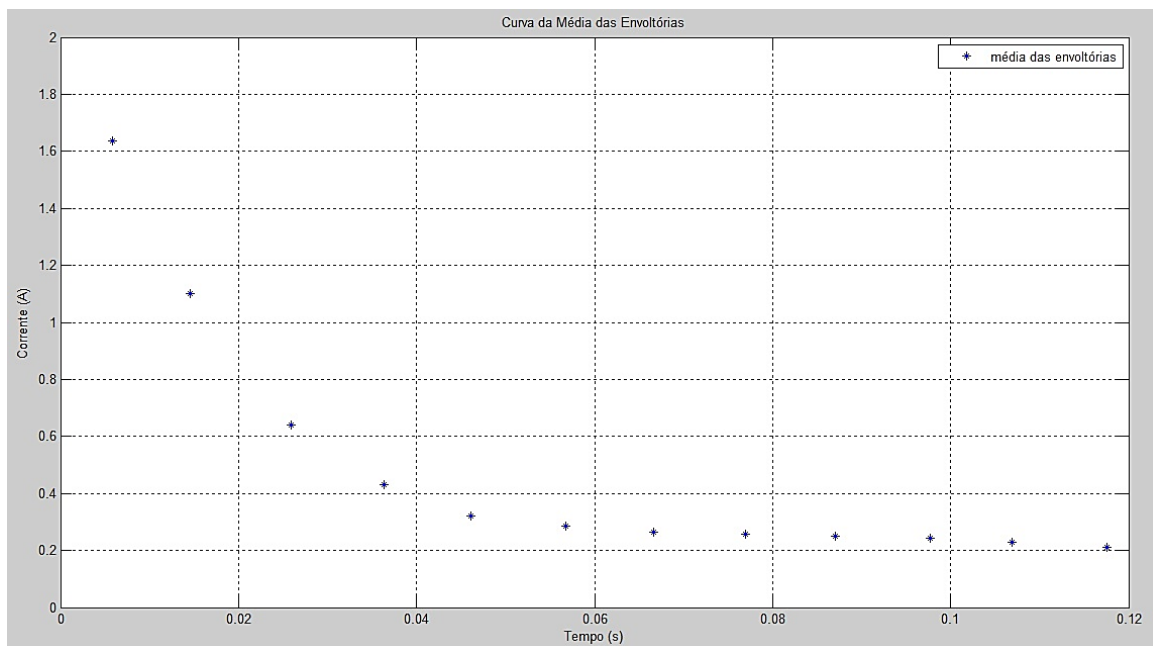


Figura 4.5: Média das envoltórias da corrente de curto-circuito

Sabendo que o valor em regime permanente de corrente (I_{ss}) encontrado na curva de curto-circuito é de $0,22 A_{pico}$, então utilizando a equação 17 temos que a reatância de eixo direto é:

$$X_d = \frac{37,6}{0,22} = 170,9 \Omega$$

A janela da ferramenta *cftool* do *MATLAB 2013* está mostrada na figura 4.6, onde foram fornecidos os pontos da curva em *X data* e *Y data*, e escolhidos qual tipo de aproximação fora usada (nesse caso, exponencial com 2 variáveis).

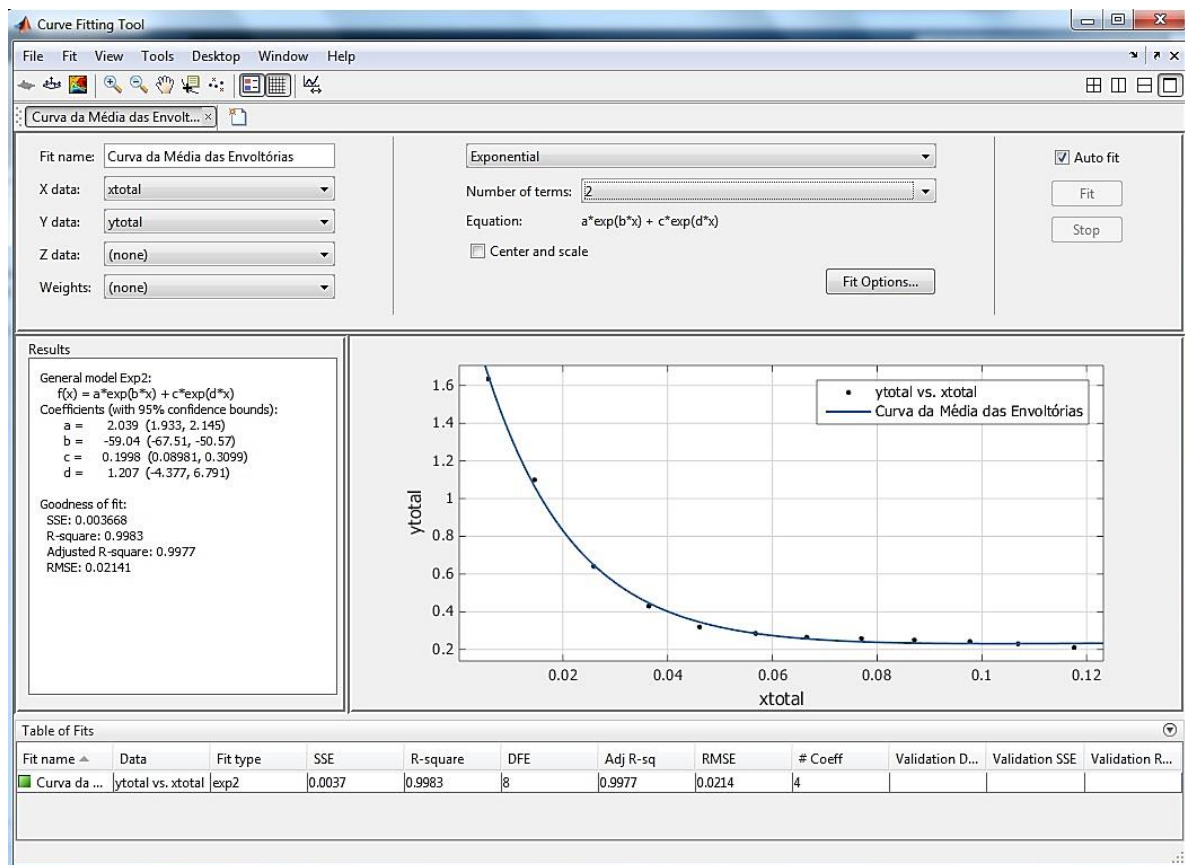


Figura 4.6: Ferramenta *cftool* do MATLAB

De acordo com essa figura encontramos os valores dos coeficientes da equação (18), e, portanto, utilizando as equações (19) e (20) temos que os valores dos parâmetro de eixo direto serão:

$$X'_d = 88,14 \, \Omega$$

$$X''_d = 15,29 \, \Omega$$

$$T'_d = 0,8285 \, s$$

$$T''_d = 0,0169 \, s$$

4.1.4. Resultados do Ensaio de Escorregamento

Os valores de $I_{\min}$, $I_{\max}$, $V_{\min}$ e $V_{\max}$ analisando as formas de onda no osciloscópio durante o ensaio estão representadas na tabela a seguir:

Tabela 4.3: Dados do Ensaio de Escorregamento no Gerador

$V_{m\acute{a}x}$ [V]	$V_{m\acute{i}n}$ [V]	$I_{m\acute{a}x}$ [A]	$I_{m\acute{i}n}$ [A]
29,6	28,40	0,48	0,188

Portanto, o valores das reatância de eixo direto e de eixo em quadratura serão:

$$X_d = \frac{29,6}{0,188} = 157,45 \, \Omega$$

$$X_q = \frac{28,4}{0,48} = 59,17 \, \Omega$$

4.1.5. Resultado da Reatância de Potier

Os valores de corrente de armadura, corrente de campo e tensão na carga medidos nesse ensaio estão representados na tabela a seguir:

Tabela 4.4 - Dados dos Ensaio da Reatância de Potier

I_a [A]	I_f [A]	V_l [V]
0,812	2,13	161

De acordo com a curva de curto-circuito do gerador ilustrada pela figura 4.2, temos que, para a corrente de armadura de 0,812 A, o valor da corrente de campo I'_f é de 1,519 A.

Em seguida, adiciona-se o ponto W com as coordenadas (2,13 A; 161 V) na curva em vazio do gerador e o ponto Z que dista 1,519 do ponto W no eixo horizontal no sentido à origem. Traçando uma reta entre esses dois pontos, temos que a curva em vazio ficará da seguinte maneira:

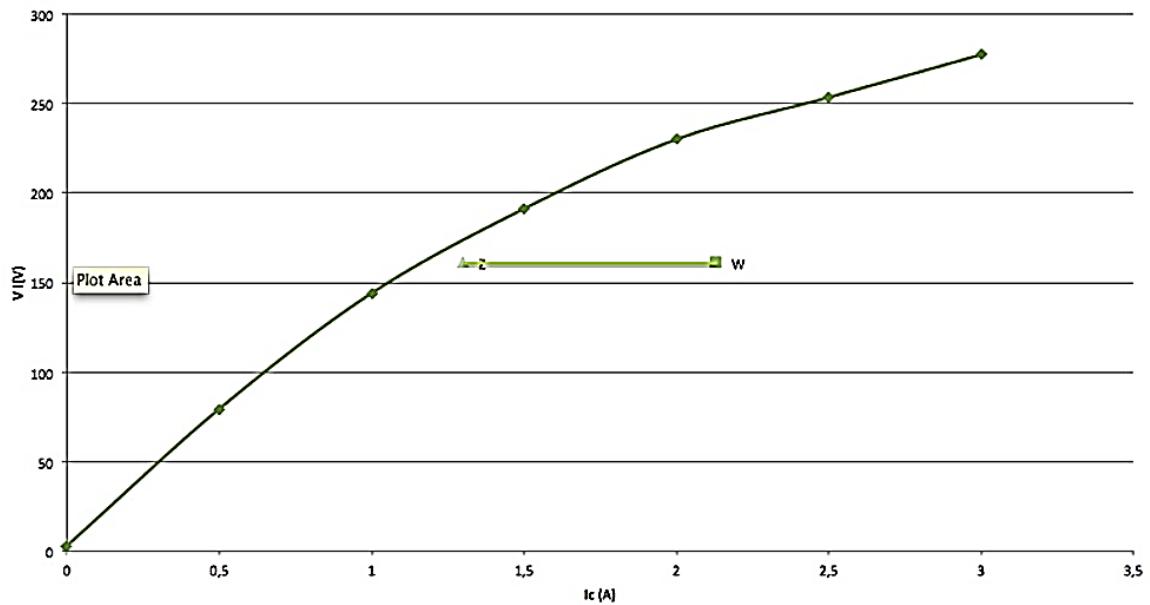


Figura 4.7: Curva em vazio do gerador após a inserção dos pontos W e Z no procedimento de Potier

Utilizando essa mesma curva, traçam-se duas retas: uma tangente a origem e uma paralela a essa com origem no ponto W, que interceptará a curva no ponto X (1,39;181), como mostrado na figura a seguir:

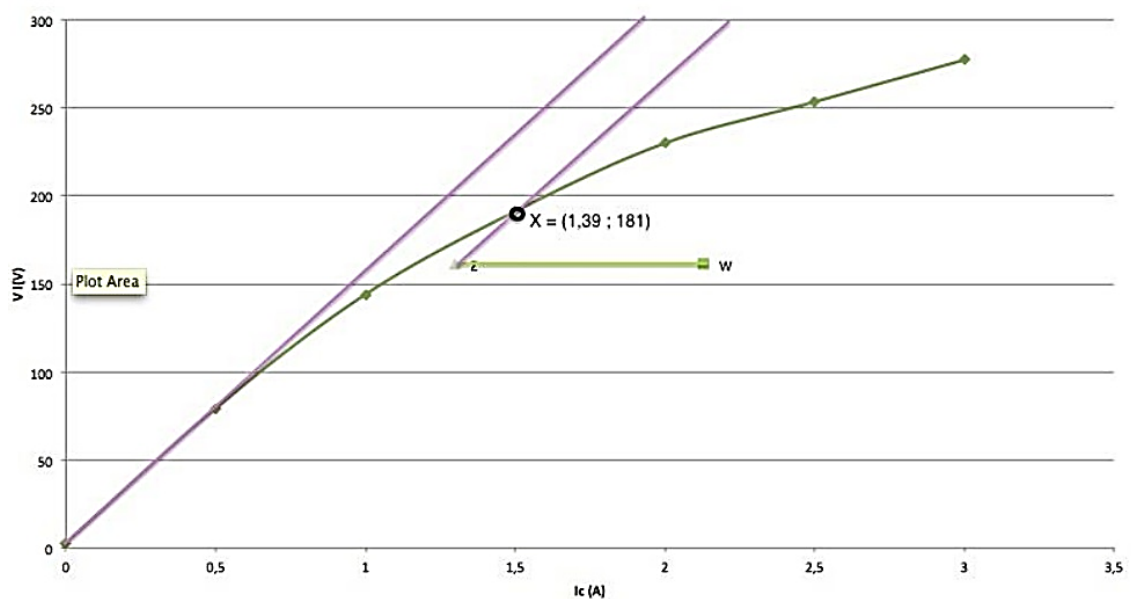


Figura 4.8: Curva em vazio do gerador após a inserção de uma reta tangente a origem e uma reta paralela a essa com origem no ponto W

A altura h do triângulo XWZ é 20 V, então temos que a reatância de Potier de acordo com a equação (23) será:

$$X_P = \frac{20}{\sqrt{3} \cdot 0,812} = 14,22 \, \Omega$$

4.1.6. Resultados dos Parâmetros Mecânicos

Utilizando a tabela 3.2, temos que o momento de inércia dessa máquina J será 0,016 kg.m². Já o parâmetro D não foi estimado por ter um valor desprezível, pois a máquina usada nesse sistema é muito pequena.

4.1.7. Quadro dos Parâmetros do Gerador

A tabela 4.5 mostra os valores dos parâmetros obtidos em todos os ensaios e testes no gerador síncrono.

Tabela 4.5: Quadro dos parâmetros do gerador

Parâmetros	Teste/ Ensaio				
	Corrente Contínua	Circuito Aberto/ Curto-Circuito	Curto-Circuito Instantâneo	Escorregamento	Potier
$R_a \, (\Omega)$	5,7*				
$X_s \, (\Omega)$		137,88*			
$X_d \, (\Omega)$			170,9*	157,45	
$X'_d \, (\Omega)$			88,14*		
$X''_d \, (\Omega)$			15,29*		
$X_q \, (\Omega)$				59,17*	
$X_l \, (\Omega)$					14,22*
$T'_d \, (s)$			0,8285*		
$T''_d \, (s)$			0,0169*		

Os valores com * foram os dados selecionados para as simulações do capítulo 5.

A tabela 4.6 mostra os valores das impedância em p.u. sabendo que os valores de base

para potência aparente trifásica (S_{base}) e de tensão de linha (V_{Lbase}) escolhidos foram 500 VA e 220 V, respectivamente, então a impedância fase-neutro de base será:

$$Z_{base} = \frac{\left(\frac{V_{Lbase}}{\sqrt{3}}\right)^2}{\frac{S_{base}}{3}} = \frac{220^2}{500} = 96,8 \, \Omega$$

Tabela 4.6: Quadro dos parâmetros do gerador em p.u. selecionados da tabela 4.5

Parâmetros	Valor em p.u.
R_a	0,0589
X_s	1,4244
X_d	1,7655
X'_d	0,9105
X''_d	0,1579
X_q	0,6112
X_l	0,1469

4.2. Resultados da Linha de Transmissão

4.2.1. Resultado do Ensaio em Vazio do Transformador

Os valores encontrados de tensão no primário, corrente no primário e potência são dados pela seguinte tabela:

Tabela 4.7: Dados do Ensaio em Vazio na Linha de Transmissão

V_0 [V]	I_0 [A]	P_0 [W]
127	0,145	9

Utilizando as equações da seção 3.2, temos que o valor da resistência do núcleo será:

$$R_c = \frac{127^2}{9} = 1792,11 \, \Omega$$

$$I_c = \frac{127}{1792,11} = 70,87 \, mA$$

$$I_m = \sqrt{0,145^2 - 0,07087^2} = 0,126 \text{ A}$$

Logo, a reatância de magnetização será:

$$X_m = \frac{127}{0,126} = 1007,94 \Omega$$

4.2.2. Resultado do Ensaio em Curto-Circuito do Transformador

Os valores da tensão do primário, corrente do primário e potência de entrada medidos nesse ensaio estão na tabela a seguir:

Tabela 4.8: Dados do Ensaio em Curto-Circuito na Linha de Transmissão

V_1 [V]	I_1 [A]	P_1 [W]
9,67	0,457	4

A resistência série de acordo com a equação da secção 3.3 será dada por:

$$R_{eq} = \frac{4}{0,457^2} = 9,575 \Omega$$

$$Z_{eq} = \frac{9,67}{0,457} = 21,16 \Omega$$

Assim, a reatância série será:

$$X_{eq} = \sqrt{21,16^2 - 9,575^2} = 4,5 \Omega$$

4.3. Resultados do Motor de Indução Trifásico

Os valores dos parâmetros obtidos nos ensaios estão representados nos subitens a seguir:

4.3.1. Resultado do Ensaio em Corrente Contínua do MIT

Sabendo que os valores encontrados nesse ensaio foram os seguintes:

$$V_{cc} = 12,3 \text{ V}$$

$$I_{cc} = 1 \text{ A}$$

Utilizando a equação (24) da secção 3.2.2.1, temos que a resistência de armadura será:

$$R_1 = \frac{12,3}{2 \cdot 1} = 6,15 \, \Omega$$

4.3.2. Resultado do Ensaio em Vazio do MIT

Os valores medidos de tensão e corrente nos terminais da armadura estão representados a seguir:

$$V_\phi = 220,1 \, V$$

$$I_1 = 1,107 \, A$$

Utilizando a equação da secção 2.3.2, temos que:

$$X_1 + X_m = \frac{220,1}{\sqrt{3} \cdot 1,107} = 114,79 \, \Omega$$

4.3.3. Resultado do Ensaio com Rotor Bloqueado do MIT

Os valores medidos de tensão e corrente de armadura, e potência de entrada estão representados na tabela a seguir:

Tabela 4.9: Dados do Ensaio com Rotor Bloqueado no MIT

V_t [V]	I_1 [A]	$P_{entrada}$ [W]
56	1,62	73,5

Utilizando a equação (26), temos que o fator de potência é:

$$FP = \cos \theta = \frac{73,5}{\sqrt{3} \cdot 56 \cdot 1,62} = 0,4677$$

O módulo da impedância de rotor bloqueado de acordo com a equação (27) será:

$$|Z_{RB}| = \frac{56}{\sqrt{3} \cdot 1,62} = 19,96 \, \Omega$$

Os valores da resistência e da reatância de rotor bloqueado, serão, portanto:

$$R_{RB} = 0,4677 \cdot 19,96 = 9,34 \, \Omega$$

$$X_{RB} = 0,8839 \cdot 19,96 = 17,64 \, \Omega$$

Sabendo que R_1 é $6,15 \, \Omega$, então R_2 será:

$$R_2 = 9,34 - 6,15 = 3,19 \, \Omega$$

E os valores das reatâncias do MIT serão:

$$X_1 = X_2 = \frac{17,64}{2} = 8,82 \, \Omega$$

$$X_m = 114,79 - 8,82 = 105,97 \, \Omega$$

4.3.4. Quadro dos Parâmetros do Motor

A tabela 4.10 mostra os valores dos parâmetros obtidos em todos os ensaios e testes no MIT.

Tabela 4.10: Quadros dos parâmetros do MIT

	Ensaio		
Parâmetros	Corrente Contínua	Em Vazio	Rotor Bloqueado
$R_1 \, (\Omega)$	6,15		
$X_1 \, (\Omega)$		8,82	
$R_2 \, (\Omega)$			3,19
$X_2 \, (\Omega)$			8,82
$X_m \, (\Omega)$		105,97	

Utilizando a impedância base de $96,8 \, \Omega$ selecionada na seção 4.1.7, temos que os valores em p.u. do MIT estão representados na tabela a seguir:

Tabela 4.11: Quadro dos parâmetros do MIT em p.u. selecionados da tabela 4.10

Parâmetros	Valor em p.u.
R_1	0,0635
X_1	0,0911
R_2	0,0329
X_2	0,0911
X_m	1,0947

Capítulo 5

5. Validação do SEP

Nesse capítulo serão feitas análises estática e dinâmica do SEP apresentado no capítulo 2 com o intuito de se conhecer o comportamento desse sistema, ou quando está em regime permanente, ou quando está passando por um transitório.

5.1. Análise Estática do Sistema

A análise estática será feita avaliando 2 casos do sistema realizados experimentalmente, e depois comparando-os com os realizados computacionalmente via *Simulink*. O 1º caso terá somente o gerador 1 alimentando a carga, já o 2º caso terá os dois geradores alimentando a carga.

5.1.1. Dados Experimentais

Os dados experimentais obtidos no 1º e 2º casos estão representados nas figura 5.1 e 5.2, respectivamente.

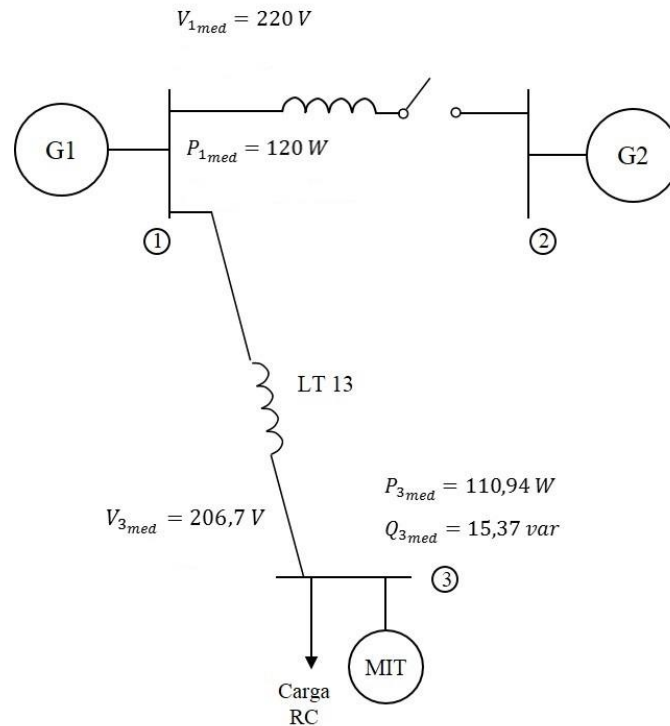


Figura 5.1: Diagrama unifilar do 1º caso

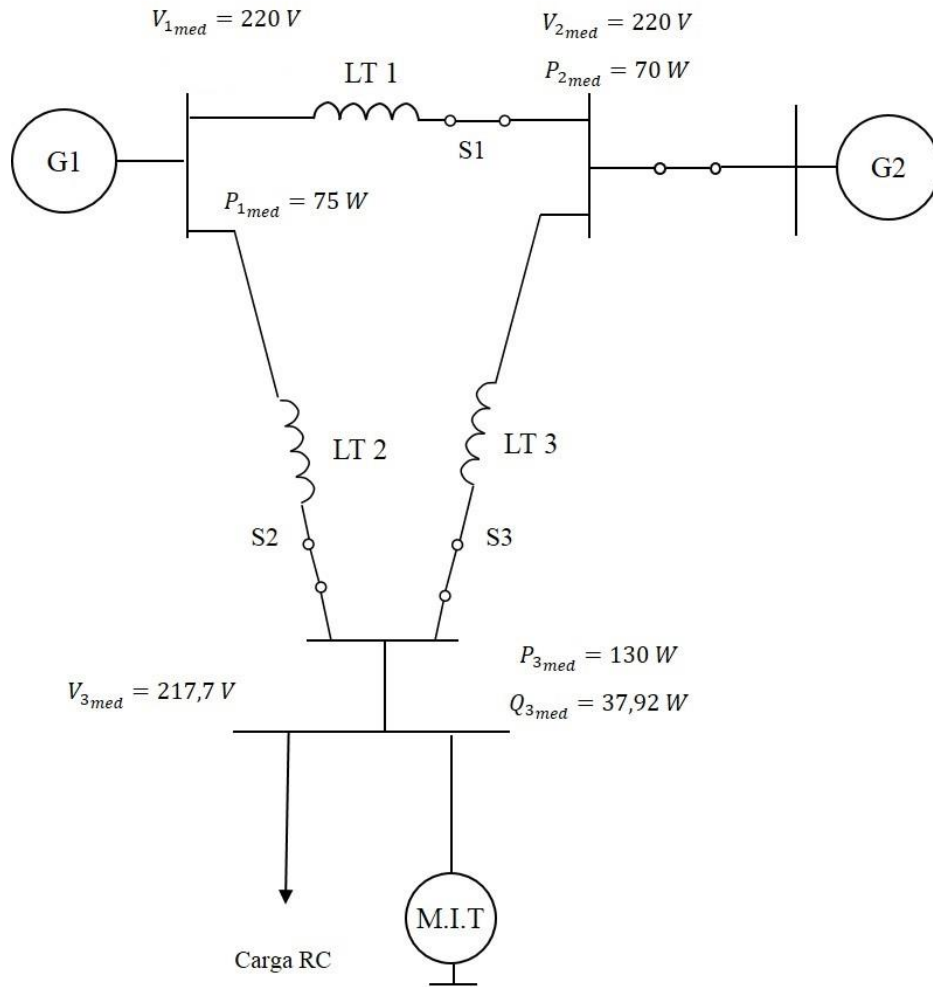


Figura 5.2: Diagrama unifilar do 2º caso

5.1.2. Simulações Computacionais

Utilizando o software *Simulink* do *MATLAB* para a simulação computacional desse sistema, temos que o modelo empregado nesse caso será o representado pela figura a seguir:

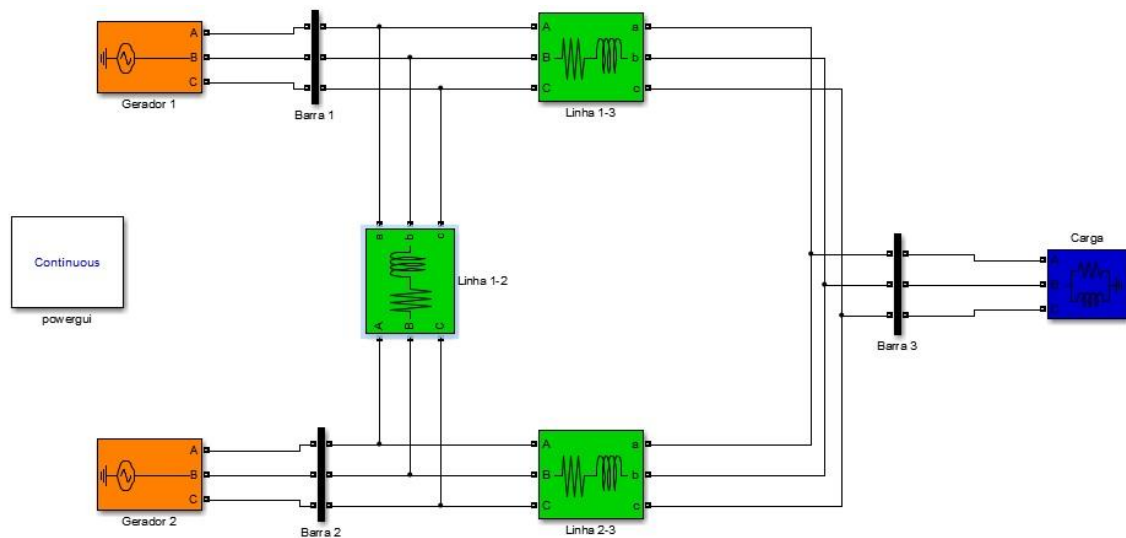


Figura 5.3: Modelo do SEP utilizado no *Simulink* para a análise estática do sistema

Para a análise estática desse SEP, utilizaram-se fontes de tensão trifásica para representar os geradores, sendo que para o gerador 1 usou-se uma barra swing e para o gerador 2 usou-se uma barra PV. As impedâncias séries foram utilizadas para representar as linhas de transmissão; e uma carga trifásica em paralelo como barra PQ para representar a carga desse sistema.

Com o intuito de se fazer uma comparação entre os dados observados e simulados, foram realizadas simulações para os 2 casos descritos na seção 5.1.1. As tabelas a seguir mostram os valores encontrados no 1º e 2º caso, respectivamente:

Tabela 5.1: Simulação do Gerador 1 alimentando as cargas

	Tensão [V]	Ângulo	Potência Ativa [W]	Potência Reativa [var]
Gerador 1	220,0	0°	113,51	16,59
Gerador 2	-	-	-	-
Carga	214,72	-0,43°	110,94	15,37

Tabela 5.2: Simulação do Gerador 1 e Gerador 2 alimentando as cargas com potências equilibradas

	Tensão [V]	Ângulo	Potência Ativa [W]	Potência Reativa [var]
Gerador 1	220,0	0	61,87	28,04
Gerador 2	220,0	0,08°	70	10,76
Carga	216,74	-0,09°	130	37,92

5.1.3. Discussão dos Resultados da Análise Estática

A análise do comportamento estático do sistema será feita utilizando a tabela 5.3 que compara os valores medidos e os valores simulados de tensão na barra 3 e de potência na barra 1.

Tabela 5.3: Quadro de Comparações do Regime Permanente

	Caso 1			Caso 2		
Parâmetros	Medido	Simulado	Erro (%)	Medido	Simulado	Erro (%)
P_1 (W)	120	113,51	5,4	75	61,87	17,5
V_3 (V)	206,7	214,72	3,9	217,7	216,74	0,35

Comparando os valores experimentais com os computacionais, vimos que o parâmetro em que se tem o menor erro nos 2 casos é o de tensão na barra 3, mostrando que os voltímetros utilizados tem uma grande confiabilidade, pois o erro ficou na casa de 0,4 a 3,9%. Já nos 2 casos, vimos que os valores de potência medidos na barra 1 estão com erros relativamente grandes (na casa de 5 a 18%), mostrando assim que o wattímetros não são tão confiáveis. Essa característica faz com que todas as medidas sofram efeito cascata, aumentando ainda mais o erro.

Portanto, apesar de algumas incongruências nas medidas experimentais, principalmente as mensuradas nos wattímetros, podemos considerar que os resultados da análise estática foram satisfatórios.

5.2. Análise Dinâmica do Sistema

A análise dinâmica consiste no estudo do comportamento do sistema frente a uma perturbação. Nesse trabalho essa análise foi feita chaveando o motor de indução em dois casos:

- 1º Caso: somente o gerador 1 está alimentando o sistema.
- 2º Caso: os dois geradores estão alimentando o sistema.

Em cada um desses casos, foi analisado experimentalmente e computacionalmente o comportamento do gerador síncrono (G1) frente a essa perturbação, mensurando as tensões e correntes de armadura.

5.2.1. Dados Experimentais da Análise Dinâmica

No sistema montado no laboratório amostrou-se as formas de ondas trifásicas das correntes e tensões de armadura via osciloscópio, e depois tratou-se esses dados via *MATLAB*.

Para o primeiro caso, chaveia-se o motor de indução manualmente, e amostra as formas de ondas via osciloscópio. As figuras a seguir representam os comportamentos da tensão e da corrente, respectivamente:

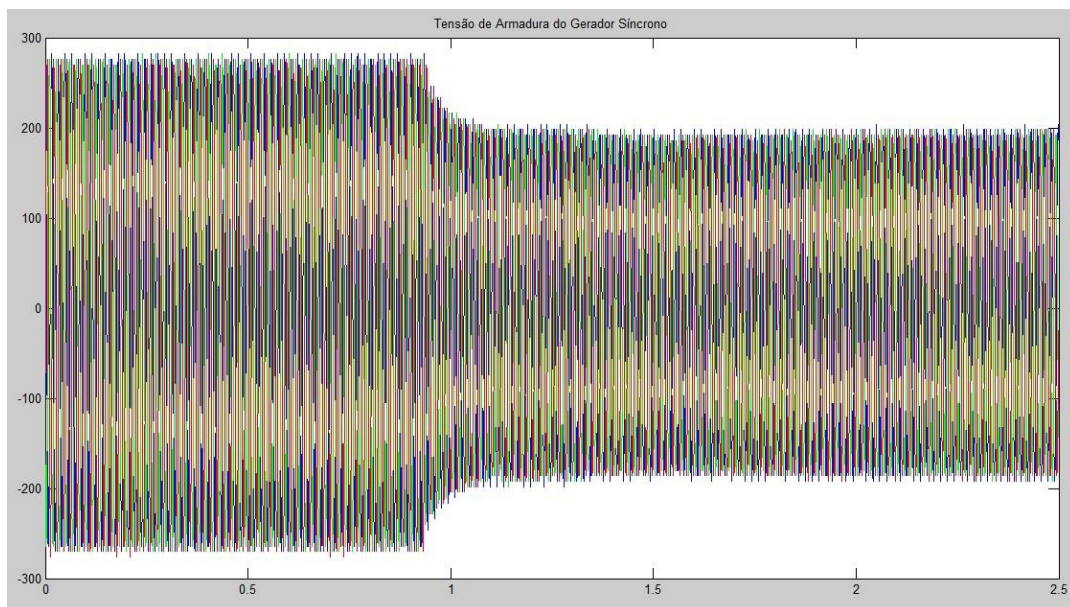


Figura 5.4: Análise Dinâmica da Tensão de Armadura no Gerador 1 (1º Caso)

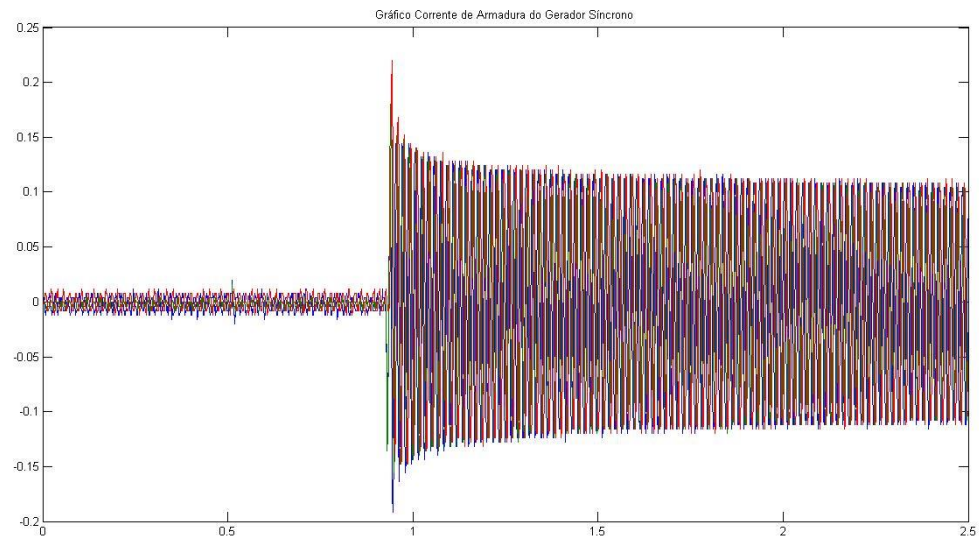


Figura 5.5: Análise Dinâmica da Corrente de Armadura no Gerador 1 (1º Caso)

Repetindo o mesmo procedimento para o segundo caso, temos que:

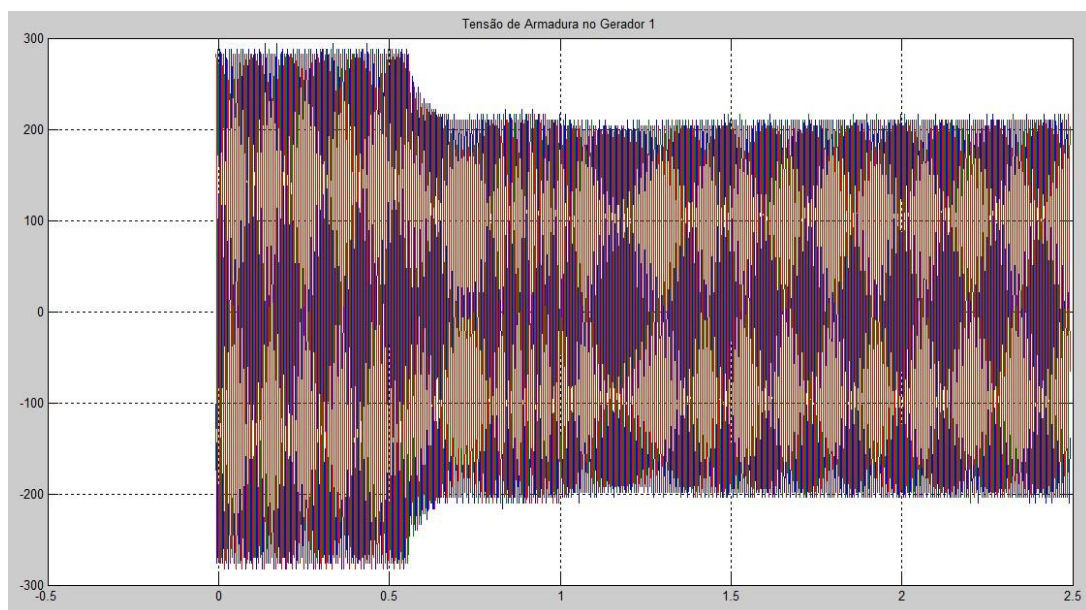


Figura 5.6: Análise Dinâmica da Tensão de Armadura no Gerador 1 (2º Caso)

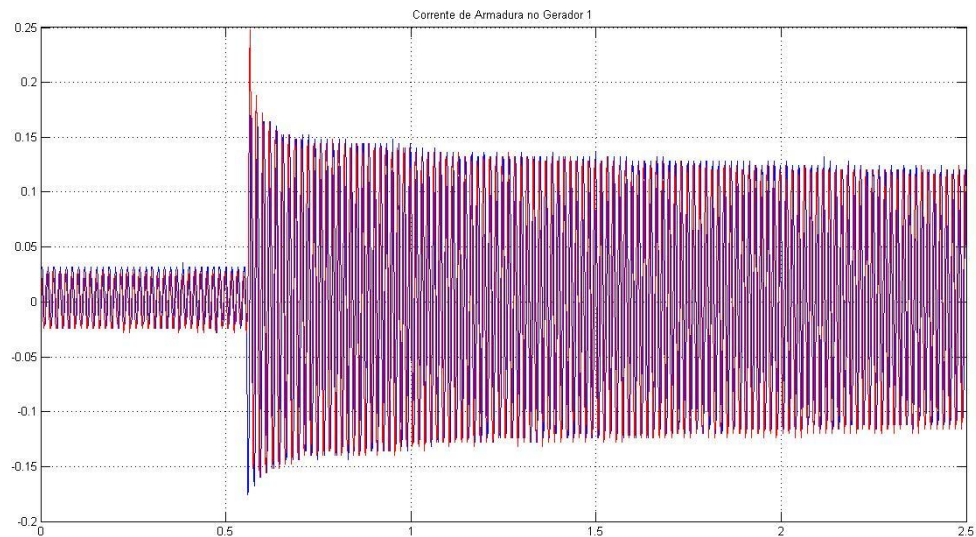


Figura 5.7: Análise Dinâmica da Corrente de Armadura no Gerador 1 (2º Caso)

5.2.2. Simulações Computacionais da Análise Dinâmica

A ferramenta *Simulink* do *MATLAB* será utilizada nas simulações computacionais desse sistema. O modelo construído nesse *software* a fim de simular esse sistema está representado na figura 30

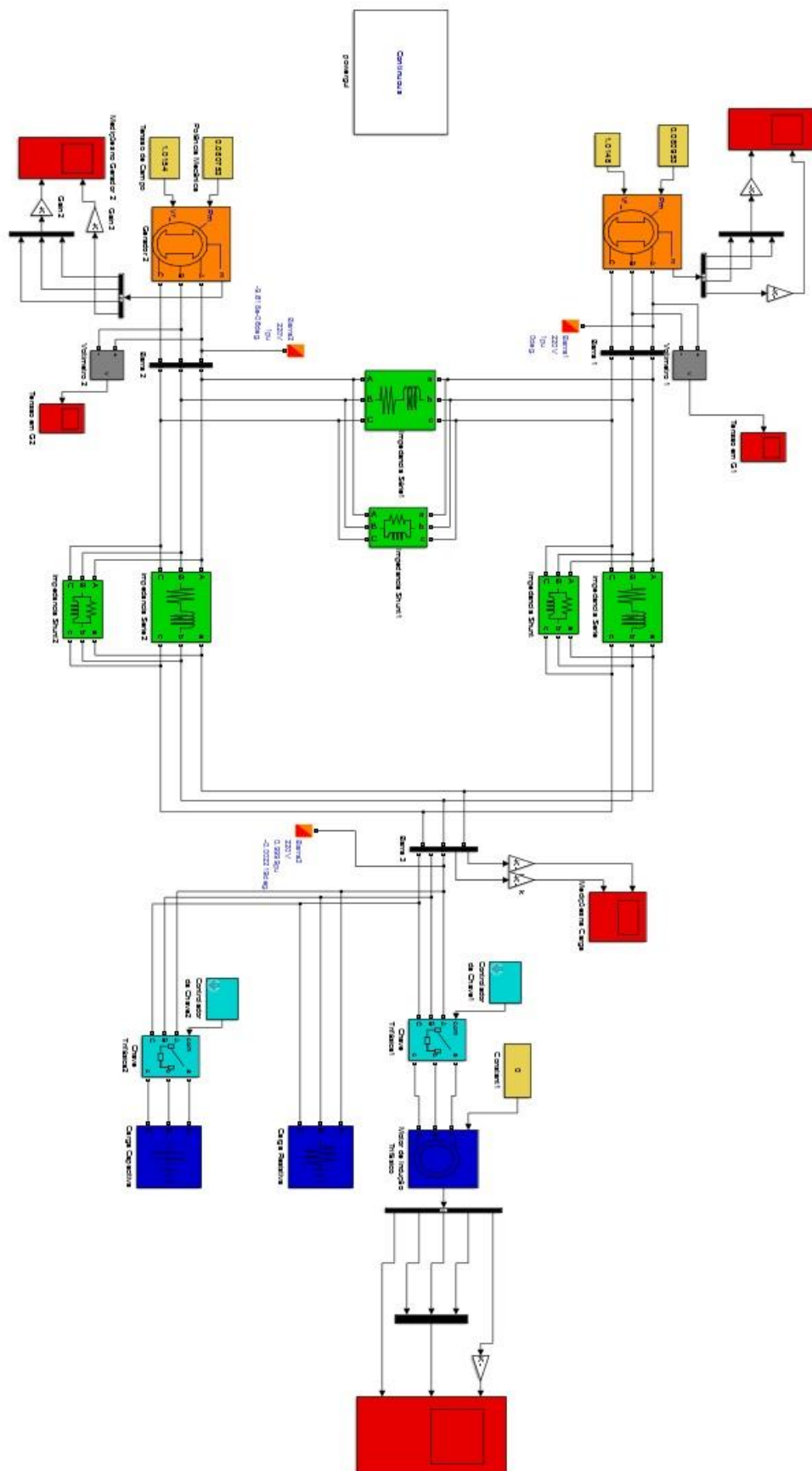


Figura 5.8: Circuito Equivalente do Sistema utilizado no *Simulink*

Para a análise dinâmica desse SEP, utilizamos como modelo do gerador síncrono o “Synchronous Machine pu Standard”, que tem como parâmetros:

Block Parameters: Synchronous Machine pu Standard

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 Advanced Load Flow

Nominal power, line-to-line voltage, frequency [Pn(VA) Vn(Vrms) fn(Hz)]:
[500 220 60]

Reactances [Xd Xd' Xd'' Xq Xq' Xl] (pu):
[1.7655, 0.9105, 0.1579, 0.6112, 0.001, 0.1469]

d axis time constants: Short-circuit

q axis time constants: Short-circuit

Time constants [Td' Td'' Tq''] (s):
[0.8285 0.0169 0.001]

Stator resistance Rs (pu):
0.0589

Inertia coefficient, friction factor, pole pairs [H(s) F(pu) p()]:
[3 0 2]

OK Cancel Help Apply

Figura 5.9: Parâmetros do Modelo do Gerador utilizado pelo *Simulink*

Já como o modelo do Motor de Indução Trifásico, utilizamos o modelo “Asynchronous Machine pu Units”, que tem como parâmetros:

Block Parameters: Asynchronous Machine pu Units

Asynchronous Machine (mask) (link)
Implements a three-phase asynchronous machine (wound rotor, squirrel cage or double squirrel cage) modeled in a selectable dq reference frame (rotor, stator, or synchronous). Stator and rotor windings are connected in wye to an internal neutral point.

Configuration Parameters Advanced Load Flow

Nominal power, voltage (line-line), and frequency [Pn(VA),Vn(Vrms),fn(Hz)]:
[500 220 60]

Stator resistance and inductance [Rs,Lls] (pu):
[0.0635 2.4168e-4]

Rotor resistance and inductance [Rr',Llr'] (pu):
[0.0329 2.4168e-4]

Mutual inductance Lm (pu):
0.0029

Inertia constant, friction factor, pole pairs [H(s) F(pu) p()]:
[3 0 2]

OK Cancel Help Apply

Figura 5.10: Parâmetros do Modelo do MIT utilizado pelo *Simulink*

Assim, para cada um dos dois casos adicionou-se uma chave trifásica na entrada do MIT programada para fechar após transcorrido 0,5 segundo de simulação.

Para o 1º caso temos que o comportamento do gerador será:

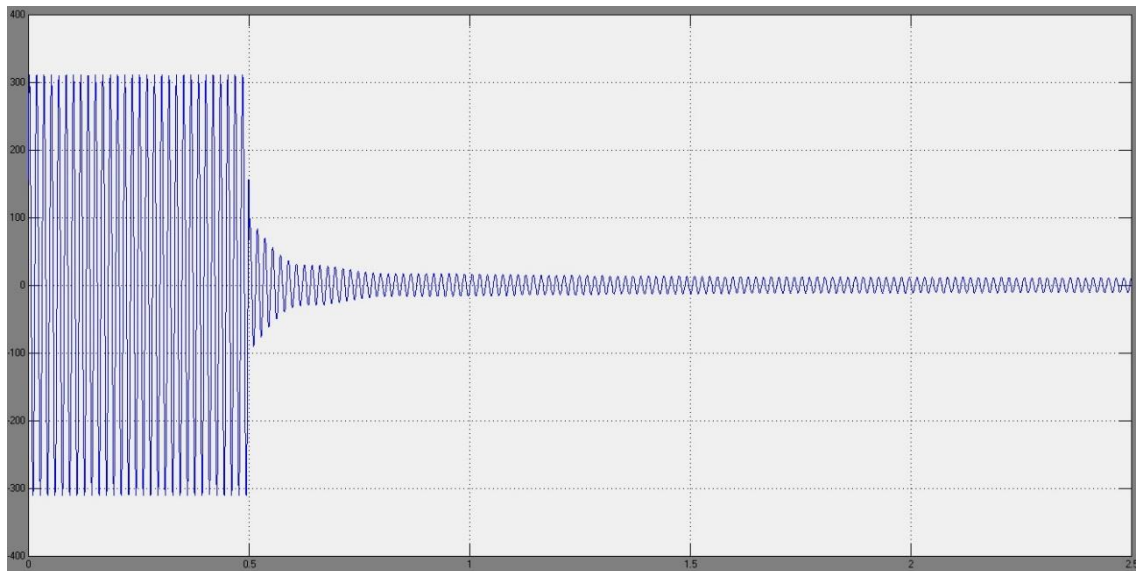


Figura 5.11: Comportamento da Tensão de Linha do Gerador no 1º Caso

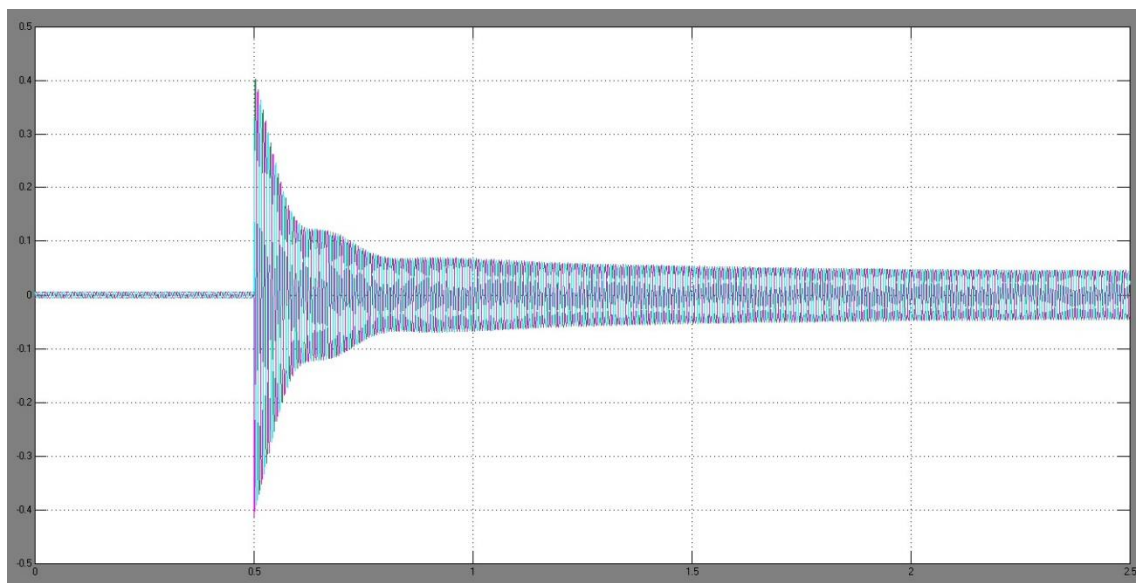


Figura 5.12: Comportamento da Corrente de Armadura do Gerador no 1º Caso

Já para o segundo caso, o comportamento do gerador síncrono 1 seria:

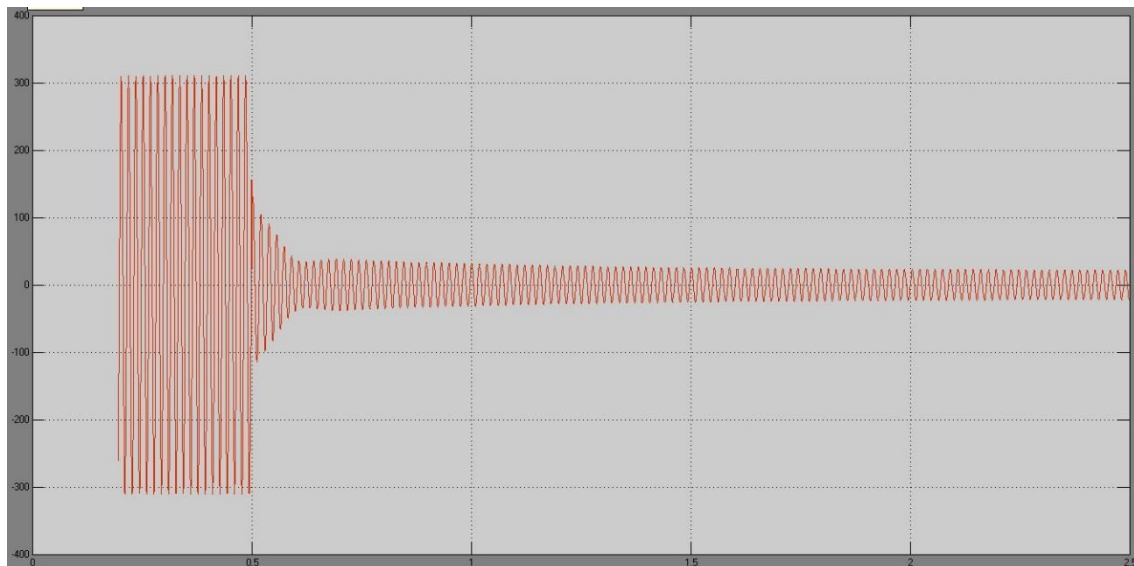


Figura 5.13: Comportamento da Tensão de Linha do Gerador no 2º Caso

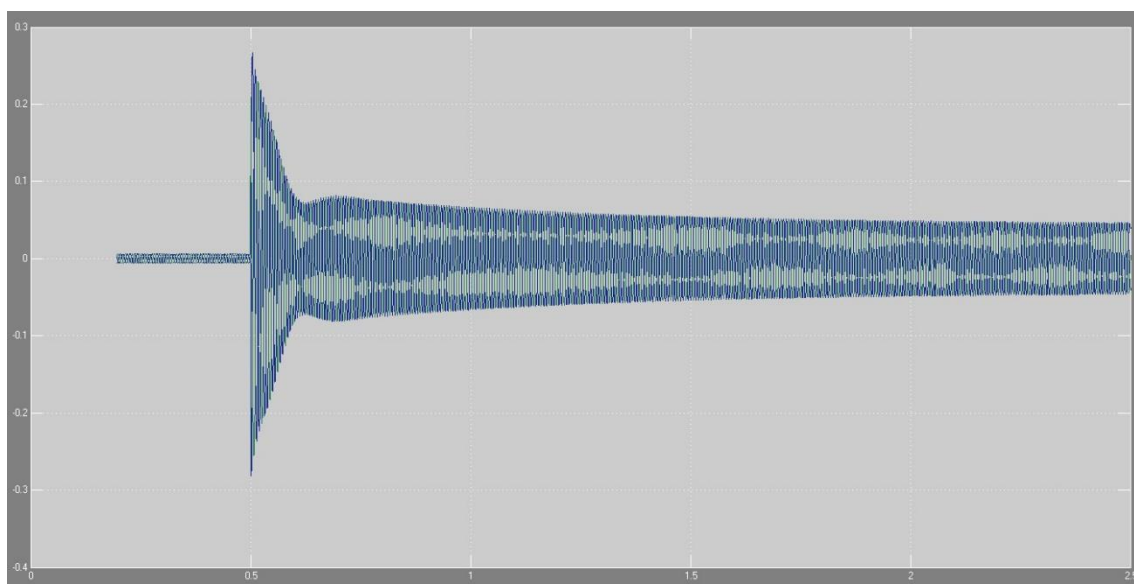


Figura 5.14: Comportamento da Corrente de Armadura do Gerador no 2º Caso

5.2.3. Discussão dos Resultados da Análise Dinâmica

Por último, analisar-se-á o comportamento dinâmico do sistema ao se chavear o motor de indução trifásico. Pode-se analisar que as formas de onda das correntes de armadura nos dois casos (1º caso: somente G1 alimentando o sistema/ 2º caso: G1 e G2 alimentando o SEP) tem um comportamento bem parecido: logo após o chaveamento, há um aumento grande da corrente e depois ela vai diminuindo até se estabilizar em um valor permanente.

Já em relação a tensão de armadura do gerador, vimos que o comportamento medido experimentalmente e o simulado são bem diferentes, pois no primeiro tem-se que a tensão decai bem menos do que no segundo. Isso acontece devido ao fato de que no sistema montado no laboratório, o gerador síncrono é acionado por um motor de corrente contínua, que, conseqüentemente, serve como um regulador de tensão para o gerador.

Já no sistema simulado temos que o gerador recebe um valor constante de torque mecânico, que é modificado de acordo com o fluxo de carga calculado pelo *Simulink*, portanto a sua tensão de armadura não é regulada, que fez com que nesse caso a tensão caísse tanto quando o MIT foi chaveado.

Assim, apesar de o comportamento das correntes de armadura terem sido bem parecido, tivemos que o comportamento das tensões de armaduras foram bem distintos, fazendo, portanto, com que a nossa análise dinâmica do SEP não tenha sido satisfatória.

Capítulo 6

6. Conclusões

Esse trabalho tratou da modelagem e da validação de um pequeno sistema elétrico de potência através da obtenção dos parâmetros dos elementos desse sistema, e, posteriormente, das análises estáticas e dinâmicas desse sistema.

Os parâmetros desse sistema foram obtidos analisando separadamente cada elemento, como por exemplo, os parâmetros do gerador síncrono que foram obtidos por alguns ensaios convencionais, tais como:

- Ensaio de curto-circuito e circuito-aberto em regime permanente.
- Ensaio de curto-circuito instantâneo.
- Ensaio de escorregamento.
- Teste de Potier.

Na parte da análise estática desse sistema, os resultados alcançados experimentalmente e computacionalmente foram próximos, apesar das imprecisões nas medidas.

Já na parte da análise dinâmica, o comportamento da tensão de armadura obtido experimentalmente é diferente do obtido computacionalmente. Isso pode ser devido ao fato de que no SEP físico tem um regulador de tensão (o motor CC) e já no SEP modelado no *Simulink* não se tem esse tipo de regulador, fazendo com que a tensão caia bastante frente a uma perturbação. Por outro lado, o comportamento da corrente de armadura foi o esperado.

Como sugestão para trabalhos futuros recomenda-se realizar os seguintes procedimentos a fim de se obter resultados ainda mais satisfatórios, como:

- Realização de ensaios a fim de se obter os parâmetros mecânicos do gerador síncrono e do motor de indução, pois ao modelar o SEP no *Simulink*, pede-se alguns parâmetros mecânicos dessas máquinas.
- Realização de mais casos a fim de se conhecer ainda mais o comportamento dinâmico do SEP, como por exemplo: retirada de um gerador, retirada do MIT ou a realização de uma falta no sistema.
- Modelagem de um regulador de tensão e/ou de um regulador de velocidade no modelo do *Simulink* a fim de se conhecer o comportamento dinâmico do SEP ao simulá-lo computacionalmente.

Referências Bibliográficas

- [1] IEEE (1995). “Guide test procedures for synchronous machines”, Technical report, Std 115-1995, Power Engineering Society.
- [2] IEEE (1996). “Standard Test Procedures for Polyphase Induction Motor and Generators”, Technical report, Std 112-1996, Power Engineering Society.
- [3] Cari, E. P. T., “Estimação dos parâmetros da máquina síncrona e seu sistema de excitação”, Tese de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2005.
- [4] Landgraf, T. G., “Modelagem e Estimação de Parâmetros de Geradores Síncronos via Análise de Sensibilidade de Trajetória”, Tese de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2014.
- [5] SISTEMA DE EXCITAÇÃO DE GERADORES SÍNCRONOS. Desenvolvido por Prof. Tit. Antônio Simões Costa, Grupo de Sistemas de Potência, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008. Disponível em: <<http://www.labspot.ufsc.br/~simoos/dincont/dc-cap5.pdf>>. Acesso em: 01 nov. 2016.
- [6] Stevenson, W. D., “Elementos de Análise de Sistemas de Potência”. 2ª Edição, McGraw-Hill Inc., 1986.
- [7] Fitzgerald, A. E.; Kingsley Jr., C.; Kusko, A., “Máquinas Elétricas”. 1ª Edição, McGraw-Hill Inc., 1975.
- [8] Chapman, S.J., “Fundamentos de Máquinas Elétricas”, 5ª Edição, McGraw-Hill Inc., 2013.
- [9] Beordo, L., “Determinação experimental dos parâmetros de um gerador síncrono via testes convencionais (*off-line*) e via técnica de análise de sensibilidade de trajetória (*on-line*)”, Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2014.
- [10] Ramos, R. A.; Alberto, L. F. C.; Bretas, N. G., “Modelagem de Máquinas Síncronas Aplicada ao Estudo de Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência”, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2008.
- [11] Jordão, R.G., “Máquinas Síncronas”, 2ª Edição, LTC/EDUSP, 2013.
- [12] Bezerra, Matheus C. S., “Métodos de estimação dos parâmetros mecânicos de geradores síncrono”, Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2016.

[13] de Carvalho, D. M., “Dimensionamento da potência mecânica de motores elétricos de indução trifásico gaiola pelo critério do tempo de aceleração”, Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2013.