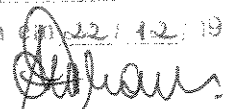


UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

Este exemplar corresponde a redação final
da tese defendida por Marcos Otácio
Prado Martins e aprovada
pela comissão julgadora em 22/12/1995.


ORIENTADOR

Dissertação Apresentada à
Faculdade de Engenharia Mecânica
Como Requisito Parcial à Obtenção do
Título de Mestre em Engenharia de Petróleo

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO COMPORTAMENTO
TRANSITÓRIO DO SISTEMA ELÉTRICO
DE PLATAFORMAS DE PETRÓLEO**

50/95

Autor: Marcos Otácio Prado Martins

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Morelato França

Co-Orientadora: Prof^a Dr^a Maria Cristina de Castro Cunha

Dezembro 1995

UNIVERSIDADE: BC
CAMPUS: T/UNICAMP
M366/P
27438
667/96
R\$ 11,00
25/04/96
CPD C.M.00027399-1

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

M366s Martins, Marcos Otácio Prado
Simulação computacional do comportamento transitório do sistema elétrico de plataformas de petróleo / Marcos Otácio Prado Martins.--Campinas, SP: [s.n.], 1995.

Orientadores: André Luiz Morelato França, Maria Cristina de Castro Cunha.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

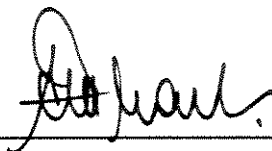
1. Engenharia ^{de} do petróleo. 2. Plataformas móveis de perfuração. 3. Indústria petrolífera - Equipamento e acessórios. 4. Sistemas de energia elétrica - Estabilidade. 5. Dinâmica. 6. Simulação (Computadores digitais). I. França, André Luiz Morelato. II. Cunha, Maria Cristina de Castro. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. IV. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

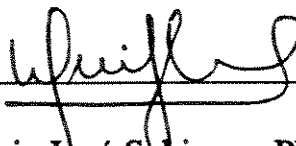
A dissertação “Simulação Computacional do Comportamento Transitório do Sistema Elétrico de Plataformas de Petróleo”, elaborada por Marcos Otácio Prado Martins foi aceita pela Subcomissão de Pós-Graduação em Engenharia de Petróleo como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Petróleo.

Campinas, 22 de dezembro de 1995

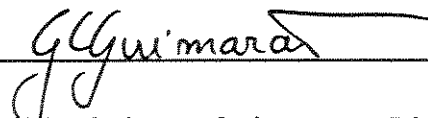
Banca Examinadora:



André Luiz Morelato França, Ph.D.



Denis José Schiozer, Ph.D.



Geraldo Caixeta Guimarães, Ph.D.

As minhas filhas Bruna e Hannah pelo carinho que me deram, mesmo nos períodos de ausência, e a Marisa pelo apoio e companheirismo.

**“Aceitar as idéias dominantes do momento
sem senso crítico é correr o risco de
afogar-se na própria covardia”
(Marcos Otácio)**

AGRADECIMENTOS

Ao André, pela valiosa orientação e apoio no desenvolvimento desse trabalho.

À Cristina Cunha, pelo apoio da sua valiosa co-orientação.

À equipe de estagiárias do laboratório de informática, pela paciência e dedicação no auxílio para sanar as dúvidas que tive na utilização destes equipamentos.

Aos engenheiros Antônio Claudio e Kelsen, pelo apoio recebido.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Petróleo, por terem de alguma forma colaborado neste trabalho.

Às equipes de operação e manutenção das plataformas Petrobrás-15 e Petrobrás-18, pelo apoio recebido durante a realização dos ensaios a bordo dessas embarcações.

Ao engenheiro Matias, pela amizade e apoio na realização deste trabalho.

À Petrobrás, pelo apoio e suporte recebidos.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo modelar e simular computacionalmente o comportamento transitório de sistemas de geração elétrica de plataformas marítimas de petróleo.

A modelagem dos componentes do sistema elétrico foi efetuada através da representação por modelos operacionais, usando-se funções de transferência organizadas na forma de diagramas de blocos, na forma adequada ao “software MATLAB”. Para os geradores síncronos e motores de indução utilizou-se modelo detalhados, sendo os geradores representados pelo modelo IV (estado subtransitório) e os motores pelo modelo de 5ª ordem (levado em consideração os transitórios do estator e rotor). Na representação dos reguladores de tensão utilizou-se os modelos tipo1 e tipo2 IEEE, enquanto que na representação das forças motrizes utilizou-se para a turbina a gás o modelo simplificado. No caso dos motores diesel foi empregada a técnica de identificação experimental de sistemas para obter a função de transferência agregada do conjunto gerador/motor/regulador de velocidade, dada a indisponibilidade de parâmetros fornecidos pelos fabricantes. Tanto para realizar a identificação quanto as simulações foi utilizado o “software MATLAB”

Nas simulações executadas para validar os modelos operacionais desenvolvidos neste trabalho foram utilizados dados experimentais dos sistemas de geração elétrica das Plataformas Petrobrás-15 e Petrobrás-18.

Os resultados de simulação obtidos foram satisfatórios, principalmente os obtidos com a identificação da função de transferência agregada do conjunto gerador/motor/regulador de velocidade. Conclui-se essa é uma alternativa válida para representação matemática da força motriz e regulador de velocidade, na ausência dos modelos ou parâmetros fornecidos pelo fabricante.

ABSTRACT

This work reports a comprehensive approach in modeling and simulating the electrical system transient behavior of offshore oil platforms. The modeling of system components is based on operational model representation using transfer functions. The system components that are modeled include diesel engines, gas turbines, synchronous generators, AVRs, speed governors and large induction motors. The synchronous machines are represented by a two-axis model including subtransient effects (model IV) and the induction motors are represented by a fifth-order model. The IEEE type 1 and Type 2 models are used to represent the automatic voltage regulators (AVR) and the gas turbines are represented by a simplified model. In the case of diesel-driven generators the diesel engine/speed governor/generator units are modeled as a block from experimental tests, due to the lack of reliable parameters to be furnished by manufactures. Identification techniques are used to obtain the diesel-driven generator/governor transfer functions from experimental data. The identification and simulation have been performed with the software Matlab. The approach has been tested on two offshore oil platforms Petrobrás-15 and Petrobrás-18, showing results that are in very good agreement with measured values.

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 Objetivos do trabalho | 1 |
| 1.2 Relevância econômica..... | 1 |
| 1.3 Sistemas elétricos industriais isolados | 2 |
| 1.4 Metodologia de abordagem | 4 |
| 1.5 Organização da tese..... | 5 |
| CAPÍTULO 2. MODELAGEM DE MÁQUINAS SÍNCRONAS | 6 |
| 2.1 Equações dinâmicas do rotor | 6 |
| 2.2 Modelo I (clássico)..... | 7 |
| 2.3 Modelo II..... | 8 |
| 2.4 Modelo III..... | 10 |
| 2.5 Modelo IV | 11 |
| 2.6 Representação por modelo operacional..... | 14 |
| CAPÍTULO 3 SISTEMAS DE EXCITAÇÃO E REGULADORES DE TENSÃO | 16 |
| 3.1 Sistema de excitação..... | 16 |
| 3.1.1 Sistemas diretos de excitação estáticos | 16 |
| 3.1.2 Sistemas indiretos de excitação | 17 |
| 3.1.2.1 Sistema de excitação CC | 17 |
| 3.1.2.2 Sistema de excitação CA | 17 |
| 3.2 Reguladores de tensão..... | 19 |
| 3.2.2 Modelo Tipo 1s | 23 |
| 3.2.3 Modelo Tipo 2 | 24 |
| 3.2.4 Modelo Tipo 3 | 24 |
| 3.2.5 Modelo Tipo 4 | 24 |
| 3.2.6 Função de saturação..... | 25 |
| CAPÍTULO 4. MOTORES DE INDUÇÃO | 26 |
| 4.1 Introdução..... | 26 |
| 4.2 Equações nas variáveis da máquina..... | 26 |
| 4.3 Equações nas variáveis de um sistema de referência arbitrário..... | 30 |
| 4.4 Representação dos motores de indução por modelo..... | 33 |

| | |
|--|-----------|
| CAPÍTULO 5. FORÇA MOTRIZ E REGULADORES DE VELOCIDADE..... | 36 |
| 5.1 Introdução..... | 36 |
| 5.2 Motores diesel..... | 36 |
| 5.3 Turbina a gás..... | 38 |
| 5.4 Reguladores de velocidade | 40 |
| 5.5 Modelagem | 40 |
| 5.5.1 Introdução..... | 40 |
| 5.5.2 Comportamento termodinâmico..... | 42 |
| 5.5.2.1 Modelo simplificado..... | 43 |
| 5.5.2.2 Modelo por partes..... | 44 |
| 5.5.2.3 Modelo de estado quase-estático | 44 |
| 5.5.2.4 Modelo totalmente dinâmico | 45 |
| 5.5.3 Reguladores de velocidade..... | 45 |
| 5.5.3.1 Reguladores de velocidade para motores a diesel..... | 45 |
| 5.5.3.2 Reguladores de velocidade para turbina de um eixo | 46 |
| 5.5.4 Modelo simplificado | 47 |
| 5.5.5 Diagrama de blocos para turbina de eixo simples..... | 48 |
| 5.6 Método de obtenção de função de transferência a partir do sinal de potência e frequência | 50 |
| | |
| CAPÍTULO 6. SISTEMA ELÉTRICO DA PLATAFORMA PETROBRAS 15 | 52 |
| 6.1 Introdução..... | 52 |
| 6.2 Descrição do sistema elétrico..... | 52 |
| 6.3 Identificação da função de transferência potência-frequência..... | 54 |
| 6.4 Obtenção dos parâmetros do motor de indução | 66 |
| 6.4.1 Estimativa inicial..... | 68 |
| 6.4.2 Ajuste de parâmetros | 69 |
| 6.5 Sistema elétrico completo da Petrobrás-15..... | 73 |
| 6.5.1 Ajuste dos parâmetros dos AVR's | 74 |
| 6.5.2 Verificação das curvas de frequência dos geradores G_3 e G_4 através da simulação da partida de duas bombas de lastro..... | 76 |
| 6.5.3 Alternativas para melhorar a resposta de frequência | 77 |
| 6.6 Conclusões dos resultados simulados na plataforma Petrobrás-15 | 82 |
| | |
| CAPÍTULO 7. APLICAÇÃO AO SISTEMA ELÉTRICO DA PLATAFORMA PETROBRÁS-18..... | 83 |
| 7.1 Introdução..... | 83 |
| 7.2 Descrição do sistema elétrico..... | 83 |
| 7.3 Representação da força motriz por modelos operacionais | 86 |
| 7.4 Ajuste dos parâmetros do AVR | 88 |
| 7.5 Simulação do sistema de geração da plataforma Petrobrás-18..... | 90 |
| 7.6 Conclusão | 96 |

| | |
|--|------------|
| CAPÍTULO 8. CONCLUSÕES E SUGESTÕES | 97 |
| 8.1 Conclusões..... | 97 |
| 8.2 Sugestões..... | 97 |
| REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA | 98 |
| APÊNDICE A - SISTEMA DE REFERÊNCIA | 101 |
| A.1 Introdução..... | 101 |
| A.2 Equações de transformação - Mudança de variáveis..... | 101 |
| A.3 Variáveis de circuito estacionário transformado em sistema de referência arbitrário | 102 |
| A.3.1 Elementos resistivos..... | 102 |
| A.3.2 Elementos indutivos..... | 103 |
| A.4 Sistemas de referência normalmente utilizados | 104 |
| A.5 Transformação entre sistemas de referência..... | 105 |
| APÊNDICE B - IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS | 107 |
| B.1 Introdução..... | 107 |
| B.2 “Software” MATLAB..... | 107 |
| B.3 Procedimento para identificação de sistemas | 107 |
| B.4 Modelos de identificação de sistemas | 108 |
| B.4.1 Introdução | 108 |
| B.4.2 Representação polinomial das funções de transferência..... | 109 |
| B.4.3 Estimativa de modelos paramétricos..... | 110 |
| B.4.4 Intervalo de amostragem..... | 111 |
| APÊNDICE C - BIBLIOTECA DE BLOCOS-112 | |
| C.1 Blocos básicos..... | 112 |
| C.2 Blocos do sistema elétrico da plataforma petrobrás-15..... | 114 |
| C.3 Blocos do sistema elétrico da plataforma Petrobrás-18..... | 118 |

NOMENCLATURA

- δ = ângulo relativo entre o rotor e a referência síncrona
 i'_{dr} = corrente rotórica do motor no eixo direto referida ao estator
 i'_{qr} = corrente rotórica do motor em quadratura referida ao estator
 φ'_{dr} = fluxo do rotor no eixo direto referido ao estator
 φ'_{qr} = fluxo do rotor no eixo em quadratura referido ao estator
 ω = velocidade angular elétrica do sistema de referência
 $\rho(\%)$ = “droop” do regulador de velocidade
 λ_{abc} = fluxo concatenado
 ω_b = velocidade base
 φ_d = fluxo no eixo direto
 φ_{ds} = fluxo do estator no eixo direto
 μ_o = permeabilidade
 φ_q = fluxo no eixo em quadratura
 φ_{qs} = fluxo do estator no eixo em quadratura
 ω_r = velocidade elétrica do rotor
 θ_r = deslocamento angular do rotor
 ω_r = velocidade do rotor
 ω_s = velocidade síncrona
 Δ_{VT} = erro de tensão terminal do gerador.
 E'_{d} = tensão transitória de eixo direto
 E'_{q} = tensão transitória de eixo em quadratura
 E''_{q} = tensão subtransitória de eixo em quadratura
 E''_{d} = tensão subtransitória de eixo direto
 E_d = tensão síncrona de eixo direto
 E_{FD} = tensão terminal da excitatriz (aplicada no campo do gerador)
 E_q = tensão síncrona de eixo em quadratura
 g = espaço de entreferro
 $G(p)$ = admitância operacional
 H = constante de inércia em segundos
 i_{abc} = correntes de linha (i_a , i_b e i_c)
 I_d = corrente de eixo direto
 i_{ds} = corrente do estator do motor no eixo direto
 I_{FD} = corrente de campo do gerador
 I_q = corrente de eixo em quadratura
 i_{qs} = corrente do estator do motor em quadratura
 I_t = corrente terminal
 K_a = ganho do regulador
 K_e = constante de tempo da excitatriz relacionada ao campo de auto excitação
 K_f = ganho do circuito estabilizador do regulador
 K_i = ganho do circuito de corrente do sistema tipo 3
 K_p = ganho do circuito de tensão do sistema tipo 3 ou tipo 1s
 K_v = aumento rápido (“lower contact setting”), sistema tipo 4
 l = comprimento axial
 L_a = indutância de armadura
 L_{fd} = indutância de campo
 L_{kd} = indutância dos enrolamentos amortecedores no eixo direto
 L_{kq} = indutância dos enrolamentos amortecedores no eixo em quadratura
 L_{lr} = indutância de dispersão do rotor

L_{ls} = indutância de dispersão do estator
 L_{md} = indutância mútua de eixo direto entre armadura, campo e enrolamentos amortecedores
 L_{mq} = indutância mútua de eixo direto em quadratura entre armadura, campo e enrolamentos amortecedores
 L_{mr} = indutância mútua do rotor
 L_{ms} = indutância mútua do estator
 N_r = número de espiras do rotor
 N_s = número de espiras do estator
 p = operador $\frac{d}{dt}$
 P_e = potência elétrica no entreferro
 P_m = potência mecânica
 r = raio médio do entreferro
 R_a = resistência de armadura
 R_{fa} = resistência de campo
 R_{kd} = resistência dos enrolamentos amortecedores no eixo direto
 R_{kq} = resistência dos enrolamentos amortecedores no eixo em quadratura
 S_E = função de saturação da excitatriz
 $T_{,d}$ = constante de tempo transitória de eixo direto com circuito em curto-circuito
 $T_{,do}$ = constante de tempo transitória de eixo direto com circuito aberto
 $T_{,qo}$ = constante de tempo transitória de eixo em quadratura com circuito em aberto
 $T_{,d}''$ = constante de tempo subtransitória de eixo direto com circuito em curto-circuito
 $T_{,do}''$ = constante de tempo subtransitória de eixo direto com circuito aberto
 $T_{,q}''$ = constante de tempo subtransitória de eixo em quadratura com circuito em curto-circuito
 $T_{,qo}''$ = constante de tempo subtransitória de eixo em quadratura com circuito aberto
 T_1, T_2, \dots, T_n = constante de tempo
 T_A = constante de tempo do amplificador do regulador
 T_E = constante de tempo da excitatriz
 T_e = torque elétrico
 T_F = constante de tempo do circuito estabilizador do regulador
 T_{F1}, T_{F2} = constante de tempo do circuito estabilizador do regulador (sistema de retificador rotativo)
 T_{kd} = constante de tempo de eixo direto do circuito de amortecimento
 T_l = torque de carga
 T_{qo} = constante de tempo de eixo em quadratura com circuito aberto
 T_R = constante de tempo do filtro de entrada do regulador
 T_{RH} = constante de tempo do reostato, sistema tipo 4
 V_R = tensão de saída do regulador
 V_{REF} = ajuste de tensão
 V_{RH} = ajuste do reostato de campo
 V_{Rmax} = máximo valor de V_R
 V_{min} = mínimo valor de V_R
 V_t = tensão terminal
 V_T = tensão terminal do gerador
 V_{THEV} = tensão obtida pela soma vetorial do potencial e sinal de corrente, sistema tipo 3
 X'_l = reatância de dispersão do rotor referido ao estator
 $X'_{tr} = X'_m + X'_{tr}$
 X'_q = reatância transitória de eixo em quadratura

X''_q = reatância subtransitória de eixo em quadratura
 $X_d(p)$ = impedância operacional de eixo direto
 X_{ls} = reatância de dispersão do estator
 X_m = reatância de magnetização
 X_q = reatância síncrona de eixo em quadratura
 $X_q(p)$ = impedância operacional de eixo em quadratura
 $X_{ss} = X_m + X_{lr}$

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Objetivos do trabalho

O objetivo deste trabalho é modelar e simular o comportamento transitório de sistemas de geração elétrica de plataformas de petróleo, cujas forças motrizes são turbinas a gás e/ou motores diesel. O conhecimento da resposta dinâmica desses sistemas, sob a influência de vários distúrbios, requer uma representação matemática que relacione as variáveis dinâmicas desse sistema, seus componentes e sua forma de interligação. Essa representação matemática aparece na forma de equações diferenciais e algébricas.

1.2 Relevância econômica

Os aspectos do custo operacional de turbinas a gás é abordado em Wade [30], onde quantifica-se a contribuição da força motriz no custo operacional (manutenção e operação) por kW gerado, o que pode ser utilizado como referência para o caso de plataformas marítimas que utilizam esse tipo de força motriz.

No caso específico da utilização de motores diesel como força motriz, e com base nos dados fornecidos por DPSE/SUPLAT/SEPRM (1993), para estimativa de custo diário de operação e manutenção de motores diesel EMD, verifica-se que o consumo de óleo diesel é o componente que causa maior impacto no custo de operação/manutenção, conforme visto na Tabela 1.2-1.

Tabela 1.2-1 Custo diário de um motor EMD

| Componente | Valor (US\$) | Percentual (%) |
|---|----------------|------------------|
| Depreciação | 112.50 | 7,81 |
| Óleo lubrificante | 80.69 | 5,61 |
| Material de reposição | 124.84 | 8,66 |
| Contrato para manutenção geral ("overhaul") | 51.27 | 3,56 |
| Óleo diesel | 1,071.36 | 74,37 |
| Total | 1,440.66 | 100,00 |

Obs:

1. O consumo de óleo diesel foi calculado baseado no consumo médio histórico de oito plataformas em operação normal de produção, completação ou perfuração (248l/dia)
2. Custo de óleo diesel US\$ 0.18 p/l.

Com base nos dados apresentados, tem-se o custo de óleo diesel para um motor conforme valores apresentados na Tabela 1.2-2

Tabela 1.2-2 Consumo de diesel para um motor EMD

| | |
|----------------|---|
| Consumo diário | $248 \text{ l/h} \times 24 \text{ h} = 5.952 \text{ l/dia}$ |
| Custo diário | $5,952 \times 0.18 = \text{US\$ } 1,071.36$ |
| Custo anual | $1,071 \times 360 = \text{US\$ } 385,689.60$ |

Supondo que um motor diesel permaneceu no barramento durante 4,8 horas/dia (20% de 24 horas) sem necessidade, durante o período de um ano nas 17 plataformas semi-submersíveis de propriedade da Petrobrás, ter-se-á um custo operacional anual adicional de :

$$17 \times (0.2 \times 385,689.60) = \text{US\$ } 1,311,344.00$$

Portanto a elaboração de uma modelagem confiável, a partir da qual seja possível determinar as limitações da geração de energia elétrica de cada unidade, proporcionará diretamente uma redução substancial no custo operacional dessa unidade através da utilização otimizada de seu sistema de geração.

Além disso, conhecendo-se devidamente a capacidade e limitações do sistema de geração de energia elétrica de uma plataforma pode-se evitar a ocorrência de desligamentos indevidos (“blackout”), através do planejamento da entrada dos maiores motores de indução e mantendo-se simultaneamente a otimização na utilização dos grupos geradores.

Por outro lado, para novos projetos, plataforma nova ou conversão de unidades existentes, essa modelagem poderá ser utilizada para efetuar melhor dimensionamento do sistema de geração.

1.3 Sistemas elétricos industriais isolados

A função das plataformas de produção de óleo (petróleo) “offshore”, caracterizada pela atividade de perfuração e separação de óleo e gás, pode ser considerada como única e portanto não há diferenças relevantes no sistema de geração de plataformas que desenvolvem essas atividades.

Como todo sistema de geração o nível de tensão utilizado é fator determinante na sua caracterização, sendo que em Bromhead [17] é efetuada uma comparação entre o padrão adotado no Reino Unido (“United Kingdom”) e USA, a qual está reproduzida na Tabela 1.3-1

Tabela 1.3-1 Padrões de tensão

| | | | | | | |
|-----|---------|---------|-------|-------|-------|-------|
| UK | 11.0 KV | 3.30 KV | 415 V | ----- | ----- | ----- |
| USA | 13.8 KV | 4.16 KV | 600 V | 480 V | 220 V | 120 V |

Deve ser observado que existe uma diferença entre a prática de declaração de nível de tensão adotada por UK e USA. No sistema UK a tensão de circuito aberto no “tap” nominal do transformador é diferente do valor nominal declarado do sistema, por exemplo, um transformador de 3,43 KV/433 V é conectado a barramentos cuja tensão nominal declarada é 3,3 KV e 415 V.

No sistema americano o valor de tensão de circuito aberto no tap nominal é o mesmo do valor declarado dos barramentos aos quais o circuito primário e secundário estão conectados.

Nas plataformas que serão modeladas e simuladas neste trabalho o padrão adotado é o americano.

Os grupos geradores desses sistemas elétricos são caracterizados como geração principal e geração essencial.

A geração principal alimenta as cargas inerentes ao processo e que não são consideradas como essenciais ou de emergência. A geração essencial alimenta as cargas essenciais necessárias para a partida do sistema de geração principal, segurança da embarcação e salvaguarda da vida humana. Nos sistemas de pequeno porte, de capacidade instalada menor que 10 MVA, é comum ter-se as cargas essenciais conectadas a um gerador denominado “gerador de emergência” e nos sistemas de maior capacidade pode-se ter também, além dos geradores essenciais (“auxiliares”), um gerador de emergência onde estarão conectadas as cargas responsáveis pela salvaguarda da vida humana. Para os geradores essenciais e geradores de emergência a força motriz utilizada é sempre o motor diesel, devido à facilidade de partida e independência do processo para suprimento do combustível. Nas gerações de pequeno porte e plataformas de perfuração, a geração principal também utiliza motores diesel como força motriz.

Os problemas de operação associados a sistemas elétricos isolados são distintos daqueles encontrados em grandes sistemas interligados em rede. Stewart [25] classificou os problemas de suprimento de energia elétrica em uma planta de processo (refinaria e/ou plataforma) em três grandes áreas: (1)nível de tensão e oscilação, (2)capacidade insuficiente para a partida de motores e (3)os problemas de transitórios na tensão. Em complemento a essa classificação, no caso específico de plataformas, incluem-se as variações de frequência durante transitórios de carga. De fato, certos distúrbios, como por exemplo a partida de um motor de indução, irão causar uma variação de frequência e voltagem muito maior nos sistemas isolados que em um sistema interligado. Isto é explicado por uma rede de transmissão muito compacta e pelo tamanho de carga relativamente grande quando comparado com a capacidade de geração do sistema isolado. Esse fato resulta na necessidade de maior precisão na representação computacional dos componentes de um sistema isolado, pois a atuação de cada um pode ser decisiva no comportamento dinâmico desse sistema.

No caso de sistemas elétricos de plataformas marítimas de perfuração, além da partida de motores de indução mencionados anteriormente, tem-se a aceleração e desaceleração de grandes motores “CC”, que poderão afetar o sistema de geração, sendo portanto cargas importantes no estudo do comportamento dos sistemas elétricos dessas plataformas.

Em sistemas elétricos industriais e, principalmente, em sistemas isolados, os principais objetivos de um estudo dinâmico são:

- verificar a adequação dos sistemas de excitação e regulação de tensão;
- avaliar o impacto de carga elétrica nas máquinas motrizes que acionam os geradores;
- investigar o efeito da partida de grandes motores no sistema;
- avaliar o desempenho dos dispositivos de proteção;
- investigar o efeito de abertura da interligação com a concessionária quando operando em paralelo;
- investigar o efeito da perda de parte da geração quando em operação isolada;
- avaliar a estabilidade dos geradores e motores síncronos;
- analisar a possibilidade de reaceleração dos motores assíncronos em operação.

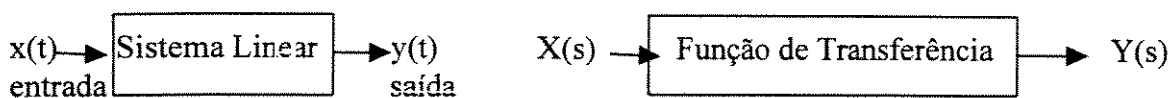
1.4 Metodologia de abordagem

Adotou-se neste trabalho a modelagem dos componentes do sistema elétrico através da representação por modelos operacionais, usando-se funções de transferência no domínio da frequência (transformada de Laplace), que serão organizadas na forma de diagramas de blocos.

Para encontrar a função de transferência de um determinado componente do sistema parte-se do modelo matemático, o qual é representado pelo conjunto de equações diferenciais e algébricas, lineariza-se esse modelo e aplica-se a transformada de Laplace no conjunto de equações.

Pode-se definir a função de transferência de um sistema linear como sendo a razão entre a transformada de Laplace da variável de saída (função resposta) e a transformada de Laplace da variável de entrada (função excitação).

Na fig. 1.4-1 observa-se esquematicamente essa representação, onde $X(s)$ e $Y(s)$ são as transformadas de Laplace de $x(t)$ e $y(t)$, respectivamente.



$$FT = \frac{Y(s)}{X(s)} = G(s)$$

figura 1.4-1 Representação esquemática da definição de função de transferência

Uma função de transferência é uma descrição das relações dinâmicas entre as variáveis de entrada e saída e descreve o comportamento dinâmico do sistema sem entrar em detalhes internos.

O conjunto de funções de transferência dispostos na forma de diagrama de blocos constituem um modelo operacional.

As máquinas síncronas (geradores) e os motores assíncronos serão representados pelas suas equações diferenciais e algébricas sob a forma de modelos operacionais decompostos em diversas funções de transferência que constituem um complexo diagrama de blocos. Já os reguladores de velocidade (“governor”) e de tensão (AVR), bem como os motores diesel/turbinas serão representados por modelos operacionais agregados, ou seja, apenas representam matematicamente a função de transferência total entre a entrada e saída desses componentes como um todo.

Na impossibilidade do fornecimento dos parâmetros por parte do fabricante, como no caso dos motores diesel e reguladores de velocidade, usa-se identificação experimental para obter os modelos operacionais. A metodologia de identificação de sistemas é efetuada utilizando-se funções do “software” Matlab conforme descrito no Apêndice B e Capítulo 6.

As simulações para verificar o comportamento dinâmico dos sistemas elétricos abordados serão efetuadas utilizando-se o “software” Matlab através do “Simulink” .

O Matlab é um ambiente de computação técnica de alta performance para computação numérica e visualização. O nome Matlab é originado de “matrix laboratory” e foi originalmente escrito para dar livre acesso a “software” matricial desenvolvido pelos projetos “Linpack e Eispack”, que em conjunto representam o estado da arte do “software” para computação matricial. O Matlab possui também um conjunto de aplicações para soluções de problemas específicos que são denominados “toolboxes” (caixas de ferramentas). Áreas em que os “toolboxes” estão disponíveis incluem processamento de sinais, projeto de sistemas de controle, simulação de sistemas dinâmicos, identificação de sistemas, redes neurais e outras. Em aplicações industriais, Matlab é utilizado na solução de problemas práticos de engenharia e matemática. As funções do Matlab podem ser representadas em diagramas de blocos e simuladas utilizando-se o “Simulink”. O “Simulink” é um programa para simulação de sistemas dinâmicos, usado como uma extensão do Matlab.

As vantagens na utilização do Matlab para simulações de sistemas dinâmicos são:

- permitir manipular facilmente diagramas de blocos de função de transferência;
- permite simulação automática usando integração numérica;
- permite visualização gráfica das variáveis;
- pode ser instalado em microcomputadores na própria plataforma marítima.

As cargas, excetuando-se os motores que terão as partidas simuladas, serão representadas sob a forma de potência constante (módulo mecânico) e corrente constante (módulo de tensão).

Todo o estudo será efetuado para as grandezas observadas no barramento principal, ou seja, no barramento de geração e, por isso, os valores das impedâncias dos cabos serão desprezadas, bem como não será necessário representar os transformadores e circuitos de distribuição, simplificação que não implica em erros significativos, conforme verifica-se em Tsao [29].

1.5 Organização da tese

Nos Capítulos 2,3,4 e 5 será desenvolvida a modelagem de máquinas síncronas, sistemas de excitação, motor de indução e força motriz/regulador de velocidade, respectivamente. No Capítulo 6 aplicar-se-á os modelos definidos nos capítulos anteriores para a representação por modelo operacional e simulação do sistema de geração da plataforma Petrobrás-15. Nesse capítulo será também efetuada a identificação da função de transferência agregada do regulador de velocidade/motor diesel/gerador. No Capítulo 7 será tratada a representação por modelo operacional e simulação do sistema elétrico da plataforma Petrobrás-18, com geração por turbinas a gás. E por fim, no Capítulo 8 serão apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros

CAPÍTULO 2. MODELAGEM DE MÁQUINAS SÍNCRONAS

Nos modelos de máquinas síncronas apresentados neste capítulo, as seguintes hipóteses foram adotadas:

- despreza-se a saturação magnética;
- representa-se somente a frequência fundamental; assimetrias (deslocamentos CC), correntes e tensões harmônicas são desprezadas;
- usam-se componentes simétricas na representação de condições desequilibradas;
- despreza-se o efeito das variações de velocidade da máquina sobre a tensão gerada;
- usa-se o sistema de eixos d-q fixos no rotor para a representação das equações (referencial de Park);
- despreza-se a resistência de estator.

Mesmo incluindo-se todas essas hipóteses simplificadoras, as equações das máquinas síncronas ficam ainda muito complexas, tornando-se conveniente introduzir simplificações dependendo do tipo de estudo a ser feito e da distância elétrica da máquina em relação ao distúrbio (defeito ou manobra).

Partindo-se das equações nodais complexas da máquina síncrona e introduzindo algumas simplificações adicionais, chega-se a quatro modelos que serão apresentados nas Seções 2.2 a 2.5.

2.1. Equações dinâmicas do rotor

As duas equações diferenciais que descrevem o comportamento dinâmico do rotor são:

$$p\omega = (\omega_s / 2H) (P_m - P_e) \quad (2.1)$$

$$p\delta = \omega_r - \omega_s \quad (2.2)$$

onde:

P_m = potência mecânica

P_e = potência elétrica no entreferro

ω_s = velocidade síncrona

H = constante de inércia em segundos

δ = ângulo relativo entre o rotor e a referência síncrona

ω_r = velocidade elétrica do rotor

$p\omega$ = derivada de ω em relação ao tempo

$p\delta$ = derivada de δ em relação ao tempo.

2.2 Modelo I (clássico)

É o modelo mais utilizado face a sua simplicidade, facilidade de utilização e de obtenção dos dados. Além das hipóteses básicas já citados, assume-se que:

- o fluxo concatenado com o campo permanece constante em magnitude durante o transitório;
- o efeito dos enrolamentos amortecedores é desprezível;
- não se considera a saliência transitória, ou seja:

$$X'_q = X_q = X'_d.$$

Os únicos dados necessários para este modelo são a reatância transitória de eixo direto (X'_d) e a inércia combinada do gerador e da força motriz (turbina ou motor a diesel).

De acordo com o resultado das equações de Park descritas em Kimbark [18] tem-se :

$$E'_d = 0$$

$$E'_q \angle \delta = V_t \angle \theta + j X'_d \cdot \vec{I}_t \quad (2.3)$$

Como o efeito dos enrolamentos amortecedores não é representado e a hipótese de fluxo concatenado constante é válida para um período limitado de tempo, o modelo é adequado somente para avaliar a primeira oscilação da estabilidade transitória.

As Figs. (2.2-1) e (2.2-2) mostram o circuito equivalente e o diagrama fasorial do modelo clássico (I).

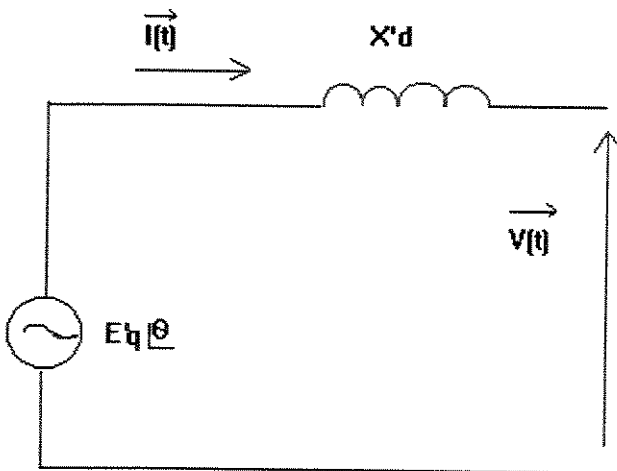


Figura 2.2-1 - Circuito equivalente do modelo clássico

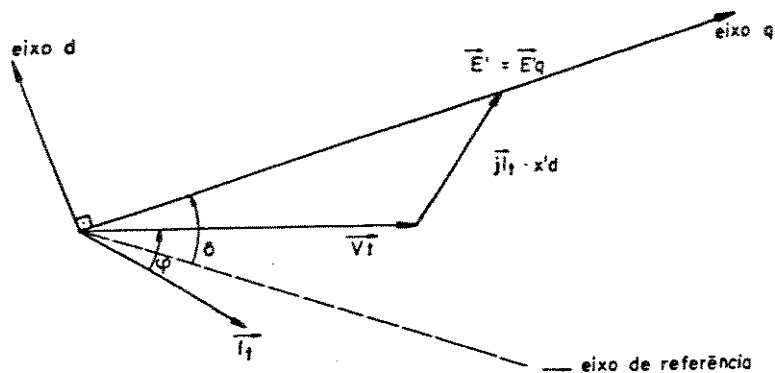


Figura 2.2-2 - Diagrama fasorial do modelo clássico (I)

Uma das grandes limitações do modelo clássico é o fato que ele não pode ser usado para analisar os efeitos da excitação sobre a estabilidade.

2.3 Modelo II

Este modelo é conhecido como modelo de um eixo (“one-axis model”) Fouad [11].

Neste modelo tem-se tensões transitórias nos eixos d e q , sendo que:

$$pE'_d = 0$$

$$E'_q = \text{variável}$$

No modelo clássico (I) tinha-se:

$$E'_d = 0$$

$$E'_q = \text{constante.}$$

Além das hipóteses básicas feitas no início deste capítulo, tem-se ainda que o efeito dos enrolamentos amortecedores é desprezado.

Este modelo pode ser representado em termos de enrolamentos conforme mostrado na Fig. 2.3-1.

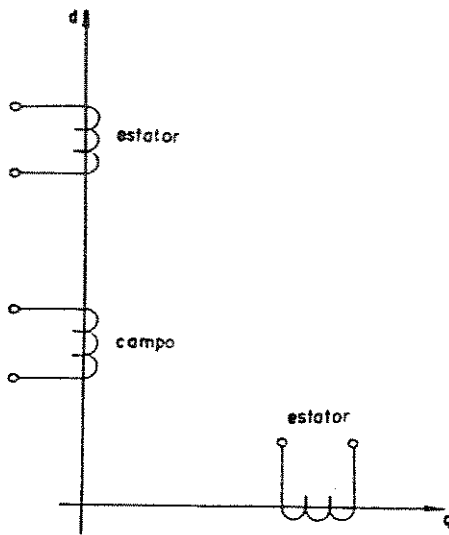


Figura 2.3-1 - Enrolamentos da máquina síncrona representada com modelo II

De acordo com Kimbark [18], as equações básicas para este modelo são:

$$E'_q = V_q - x'_d \cdot I_d \quad (2.4)$$

$$E'_d = V_d + x'_q \cdot I_q \quad (2.5)$$

$$pE'_q = 1/T'_{d0} \cdot (E'_q - (x_d - x'_d) \cdot I_d - E_{fd}) \quad (2.6)$$

onde : E_{fd} = tensão de campo do gerador

O diagrama fasorial para este modelo é mostrado na Fig. 2.3-2.

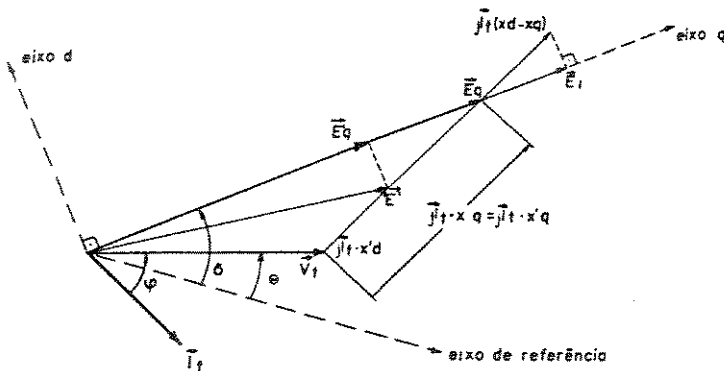


Figura 2.3-2 - Diagrama fasorial para o modelo II

Além dos dados necessários ao modelo I é necessário ter os seguintes dados para utilizar o modelo II:

- X_d : reatância síncrona de eixo direto ;
- X_q : reatância síncrona de eixo em quadratura, ($X'_q = X_q$); e
- T'_{d0} : constante de tempo transitória de eixo direto com estator aberto.

Este é o modelo mais simples que inclui o efeito da excitação sobre o comportamento da máquina.

2.4 Modelo III

Este modelo, conhecido como modelo de dois eixos ("two-axis model") Fouad [11], é utilizado para representar máquinas de polos lisos onde o efeito de amortecimento produzido pelas correntes induzidas no ferro (correntes de Foucault) é considerado.

Além das hipóteses básicas feitas na introdução, tem-se ainda que o efeito de amortecimento produzido no eixo direto é desprezado. Os efeitos de amortecimentos produzidos pelas correntes que circulam nos circuitos do ferro no eixo em quadratura são representados por um circuito equivalente cujos parâmetros são obtidos com correntes de rotor na frequência de 1 Hertz; esta frequência é típica de oscilação entre unidades geradoras.

Para este modelo tem-se:

E'_d : variável

E'_q : variável

No modelo II tinha-se :

$pE'_d = 0$

E'_q : variável

A vazio todo o efeito de amortecimento é produzido pelos circuitos do ferro, localizados no eixo em quadratura; a plena carga os circuitos do ferro no eixo q continuam a proporcionar a maior parte do amortecimento, sendo o efeito complementado pelos circuitos do ferro no eixo d.

Este modelo é representado em termos de enrolamentos conforme Fig. 2 4-1.

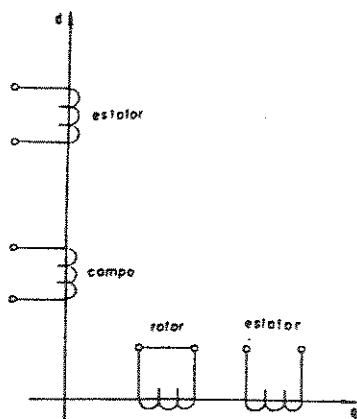


Figura 2.4-1 - Enrolamentos da máquina síncrona representada com modelo III

Além dos dados necessários ao modelo II são necessários:

- X'_q : reatância transitória de eixo em quadratura; e
- T'_{q0} : constante de tempo transitória de eixo em quadratura com o estator em aberto.

De acordo com Kimbark [18] as equações diferenciais para este modelo são:

$$pE'_q = -\frac{(E'_q - (X'_d - X'_d).I_d - E_{fd})}{T'_{d0}} \quad (2.7)$$

$$pE'_d = -\frac{E'_q + (X'_q - X'_q).I_q}{T'_{q0}} \quad (2.8)$$

O fato de ter-se tensões variáveis nos dois eixos justifica a designação de modelo de dois eixos.

O diagrama fasorial que representa este modelo é o mesmo do modelo II (fig. 2.3-2).

2.5 Modelo IV

Este modelo, denominado como completo Fouad [11], incorpora os efeitos do campo, transitórios e subtransitórios, incluindo portanto, os enrolamentos amortecedores propriamente ditos. Assumindo que o efeito de desprezar o transitório no estator é irrelevante para o comportamento dinâmico da máquina, pode-se representar a máquina através dos dois circuitos equivalentes das figs. 2.5-1a e 2.5-1b Guimarães [14]:

Na Fig. 2.5.1: R_a , R_{fd} , R_{kd} e R_{kq} são as resistências de armadura, campo e enrolamentos amortecedores nos eixos d e q, respectivamente; L_a , L_{fd} , L_{kd} e L_{kq} são as indutâncias destes enrolamentos; L_{md} representa a indutância mútua de eixo direto entre a armadura, campo e enrolamento amortecedores (assumindo que seja a mesma), L_{mq} é a indutância mútua do eixo em quadratura entre a armadura e os enrolamentos amortecedores.

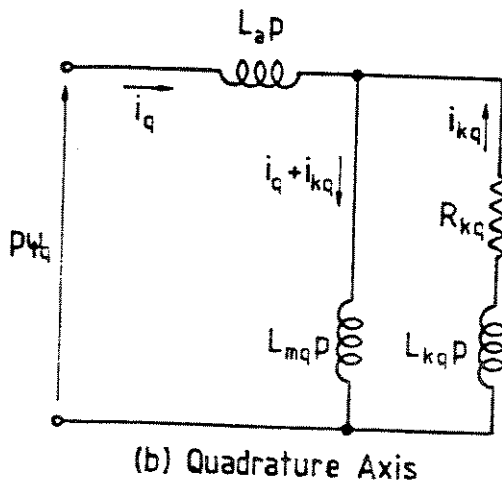
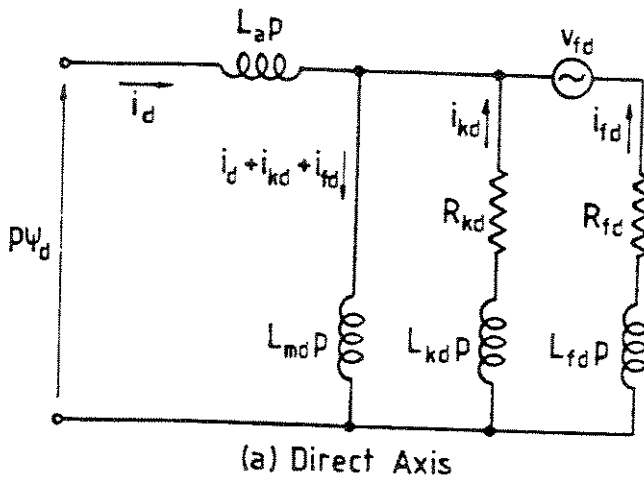


Figura 2.5-1 - Circuito equivalente da máquina síncrona

$$Y_d = X_d(p)/\omega_0 \cdot i_d + G(p)/\omega_0 \cdot V_{fd} \quad (2.9)$$

$X_d(p)$ = impedância operacional de eixo direto

ω_0 = velocidade síncrona

$$\varphi_q = X_q(p)/\omega_0 \cdot i_q$$

$X_q(p)$ = impedância operacional de eixo em quadratura.

Os valores de $X_d(p)$, $G(p)$ e $X_q(p)$ para máquinas síncronas com uma bobina amortecedora em cada eixo podem então ser expressas na forma :

$$X_d(p) = \frac{(1 + Td'p)(1 + Td''p)}{(1 + Tdo'p)(1 + Tdo''p)} \cdot X_d \quad (2.10)$$

$$G(p) = \frac{(1 + Tq'' p)}{(1 + Td_0' p)(1 + Td_0'' p)} X_q \quad (2.11)$$

$$X_q(p) = \frac{(1 + Tq'' p)}{(1 + Tq_0'' p)} X_q \quad (2.12)$$

$$X_d = \omega_0 (L_a + L_{md}) = \omega_0 L_d \quad (2.13)$$

$$X_q = \omega_0 (L_a + L_{mq}) = \omega_0 L_q \quad (2.14)$$

onde os novos parâmetros são definidos como:

- X_d (X_q) é a reatância síncrona de eixo-direto (eixo-quadratura);
- T_{d0}' (T_d') é a constante de tempo transitória de eixo-direto com circuito aberto (curto-circuito);
- T_{d0}'' (T_d'') é a constante de tempo subtransitória de eixo direto com circuito aberto (curto-circuito);
- T_{q0}'' (T_q'') é a constante de tempo subtransitória de eixo em quadratura com circuito-aberto (curto-circuito); e
- T_{kd} é a constante de tempo de eixo direto do circuito de amortecimento.

Utilizando-se as equações apresentadas anteriormente e as considerações efetuadas em Guimarães [14] tem-se:

(i) para estado subtransitório

$$E_d'' - V_d = R_a I_d - X_q'' I_q \quad (2.15a)$$

$$E_q'' - V_q = R_a I_q + X_d'' I_d \quad (2.15b)$$

$$pE_d'' = [(X_q' - X_q'') I_q - E_d''] / T_{q0}'' \quad (2.16a)$$

$$pE_q'' = [E_q' - (X_d' - X_d'') I_d - E_q''] / T_{d0}'' \quad (2.16b)$$

(ii) para estado transitório

$$E_d' - V_d = R_a I_d - X_q' I_q \quad (2.17a)$$

$$E_q' - V_q = R_a I_q + X_d' I_d \quad (2.17b)$$

$$pE_d' = [(X_q - X_q') I_q - E_d'] / T_{q0} \quad (2.18a)$$

$$pE_q' = [E_q - (X_d - X_d') I_d - E_q'] / T_{d0}' \quad (2.18b)$$

(iii) estado permanente

$$-V_d = R_a I_d - X_q I_q \quad (2.19a)$$

$$E_q - V_q = R_a I_q + X_d I_d \quad (2.19b)$$

2.6 Representação por modelo operacional

O modelo selecionado para representar as máquinas síncronas neste trabalho foi o modelo IV, por ser completo e pela disponibilidade dos parâmetros necessários para a sua utilização. O conjunto de equações que representam fisicamente a máquina corresponde ao estado subtransitório (2.15 e 2.16) e a Eq. (2.18b).

Na Fig 2.6-1 tem-se a representação por modelo operacional das equações que representam a máquina síncrona de acordo com o modelo IV, e na Fig. 2.6-2 esse mesmo modelo modelo operacional visto em detalhe.

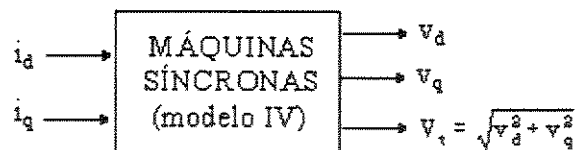


Figura 2.6-1 Modelo operacional da máquina síncrona (corrente-tensão).

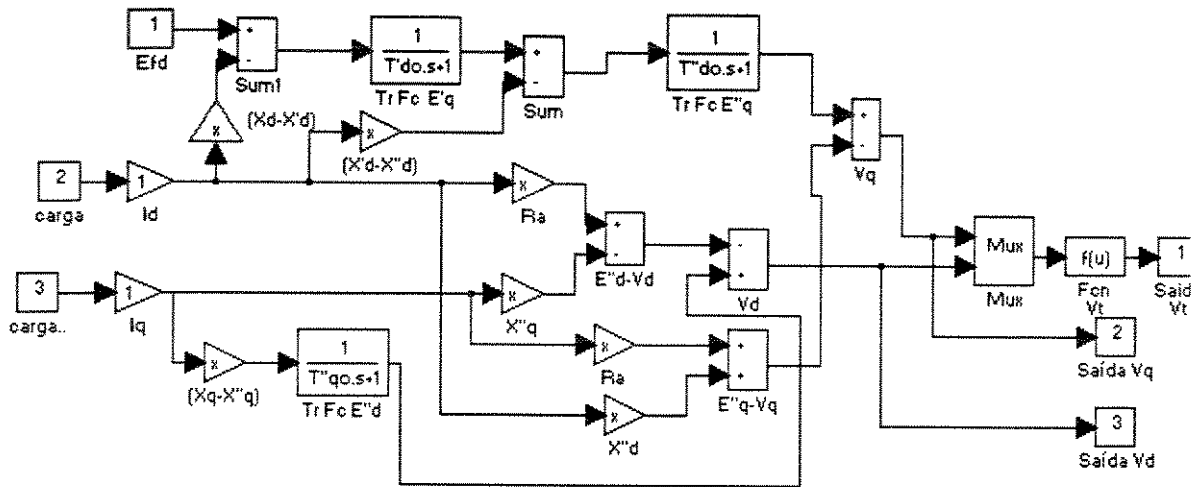


Figura 2.6-2 - Modelo operacional visto em detalhe do modelo IV da máquina síncrona, colocado no formato utilizado pelo MATLAB.

CAPÍTULO 3. SISTEMAS DE EXCITAÇÃO E REGULADORES DE TENSÃO

3.1 Sistemas de Excitação

De acordo com a maneira pela qual a tensão aplicada no campo do gerador é produzida, tem-se três tipos básicos de sistemas de excitação, IEEE[16]:

- 1- sistemas de excitação estáticos ;
- 2- sistemas de excitação CC; e
- 3- sistemas de excitação CA;

Os sistemas de excitação estáticos são chamados de sistemas diretos de excitação e os outros dois de sistemas indiretos de excitação. Serão discutidos a seguir, com mais detalhes, esses dois tipos de sistemas.

3.1.1 Sistemas diretos de excitação ou estáticos

Nesses sistemas não existe a excitatriz rotativa, e assim as solicitações de potência do circuito de campo são atendidas quase instantaneamente, possibilitando que os tempos de resposta sejam mais rápidos que os dos sistemas com excitatriz rotativa (indiretos).

O arranjo básico de um sistema direto de excitação (estático) é mostrado na Fig.3.1-1:

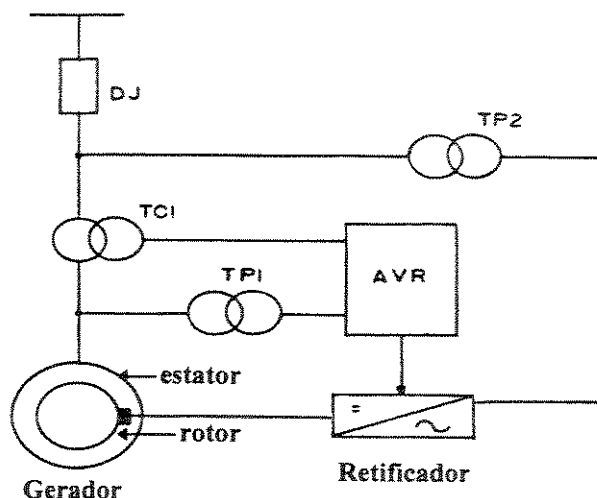


Figura 3.1-1 - Arranjo básico do sistema de excitação estática

A tensão contínua é aplicada no campo através de anéis coletores (“slip-ring”) e escovas . A presença de escovas nos geradores representa um dos pontos fracos da excitação estática, pois os porta-escovas e escovas necessitam de inspeção periódica para garantir confiabilidade no sistema.

O principal motivo que levou à grande aceitação da excitação estática é a maior rapidez com que a tensão de excitação pode ser variada.

3.1.2 Sistemas indiretos de excitação

Em todos os sistemas indiretos de excitação existe a excitatriz rotativa, uma máquina CC ou CA, que gera a potência necessária à excitação, normalmente acoplada ao eixo do gerador.

3.1.2.1 Sistemas de excitação CC

Utiliza um gerador CC com comutador para gerar a tensão de campo. Além das escovas e do comutador do gerador CC tem-se os anéis e escovas que conduzem a corrente CC ao circuito de campo do gerador síncrono. Este sistema é utilizado em máquinas antigas e atualmente não é mais produzido.

3.1.2.2 Sistema de excitação CA

Existem dois tipos principais descritos a seguir:

- sistema com diodos estacionários;
- sistema sem escovas (“Brushless”).

• Sistema de excitação CA com diodos estacionários

A excitatriz consiste de um gerador CA normal montado no eixo do gerador principal; a tensão de campo da excitatriz é controlada pelo regulador automático de tensão (AVR) ; a tensão gerada é retificada por diodos (ou tiristores) estacionários. Nesse arranjo há dois conjuntos de anéis/escovas, sendo um para o campo do gerador principal e outro para o campo da excitatriz.

Na Fig. 3.1-2 mostra-se o arranjo básico do sistema de excitação CA com diodos estacionários, cuja representação computacional é do tipo 1 do IEEE[15].

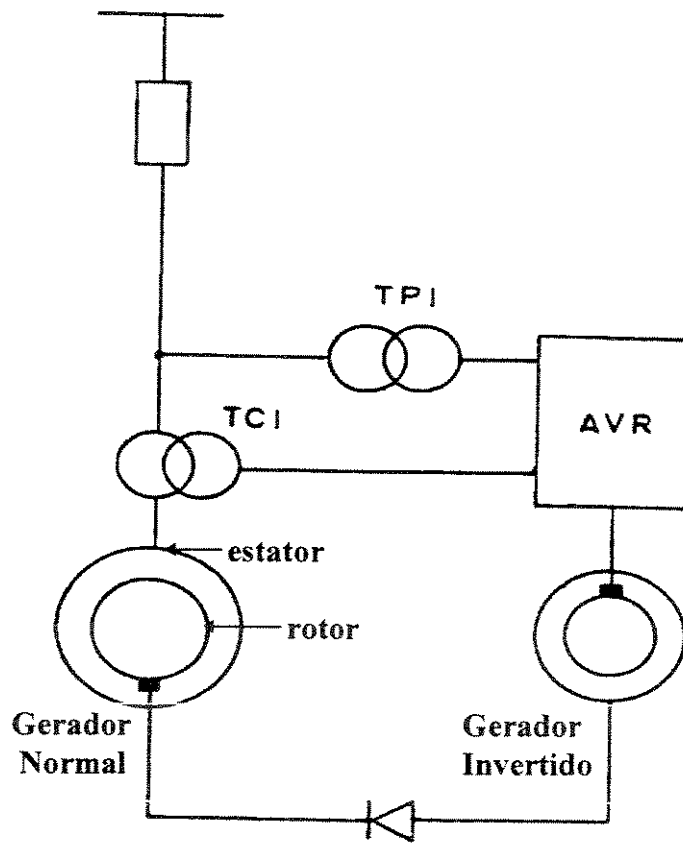


Figura 3.1-2 - Arranjo básico do sistema de excitação CA com diodos estacionários

- **Sistema sem escovas("brushless")**

Na ponta do eixo do gerador síncrono há uma excitatriz CA com a armadura localizada no eixo e ligado ao circuito de campo do gerador através de diodos semicondutores; a corrente alternada gerada pela excitatriz é retificada pelos diodos rotativos e aplicada ao campo principal. Este arranjo elimina as escovas e os anéis coletores, pois o enrolamento de campo da excitatriz é estacionário. De acordo com Wright [33] existem configurações sem escovas que utilizam tiristores rotativos em vez de diodos, agilizando o controle da excitação.

Na Fig 3.1-3 mostra-se o arranjo básico do sistema sem escovas com diodos rotativos; a representação computacional é do Tipo 2 do IEEE[15].

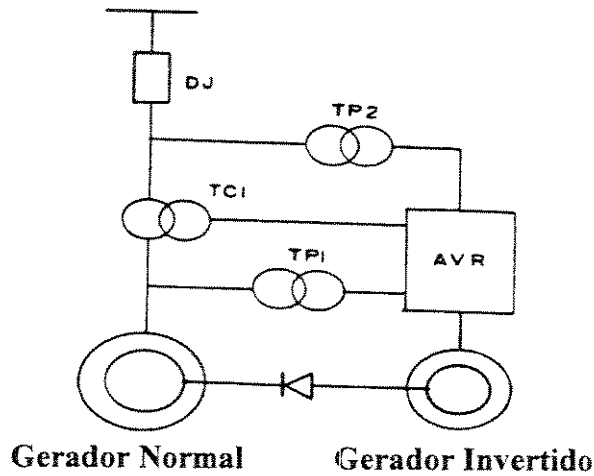


Fig 3.1-3 - Arranjo básico do sistema de excitação "Brushless"

A maior vantagem desta configuração é a eliminação completa das escovas e a grande desvantagem são os tempos de resposta relativamente longos.

3.2 Reguladores de tensão

A modelagem dos reguladores automáticos de tensão (AVR) é etapa importante para o estudo de estabilidade em geral. O IEEE COMMITTEE REPORT [15] estabeleceu em 1968, quatro modelos básicos designados como:

- . Tipo 1;
- . Tipo 2;
- . Tipo 3; e
- . Tipo 4.

Os diagramas de blocos destes modelos são mostrados nas Figs. 3.2-1 a 3.2-4.

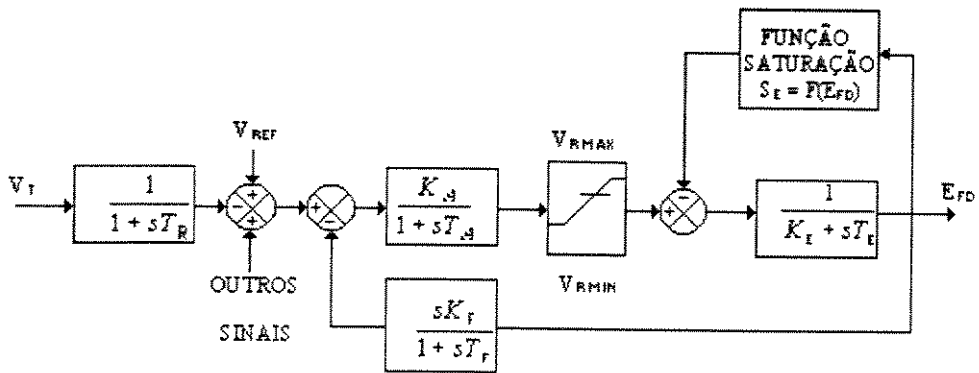


Figura 3.2-1- Representação do sistema de excitação modelo Tipo 1

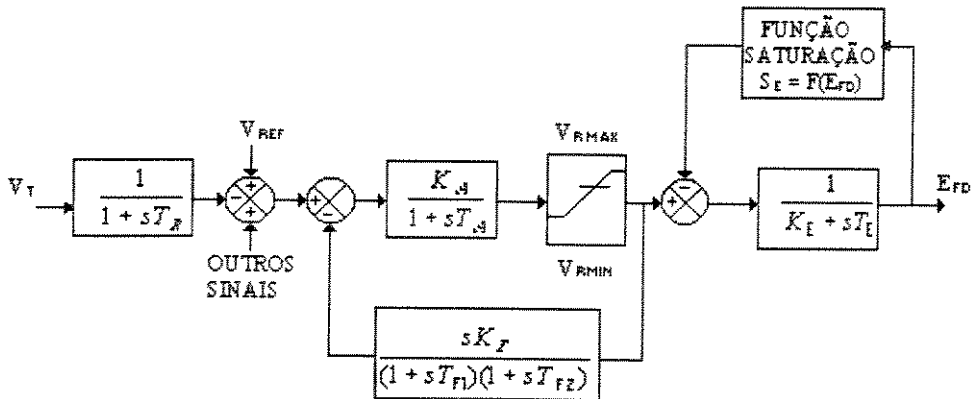


Figura 3.2-2 - Representação do sistema de excitação, (sistema de retificador rotativo) Tipo 2

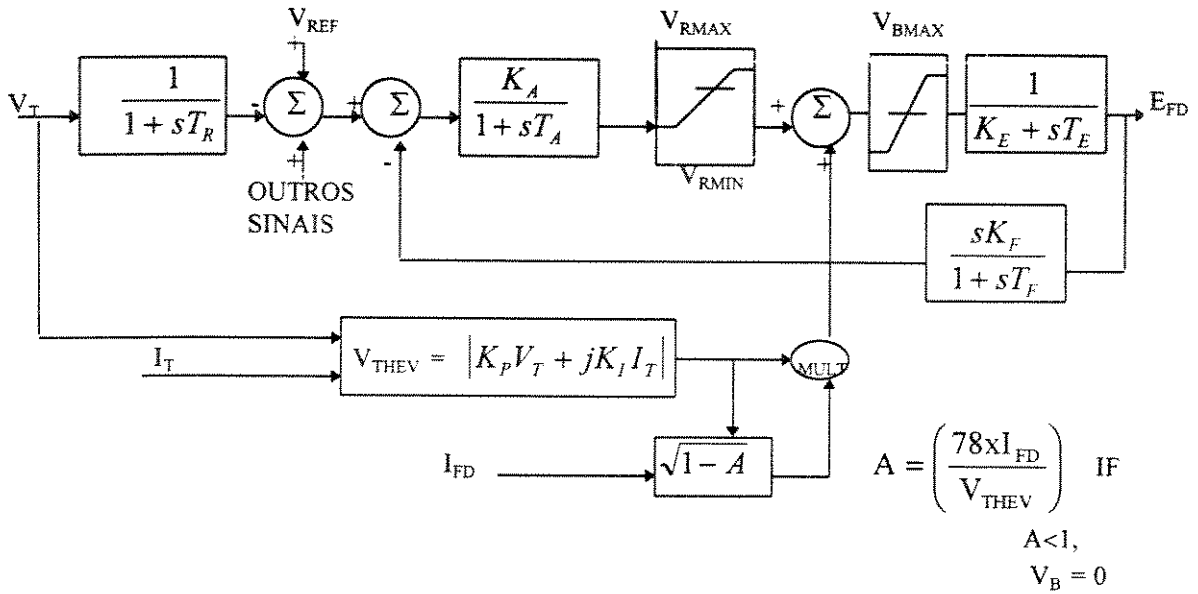


Figura 3.2-3 - Representação do sistema de excitação, estático com terminal de potencial e alimentação de corrente - Tipo 3

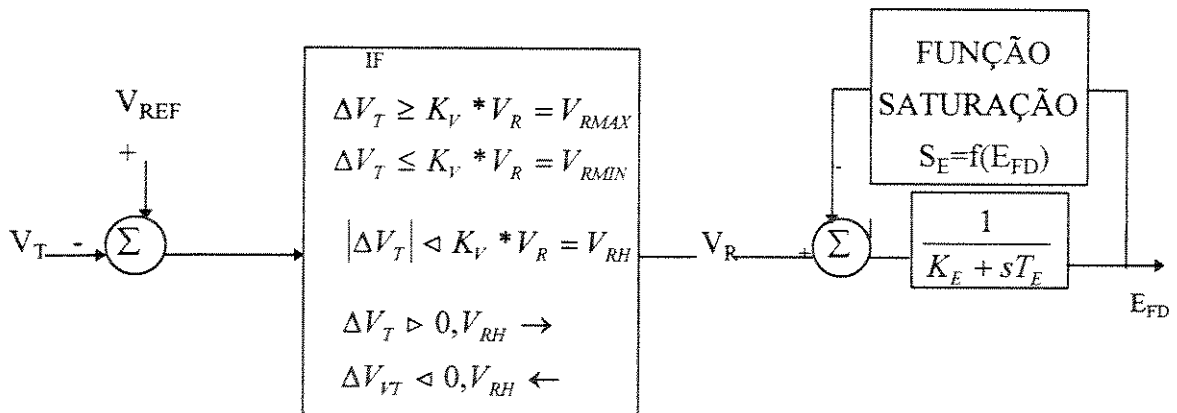


Figura 3.2-4 - Representação do sistema de excitação , regulador de ação não contínua - Tipo 4

onde:

E_{FD} = tensão terminal da excitatriz (aplicada no campo do gerador);

I_{FD} = corrente de campo do gerador;

K_a = ganho do regulador;

K_e = constante de tempo da excitatriz relacionada ao campo de auto excitação;

K_f = ganho do circuito estabilizador do regulador;

K_i = ganho do circuito de corrente do sistema Tipo 3;

K_p = ganho do circuito de tensão do sistema Tipo 3 ou Tipo 1s;

K_v = aumento rápido("lower contact setting"), sistema Tipo 4;

S_E = função de saturação da excitatriz;

T_A = constante de tempo do amplificador do regulador;

T_E = constante de tempo da excitatriz;

T_F = constante de tempo do circuito estabilizador do regulador;

T_{F1}, T_{F2} = constante de tempo do circuito estabilizador do regulador (sistema de retificador rotativo)

T_R = constante de tempo do filtro de entrada do regulador;

T_{RH} = constante de tempo do reostato, sistema Tipo 4;

V_R = tensão de saída do regulador;

V_{Rmax} = máximo valor de V_R ;

V_{rmin} = mínimo valor de V_R ;

V_{REF} = ajuste de tensão;

V_{RH} = ajuste do reostato de campo;

V_T = tensão terminal do gerador;

V_{THEV} = tensão obtida pela soma vetorial do potencial e sinal de corrente, sistema Tipo 3;

Δ_{VT} = erro de tensão terminal do gerador.

Apresenta-se seguir uma breve descrição de cada modelo e do Tipo 1s que é uma variação do Tipo 1. Informações mais detalhadas poderão ser obtidas em Feltrin [2], Guimarães [14], Waters [26], IEEE[16] e IEEE [15].

3.2.1 Modelo Tipo 1 - regulador e excitatriz com ação contínua

O sistema de excitação Tipo 1 é representativo para a maioria dos sistemas modernos. Isto inclui a maioria dos sistemas com ação contínua com excitatriz rotativa, tais como:

| | |
|------------------|-----------------------------|
| Allis Chalmers | Regulex Regulator |
| General Electric | Amplidyne Regulator |
| | Alterrex |
| | Alterrex-Thyristor |
| Westinghouse | Mag-A-Star regulator |
| | Brushless(a partir de 1967) |
| | Rototrol |
| | Silvestat Regulator |
| | TRA Regulator |

3.2.2 Modelo Tipo 1s - sistema de retificador controlado com suprimento apenas do terminal de potencial

Sendo um caso especial do Tipo 1, é um sistema empregando uma fonte de excitação proveniente da tensão terminal com apenas retificadores controlados. Um sistema deste tipo responde rapidamente, mas com tensão limite (ceiling voltage) proporcional à tensão terminal do gerador. Referindo-se a fig 3.2.1, V_{Rmax} não é assumida constante, mas é computada como proporcional à tensão terminal.

$$V_{Rmax} = K_p V_T$$

Em geral, as constantes para este tipo de sistema são tais que $K_E = 0, T_E=0$ e $S_E=0$.

3.2.3 Modelo Tipo 2 - sistema retificador rotativo

O sistema Tipo 2 é aplicado para unidades com um maior laço amortecedor na entrada proveniente da saída do regulador. Um exemplo é o sistema sem escovas da Westinghouse posto em serviço até 1966, inclusive. Na função de transferência de realimentação há uma constante de tempo adicional para compensar a excitatriz que não é incluída no laço de amortecimento. As demais características do Tipo 2 são similares ao Tipo 1.

3.2.4 Modelo Tipo 3 -sistema estático com terminal de potencial e suprimento de corrente

Alguns sistemas estáticos não podem ser representados pelo Tipo 1 ou 1s, porque a corrente terminal do gerador é utilizada como potencial para a fonte de excitação. Um exemplo deste sistema é o SCPT da General Electric. O sistema do modelo Tipo 3 tem sido desenvolvido para representar esses sistemas estáticos particulares. O fabricante deve ser contactado para estabelecer a aplicabilidade da representação do Tipo 3 para outros tipos de sistemas de excitação.

3.2.5 Modelo Tipo 4 - ação não contínua

Por não ser de interesse neste estudo não serão apresentados dados sobre esse modelo.

É importante mencionar que o IEEE Committee Report em 1981 [16] estendeu o trabalho apresentado por este comitê em 1968 IEEE [15], no qual foi baseada a descrição feita acima, propondo modelos para representar os novos tipos de equipamentos de excitação não abordados anteriormente, bem como para acrescentar modelos para equipamentos antigos, os quais não serão abordados no momento devido ao fato que os reguladores de tensão das plataformas que serão analisadas foram representados pelos modelos propostos em IEEE [15].

3.2.6 Função de saturação

A função de saturação da excitatriz é definida em IEEE [15] como sendo um multiplicador a ser aplicado na saída de E_{FD} , que representa o incremento necessário para compensar o efeito de saturação.

Uma possível forma para a função de saturação é dada por: $SE = A e^{B E_{fd}}$.

Como os fabricantes normalmente fornecem os valores SE_{max} e $SE_{0.75max}$ especificados para:

| Tensão | Saturação |
|-----------------|----------------|
| E_{FDmax} | SE_{max} |
| $0.75E_{FDmax}$ | $SE_{0.75max}$ |

Teremos:

$$SE_{max} = A e^{B E_{fdmax}} \quad (3.1)$$

$$SE_{0.75max} = A e^{B 0.75 E_{fdmax}} \quad (3.2)$$

E para a condição de $E_{FD} = E_{FDmax}$ a seguinte relação deve ser obedecida :

$$V_{Rmax} - (K_E + SE_{max}) E_{FDmax} = 0 \quad (3.3)$$

Com as eqs. (3.1), (3.2) e (3.3) pode-se calcular A e B e por conseqüência, a função de saturação fica estabelecida.

CAPÍTULO 4. MOTORES DE INDUÇÃO

4.1 Introdução

Os motores de indução são utilizados em uma grande variedade de aplicações, envolvendo desde pequenas potências em aplicações domésticas (geladeiras, máquinas de lavar roupas, etc.) a grandes potências utilizadas na indústria petrolífera (compressores, bombas, ventiladores, etc.). Os motores de indução são os mais utilizados na grande maioria das aplicações industriais devido sua robustez e baixo custo de manutenção.

Neste trabalho, como serão estudados os efeitos causados no sistema de geração de plataformas marítimas pela partida de motores trifásicos com rotor em gaiola, será abordada apenas a modelagem deste tipo de motor nas seções seguintes.

4.2 Equações nas variáveis da máquina

O arranjo de motor de indução trifásico de dois pólos é mostrado na fig. 4.2-1. Os enrolamentos do estator são idênticos, distribuídos senoidalmente defasados de 120° , com N_s espiras e resistência r_s . O enrolamento do rotor também será considerado como tendo distribuição senoidal e defasagem de 120° , com N_r espiras equivalentes e resistência de rotor r_r . É importante notar que a direção dos eixos magnéticos dos enrolamentos do estator coincidem com a direção de f_{as} , f_{bs} e f_{cs} como especificado no Apêndice A (Fig A.2-1).

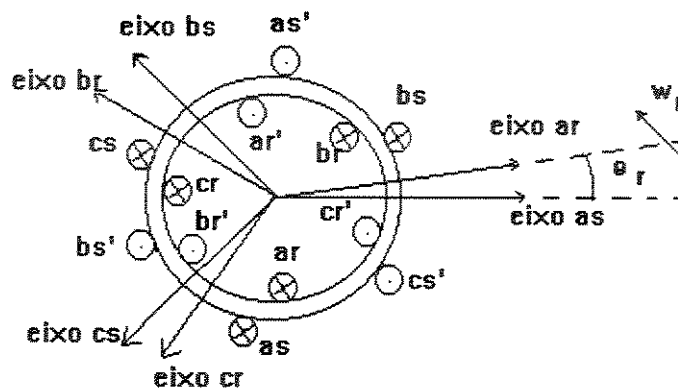


Figura 4.2-1 Máquina de indução, dois pólos, trifásico e conectado em estrela

As equações de tensão nas variáveis da máquina podem ser expressas por:

$$v_{abcs} = r_s i_{abcs} + p \lambda_{abcs} \quad (4.2-1)$$

$$v_{abcr} = r_r i_{abcr} + p \lambda_{abcr} \quad (4.2-2)$$

onde

$$(f_{abcs})^T = [f_{as} \ f_{bs} \ f_{cs}] \quad (4.2-3)$$

$$(f_{abcr})^T = [f_{ar} \ f_{br} \ f_{cr}] \quad (4.2-4)$$

Nas equações acima o subscrito s denota variáveis do estator (“stationary”) e r denota variáveis rotóricas. Ambas as matrizes r_s e r_r são diagonais. Para um sistema magnéticamente linear, o fluxo concatenado pode ser expresso por :

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abcs} \\ \lambda_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s^m & L_{sr}^m \\ (L_{sr}^m)^T & L_r^m \end{bmatrix} \quad (4.2-5)$$

Para maiores detalhes da equação (4.2-5) verificar referência Dutra [9]. Em particular

$$L_s^m = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2} L_{ms} & -\frac{1}{2} L_{ms} \\ -\frac{1}{2} L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2} L_{ms} \\ -\frac{1}{2} L_{ms} & -\frac{1}{2} L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (4.2-6)$$

$$L_r^m = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2} L_{mr} & -\frac{1}{2} L_{mr} \\ -\frac{1}{2} L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2} L_{mr} \\ -\frac{1}{2} L_{mr} & -\frac{1}{2} L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} \end{bmatrix} \quad (4.2-7)$$

$$L_{sr}^m = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta_r \end{bmatrix} \quad (4.2-8)$$

Nas equações acima, L_{ls} , L_{lr} , L_{ms} e L_{mr} são respectivamente as indutâncias de dispersão e magnetização do enrolamento do estator e rotor. A indutância L_{sr} é a amplitude das indutâncias mútuas entre estator e rotor e L^m notação matricial das indutâncias.

A equação que relaciona o torque com a velocidade é dada por:

$$T_e - T_l = J \left(\frac{2}{p} \right) p \omega_r \quad (4.2-9)$$

onde

J = inércia do rotor e em alguns casos a carga conectada expressa em Kg.m^2 ou J.s^2 (Joules segundo²)

T_e = torque elétrico

T_l = torque da carga

p = número de polos

$p \omega_r$ = derivada temporal da velocidade ω_r ,

Na representação das equações de tensão nas variáveis da máquina é conveniente referir todas as variáveis do rotor para o estator, conforme representado a seguir:

$$i'_{abcr} = \frac{N_r}{N_s} i_{abcr} \quad (4.2-10)$$

$$v'_{abcr} = \frac{N_s}{N_r} v_{abcr} \quad (4.2-11)$$

$$\lambda'_{abc} = \frac{N_s}{N_r} \lambda_{abcr} \quad (4.2-12)$$

As indutâncias mútua e de magnetização estão associadas com o mesmo caminho de fluxo; no entanto são definidas por:

$$L_{ms} = \left(\frac{N_s}{2} \right)^2 \frac{\pi \mu_0 r l}{g} \quad (4.2-13)$$

$$L_{mr} = \left(\frac{N_r}{2} \right)^2 \frac{\pi \mu_0 r l}{g} \quad (4.2-14)$$

$$L_{sr} = \left(\frac{N_s}{2} \right) \left(\frac{N_r}{2} \right) \frac{\pi \mu_0 r l}{g} \quad (4.2-15)$$

onde:

r = raio médio do entreferro

l = comprimento axial

g = espaço do entreferro

tem-se:

$$L_{ms} = \frac{N_s}{N_r} L_{sr} \quad (4.2-16)$$

Define-se então:

$$L_{sr}^m = \frac{N_s}{N_r} L_{sr}^m \quad (4.2-17)$$

$$L_{sr}^m = L_{ms} \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta_r \end{bmatrix} \quad (4.2-18)$$

De (4.2.-13) e (4.2-14) tem-se:

$$L_{mr}^m = \left(\frac{N_r}{N_s} \right)^2 L_{ms} \quad (4.2-19)$$

e pode-se escrever

$$L_r^m = \left(\frac{N_s}{N_r} \right) L_r^m \quad (4.2-20)$$

então de (4.2-7), fica

$$L_r^m = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{ms} & -\frac{1}{2} L_{ms} & -\frac{1}{2} L_{ms} \\ -\frac{1}{2} L_{ms} & L_{lr} + L_{ms} & -\frac{1}{2} L_{ms} \\ -\frac{1}{2} L_{ms} & -\frac{1}{2} L_{ms} & L_{lr} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (4.2-21)$$

onde:

$$L_{lr} = \left(\frac{N_s}{N_r} \right)^2 L_{lr} \quad (4.2-22)$$

O fluxo concatenado pode ser expresso por :

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abcs} \\ \lambda'_{abc r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s^m & L_{sr}^m \\ (L_{sr}^m)^T & L_r^m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i'_{abc r} \end{bmatrix} \quad (4.2-23)$$

E a equação de tensão pode ser expressa por :

$$\begin{bmatrix} v_{abcs} \\ v'_{abc r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s^m + pL_s^m & pL_{sr}^m \\ p(L_{sr}^m)^T & r_r^m + pL_r^m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i'_{abc r} \end{bmatrix} \quad (4.2-24)$$

onde;

$$r_r^m = \left(\frac{N_s}{N_r} \right) r_r^m \quad (4.2-25)$$

4.3 Equações nas variáveis de um sistema de referência arbitrário

De acordo com a teoria desenvolvida na seção 4.2 e no Apêndice A, tem-se na forma expandida o seguinte conjunto de equações de tensão em um sistema de referência arbitrário representando um motor de indução:

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{\omega}{\omega_b} \varphi_{ds} + \frac{p}{\omega_b} \varphi_{qs} \quad (4.3-1)$$

$$v_{ds} = r_s i_{ds} - \frac{\omega}{\omega_b} \varphi_{qs} + \frac{p}{\omega_b} \varphi_{ds} \quad (4.3-2)$$

$$v'_{qr} = r_r i'_{qr} + \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) \varphi_{ds} + \frac{p}{\omega_b} \varphi_{qs} \quad (4.3-3)$$

$$v'_{dr} = r_r i'_{dr} + \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) \varphi_{qs} + \frac{p}{\omega_b} \varphi_{ds} \quad (4.3-4)$$

O elemento ω_b utilizado nos termos envolvendo fluxo faz a correção dos valores das indutâncias pois as mesmas são calculadas para esta velocidade base.

Como os parâmetros das máquinas e do sistema de potência são dados em ohms ou em p.u. para uma dada impedância base, é conveniente expressar as equações em termo de reatâncias e não em termos de indutâncias

$$\varphi_{qs} = X_{ls}i_{qs} + X_m(i_{qs} + i'_{qr}) \quad (4.3-5)$$

$$\varphi_{ds} = X_{ls}i_{ds} + X_m(i_{ds} + i'_{dr}) \quad (4.3-6)$$

$$\varphi_{qr} = X_{lr}i_{qr} + X_m(i_{qs} + i'_{qr}) \quad (4.3-7)$$

$$\varphi_{dr} = X_{lr}i_{dr} + X_m(i_{ds} + i'_{dr}) \quad (4.3-8)$$

Substituindo-se (4.3-5) a (4.3-8) em (4.3-1) a (4.3-4) resulta a forma matricial:

$$p \begin{bmatrix} \frac{X_{ss}}{\omega_b} & 0 & \frac{X_m}{\omega_b} & 0 \\ 0 & \frac{X_{ss}}{\omega_b} & 0 & \frac{X_m}{\omega_b} \\ \frac{X_m}{\omega_b} & 0 & \frac{X'_{rr}}{\omega_b} & 0 \\ 0 & \frac{X_m}{\omega_b} & 0 & \frac{X'_{rr}}{\omega_b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v'_{qr} \\ v'_{dr} \end{bmatrix} -$$

$$\begin{bmatrix} r_s & \frac{\omega}{\omega_b} X_{ss} & 0 & \frac{\omega}{\omega_b} X_m \\ -\frac{\omega}{\omega_b} X_{ss} & r_s & -\frac{\omega}{\omega_b} X_m & 0 \\ 0 & \frac{\omega}{\omega_b} X_m & r'_r & \frac{\omega}{\omega_b} X'_{rr} \\ -\frac{\omega}{\omega_b} X_m & 0 & -\frac{\omega}{\omega_b} X'_{rr} & r'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \end{bmatrix} + \omega_r \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{X_m}{\omega_b} & 0 & \frac{X'_{rr}}{\omega_b} \\ \frac{X_m}{\omega_b} & 0 & \frac{X'_{rr}}{\omega_b} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \end{bmatrix}$$

(4.3-9)

onde:

$$X_{ss} = X_{ls} + X_m$$

$$X'_{rr} = X'_{lr} + X_m$$

ω = velocidade angular elétrica do sistema de referência

ω_r = velocidade angular elétrica do rotor

ω_b = velocidade angular base em que foram calculadas as reatâncias.

O conjunto de equações anterior pode ser representado pelo circuito equivalente da fig. (4.3-1)

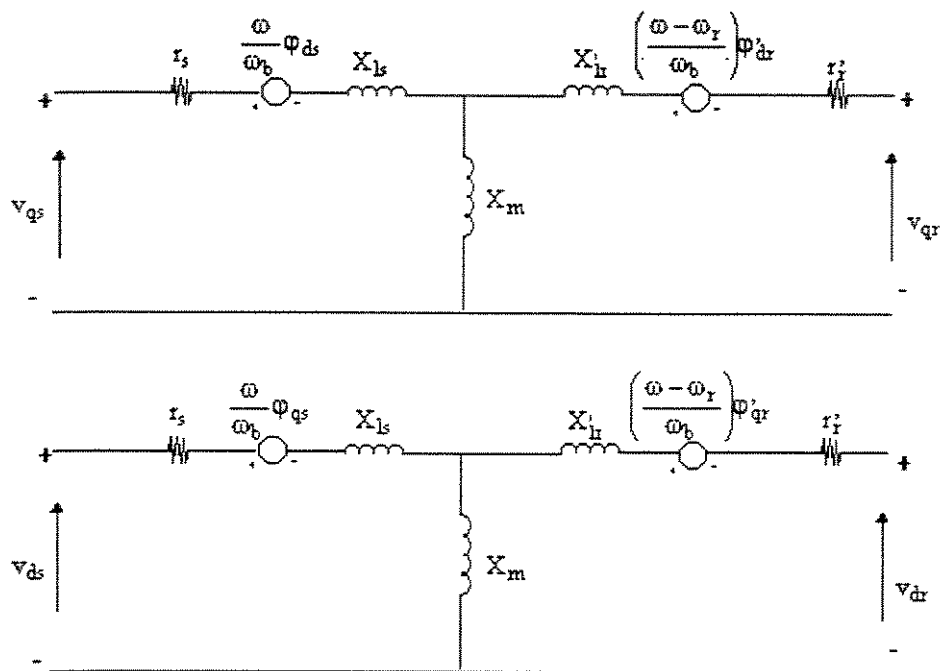


Figura 4.3-1 - Circuito equivalente para sistema de referência arbitrário.

O torque elétrico em um sistema arbitrário de referência pode ser determinado a partir das seguintes equações:

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right)\left(\frac{p}{2}\right) \frac{X_m}{\omega_b} (i_{qs}i'_{dr} - i_{ds}i'_{qr}) \quad (4.3-10)$$

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right)\left(\frac{p}{2}\right) \frac{1}{\omega_b} (i_{qs}\phi_{ds} - i_{ds}\phi_{qs}) \quad (4.3-11)$$

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right)\left(\frac{p}{2}\right) \frac{X_m}{D\omega_b} (\phi_{qs}\phi'_{dr} - \phi'_{qr}\phi_{ds}) \quad (4.3-12)$$

onde:

$$D = X_{ss}X_{rr} - X_m^2$$

Conforme verificado no Apêndice B, os valores em p.u. para as equações de torque dos motores de indução tornam-se:

$$T_e = X_m (i'_{dr}i_{qs} - i'_{qr}i_{ds}) \quad (4.3-13)$$

$$T_e - T_l = 2Hp \frac{\omega_r}{\omega_b} \quad (4.3-14)$$

4.4 Representação dos motores de indução por modelo operacional

Em uma representação por modelo operacional é imperativo não existir termos com elemento derivativo no diagrama de blocos, pois esses termos quase sempre acarretam instabilidade na simulação, impedindo desta forma a obtenção de resultados confiáveis.

Ao representar diretamente em diagrama de blocos o conjunto de equações expressas em (4.3-9) observar-se-á a presença de termos derivativos, e portanto é necessário manipular este conjunto de equações para adequar esta representação. Considere a seguinte representação matricial como alternativa para (4.3-9):

$$pA*I = V - B_1*I + B_2*I \quad (4.4-1)$$

$$A*pI = V - B*I \quad (4.4-2)$$

$$pI = A^{-1}*V - (A^{-1}*B)*I \quad (4.4-3)$$

$$pI = D *V - C*I \quad (4.4-4)$$

onde:

$$B = B_1 - B_2 ;$$

$$C = A^{-1}*B ;$$

$$D = A^{-1} ;$$

Para dar continuidade ao desenvolvimento é necessário escolher um sistema de referência. Neste estudo será adotado como sistema referencial o sistema com velocidade angular $\omega = \omega_r$. Para este referencial a Eq (4.4-4) torna-se:

$$p \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & -d_{13} & 0 \\ 0 & d_{22} & 0 & -d_{24} \\ -d_{31} & 0 & d_{33} & 0 \\ 0 & -d_{42} & 0 & d_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} * \omega_r & -c_{13} & c_{14} * \omega_r \\ -c_{21} * \omega_r & c_{22} & -c_{23} * \omega_r & -c_{24} \\ -c_{31} & -c_{32} * \omega_r & c_{33} & -c_{34} * \omega_r \\ c_{41} & -c_{42} & c_{43} * \omega_r & c_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \quad (4.4-5)$$

onde:

$$v_{qr} = 0$$

$$v_{dr} = 0$$

Vale salientar que na matriz C explicita-se ω_r , porque este valor depende do resultado da solução da Eq. (4.3-14) durante o processo iterativo da simulação.

O conjunto de Eqs. (4.4-5), após aplicada a transformada de Laplace, na sua forma expandida torna-se:

$$sI_{qs} = d_{11} * V_{qs} - [c_{11} * I_{qs} + c_{12} * \omega_r * I_{ds} - c_{13} * I_{qr} + c_{14} * \omega_r * I_{dr}] \quad (4.4-6)$$

$$sI_{ds} = d_{22} * V_{ds} - [-c_{21} * \omega_r * I_{qs} + c_{22} * I_{ds} - c_{23} * \omega_r * I_{qr} - c_{24} * I_{dr}] \quad (4.4-7)$$

$$sI_{qr} = -d_{31} * V_{qs} - [-c_{31} * I_{qs} - c_{32} * \omega_r * I_{ds} + c_{33} * I_{qr} - c_{34} * \omega_r * I_{dr}] \quad (4.4-8)$$

$$sI_{dr} = -d_{42} * V_{ds} - [c_{41} * \omega_r * I_{qs} - c_{42} * I_{ds} + c_{43} * \omega_r * I_{qr} + c_{44} * I_{dr}] \quad (4.4-9)$$

O conjunto de Eqs. (4.4-6)-(4.4-9) mais as Eqs. (4.3-13) e (4.3-14) são representadas por modelo operacional na figura 4.4-1 e na Fig. 4.4-2 têm-se esse mesmo modelo operacional visto em detalhe, que será a representação utilizada para simulações futuras. Esta modelagem é uma representação completa (5ª ordem) das equações do motor de indução, pois considera os transitórios elétricos do estator e rotor.

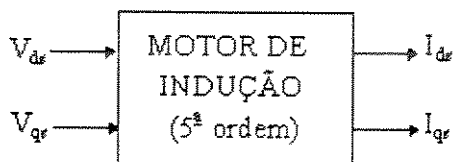


Figura 4.4-1 Modelo operacional do motor de indução (tensão-corrente).

CAPÍTULO 5. FORÇA MOTRIZ E REGULADORES DE VELOCIDADE

5.1 Introdução

Em sistemas de energia elétrica de plataformas marítimas os tipos de força motriz utilizados são os motores a diesel e turbinas a gás. Este capítulo tratará da modelagem desses equipamentos e de seus reguladores de velocidade em conjunto com a descrição física dos mesmos .

Os reguladores de velocidade tem como função principal controlar a entrada de combustível para que a velocidade seja mantida de acordo com a carga ativa solicitada no eixo do elemento motriz do gerador. Esses reguladores também são normalmente utilizados para proteger o elemento motriz durante condições de operação anormal.

Os reguladores funcionam da forma isócrona, velocidade constante, ou da forma com “droop”, onde uma pequena queda de velocidade é permitida com o incremento de carga no sistema. A forma com “droop” é utilizada quando é necessário o funcionamento em paralelo de dois ou mais geradores no barramento e a forma isócrona é utilizada quando apenas um gerador está no barramento.

5.2 Motores Diesel

O motor a diesel é o mais eficiente sistema de queima de combustível líquido já desenvolvido até o momento. Em sua forma turbo-aspirado, o motor a diesel encontra larga aplicação em base terrestre e sistema de geração de embarcações navais.

Motores a diesel de velocidade média têm tido um desenvolvimento intenso nos últimos 20 anos. Isto tem resultado num significativo acréscimo da potência específica de saída e razão potência-peso, e fez com que estes motores fossem bem aceitos em aplicações onde o peso e espaço são quesitos importantes (como por exemplo plataformas e navios).

Tipicamente os motores a diesel utilizados em aplicações de geração de energia elétrica são do tipo de média velocidade (100 a 1000 rpm) com unidades de dois ou quatro-tempos, tendo arranjo de cilindros em linha ou em vê, com 6 a 18 cilindros e potência de saída na faixa de 1 a 10 MW. As maiores unidades de quatro-tempos encontram aplicação em sistemas situados em terra e onde peso e espaços são fatores restritivos, as unidades de dois tempo são mais utilizadas.

Os motores diesel com aspiração de ar forçada (turbo-aspirado) produz em maior potência para um dado volume percorrido pelo cilindro do que um similar com admissão de ar naturalmente aspirado. Isto é realizado através do aumento da densidade de ar nos cilindros, permitindo que mais combustível seja queimado e como resultado mais potência seja liberada. A tarefa de aumentar a densidade do ar é realizado por uma turbina acionando um compressor. A turbina, por sua vez, é acionada pelo gás de exaustão do motor.

No futuro provavelmente todos os motores serão turbo aspirados, mas no entanto os benefícios que ocorrem na potência desenvolvida pelo motor não são observados em seu desempenho transitório, ou seja, aumentando a capacidade nominal do motor devido a turbo-aspiração temos como consequência a deterioração de sua capacidade em responder à solicitações bruscas de cargas. Tais solicitações bruscas de cargas ocorrem em:

(a) unidade de força marítima, onde rápidas variações de carga ocorrem quando troca-se plena carga a vante para plena carga a ré utilizando uma caixa de engrenagem de redução.

(b) equipamentos de geração de energia elétrica, quando em certas condições, grandes cargas são aplicadas instantaneamente, como por exemplo partida de motores de indução ou aceleração brusca de um motor de corrente contínua sob carga.

Os motores turbo aspirados são incapazes de responder rapidamente à solicitações bruscas de cargas devido ao atraso na resposta do sistema de turbo aspiração causado pela inércia do compressor/turbina. O regulador de velocidade sente a queda de velocidade e comanda o incremento de combustível, no entanto o mesmo não ocorre com a injeção de ar comprimido, ocorrendo desta forma uma mistura muito rica e de baixa combustão.

A Fig 5.2-1 mostra o diagrama esquemático de um motor a diesel com aspiração forçada acionando um gerador através de uma caixa de engrenagem . A aspiração forçada (turbo aspirado) consiste da turbina, do compressor e do eixo de conexão, (e também do mancal e do rolamento, que não foram mostrados) o que na realidade constitui uma pequena turbina a gás do tipo eixo simples com a câmara de combustão substituída pelo motor diesel.

Os motores a diesel têm uma maior eficiência térmica do que as turbinas a gás ou a vapor, e diferente das últimas, eles não requerem uma grande quantidade de água para o propósito de resfriamento . Isto faz os motores a diesel o acionamento preferido para aplicações em unidades de geração de energia elétrica onde restrições ambientais estão presentes, pois suas necessidades de resfriamento podem ser economicamente fornecidas por radiadores a ar.

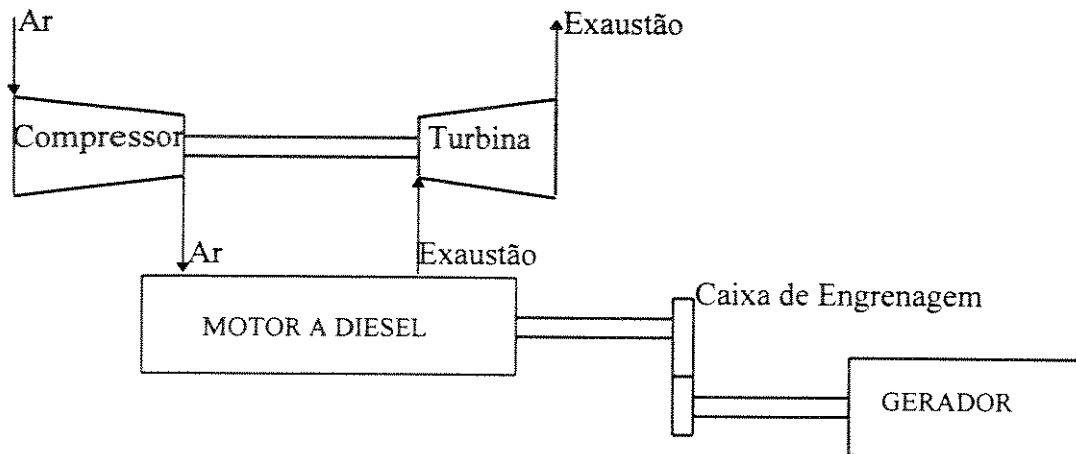


Figura 5.2-1 - Motor diesel turbo-aspirado e gerador

Os motores diesel normalmente aspirados, também podem ser representados pelo diagrama da Fig. 5.2-1, bastando que se retire o compressor e a turbina.

5.3 Turbinas a Gás

De uma forma simplificada o funcionamento das turbinas a gás pode ser descrito através das seguintes fases:

- o ar é comprimido através de um compressor axial;
- o combustível é injetado no ar comprimido para queima;
- os gases resultantes da queima do combustível no ar comprimido são expandidos, produzindo potência útil na saída, acionando também o compressor axial de ar.

O desenvolvimento das turbinas em questão está associado basicamente ao progresso na aerodinâmica, viabilizando compressores que possibilitem razões de pressão de 30:1 operando com rendimento de 85 a 90%, no material e em técnicas de fabricação.

O rendimento global das turbinas a gás, de acordo com os fabricantes é da ordem de 31%, mas na prática, os valores medidos estão na faixa de 23%, dependendo do porte da turbina.

As turbinas a gás podem ter basicamente duas configurações:

- Turbinas de eixo simples; neste caso o compressor de ar e a turbina estão no mesmo eixo;
- Turbinas de dois eixos ("twin shaft"); neste caso a turbina de alta pressão aciona o compressor de ar e este conjunto atua como gerador de gás para a turbina de potência (turbina de baixa pressão).

As Figs 5.3-1 e 5.3-2 mostram os diagramas esquemáticos para turbinas de eixo simples e de dois eixos respectivamente.

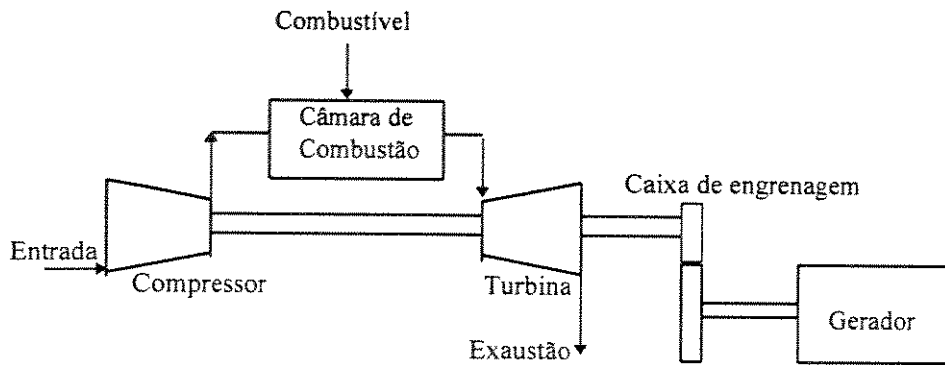


Figura 5.3-1 - Turbina de eixo simples e gerador

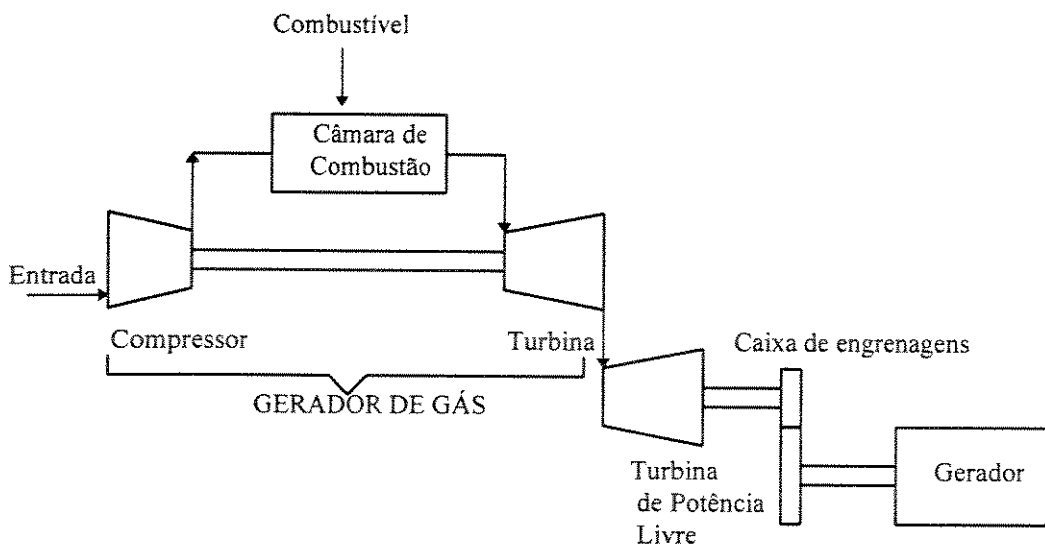


Figura 5.3-2 - Turbina de eixo duplo e gerador

A configuração com dois eixos é utilizada para acionar geradores de energia elétrica, sendo a turbina de potência projetada para velocidades compatíveis com a do gerador (1800\3600rpm) dispensando a caixa de redução.

As turbinas de dois eixos necessitam de menor energia auxiliar para partir, pois o motor de partida tem que acionar somente o gerador de gás, embora isto não signifique vantagem significativa. Duas são as desvantagens principais, ou seja:

- o controle de sobrevelocidade é mais crítico que nas turbinas de eixo simples;
- a separação da turbina de baixa pressão reduz a constante de inércia do conjunto (H), o que é indesejável do ponto de vista de estabilidade.

Na Fig 5.3-3 verificamos as principais malhas de controle de uma turbina a gás: malhas de temperatura e de velocidade.

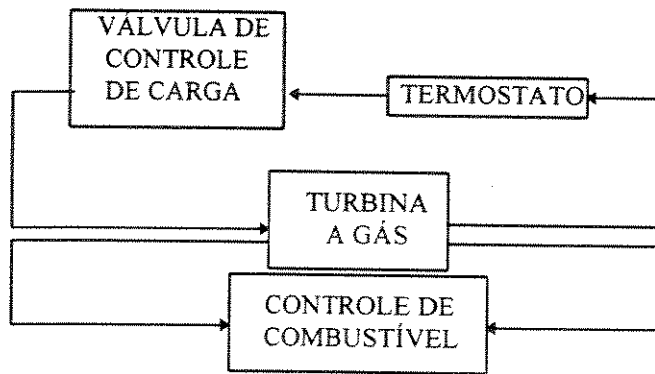


Figura 5.3-3 - malha de controle de turbina a gás.

5.4 Reguladores de Velocidade

Uma análise formal de um “governor” simples irá produzir um estudo detalhado em sua operação. Analisar um “governor” ou qualquer mecanismo consiste no equacionamento de forças, fluxos e movimentos. As forças pertinentes associadas com uma seção de controle poderão ser equacionadas em termos de duas ou mais variáveis. O mesmo pode ser feito para fluxos e para movimentos. Procedendo sistematicamente, equações para cada seção de controle poderão ser obtidas. O número de equações requerido é determinado pelo número de variáveis presente.

Nessas análises o atrito entre partes é negligenciado. A inércia das partes em movimento e do fluxo de óleo também são desprezadas. A prática tem demonstrado que os erros ocasionados por estas considerações são desprezíveis.

Na prática, é muito difícil elaborar-se este equacionamento para ser utilizado em estudos dinâmicos, devido à necessidade de dados construtivos do regulador, e que normalmente o fabricante não fornece. Por isso normalmente representa-se os reguladores de velocidade na forma de diagrama de blocos, como será visto nas seções seguintes.

5.5 Modelagem

5.5-1 Introdução

Para facilidade de representação divide-se o sistema de força motriz em três subsistemas:

- 1 - Comportamento termodinâmico do motor/turbina de onde a potência do elemento motriz é gerado;
- 2 - Sistema de controle de velocidade que determina a alimentação de combustível e também controla a distribuição de carga;
- 3 - Conjunto mecânico do eixo da turbina/motor com o gerador.

Na Fig. 5.5-1 mostra-se a interconecção desses subsistemas.

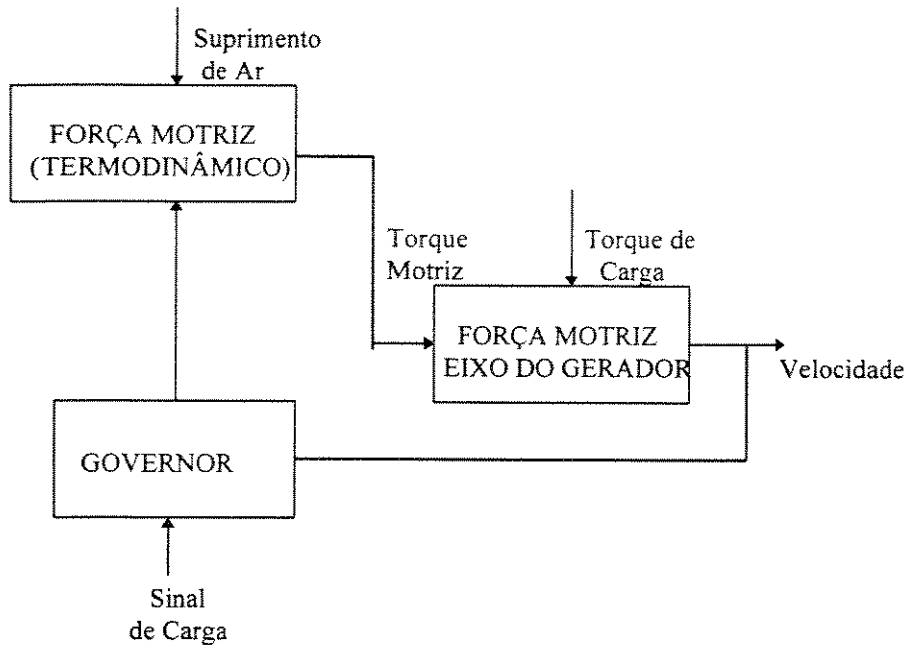


Figura 5.5-1 Força motriz - Subsistemas e interconecções

Nas seções seguintes será apresentada a metodologia de modelagem do comportamento termodinâmico do motor/turbina e do regulador de velocidade. Não será focado o conjunto mecânico pois o equacionamento mecânico do conjunto rotativo já foi discutido no capítulo de máquinas síncronas. Na seção do controlador de velocidade será apresentado seu modelo representado por diagrama de blocos e, por facilidade didática a representação do motor a diesel e turbina a gás será feita em conjunto. Como neste trabalho as simulações serão efetuadas a partir da representação por diagrama de blocos, e como existe uma grande dificuldade em obter junto aos fabricantes o modelo ou os valores dos parâmetros das equações que representam o comportamento físico do elemento motriz, para obter a sua representação por diagrama de blocos, desenvolveremos na última Seção (5.6) uma metodologia para obter-se uma representação matemática a partir do sinal de carga (entrada) e do sinal de velocidade (saída).

5.5.2 Comportamento Termodinâmico

Existem essencialmente quatro formas diferentes de modelos que podem ser utilizados para representar o comportamento termodinâmico de um motor. Eles são:

(i) Modelo simplificado usando uma função de transferência simples junto com uma simples representação da não-linearidade do motor. Este modelo é usualmente aplicado apenas para uma faixa restrita de condições operacionais do motor;

(ii) Um modelo linear (“piece-wise”) em que os ganhos e as constantes de tempo da função de transferência são alterados para abranger várias condições de cargas encontradas pelo motor;

(iii) Um modelo de estado quase-estático em que os aspectos não-lineares do motor são mais completamente e precisamente representados por modelos dinâmicos dominantes. Esta aproximação normalmente ignora os efeitos dinâmicos associados com o processo de transferência de calor e massa no motor, pois estes são geralmente muito mais rápidos que os efeitos dinâmicos associados com os aspectos de controle e mecânica do motor;

(iv) Modelo dinâmico completo que leva em consideração todos os efeitos transitórios do motor.

Quando se consider os méritos relativos a essas quatro aproximações, vários aspectos devem ser levados em conta:

(i) Compatibilidade e incompatibilidade com o nível de detalhe de representação de outros componentes do sistema;

(ii) Precisão requerida para toda a simulação (não apenas a força motriz);

(iii) Disponibilidade de dados para os motores e reguladores;

(iv) Custo da simulação.

A incorporação da representação em separado da força motriz em um sistema de potência tem por objetivo essencialmente providenciar uma indicação suficientemente precisa da variação de frequência do sistema e a variação de carga entre diferentes forças motrizes durante um transitório. É importante apenas obter aquela precisão que seja útil para a análise do estudo que se propõe a simulação, caso contrário pode-se estar gastando mais do que o necessário para a obtenção dos dados procurados.

5.5.2-1 Modelo Simplificado

O modelo simplificado do motor consiste de uma única função de transferência junto com uma única saturação do tipo não-linear relacionando a injeção de combustível com o torque de saída do motor.

A função de transferência incorpora um único ganho e uma única constante de tempo. A constante de tempo representa o efeito acumulativo de todo retardo de tempo do motor (transporte de massa, combustão e retardo na transferência de calor) e o ganho representa o fator multiplicador que relaciona o torque de saída do motor com injeção de combustível sob condições estáticas. A não-linearidade da saturação é necessária, pois o motor terá níveis máximo e mínimo de saída que não podem ser excedidos. O modelo é representado através do diagrama de blocos mostrado na Fig. 5.5-2. Este modelo é aplicado também para turbinas a gás.

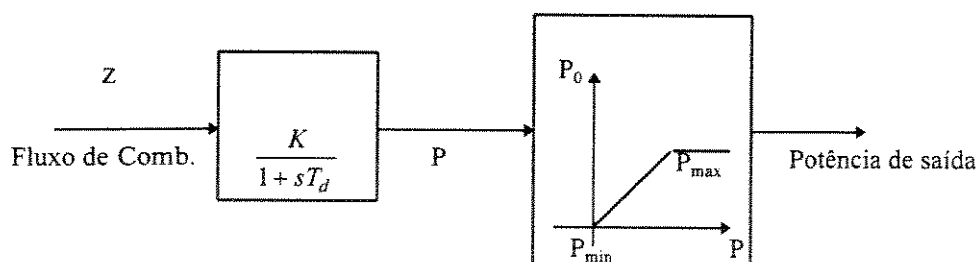


Figura 5.5-2 - Modelo simplificado do motor

Os valores usados para a constante de tempo T_d e ganho K podem ser experimentalmente obtidos ou então derivados de uma análise linear do comportamento do motor em alguns pontos da operação nominal. Esta última aproximação deve ser a preferida pois reconhece a faixa limite da aplicabilidade do modelo e fornece uma melhor representação do comportamento real do motor sob uma certa faixa de condições operacionais.

Este modelo não reflete nenhuma variação interna do motor, mas meramente representa as características sobre uma limitada faixa de condições operacionais sob a forma de uma "caixa-preta". A faixa de condições operacionais pode ser estendida pela inclusão de um grande número de ganhos, constantes de tempo e não-linearidades. O aumento do número de parâmetros no modelo, no entanto, torna mais difícil a determinação dos melhores conjuntos de valores utilizados para representar o comportamento do motor sob qualquer condição, sem retornar para um procedimento formal de estimação de parâmetros.

5.5.2-2 Modelo por Partes (Piece-Wise)

A faixa de operação pode ser futuramente estendida pela alteração dos valores dos parâmetros no modelo durante a simulação para representar adequadamente as condições operacionais encontradas. Isto conduz a um modelo por partes. Qualquer mudança nos coeficientes do modelo deve ser suave, pois qualquer descontinuidade no modelo irá introduzir um falso transitório em dada simulação.

Embora, um melhoramento desse modelo ainda mantenha as vantagens e desvantagens do original (modelo simplificado), tais como a simplicidade, facilidade de utilização, ausência de problemas de dados, aplicabilidade na ausência de dados detalhados do motor e baixa faixa de custo comparado com a falta de precisão e limitação, ter-se-á melhorado apenas a faixa de aplicabilidade. Novamente não existe representação das dinâmicas internas do motor.

Esses modelos (5.5.2-1 e 5.5.2-2) podem ser utilizados com o cuidado de providenciar que a representação adequada da resposta (constante de tempo) de velocidade do motor esteja incluída junto com uma correta representação dos limites de não-linearidades da potência de saída disponível. No entanto, se existem dados corretos disponíveis, o modelo quase-estático é melhor para representar o motor.

5.5.2-3 Modelo de Estado Quase-Estático

O modelo de estado quase-estático de um motor representa uma tentativa de introduzir a natureza não-linear na resposta dos principais termos algébricos através da inclusão no modelo dos tipos de características de estado permanente nos dados, pela dependência das variáveis e parâmetros do motor da condição operacional. Esse modelo tenta representar o comportamento das variáveis reais (como por exemplo, pressões e temperaturas) dentro do motor e resultando em modelo que não apenas fornece uma relação melhorada entre o suprimento de combustível e o torque de saída do motor, mas também providencia algumas indicações das variáveis internas do motor. Dessa maneira, não apenas uma larga faixa de condições operacionais é atingida, mas também a dependência da saída do motor com a entrada de ar é obtida. A falta disto é a maior desvantagem dos outros modelos apresentados anteriormente.

A principal desvantagem deste tipo de modelo é o acréscimo de dados necessários e a disponibilidade de dados característicos de estado permanente para um particular motor. Tais dados geralmente estarão disponíveis apenas com o fabricante, que geralmente os considera segredo industrial.

Como subdivisão do modelo de estado quase-estático pode-se ter:

- Modelo de motor diesel com limitação combustível/limitação de ar;
- Modelo de motor diesel combustível-ar integrado.

Maiores detalhes do desenvolvimento das funções de transferência e/ou equações relacionadas com estes dois tipos de representação são encontrados em Guimarães [14].

5.5.2-4 Modelo Totalmente Dinâmico

O modelo totalmente dinâmico do motor diesel considera todos os transitórios no motor que resultam do processo de transferência de calor e massa ocorrendo no motor. Tais modelos são considerados mais complexos que os modelos quase-estáticos e representam não apenas um significativo aumento na precisão mas também um aumento no custo de simulação e em dificuldades associadas com banco de dados.

Tais modelos são comumente utilizados para providenciar um entendimento detalhado no processo ocorrendo dentro do motor e por isso são mais aplicados em simulações onde a operação individual do motor está sendo estudado (por exemplo projeto de motores) do que em aplicações onde o motor é parte de um grande sistema .

Por essas razões o modelo totalmente dinâmico não é aplicado para estudar estabilidade de sistemas elétricos.

Considera-se em Stronach [28] e Guimarães [14] representações mais detalhadas para modelagem de motores a diesel turbo aspirados, no entanto não serão abordadas neste estudo pois os motores utilizados são normalmente aspirados.

5.5.3 - Reguladores de Velocidade

5.5.3.1 Reguladores de Velocidade para Motores a Diesel

O regulador de velocidade do motor diesel é normalmente considerado em duas seções: a seção do controlador e a seção da válvula de combustível do atuador. Dois diagramas de blocos utilizados para modelos completos são mostrados nas Figs. 5.5-3 e 5.5-4 :

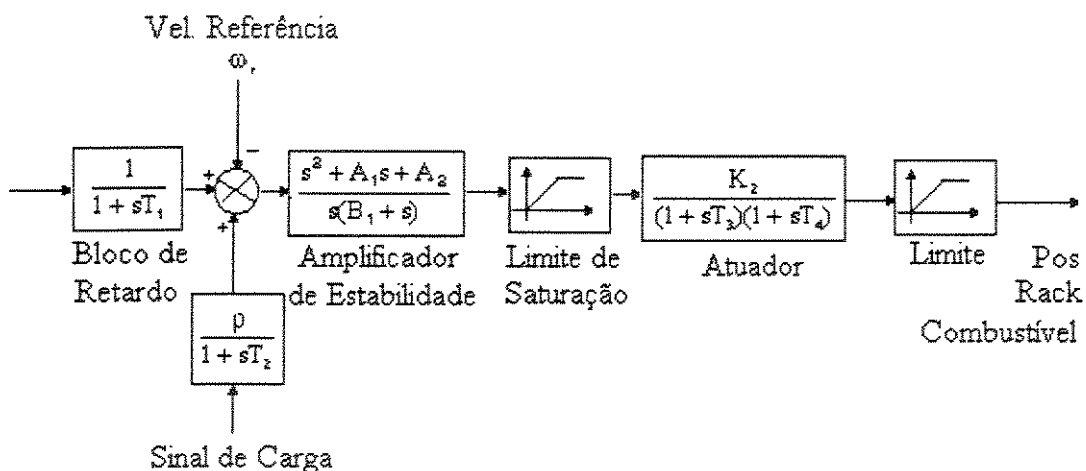


Figura 5.5-3 - Regulador de velocidade com "droop" para motor a diesel

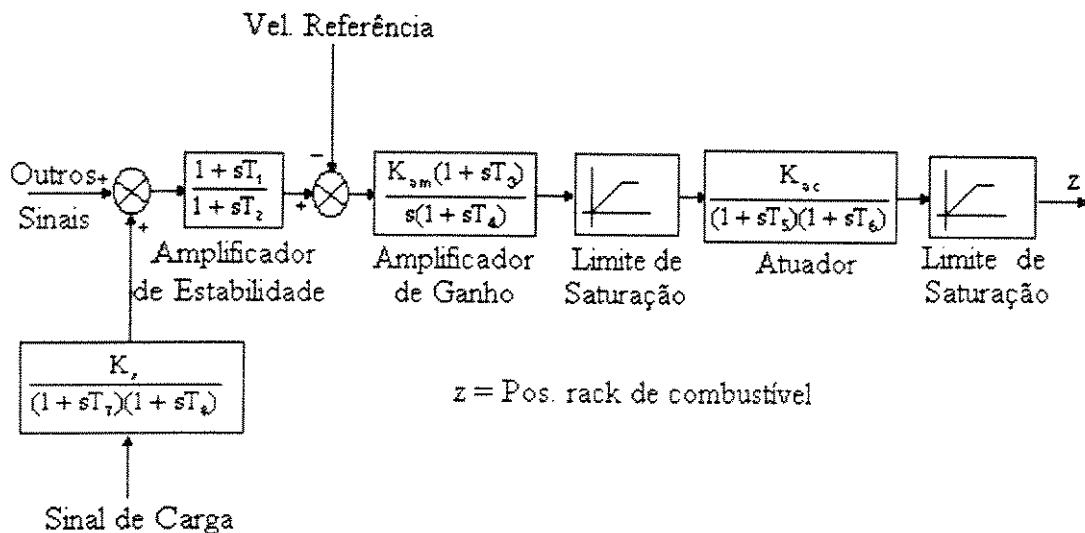


Figura 5.5-4 Governor isocrono para motor a diesel

5.5.3.2 Reguladores de velocidade para turbina de um eixo

O regulador de velocidade para este tipo de turbina é dividido em cinco subsistemas. cuja interconecção é mostrada na Fig. 5. 5-5.

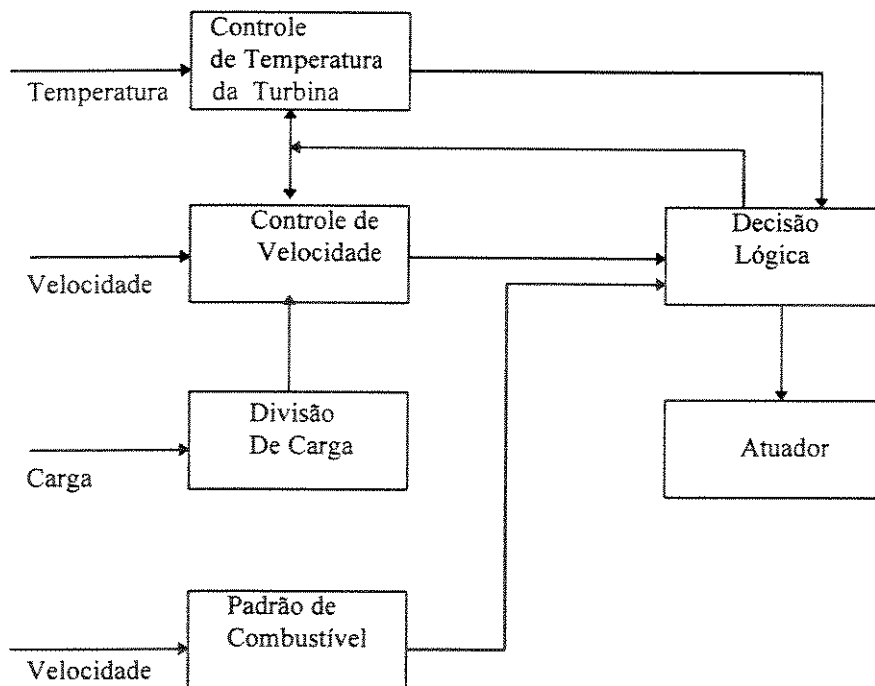


figura 5.5-5 Subsistemas do regulador de velocidade de turbina de um eixo

5.5.4 Modelo Simplificado

Devido a necessidade de um grande número de parâmetros para representar os modelos de reguladores de velocidade e do elemento motriz e da dificuldade de obtê-los, estes podem ser substituídos pelos modelos simplificados mostrados nas Figs. 5.5-6 e 5.5-7.

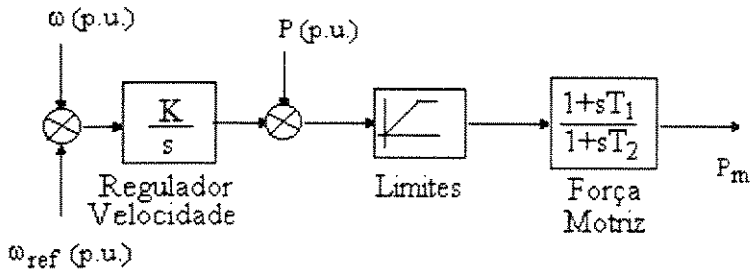


Figura 5.5-6 Modelo de regulador de velocidade isócrono

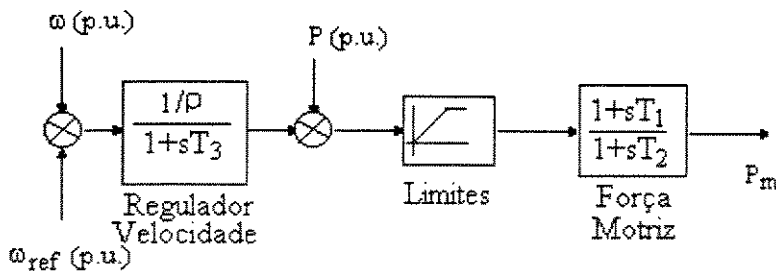


Figura 5.5-7 Modelo de regulador de velocidade com “droop”

De acordo com Guimarães [14], para motores turbo aspirados pode-se utilizar os valores das tabelas 5.1 e 5.2 para representar o modelo reduzido/simplificado das Figs 5.5-5 e 5.5-6, enquanto que para turbinas de eixo simples pode-se utilizar os valores da Tabela 5.3. Deve ser salientado que esses modelos são aproximações e devem ser utilizados com critério.

Tabela 5.1 - Regulador de velocidade isocrono (motor a diesel)

| | |
|----------------|---------------|
| K(pu) | 183.0 |
| ρ(%) | - x - |
| T ₁ | 0.19 - 0.0032 |
| T ₂ | 0.03 |
| T ₃ | - x - |

Tabela 5.2 - Regulador de velocidade com “droop” (motor a diesel)

| | |
|----------------|-------|
| K(pu) | - x - |
| ρ(%) | 4.0 |
| T ₁ | 0.14 |
| T ₂ | 1.30 |
| T ₃ | 0.07 |

Tabela 5.3 - Regulador de velocidade isócrono (turbina)

| | |
|------------|-------|
| K(pu) | 125.0 |
| $\rho(\%)$ | - x - |
| T_1 | 0.30 |
| T_2 | 0.01 |
| T_3 | - x - |

5.5.5 Diagrama de blocos para turbina de eixo simples

Na figura 5.5-8 mostra-se a representação por diagrama de blocos de uma turbina de eixo simples.

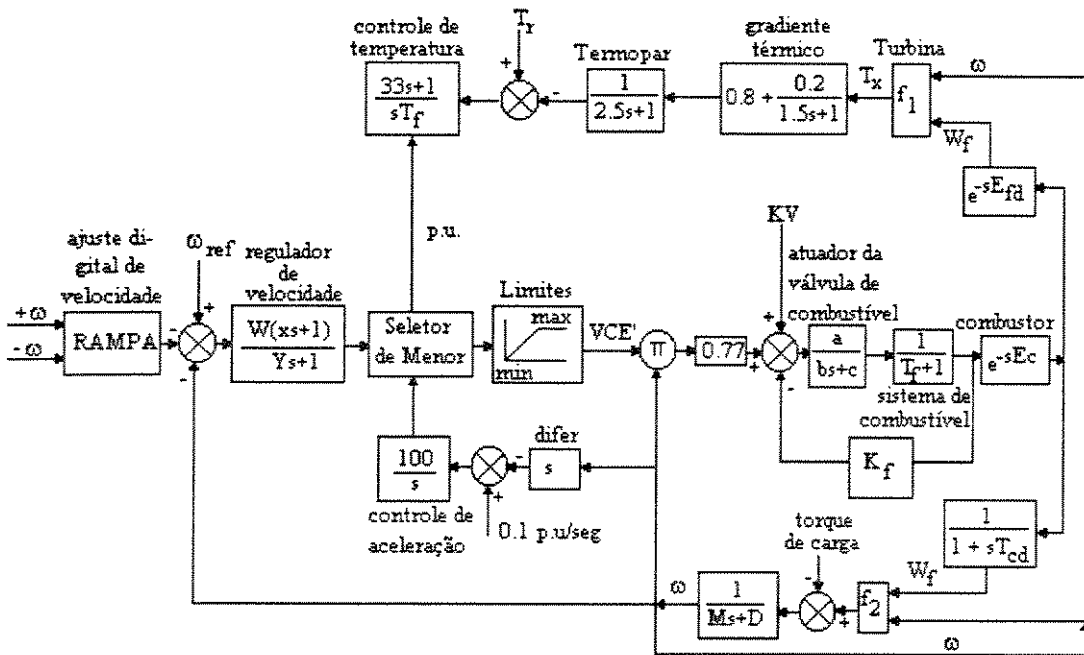


figura 5.5-8 - Diagrama de blocos para turbina a gás de eixo simples

Os componentes do modelo de turbina a gás são:

Regulador de velocidade

O regulador de velocidade é comandado pelo sinal de erro da velocidade da turbina e da referência previamente definida, podendo operar com queda de velocidade ('droop') ou isócrono. O "droop" é um controlador proporcional no qual a saída é proporcional ao erro de velocidade; em "droop" a função de transferência é:

$$\frac{K_D}{0.005s+1}, \text{ onde } K_D = 1/\rho \quad \rho = \text{"droop"} \text{ (tipicamente 4\%)}$$

Em isócrono o regulador é um controlador tipo PID (Proporcional\Integral\Derivativo) e a função de transferência é:

$$\frac{30(2.5s + 1)}{0.10s}$$

Seletor de menor

Neste comparador entra-se com:

- sinal de saída do regulador de velocidade;
- sinal de saída do sistema de controle de temperatura;
- sinal de saída do controle de aceleração.

A saída é o menor dos três sinais, ou seja, o que requer menor quantidade de combustível.

Limites

O limite máximo atua como proteção de retaguarda para o controle de temperatura e não é atingido em operação normal.

O limite mínimo é escolhido para manter um fluxo adequado de combustível assegurando que a chama seja mantida na câmara de combustão.

Sistema de combustível

É representado, no diagrama de blocos, pelo atuador, sistema de combustível propriamente dito e pela realimentação.

A constante K_v representa, em p.u., a quantidade de combustível necessária para manter a turbina operando a velocidade nominal em vazio; este valor varia de 0.23 até 0.4 p.u..

O parâmetro K_f representa o ganho da malha de realimentação do sistema de combustível, valendo 0 para turbinas operando com gás ou 1 se estiver operando com diesel.

No sistema de combustível só há duas constantes de tempo importantes. A primeira é associada com o atuador da válvula de combustível e a segunda é uma constante de tempo volumétrica, associada com as tubulações secundárias e com a tubulação principal de distribuição de combustível (“manifold”) para os combustores.

Controle de aceleração

É utilizado principalmente durante a partida da turbina para limitar a taxa de aceleração do rotor amenizando as solicitações térmicas (“thermal stresses”) existentes durante a fase de partida. Durante a operação normal, este controle funciona como proteção de sobre-velocidade em caso de perda de carga da turbina.

Controle de temperatura

É o meio utilizado para limitar as temperaturas internas da turbina, independentemente de variações na temperatura ambiente e das características do combustível.

Turbina

A turbina propriamente dita é essencialmente um dispositivo linear e não dinâmico, com exceção do movimento do rotor. Existe um atraso de transporte associado com a descarga do compressor e um atraso de transporte para levar o gás formado na câmara de combustão através da turbina. Com relação ao rotor e as constantes de tempo associadas, essas características de curta duração podem ser ignoradas.

As funções matemáticas representativas da turbina para as saídas de temperatura são:

Temperatura (f_1)

$$T_x = T_R - 390(1 - \omega_f) + 306(1 - \omega)$$

observa-se em regime que :

$$\omega = 1 \text{ e } \omega_f = 1; \text{ logo:}$$

$$T_x = T_R$$

Torque (f_2)

$$T_m = 1.3(\omega_f - 0.23) + 0.5(1 - \omega)$$

observa-se em regime que:

$$\omega_f = 1.0 \text{ e } \omega = 1, \text{ logo:}$$

$$T_m = 1.0 \text{ p.u.}$$

Constantes de tempo

$$E_{CR}, E_{TD} \text{ e } T_{CD}.$$

Outros modelos podem ser elaborados a partir deste, de acordo com as simplificações efetuadas, levando-se em consideração o tipo de operação e particularidades construtivas de cada fabricante, não significando que este modelo possa ser utilizado indiscriminadamente para todas as turbinas a gás.

5.6 Método de obtenção de função de transferência a partir do sinal de potência e frequência

Pode-se concluir das seções anteriores que a modelagem é altamente dependente de parâmetros que nem sempre são de fácil obtenção, diretamente do fabricante ou através de ensaios de campo. Neste caso, não foi possível a obtenção dos parâmetros para a modelagem dos motores a diesel e dos reguladores de velocidade. Vários fabricantes de motores de aplicação naval foram consultados, e nenhum forneceu os parâmetros ou a função de transferência dos motores de sua fabricação.

Diante desta dificuldade , partiu-se para a utilização de conceitos de “identificação de sistemas” e do “software” MATLAB para obtenção de um modelo matemático a partir de dados observados em campo do sistema de geração das plataformas alvo deste estudo.

No Apêndice B descreve-se resumidamente a teoria de identificação de sistemas e a metodologia adotada para obtenção da função de transferência do conjunto motor a diesel/regulador de velocidade/gerador, a partir do sinal de potência (entrada) e do sinal de frequência (saída).

O fundamento básico utilizado para definir um modelo matemático, ou seja, um modelo que tem como finalidade apenas representar o comportamento do sistema descrito acima, sem que a função de transferência tenha algum significado físico ou alguma relação com as equações que representam o comportamento físico do mesmo, foi o de estabelecer uma função de transferência a partir do “input” de uma carga no sistema de geração (entrada) e da variação de frequência observada devido a essa variação de carga.

A Fig. 5.6-1 mostra um diagrama esquemático desse sistema:

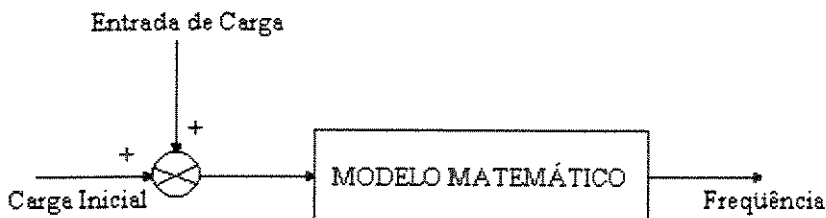


Figura 5.6-1 Diagrama esquemático da obtenção da função de transferência

No Capítulo 6 analisa-se a obtenção da função de transferência e dos resultados obtidos com esta técnica a partir de dados coletados na plataforma Petrobrás-15.

Esta técnica poderá também ser utilizada no caso de sistema de geração com turbinas a gás.

CAPÍTULO 6. SISTEMA ELÉTRICO DA PLATAFORMA PETROBRÁS-15

6.1 Introdução

Neste capítulo tratar-se-á da modelagem e simulação do comportamento dinâmico do sistema elétrico da plataforma Petrobrás-15, resumidamente descrito na Seção 6.2. Como os diversos componentes do sistema serão representados por funções de transferência, é essencial conhecer os parâmetros dos modelos desenvolvidos nos capítulos anteriores. Alguns parâmetros são diretamente fornecidos ou extraídos dos dados do fabricante, mas outros não, exigindo a identificação a partir de ensaios experimentais. Na Seção 6.3, será descrito um processo para identificação da função de transferência que represente o conjunto motor diesel/regulador de velocidade/gerador. A Seção 6.4 será dedicada à obtenção dos parâmetros do motor de indução, partindo-se da comparação dos resultados obtidos de registros a bordo da plataforma com os resultados obtidos em simulação. Na Seção 6.5 será focalizada a simulação de condições operacionais e comparados os resultados obtidos com os dados que foram registrados em campo. Finalmente a Seção 6.6 será dedicada à análise e comentários dos resultados obtidos.

6.2 Descrição do sistema elétrico

A plataforma Petrobrás-15 é uma embarcação semi-submersível, fabricada em 1983, em Hiroshima-Japão, inicialmente concebida para operar como embarcação de perfuração e posteriormente tendo recebido uma planta de produção com capacidade de 36.000 BBL/dia de óleo e 500.000 m³/dia de gás.

O sistema de geração dessa plataforma, mostrado na Fig. 6.2-1, é composto de 4 (quatro) conjuntos motor diesel/gerador com capacidade de 2.625 kVA e 1.450 kW.

No barramento principal estão conectados 8 (oito) unidades retificadoras (SCR) que acionam os motores cc dos guinchos de ancoragem e dos equipamentos destinados a atividade de perfuração e completação, e dois transformadores de 1500 kVA (600/480 V) que alimentam, em 480 V, motores de indução trifásicos usados para acionar bombas de lastros. Esses motores serão utilizados nos estudos realizados neste capítulo, pois se constituem na carga principal em operação.

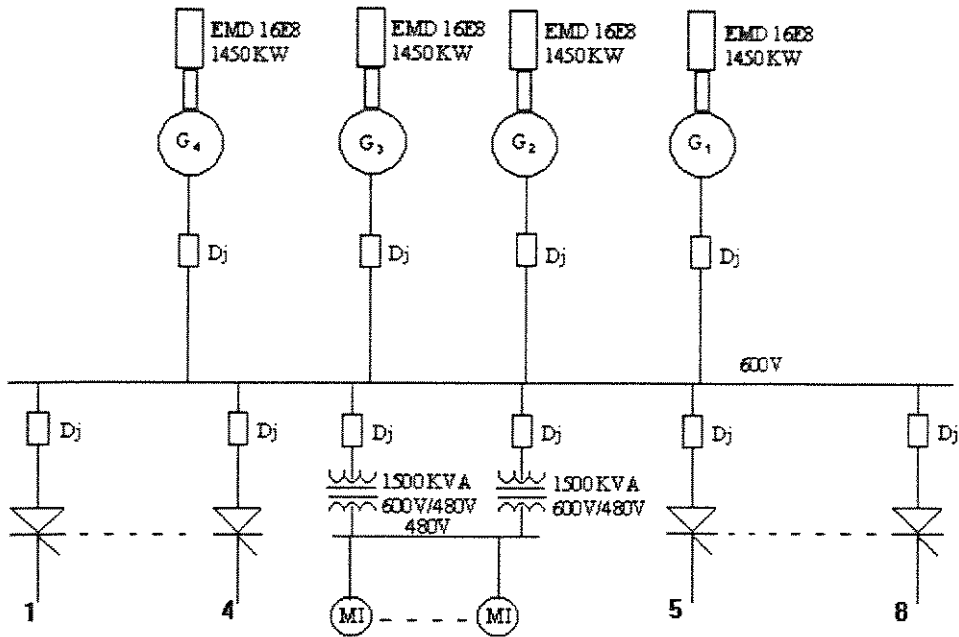


Figura 6.2-1 Diagrama unifilar do sistema de geração Petrobrás 15

Os grupos de geração dessa plataforma possuem seguintes dados fornecidos pelo fabricante:

| Gerador | | | |
|------------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Fabricante: Eletro-Motive | | Modelo: AB20 - 6 | |
| Capacidade: 2.625KVA | Rotação: 900 rpm | Fator de potência: 0.8 | |
| $x_d = 1,12 \text{ p.u.}$ | $x_q = 0,67 \text{ p.u.}$ | $x'_d = 0,28 \text{ p.u.}$ | $x'_q = 0,19 \text{ pu}$ |
| $T_{do} = 4,34 \text{ p.u.}$ | $T'_d = 0,023 \text{ p.u.}$ | $T_d = 1,02 \text{ p.u.}$ | $T_d = 0,044 \text{ p.u.}$ |

| Excitatriz | | |
|----------------------------|-------------------------|---|
| Fabricante: Eletro-Motive | | Tipo sem escovas ("Brushless" IEEE tipo 1) |
| Tensão de saída : 170 V | | Potência de saída contínua : 17 kW |
| Corrente de saída: 100 Acc | Fator de potência: 0.95 | Controlador :0509-61 |

| Módulo de controle AC (regulador de velocidade e sistema de proteção) | |
|---|---------------------------|
| Fabricante : Ross Hill Controls | Modelo: Ac control Module |

| Força motriz | | |
|--|-----------------|---------------------|
| Tipo : Motor diesel normalmente aspirado | Rotação: 900rpm | Potência : 2.199 HP |

| Regulador de velocidade | |
|-------------------------|--------------------------------------|
| Fabricante: Woodward | Modelo: EGB - 13P regulador /atuador |

6.3 Identificação da função de transferência potência-freqüência

A primeira alternativa adotada para obter os parâmetros para representar a força motriz por modelo operacional foi consultar todos os fabricantes de motores diesel navais, que são fornecedores da Petrobrás, a respeito da possibilidade do fornecimento dos modelos e parâmetros necessários. Porém não houve resposta positiva a essa solicitação, como era esperado, pois os fabricantes temem dar informações consideradas segredo industrial. O fabricante de reguladores de velocidade também não forneceu os dados necessários. Diante dessa dificuldade, procurou-se alternativas que possibilitassem a modelagem da força motriz e regulador de velocidade, chegando-se a conclusão que seria possível de aplicar técnicas de identificação experimental de sistemas dinâmicos com o auxílio do “software” MATLAB.

O procedimento adotado para essa identificação foi considerar a modelagem agregada do conjunto motor diesel/gerador/regulador de velocidade, adotando-se a variação de freqüência do sistema como saída do modelo operacional e a variação de potência de carga como entrada. Na Fig 6.3-1 observa-se a representação clássica utilizada para representar esse conjunto, sendo os pontos identificados como ENTRADA e SAÍDA os locais onde foram efetuadas as medidas de potência e freqüência.

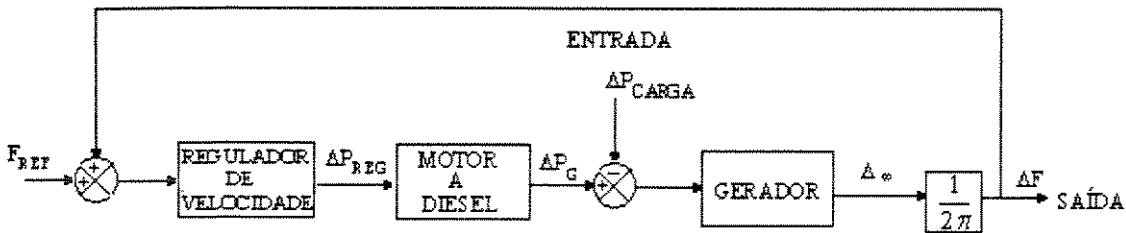


Figura 6.3-1 Diagrama clássico da representação do conjunto motor/gerador/regulador de velocidade

Após realizada a identificação da função de transferência agregada ter-se-á o modelo operacional conforme observado na Fig. 6.3-2.

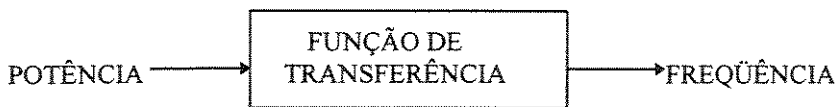


Figura 6.3-2 Representação da função de transferência agregada motor diesel/gerador/regulador

A identificação da função de transferência do conjunto motor diesel/regulador/gerador foi efetuada a partir de registros realizados a bordo da plataforma Petrobrás-15, durante a partida de uma bomba de lastro e durante a partida de duas bombas de lastro, com retardo de 0,2 segundos entre a partida da primeira e da segunda bomba (retardo este causado pela posição do acionamento remoto que necessitou de dois operadores para partir as bombas). Os motores possuem partida

direta e são comandados remotamente pela sala de controle de lastro. Os dados foram coletados quando estavam dois geradores no barramento (G_3 e G_4).

Os registros foram obtidos utilizando-se uma placa de aquisição digital de dados acoplada a um microcomputador. Essa placa foi conectada ao módulo AC de cada gerador, onde foram captados os sinais de potência (utilizado na proteção de sobrecarga) e frequência (utilizado para o controle de frequência/velocidade). Os reguladores de velocidade estão configurados no modo mestre/escravo, sendo que o gerador G_3 funciona como mestre.

A placa de aquisição de dados utilizada possui as seguintes características:

- PC - Labcard modelo PCL-18;
- Fabricante: Advantech;
- High performance data acquisition card with programmable gain;
- Taxa de aquisição: 300 Hz (cinco pontos por ciclo);
- Tempo total de amostragem : 15 segundos;
- Taxa de amostragem : 1/300 segundos

Como os dados coletados apresentam ruídos é necessário filtrá-los, tendo-se o cuidado de manter as características dos registros, ou seja, valor máximo e mínimo do transitório, período do transitório e modos de oscilação. Como parte do processo de preparação dos dados é necessário remover-se das curvas de potência e frequência a componente constante que representa a tendência dessas curvas, o que foi realizado através da subtração do valor médio antes da ocorrência do distúrbio (partida dos motores).

No desenvolvimento deste trabalho verificou-se que a forma das curvas de potência e frequência, principalmente os valores máximo e mínimo, podem ser alteradas pela escolha inadequada do filtro e, como consequência, poderia haver a identificação de funções de transferência que não representassem corretamente o sistema.

Serão apresentados a seguir os procedimentos e resultados obtidos no processamento digital dos dados.

• **Aquisição dos dados**

Nas Figs. 6.3-3 e 6.3-4 observam-se as curvas de potência e frequência do gerador G_3 relativo partida de uma bomba de lastro e partida de duas bombas de lastro . As Figs. 6.3-5 e 6.3-6 mostram as curvas de frequência e potência para o gerador G_4 nas mesmas situações. Note que após certo tempo as bombas são desligadas.

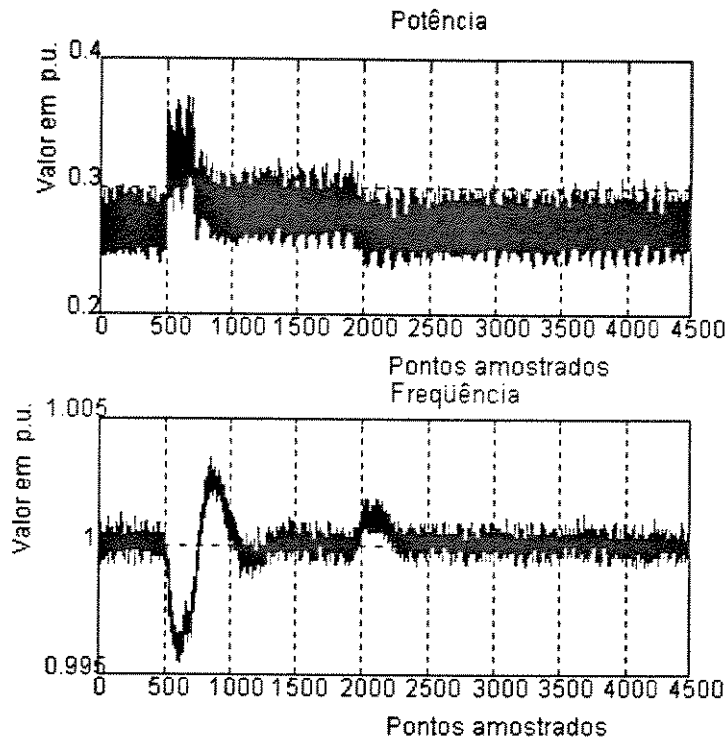


Figura 6.3-3 Potência e frequência gerador G_3 na partida de uma bomba de lastro

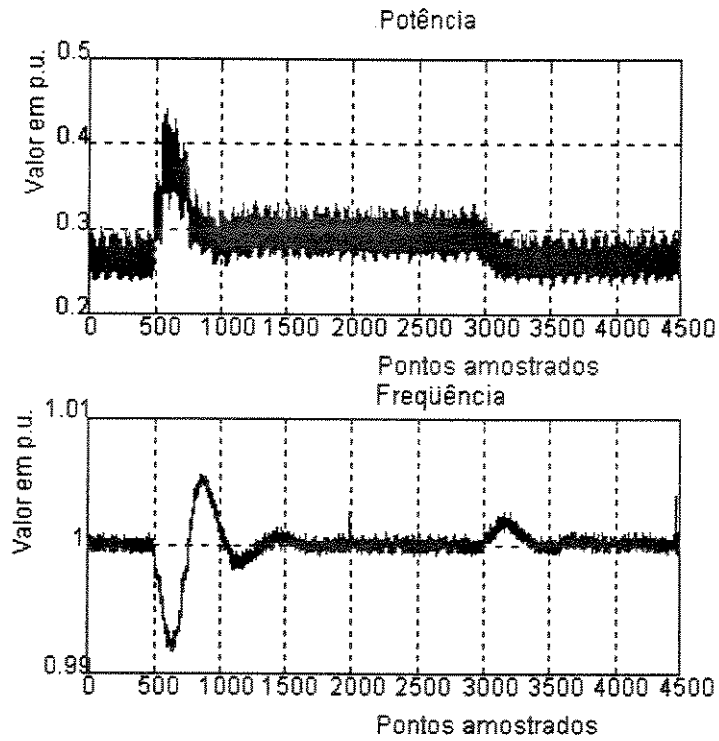


Figura 6.3-4 Potência e frequência do gerador G_3 na partida de duas bombas de lastro

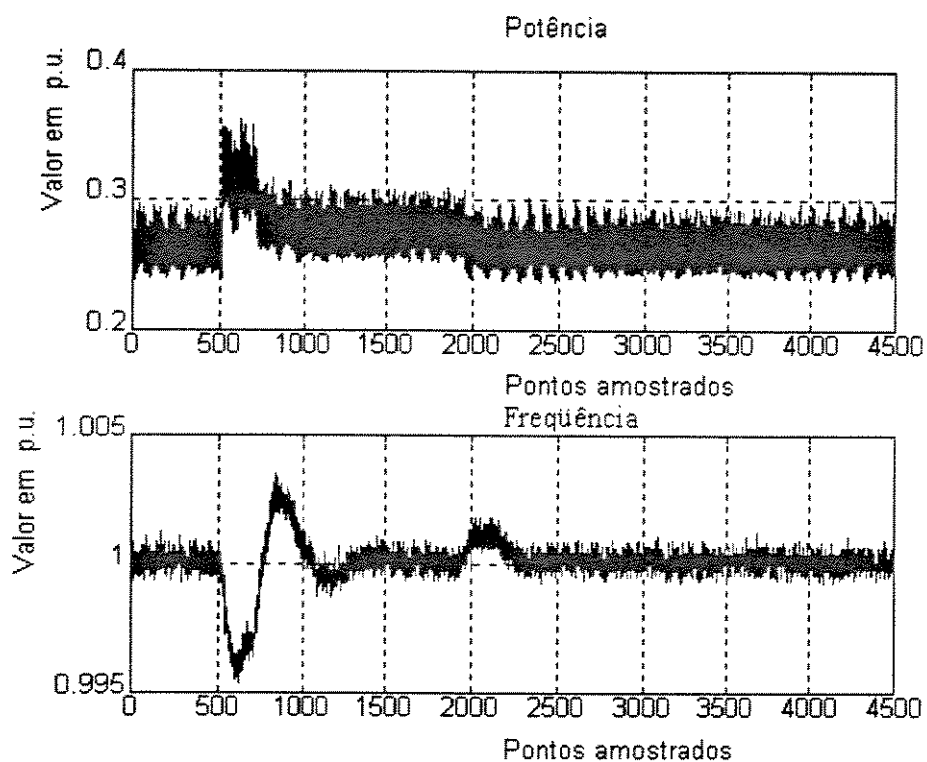


Figura 6.3-5 Potência e frequência do gerador G_4 na partida de uma bomba

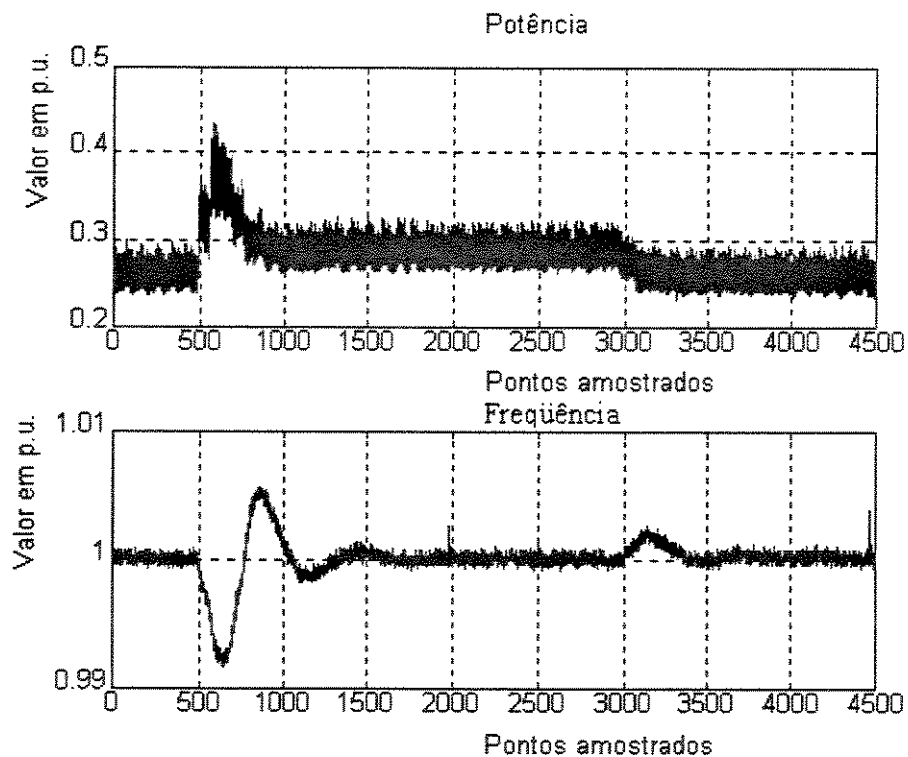


Figura 6.3-6 Potência e frequência do gerador G_4 para a partida de duas bombas

- **Deslocamento para origem**

O uso de funções de transferência supõe condições iniciais nulas, pois representam relações incrementais em torno de um ponto de operação. Para fazer a identificação da função de transferência é então necessário deslocar os sinais para a origem. Este deslocamento também é fundamental para executar uma filtragem adequada nos sinais. Isto é feito nas curvas de potência e frequência através da subtração do valor médio determinado através da função `mean(x)` do MATLAB, onde `x` é a curva da qual se deseja determinar a média, especificando-se o período no qual essa média deve ser calculada. Dependendo da curva é necessário fazer uma correção adicional para impedir que o sinal após ser filtrado desloque-se para fora da origem.

Nas Figs. 6.3-7 e 6.3-8, observam-se as curvas de potência e frequência do gerador G_3 após o deslocamento para origem durante a partida de uma bomba e duas bombas.

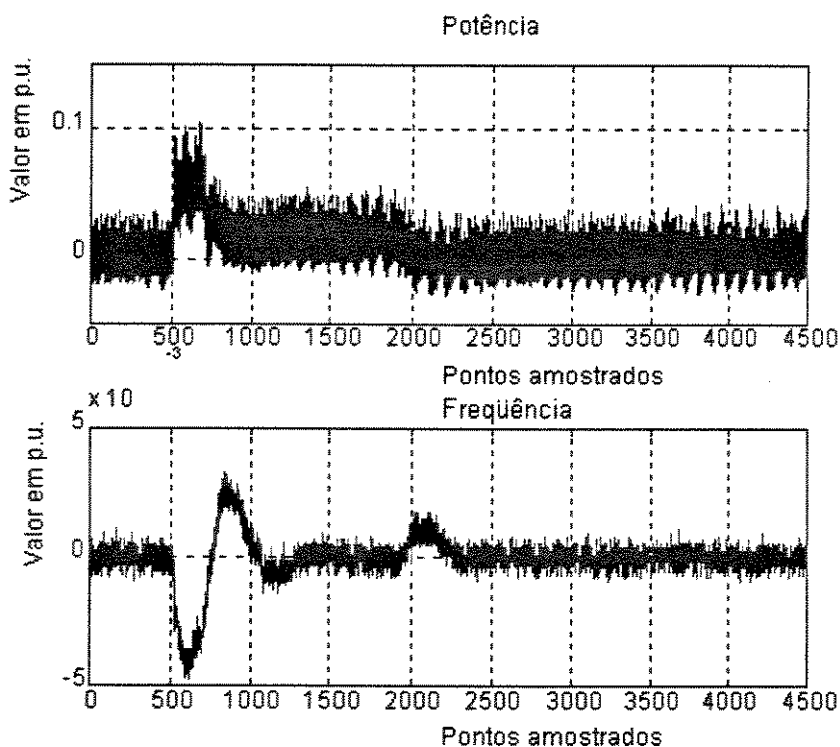


Figura 6.3-7 Potência e frequência deslocadas para origem para o gerador G_3 na partida de uma bomba

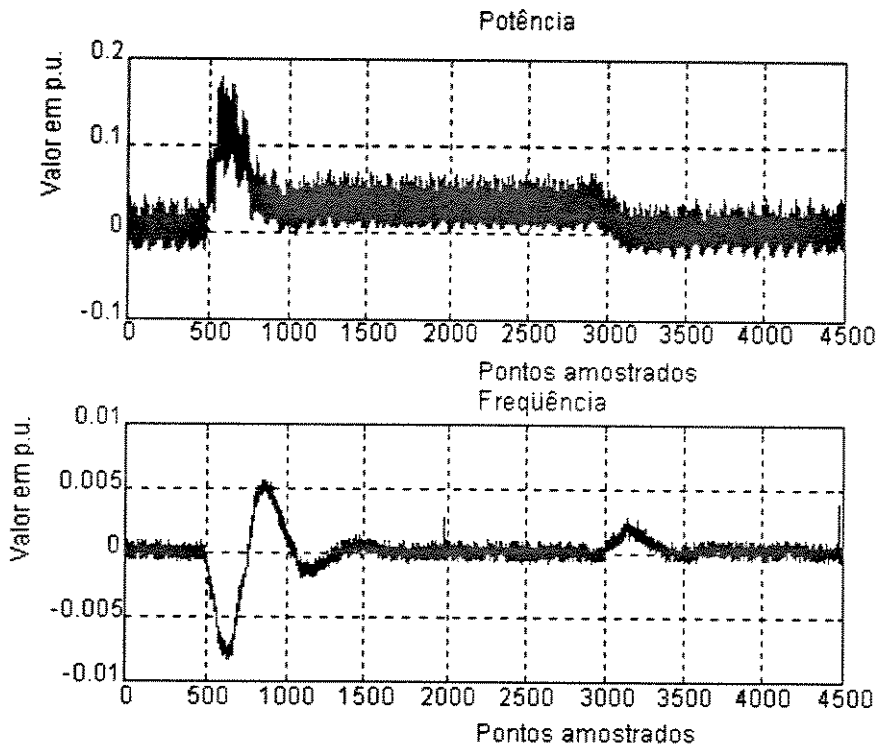


Figura 6.3-8 Potência e frequência deslocadas para origem para o gerador G_3 na partida de duas bombas

Nas figuras 6.3-9 e 6.3-10 mostram-se as curvas de potência e frequência do gerador G_4 para a partida de uma bomba e duas bombas

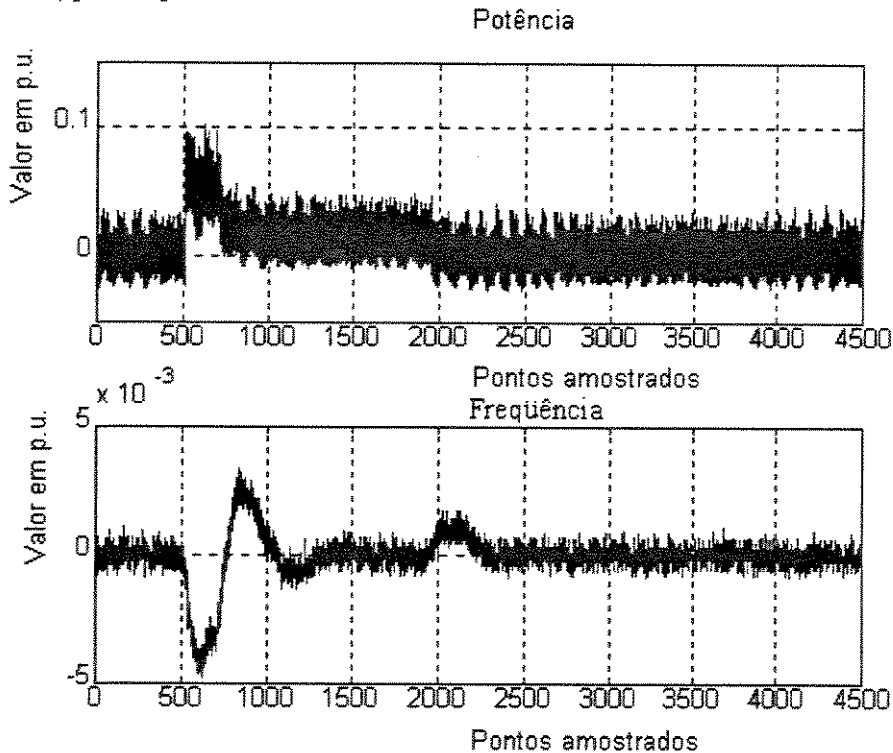


Figura 6.3-9 Potência e frequência deslocadas para origem para o gerador G_4 na partida de uma bomba

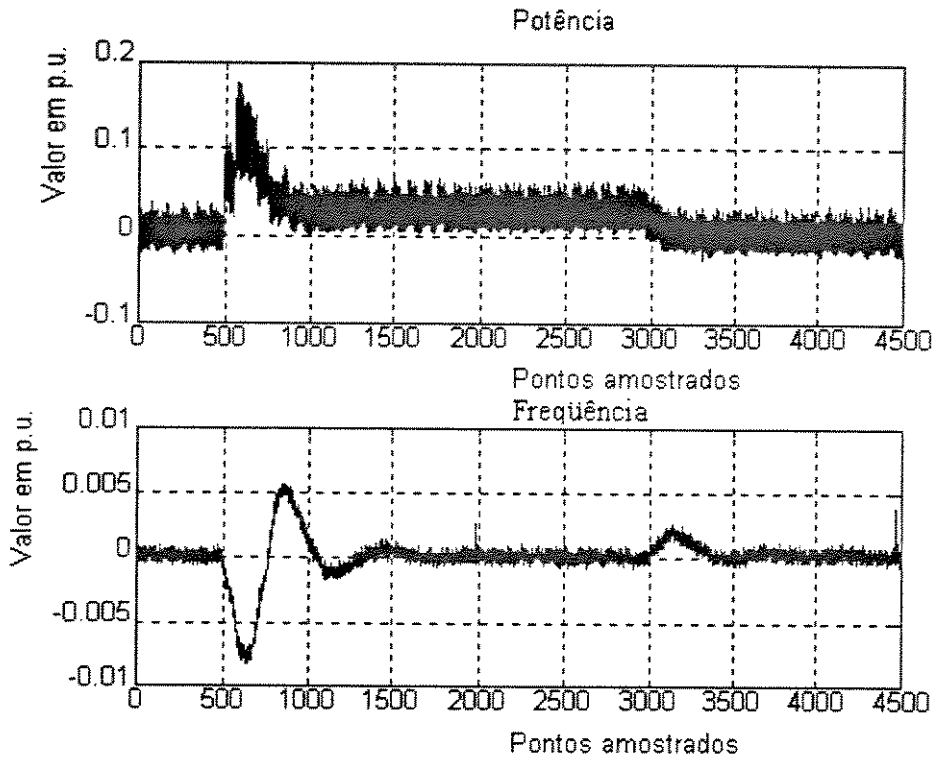


Figura 6.3-10 Potência e frequência deslocada para origem para o gerador G_4 na partida de duas bombas

- **Filtragem digital dos dados**

Antes de iniciar o processo de identificação é conveniente filtrar o sinal para eliminar o ruído introduzido durante a medição no campo. Para filtrar os dados utilizou-se um filtro “Butterworth IIR LP”, com frequência de corte 0.005 Hz, ordem 2 e tempo de amostragem 1/300 segundos, pertencente à biblioteca do “Matlab-Simulink”. Essa filtragem é realizada por “software” trabalhando-se sobre os dados amostrados durante o processo de medição.

Na Fig. 6.3-11 observam-se as curvas de potência e frequência filtradas para o gerador G_3 na partida de uma bomba e na figura 6.3-12 as curvas de potência e frequência para esse gerador relativo a partida de duas bombas

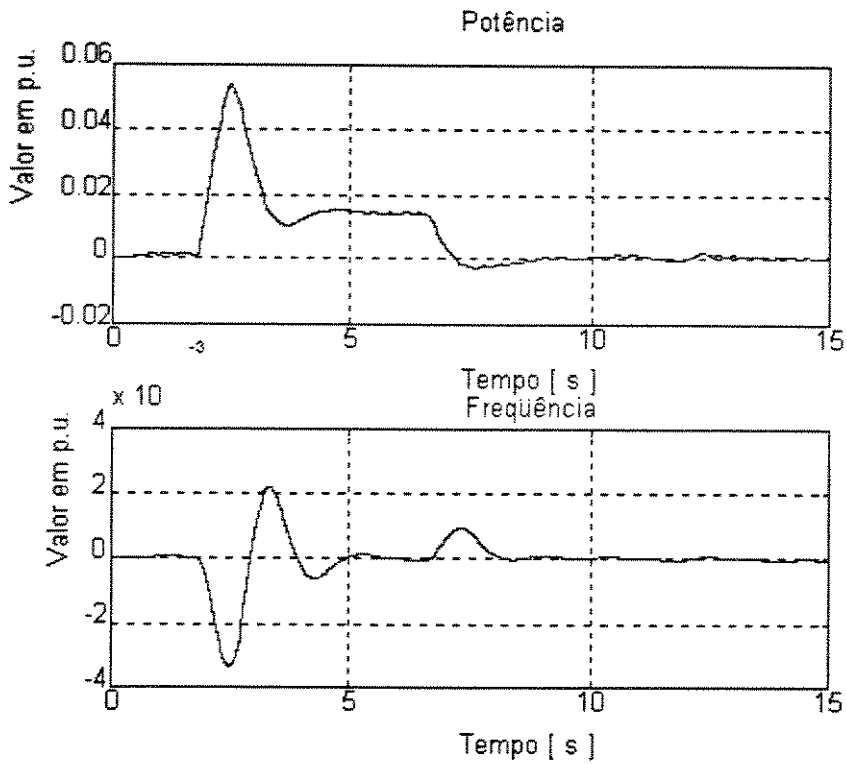


Figura 6.3-11 Potência e frequência filtradas para o gerador G_3 na partida de uma bomba

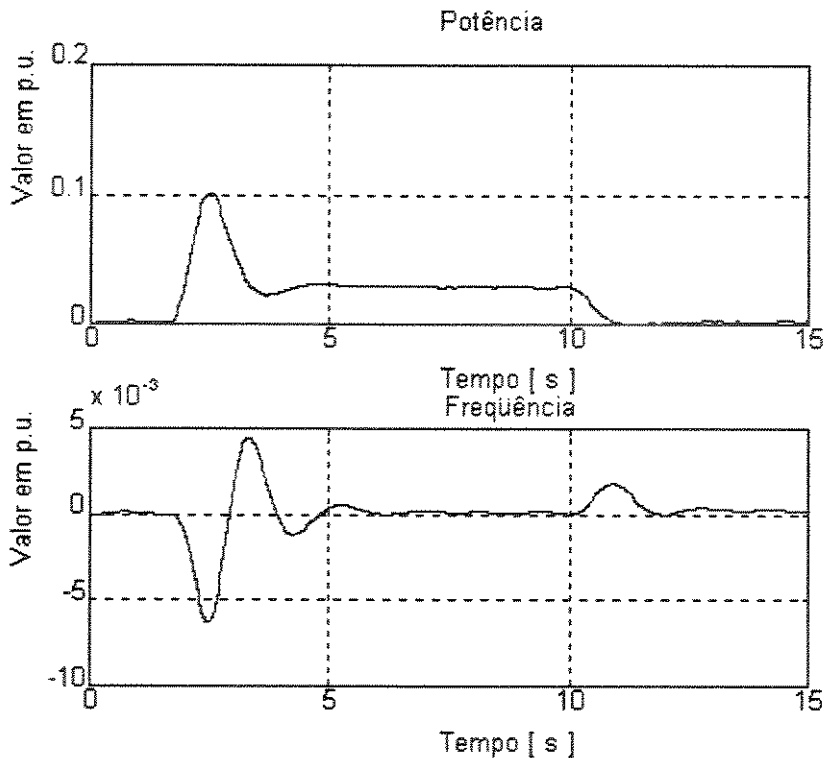


Figura 6.3-12 Potência e frequência filtradas para o gerador G_3 na partida de duas bombas

Nas Figs. 6.4-13 e 6.4-14 mostram-se as curvas de potência e frequência filtradas para o gerador G_4 para a partida de uma bomba e duas bombas.

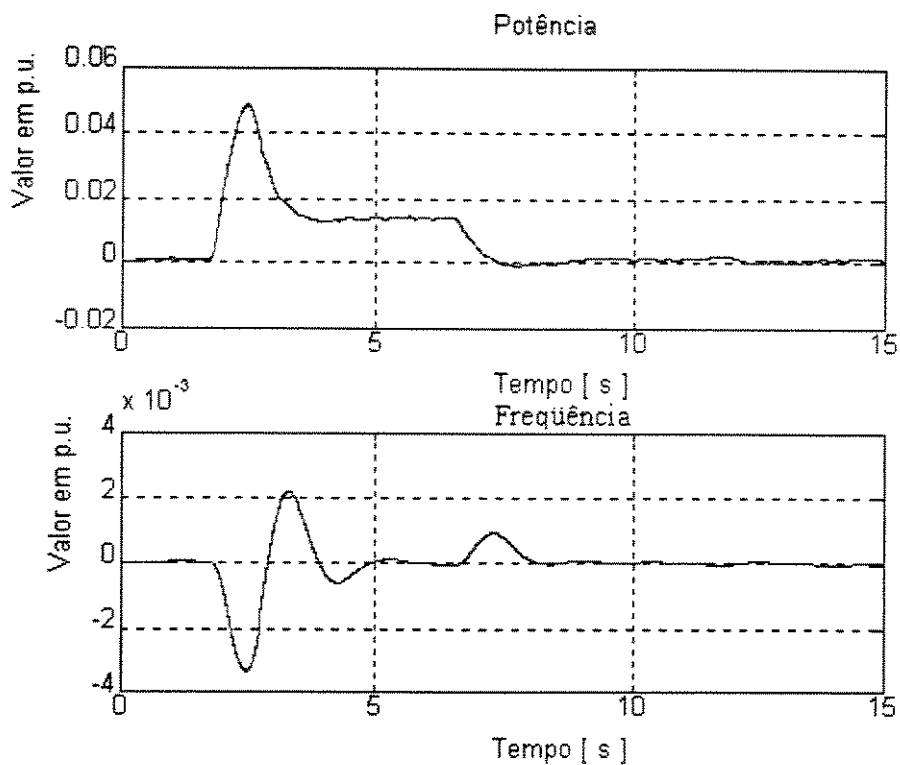


Figura 6.3-13 Potência e frequência filtradas para o gerador G_4 na partida de uma bomba

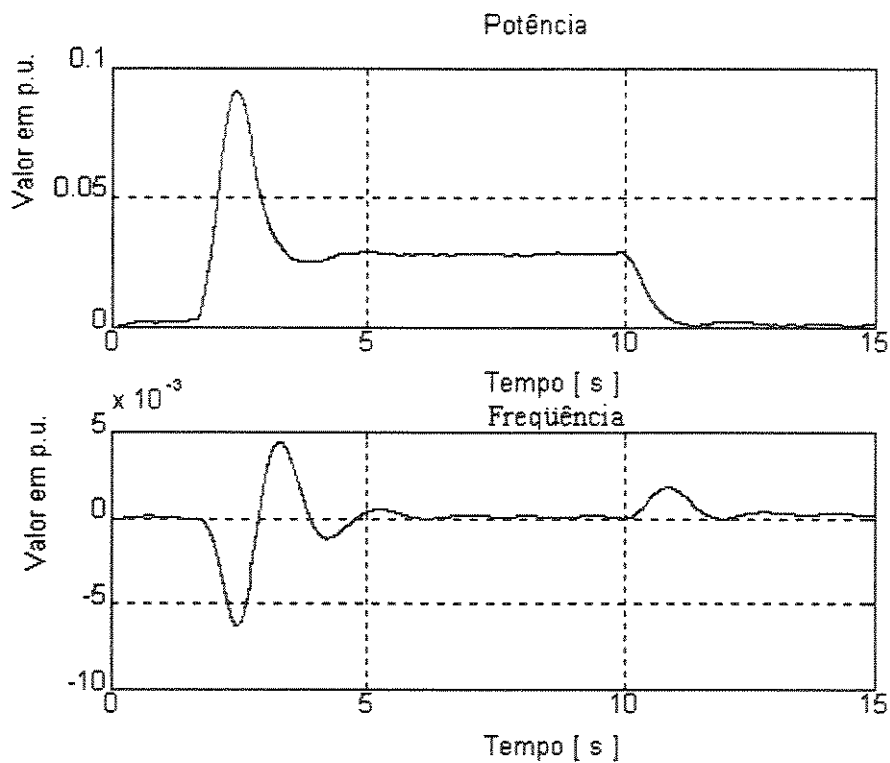


Figura 6.3-14 Potência e frequência filtradas para o gerador G_4 na partida de duas bombas

- **Função de transferência para geradores G_3 e G_4**

Durante os registros a condição de carga dos geradores era a seguinte:

Partida de uma bomba: geradores no barramento: 02 (G_3 e G_4)

$$\begin{aligned} P_3 &= 740 \text{ kW} & Q_3 &= 550 \text{ kVAr} \\ P_4 &= 680 \text{ kW} & Q_4 &= 550 \text{ kVAr} \end{aligned}$$

Partida de duas bombas: geradores no barramento: 02 (G_3 e G_4)

$$\begin{aligned} P_3 &= 700 \text{ kW} & Q_3 &= 550 \text{ kVAr} \\ P_4 &= 670 \text{ kW} & Q_4 &= 550 \text{ kVAr} \end{aligned}$$

É válido salientar que foram utilizados instrumentos analógicos existentes no painel de controle de geração para obtenção das medidas de potência ativa e reativa apresentadas acima, sendo portanto suscetíveis a erros de medição.

No procedimento de identificação da função de transferência procura-se uma função em variáveis contínuas $G(s)$ que case os sinais de entrada (potência) e saída (frequência). Escolheu-se usar representação em variáveis contínuas para ficar compatível com a representação dos demais componentes.

Basicamente o procedimento de identificação consiste em fixar uma estrutura para a função e identificar coeficientes usando alguma técnica de ajustes iterativos. Como os sinais de entrada e saída são amostrados (uma seqüência infinita de números) é conveniente expressá-los usando os operadores deslocamento-para-frente q (“forward-shift operator”) e deslocamento-para-trás q^{-1} (“backward-shift operator”). Desse modo a relação entre entrada e assume a forma:

$$A(q)y(k) = B(q)u(k - nk) \quad (6.3-1)$$

onde $y(k)$ é o sinal amostrado na saída, $u(k-nk)$ é o sinal amostrado da entrada com atraso nk , a ser definido e $A(q)$ e $B(q)$ são polinômios de grau na e nb da forma:

$$A(q) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_{na}q^{-na} \quad (6.3-2)$$

$$B(q) = b_1 + b_2q^{-1} + \dots + b_{nb}q^{-nb+1} \quad (6.3-3)$$

A função de transferência em variáveis discretas é expressa então por:

$$G(q) = \frac{B(q)}{A(q)} \quad (6.3-4)$$

sendo nessa forma identificada através do “toolbox” de processamento de sinais e identificação do MATLAB. A conversão para a forma contínua $G(s)$ é feita automaticamente pelo MATLAB. Para maiores detalhes consultar o Apêndice B.

Na identificação da função de transferência agregada da geração G_3 e G_4 utilizaram-se os dados da partida de uma bomba para obtenção das funções e a partida de duas bombas para validação dessas funções. Através do MATLAB as funções foram obtidas de acordo com modelo de identificação Arx com $[n_a \ n_b \ n_k]$ igual a $[2 \ 2 \ 2]$, que é a estrutura com menor ordem capaz de representar satisfatoriamente o conjunto motor/gerador/regulador dos sistemas de geração. Outras estruturas de maior ordem também foram identificadas mas optou-se pela estrutura mais simples, pois as estruturas maiores não melhoraram consideravelmente os resultados comparados com a estrutura escolhida.

As funções de transferência contínuas, $G_3(s)$ e $G_4(s)$, são apresentadas a seguir e representam matematicamente o conjunto motor diesel/gerador/regulador de velocidade das unidades geradoras número 3 e 4 da plataforma Petrobrás-15.

$$G_3(s) = \frac{-0,4844s - 0,1415}{s^2 + 3,4201s + 15,1318} \quad (6.3-5)$$

$$G_4(s) = \frac{-0,3865s - 0,1121}{s^2 + 2,2998s + 12,5510} \quad (6.3-6)$$

Na Fig. 6.3-15 observam-se as curvas de frequência normalizadas obtidas a partir de dados registrados em campo(real), relativos ao gerador G_3 (na partida de duas bombas) e a resposta obtida na simulação da função de transferência $G_3(s)$ utilizando-se como entrada a curva de potência registrada durante a partida de duas bombas. Na Fig. 6.3-16 plotam-se as mesmas curvas com os valores de frequência expressos em Hertz, e nas Figs. 6.3-17 e 6.3-18 observam-se essas curvas para o conjunto de geração G_4 . Essa comparação foi feita para testar a validade das funções de transferência $G_3(s)$ e $G_4(s)$ identificadas experimentalmente.

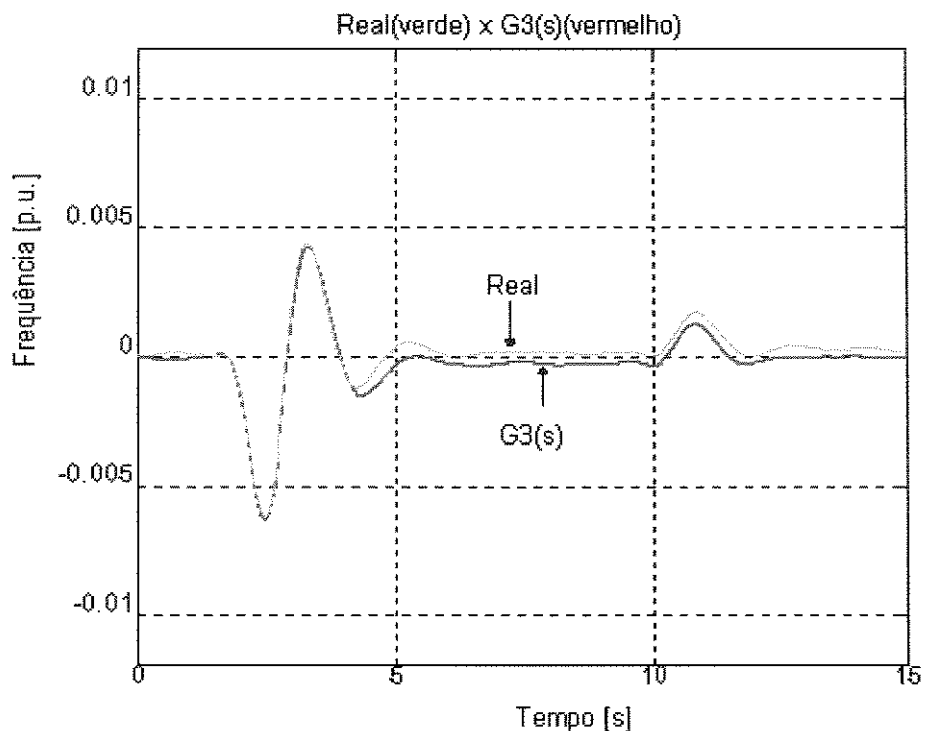


Figura 6.3-15 Curvas de frequência normalizada real e simulada

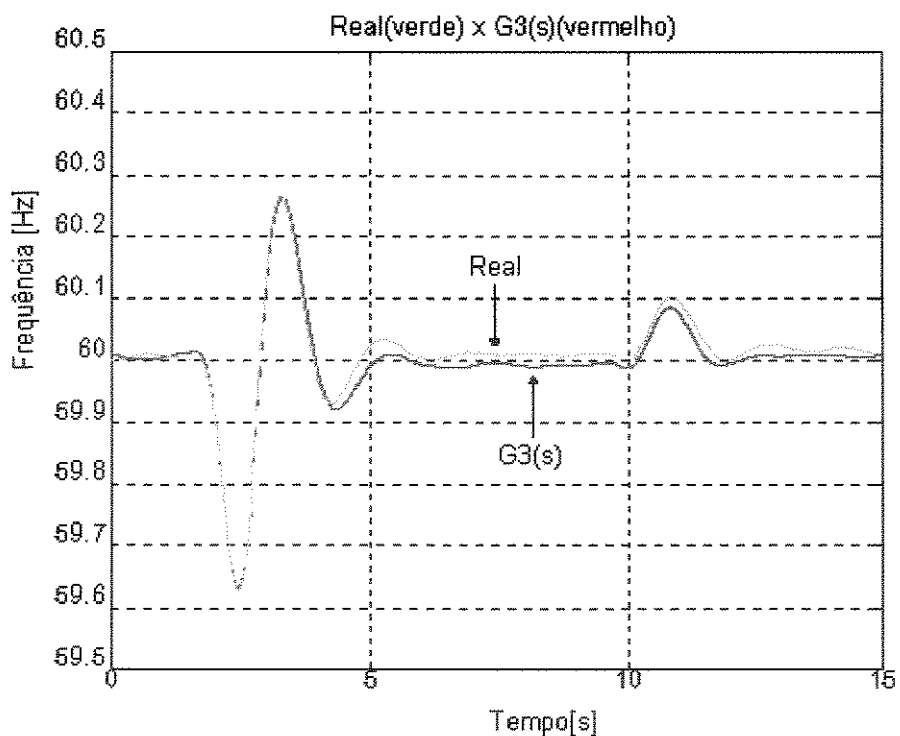


Figura 6.3-16 Curvas de frequência em hertz real e simulada

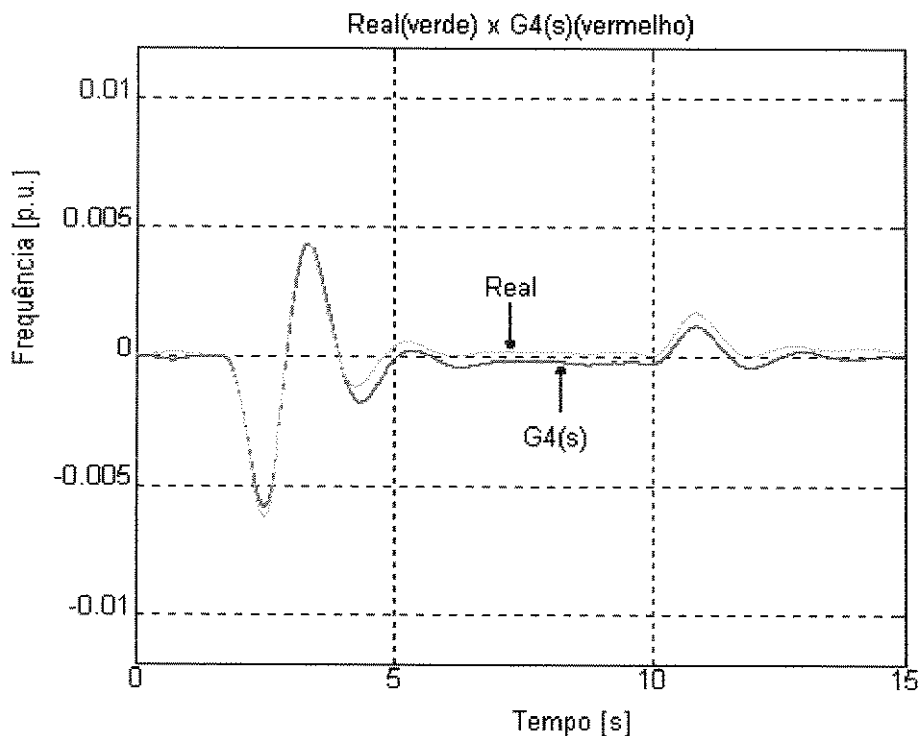


Figura 6.3-17 Curvas de frequência normalizada real e simulada

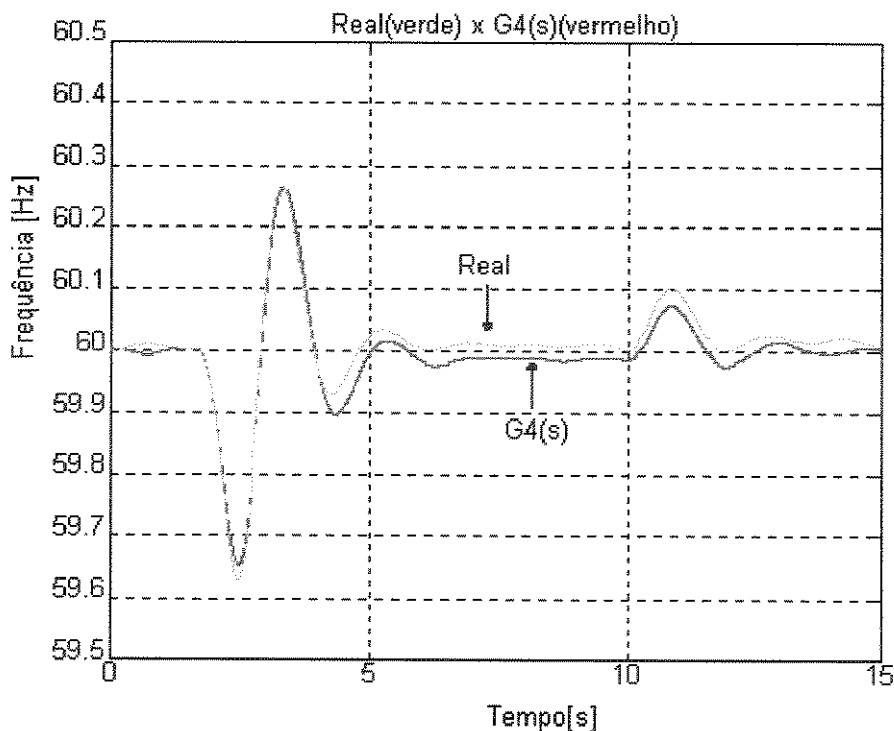


Figura 6.3-18 Curvas de frequência em hertz real e simulada

De acordo com os resultados observados nas Figs. 6.3-16 e 6.3-18, conclui-se que, para o ponto de operação descrito acima a representação do conjunto motor/regulador/generador através das funções de transferência (6.3-5) e (6.3-6) é satisfatório.

Deve-se observar que na obtenção dos registros foram utilizadas calibrações na placa de aquisição de dados que podem influenciar os resultados se não forem efetuadas com cuidado.

A diferença de carga observada nos geradores em questão está associada a ajustes internos da placa de controle AC e ao ajuste efetuado no momento do paralelismo desses geradores, e também ao comportamento dos reguladores de velocidade que, apesar de serem do mesmo modelo, apresentam pequenas diferenças de resposta, como se pode observar na diferença de potência obtida nas medições.

Verificou-se, no desenvolvimento desse trabalho, que o erro de regime observado na resposta da função de transferência está associado à diferença (embora pequena) dos valores de regime obtidos para as curvas de potência e frequência após efetuado o processamento preparatório de sinais.

6.4 Obtenção dos parâmetros do motor de indução

As características disponíveis para o motor de indução fornecidas pelo fabricante são:

| | | | |
|--|----------|-----------------------------|-------|
| Motor de indução trifásico | | | |
| Fabricante : Mitsubishi Electric Corporation | | | |
| 150 HP | 4 pólos | 460 V | 60 Hz |
| $I_N = 162 \text{ A}$ | 1770 rpm | $R_s = 0,0316 \text{ ohms}$ | |
| Corrente de partida = 868 A | | | |
| Torque máximo = 251% | | Torque de partida = 125% | |
| Teste sem carga | | | |
| Tensão = 460 V | | Corrente = 34,4 A | |
| Características a plena carga | | | |
| Escorregamento = 1,65 % | | Corrente = 162 A | |
| Eficiência = 94,2 % | | Fator de potência = 0,922 | |
| Tipo de carga : Bomba centrífuga (lastro) | | | |

O modelo operacional com funções de transferência precisa dos parâmetros do circuito equivalente do motor que, como se vê, não são fornecidos diretamente pelo “data sheet” do fabricante. Face a essa indisponibilidade de parâmetros por parte do fabricante, utilizou-se a seguinte metodologia para determinar os parâmetros do motor, usando-se medidas oscilografadas da corrente de partida como referência:

- estimativa inicial usando os dados do fabricante
- ajuste da curva de torque simulada através de ajuste nos parâmetros sob condições de tensão e frequência nominais;
- comparação da corrente de partida oscilografada com corrente de partida simulada após ajuste da curva de torque sob condições reais de operação

6.4.1 Estimativa inicial

Uma estimativa inicial dos parâmetros do motor foi obtida a partir da metodologia de cálculo apresentada na referência Slemon [23] e que utiliza os dados fornecidos pelo fabricante. Será apresentada abaixo a rotina de cálculo para obtenção dos parâmetros do circuito equivalente do motor de indução, utilizando-se os dados fornecidos pelo fabricante. Para a identificação da simbologia consultar a seção de nomenclatura.

$$P = \sqrt{3} \cos \phi = \sqrt{3} * 460 * 162 * 0,922 = 119.004,78 \text{ W}$$

$$I_N = 162 \text{ amp};$$

$$\text{perdas a vazio} = 3510 \text{ W};$$

$$\text{corrente a vazio (} I_{NL} \text{)} = 34,4 \text{ amp};$$

$$\eta = 1770 * 2 * \pi / 60 = 185,354 \text{ rad/seg};$$

$$V_a = 460 / \sqrt{3};$$

$$I_a = 162 \angle -22,78^\circ = 149,364 - 62,72j;$$

$$I_m = I_{NL} \angle -90^\circ = 34,4 \angle -90^\circ;$$

$$I'_a = I_a - I_m = 152 \angle -10,686^\circ;$$

$$X_m = 460 / \sqrt{3} * I_{NL} = 7,72 \Omega$$

$$T_L = 746 * 150 / 185,354 = 603,71 \text{ N.m};$$

$$T_{\text{perdas}} = P_{\text{perdas}} / \eta = 3510 / 185,354 = 18,93 \text{ N.m};$$

$$T = T_L + T_{\text{perda}} = 622,64 \text{ N.m};$$

$$3 * P_{ma} = \frac{3R_r}{s} (I'_a)^2 \Rightarrow R_r = 0,021 \Omega;$$

$$Z_r = R_s + \frac{R_r}{s} + j\omega_s L$$

$$Z_r = 1,7244 + jX_1$$

$$\frac{X_1}{1,7244} = \text{tg} \angle -I'_a = \text{tg} \angle 10,686 \Rightarrow X_1 = 0,3254 \Omega$$

$$X_{ls} = 0,4X_1 = 0,13016 \Omega$$

$$X_{lr} = 0,6X_1 = 0,19524 \Omega$$

Os parâmetros calculados com essa metodologia estão listados na Tabela 6.3-1

6.4.2 Ajuste de parâmetros

Na simulação do motor com os parâmetros inicialmente calculados nas condições nominais observou-se uma discrepância significativa no valor de torque máximo simulado (3,2 p.u.) em relação ao valor fornecido pelo fabricante (2,51 p.u.). Por esse motivo optou-se por ajustar ligeiramente os parâmetros, conforme Tabela 6.3-1. Nos ajustes efetuados priorizou-se o casamento das curvas de torque do fabricante e simulada em detrimento das demais características fornecidas pelo fabricante, devido a sua importância no comportamento da frequência. Todas as simulações foram efetuadas considerando a bomba em “shutoff”, pois os ensaios e registros efetuados a bordo da plataforma foram nesta condição, bem como usando condições nominais de tensão e frequência.

Tabela 6.3-1

| | Calculado (p.u.) | Ajustado (p.u.) |
|-----------|--------------------|-------------------|
| R_s | 0,01987 (*) | 0,01987 |
| R_r | 0,01767 | 0,01767 |
| X_m | 4,85500 | 4,85500 |
| X_l | 0,20470 | 0,25300 |
| X_{ls} | 0,08186 | 0,10120 |
| X_{lr} | 0,12280 | 0,15180 |
| X_{ss} | 4,93686 | 4,95620 |
| X_{rr} | 4,97780 | 5,00680 |
| T_{max} | 3,10000 | 2,50400 |
| J | 1,70000(***) | 1,01070(**) |

Durante o processo de ajuste foram adotados os seguintes critérios:

- 1) (*) - fornecido pelo fabricante;
- 2) (**) - ajustado dentro da faixa de valores característicos para acerto do tempo de partida;
- 3)(***) - ajustado para manter coerência de tempo de aceleração com valor observado em campo;
- 4) $S_{BASE} = 132,878 \text{ KVA}$; $Z_{BASE} = 1,59 \Omega$; $V_{BASE} = 460 \text{ V}$.
- 5) $P_{carga} = K\omega^2$, onde $K = 0,54$ na situação de “shutoff” e ω = velocidade angular do motor

As Figs. 6.4-1 e 6.4-2 mostram as curvas de corrente de partida e torque utilizando-se os parâmetros calculados inicialmente e sob condições nominais de tensão e frequência, mantidos fixos. Note que o torque máximo atinge 3,2 p.u..

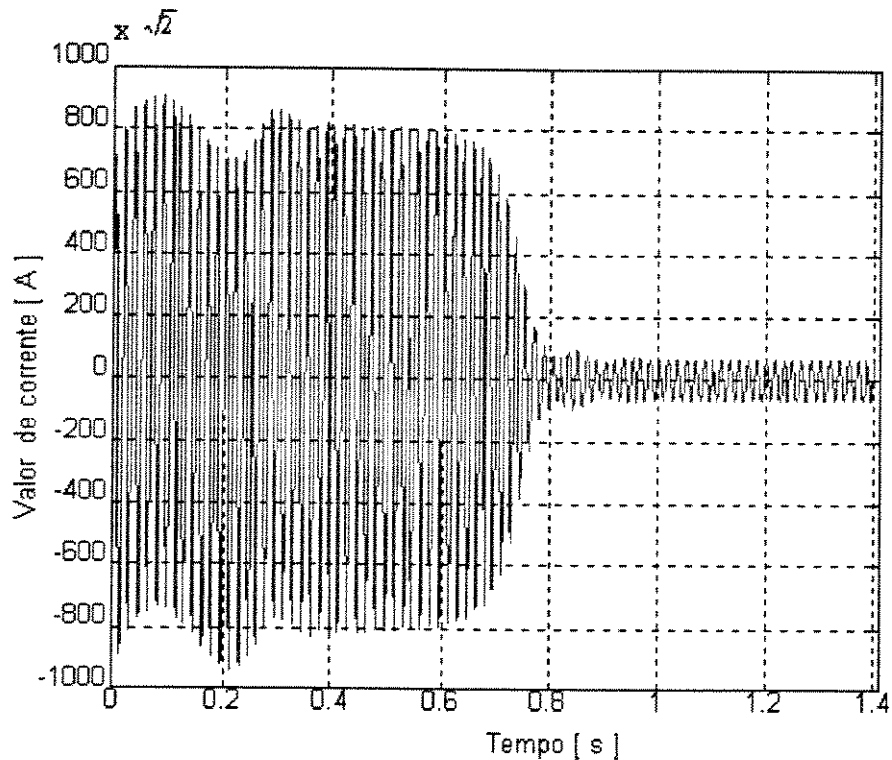


Figura 6.4-1 - Curva de corrente de partida com parâmetros calculados e condições nominais

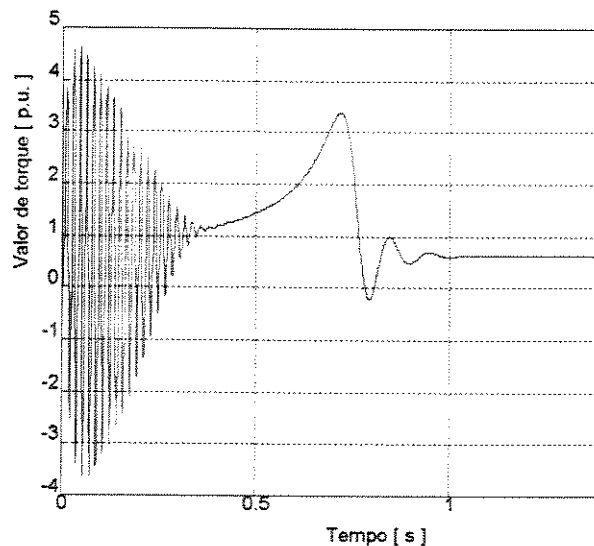


Figura 6.4-2 Curva de torque com parâmetros calculados e condições nominais

A atitude de deixar coerente os valores dos parâmetros calculados ou fornecidos pelo fabricante com valores ensaiados não é raro, de acordo com Johnson [3], P. Ju [24] e Waters [26], pois devido às simplificações efetuadas (por exemplo desprezar o efeito pelicular) aparecem discordância entre os valores calculados e ensaiados fornecidos pelo fabricante. Frequentemente, o próprio fabricante faz um ajuste para atender aos valores ensaiados.

É conveniente ressaltar que os ajustes foram efetuados para buscar uma concordância na curva de torque devido ao fato da curva de potência ser determinante no comportamento do sistema quanto à resposta em frequência.

Na Fig. 6.4-3 mostra-se a curva de torque após os ajustes efetuados nas reatâncias de dispersão do rotor e estator, simulada sob condições nominais de frequência e tensão. Note que o torque máximo agora é de aproximadamente 2,4 p.u..

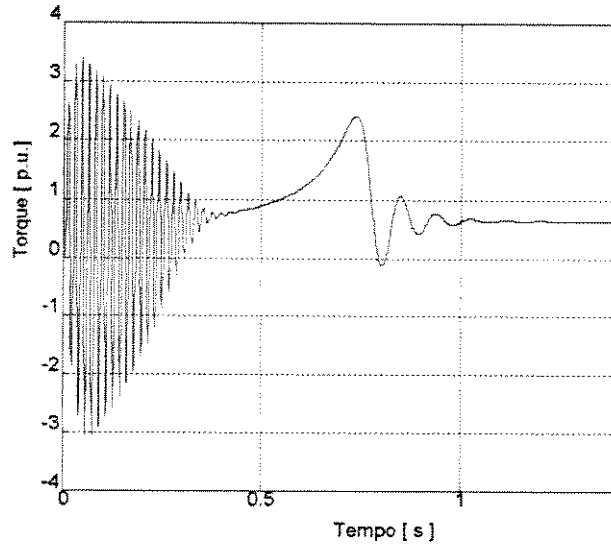


Figura 6.4-3 - Curva de torque com parâmetros ajustados do motor de 150 HP, com condições nominais

Na Fig. 6.3-4 apresenta-se a curva da corrente de partida simulada sob as mesmas condições descritas anteriormente.

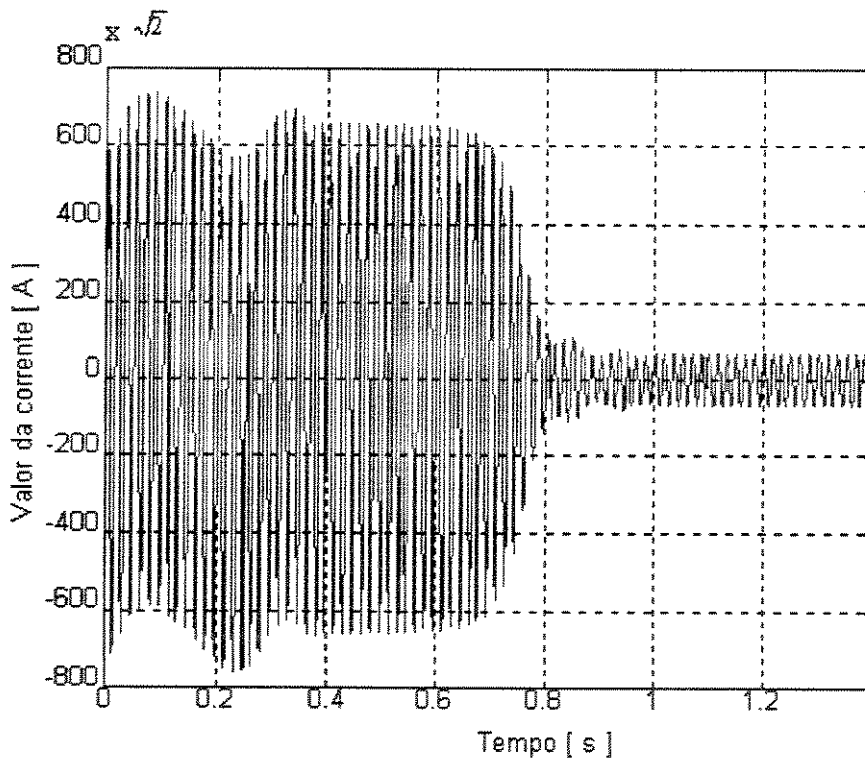


Figura 6.4-4 - Curva da corrente de partida simulada, com condições nominais

Na Fig. 6.4-5 apresenta-se a curva de corrente de partida do motor , registrada (oscilografada) a bordo da plataforma Petrobrás-15, sob condição operacional real de tensão e frequência. Nas Figs. 6.4-6 e 6.4-7 estão mostradas as curvas de corrente e torque simuladas sob essas mesmas condições (tensão e frequência variam), utilizando-se os parâmetros ajustados do motor e demais parâmetros do sistema gerador conforme foi abordado na seção anterior. Note que o valor máximo de torque agora é aproximadamente 2,5 p.u., como desejado, e que o tempo de aceleração é aproximadamente o mesmo do oscilografado.

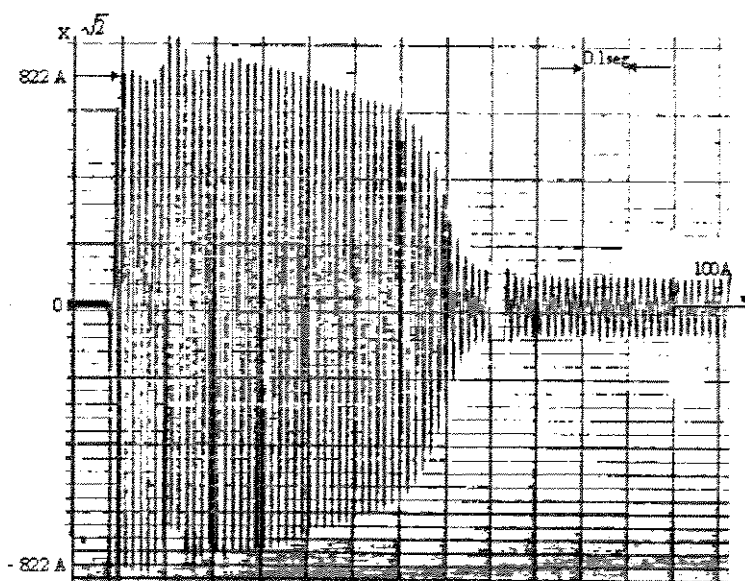


Figura 6.4-5 - Corrente de partida oscilografada do motor da bomba de lastro (150 Hp)

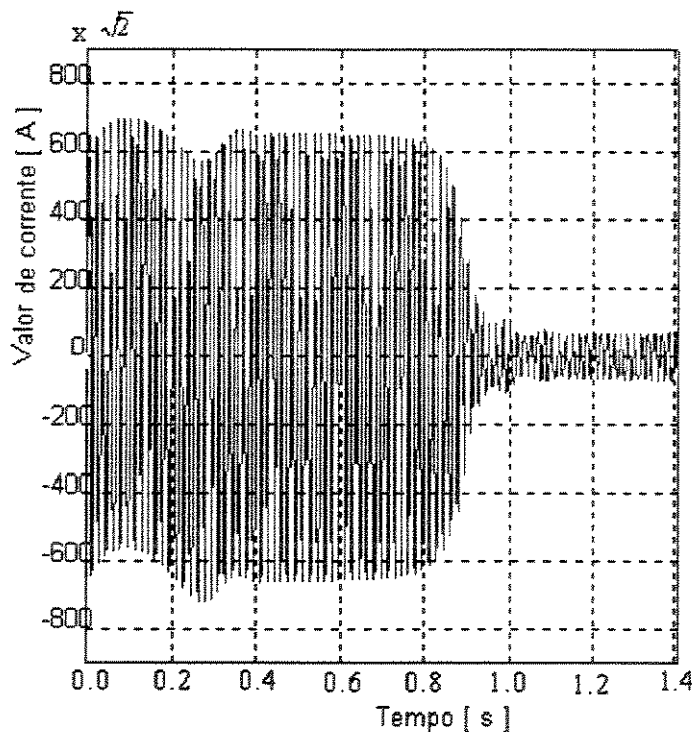


Figura 6.4-6 Curva da corrente de partida simulada com condições operacionais

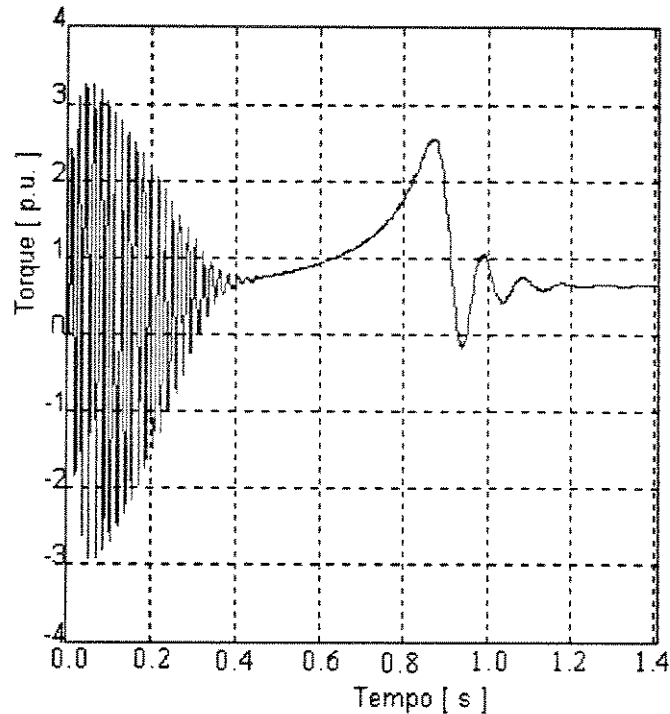


Figura 6.4-7 Curva de torque simulada em condições operacionais

Analisando os resultados obtidos conclui-se que ao ajustar-se os parâmetros do motor para haver concordância do valor de torque máximo distorce-se um pouco a forma de onda da corrente, mas os valores diferem menos que 20 % em p.u., o que é razoável de acordo com a referência Waters [26] e aceito pela ABNT [1].

É válido ainda salientar que o método utilizado para ajustar a curva de torque, variando-se um parâmetro e fixando-se os demais não é o mais adequado, mas como qualquer um dos métodos sugeridos em Johnson[25], P.Ju [24] e Waters [26] implica no desenvolvimento de um programa específico, o que está fora do escopo deste trabalho- serão utilizados nas seções seguintes os valores ajustados da Tabela 6.3-1.

6.5 Sistema elétrico completo da Petrobrás-15

O sistema elétrico completo dessa plataforma é representado por modelos operacionais conforme mostrado na Figs. 6.5-1. Os blocos dos geradores (Gerador U15 e U15b) contém o conjunto de funções de transferência verificadas na Fig. 2.7, os blocos mogovgw15 e mogovgw15.1 contém as funções de transferência $G_3(s)$ e $G_4(s)$ respectivamente, e os blocos avrt1u15 e avrt2u151 contém o conjunto de funções de transferências mostrado na figura 3.4. No Apêndice C apresenta-se a relação dos blocos do MATLAB, onde se pode ver o significado de cada bloco, bem como o seu conteúdo específico.

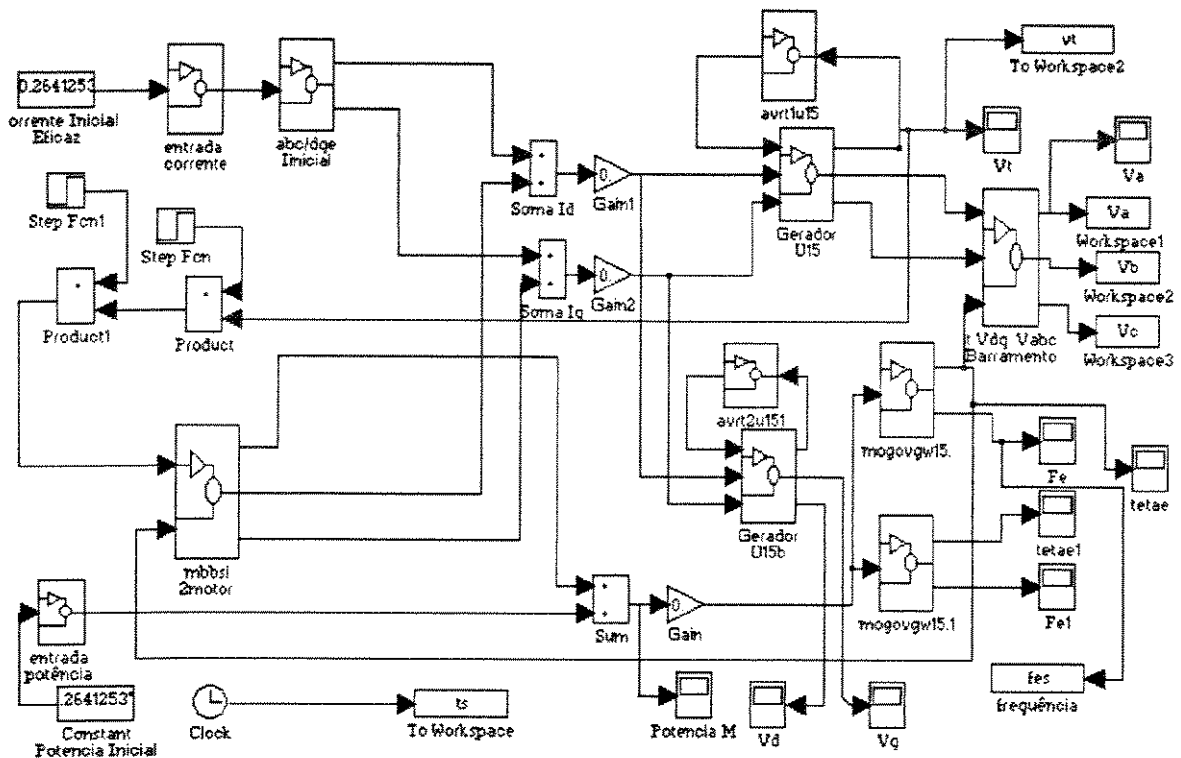


Figura 6.5-1 Representação modelos operacionais do sistema elétrico da plataforma Petrobrás 15

6.5.1 Ajuste dos parâmetros dos AVR's

Para ajustar os parâmetros dos AVR's dos geradores G_3 e G_4 utilizou-se o valor de tensão observado e registrado no barramento de 480Vac durante partida de uma bomba de lastro (motor de 150 HP) e que está mostrado na Fig. 6.5-2.

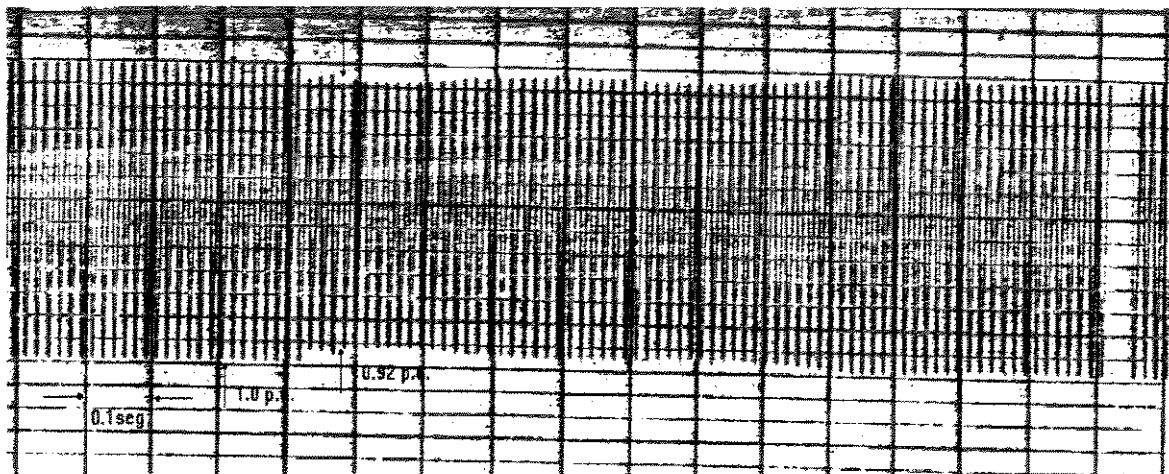


Figura 6.5-2 Tensão no barramento de 480 Vac oscilografada durante a partida de uma bomba de lastro

Verifica-se que a tensão oscilografada no barramento de 480V sofre uma queda de tensão de 0.05 p.u., ou seja, o valor mínimo de tensão é 0.95 p.u.. A Fig. 6.5-3 mostra a tensão simulada no barramento de 600V, onde se obteve o valor mínimo de tensão de 0.92 p.u., sendo que na simulação foram desprezadas as impedâncias dos cabos e do transformador 600/460 V. Observa-se que o tempo do transitório e modo de oscilação apresentam boa concordância com os dados registrado em campo.

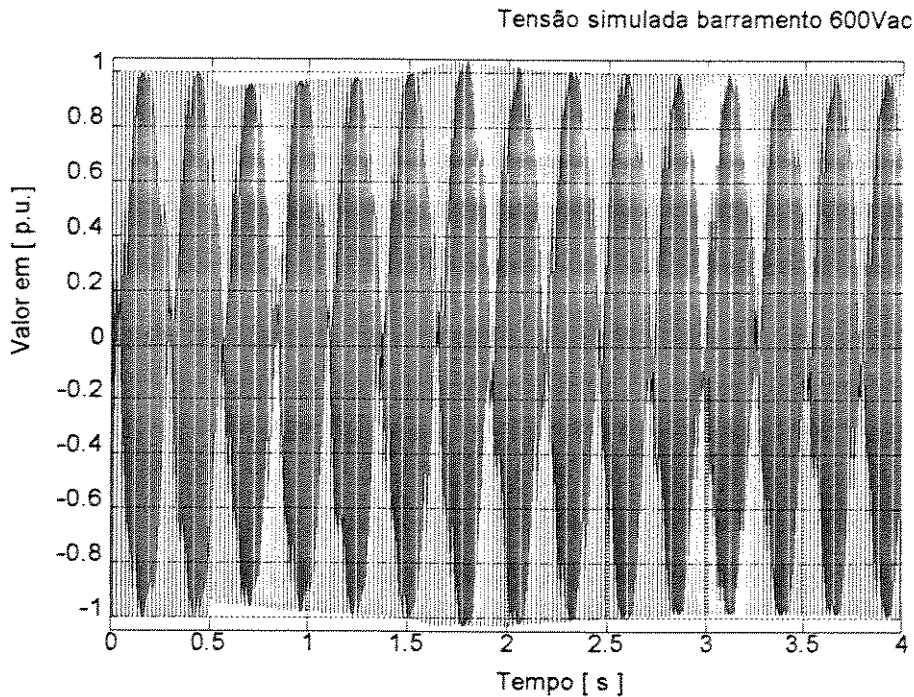


Figura 6.5-3 Tensão no barramento de 600V e obtida na simulação da partida de uma bomba de lastro

O modelo utilizado para representar o regulador de tensão foi o Tipo 1 do IEEE, que normalmente é usado para representar excitatrizes sem escovas, como as encontradas na plataforma Petrobrás-15.

Os parâmetros do modelo Tipo 1 obtidos após os ajustes estão relacionados na Tabela 6.5-1.

Tabela 6.5-1

| Parâmetros | Valor |
|-------------|-------|
| T_R | 0.02 |
| K_A | 700 |
| T_A | 0.02 |
| V_{Rmax} | 600 |
| V_{Rmin} | 0.18 |
| K_f | 0.05 |
| T_f | 0.5 |
| K_E | 0.8 |
| T_E | 0.13 |
| SE_{max} | 0.86 |
| $SE_{0.75}$ | 0.50 |

obs: Função de saturação : $SE = 0.11426e^{0.6002E_{fd}}$

6.5.2 Verificação das curvas de frequência dos geradores G_3 e G_4 através da simulação da partida de duas bombas de lastro

Usando-se os modelos operacionais e parâmetros definidos para todos os componentes do sistema elétrico simula-se a partida de duas bombas de lastro. Na Fig. 6.5-4 compara-se a curva de potência simulada com a curva de potência registrada durante ensaios para o gerador G_3 .

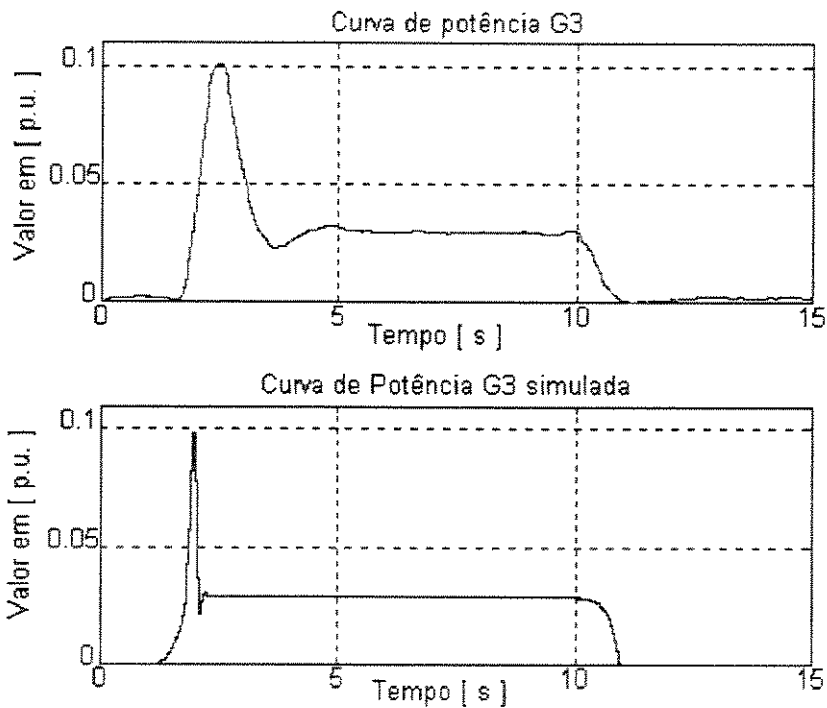


Figura 6.5-4 Curvas de potência do gerador G_3 na condição de partida de duas bombas

Na simulação manteve-se fixa a mesma distribuição de carga observada nos registros da partida de uma bomba e duas bombas, ou seja, 55% para G_3 e 45% para G_4 . Verifica-se na Fig. 6.5-4 que a forma da curva simulada difere da forma de onda registrada, mas os valores de pico e de regime coincidem. A curva medida apresenta uma resposta mais amortecida.

Na Fig. 6.5-5 comparam-se as curvas de frequência medida e simulada. Nota-se uma diferença considerável entre essas curvas de frequência, principalmente quanto ao valor de “overshooting” observado no primeiro transitório, embora a queda de frequência e formas de onda sejam bem representadas. Os resultados simulados são mais conservativos que os medidos e por isso recomenda-se critério na utilização desses resultados, embora o erro cometido não seja de grande amplitude.

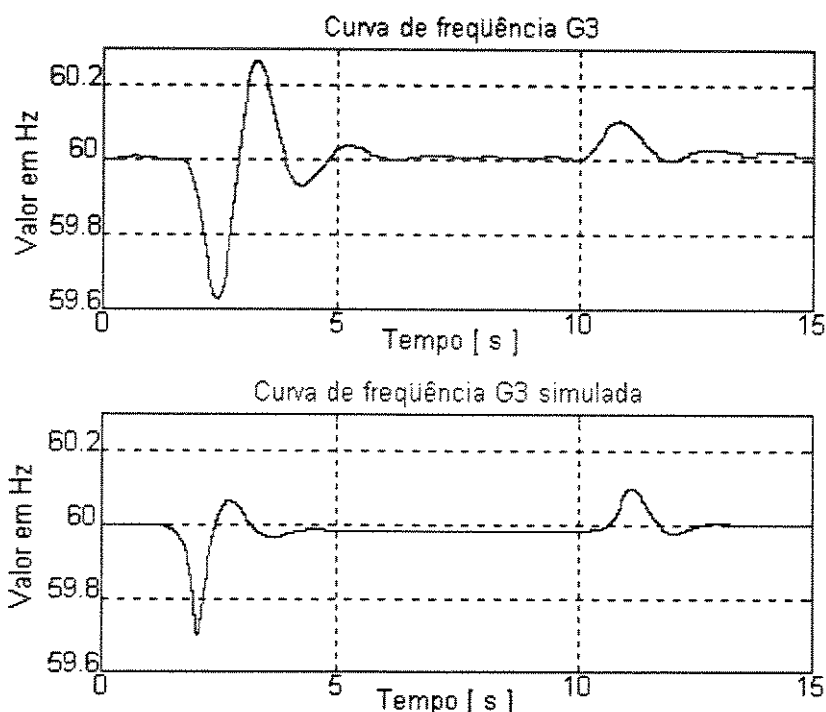


Figura 6.5-5 Curvas de frequência do gerador G_3 na condição de partida de duas bombas

Durante o desenvolvimento deste trabalho observou-se que a curva de frequência simulada pode ser ajustada a curva obtida nos registros de campo a partir do ajuste dos parâmetros da função de transferência. No entanto não foi possível ajustar totalmente a curva, ou seja ao ajustar-se um determinado comportamento perde-se o ajuste em um outro qualquer, como por exemplo, ao ajustar-se o “overshooting” do primeiro transitório perde-se a concordância do segundo “overshooting” (“desligamento dos motores”). Por essa razão neste trabalho, até o momento, foram utilizadas as funções de transferência na forma como foram identificadas, ou seja, sem ajustes. Não serão apresentadas as curvas referente ao gerador G_4 pois o comportamento é análogo ao verificado para o gerador G_3 .

6.5-3 Alternativas para melhorar a resposta de frequência

Observa-se que a curva de frequência simulada não apresenta boa concordância com a curva medida em relação à amplitude e forma do primeiro transitório, conforme verifica-se na Fig. 6.5-5. Em simulações realizadas constatou-se que a diferença entre as curvas de potência medidas e simuladas, Fig. 6.5-6, estava diretamente relacionada com a diferença observada nas curvas de frequência simulada e medida.

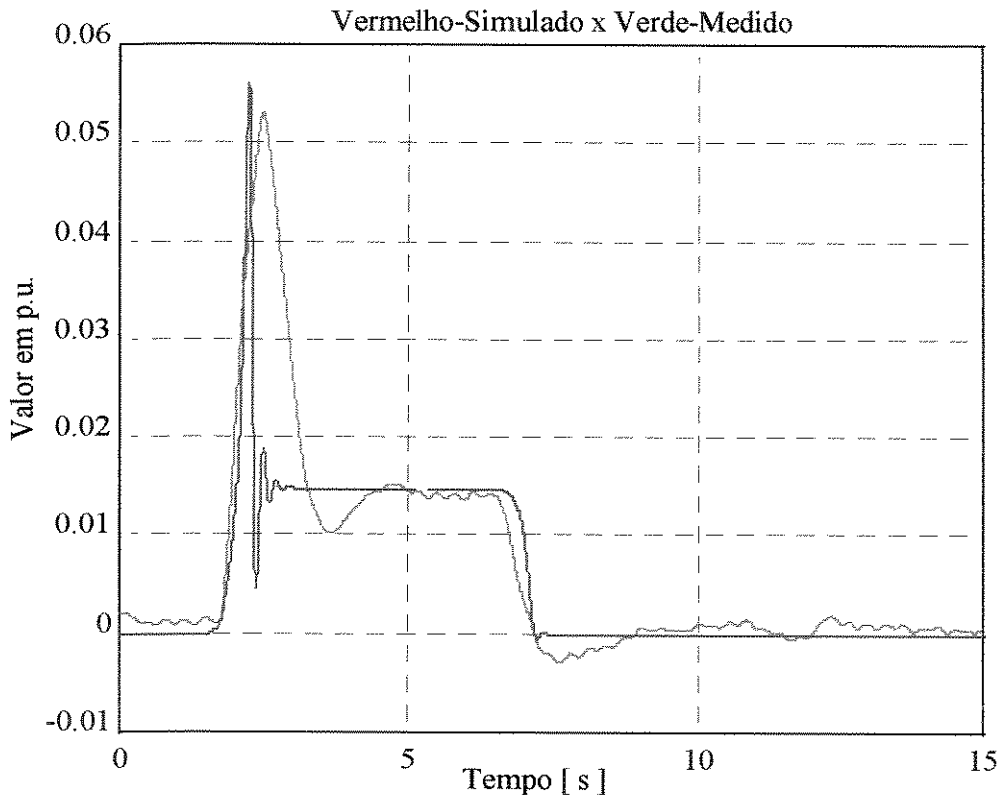


Figura 6.5-6 Curvas de potência medida e simulada na condição de partida de uma bomba para gerador G_3

Para melhorar a resposta de frequência simulada deste sistema adotou-se as seguintes alternativas:

- 1^a - identificar uma nova função de transferência utilizando potência simulada e frequência medida; e
- 2^a - inclusão de uma função de transferência no modelo operacional do sistema elétrico para representar o efeito de medição.

- Função de transferência utilizando potência simulada e frequência medida

Utilizando as curvas de potência simulada como entrada e frequência medida como saída, para a partida de uma bomba de lastro, mostradas na Fig. 6.5-7 e adotando-se o modelo OE (“output-error”) com estrutura $[nb \ nf \ nk]=[3 \ 3 \ 2]$, obtém-se a seguinte função de transferência:

$$G_{3M}(s) = \frac{-0,0147s^2 + 0,0259s - 0,0112}{s(s^3 - 1,0061s^2 - 0,9757s + 0,9821)}$$

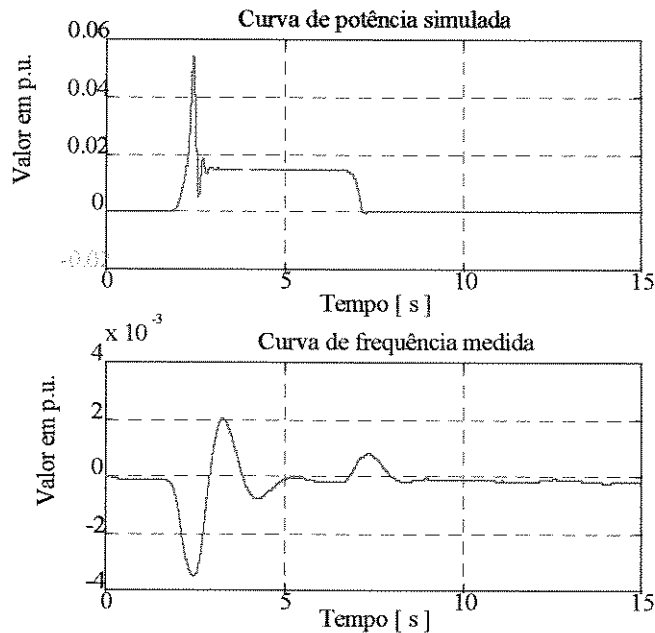


Figura 6.5-7 Curvas de potência simulada e frequência medida na condição de partida de uma bomba para gerador G_3

Substituindo a função de transferência utilizada anteriormente $G_3(s)$ por essa nova função $G_{3M}(s)$ no modelo operacional do sistema elétrico da plataforma Petrobrás 15 e simulando a partida de uma bomba de lastro, obtém-se a resposta de frequência observada na Fig. 6.5-8.

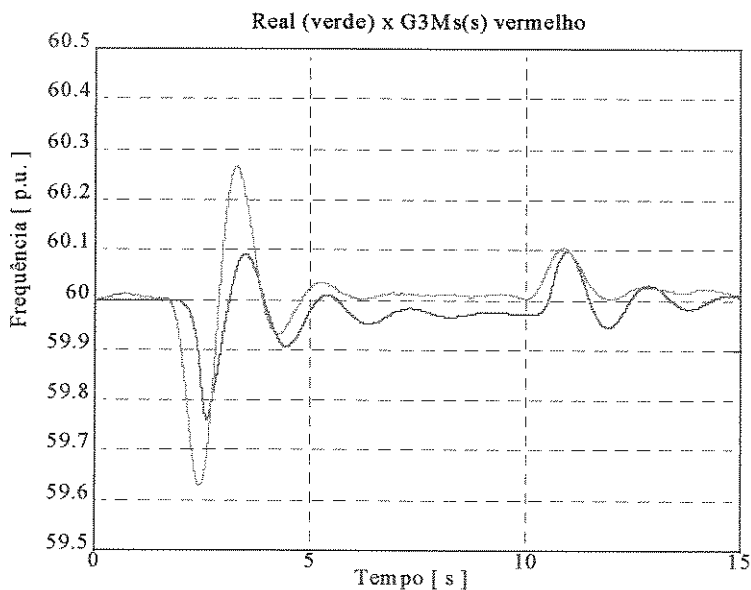


Figura 6.5-8 Curvas de frequência simulada e medida para a partida de uma bomba de lastro para gerador G_3

- **Inclusão de uma função de transferência considerando o efeito de medição**

Verifica-se na Fig. 6.5-6 que a curva de potência medida apresenta-se diferente da curva simulada, e como a curva medida foi obtida através da medição de um sinal CC (conforme Seção 6.3) salientado-se que este sinal é gerado por um circuito possuindo como entradas a saída de três TC's (transformador de corrente), conectados próximos ao disjuntor de cada gerador, e o sinal de tensão proveniente de um TP (transformador de potencial). Como estes sinais são transformados da forma CA para a forma CC através de um circuito eletrônico com constantes de tempo, conclui-se que o sinal representativo da potência apresenta erro devido à forma como foi obtido.

Utilizando-se então as curvas de potência simulada, como entrada, e a medida como saída, para a partida de uma bomba de lastro, mostradas na Fig. 6.5-6 e adotando-se o modelo OE ("output-error") com estrutura $[nb \ nf \ nk] = [2 \ 2 \ 1]$ obtém-se a seguinte função de transferência para representar o efeito de medição:

$$FT_M(s) = \frac{7,1107s + 8,0463}{s^2 + 3,6229s + 8,1195}$$

Utilizando-se a função de transferência $FT_M(s)$ associada a $G_3(s)$ no modelo operacional do sistema elétrico dessa plataforma e simulando-se a partida de uma bomba de lastro obtém-se uma nova curva de potência simulada conforme Fig. 6.5-9.

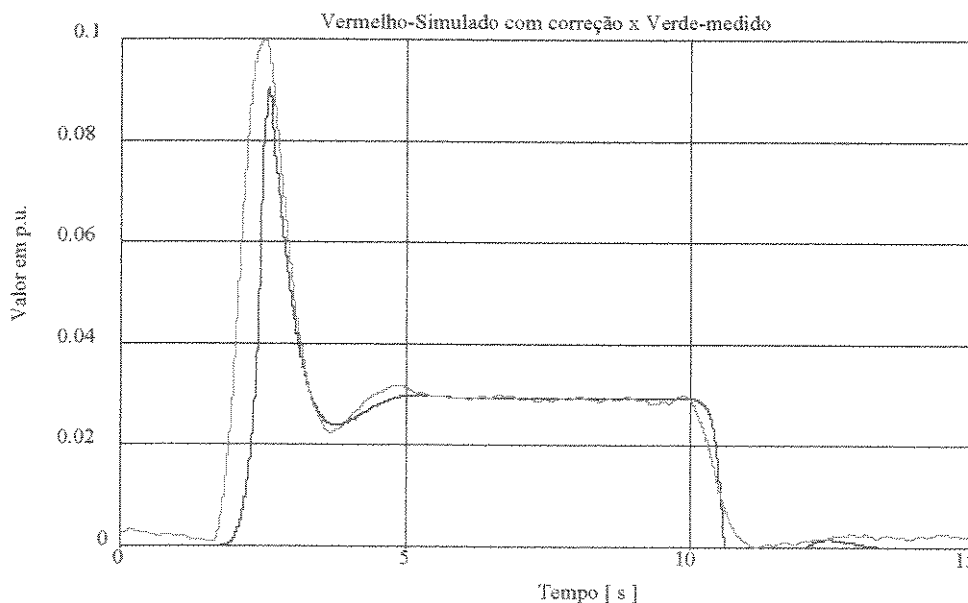


Figura 6.5-9 Curvas de potência para partida de uma bomba de lastro

Na Fig. 6.5-10 apresentam-se as curvas da frequência medida e simulada na partida de uma bomba de lastro, levando-se em consideração o efeito de medição.

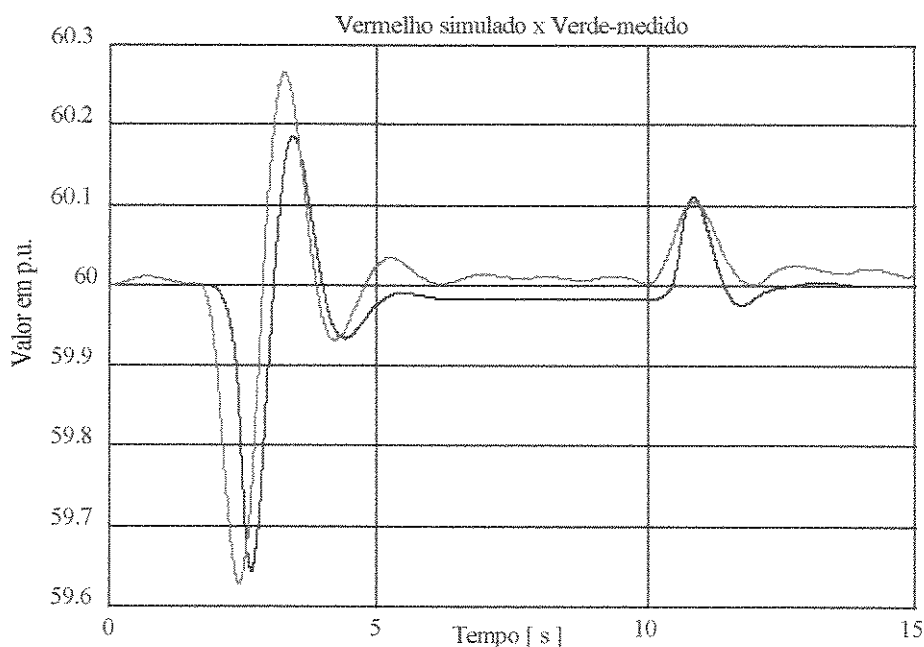


Figura 6.5-10 Curvas de frequência simulada com correção e medido para a partida de uma bomba de lastro do gerador G_3

6.6 Conclusões dos resultados simulados na plataforma Petrobrás 15

Verificou-se que a representação do sistema elétrico dessa plataforma através de modelos operacionais é possível de ser realizada e apresenta resultados satisfatórios, pois os valores simulados com esta modelagem estão de acordo com os valores medidos.

Os resultados obtidos na identificação da função de transferência do conjunto gerador/motor/regulador através da técnica de identificação de sistemas demonstrou que essa ferramenta pode ser empregada com sucesso, quando se depara com a inexistência de dados necessários para efetuar a representação matemática desses componentes ou quando necessita-se de resultados mais precisos para a análise de determinada condição operacional. Observou-se que para atingir resultados mais precisos na resposta de frequência foi necessário levar em consideração o efeito de medição, através de uma função de transferência, com o objetivo de representar na simulação curvas de potência compatíveis com as curvas utilizadas na identificação da função de transferência do conjunto gerador/motor/regulador de velocidade.

Na determinação dos parâmetros do motor de indução ficou clara a dificuldade de adequar-se as respostas simuladas com resultados obtidos em campo, e que a principal razão deste fato deve-se às simplificações efetuadas ao representar-se os motores de indução por circuito equivalente, e que para melhorar os resultados torna-se necessário realizar ajustes nos parâmetros calculados.

A representação do AVR através do modelo Tipo 1 do IEEE sugerido em [15] mostrou-se satisfatório, apenas apresentando restrição quanto ao valor do “overshooting” observado. No entanto uma representação mais completa para esse dispositivo não foi possível devido à indisponibilidade de dados necessários que foram solicitados ao fabricante mas não obtidos.

CAPÍTULO 7. APLICAÇÃO AO SISTEMA ELÉTRICO DA PLATAFORMA PETROBRÁS 18

7.1 Introdução

Neste capítulo, será abordada a modelagem do sistema elétrico da plataforma Petrobrás-18, sendo que na Seção 7.2 será apresentada uma breve descrição do sistema elétrico. A Seção 7.3 será dedicada a análise da força motriz dessa unidade marítima, a Seção 7.4 abordará o ajuste dos parâmetros do AVR e na Seção 7.5 serão apresentados os resultados da simulação da partida do motor da bomba de injeção de água dos poços, onde serão comparados os valores fornecidos pelo fabricante com os resultados simulados e também com os registros efetuados a bordo dessa unidade. Por fim, na Seção 7.6 serão feitos comentários e conclusões sobre a modelagem e resultados obtidos.

7.2 Descrição do sistema elétrico

A plataforma Petrobrás-18 é uma embarcação semi-submersível, fabricada em Singapura e complementada em Paranaguá/Pr, construída pelo consórcio Tenfels/Tenenge. Essa plataforma foi concebida para operar como unidade de produção marítima com capacidade instalada de 100.000 BBl/dia e 1.500.000 m³/dia de gás natural.

O sistema de geração dessa plataforma, mostrado na Fig. 7.2-1, é composto de 2 (dois) conjuntos turbo geradores (TG) a gás com capacidade de 15.625 kVA/12,5 MW conectados ao barramento de 4,16 KV e dois conjuntos moto geradores diesel (denominados geração auxiliar) com capacidade de 1.000 kVA/800KW conectados ao barramento de 480 V.

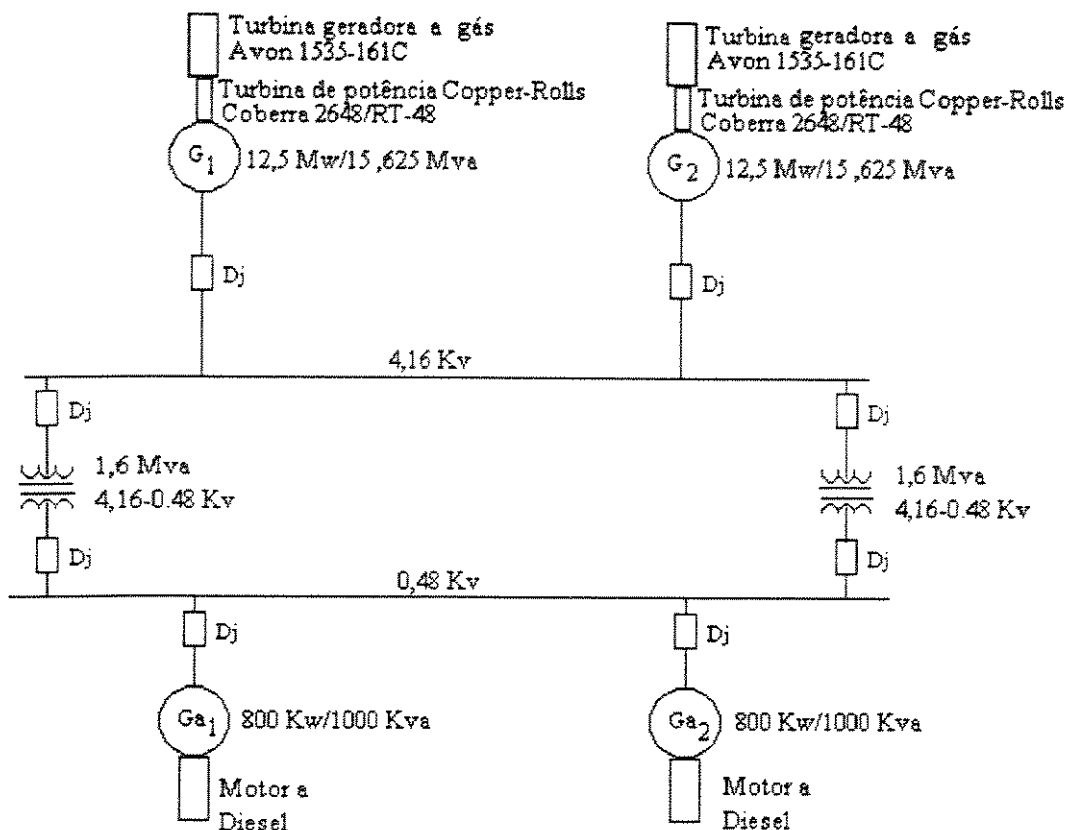


Figura 7.2-1 Diagrama unifilar do sistema de geração Petrobrás-18

No diagrama unifilar mostrado acima não foi representada a geração de emergência por não ser de interesse deste trabalho. A geração auxiliar não será detalhada pois o estudo desse sistema concentrar-se-á na geração principal, já que as maiores cargas estão conectadas no barramento de 4,16 kV.

A força motriz do sistema de geração principal é constituída por uma turbina de dupla combustão de eixo simples composta de:

- Turbina geradora de gás
 - Fabricante : Rolls-Royce
 - Modelo : Avon 1535-161C
 - Compressor: 17 estágios de fluxo axial
 - Turbina: 3 estágios de fluxo axial
 - Rotação nominal: 7550 rpm
 - Tipo de combustível: gás e líquido
- Turbina de potência
 - Fabricante : Cooper Bessemer
 - Modelo: Cooper-Rolls Coberra 2648/RT-48
 - Potência máxima: 13.662 KW + 3%(ISO)
 - Rotação nominal : 5500 rpm

O gerador elétrico e o sistema de excitação possuem as seguintes características:

- Gerador elétrico

Fabricante : Asea Brown Boveri (ABB)
 Tipo: GBA 1000 SH
 Número de pólos: 4
 Tensão nominal: 4.160 V
 Corrente nominal : 2.168 A
 Potência nominal : 15.625 KVA
 Fator de potência : 0.8
 Rotação: 1800 rpm
 Nº de fases : 3
 Frequência : 60 Hz
 Parâmetros tabela 7.2-1

Tabela 7.2-1

| Parâmetro | Valor |
|------------|-----------------------|
| T_{do} | 4,300 |
| T_{do}'' | 0.045 |
| T_{qo}'' | 0.120 |
| X_d | 1,630 |
| X_d' | 0,300 |
| X_d'' | 0,220 |
| X_q | 0.770 |
| X_q'' | 0.330 |
| R_a | 0,00234 |
| J | 965 Kg.m ² |

obs:1 - valores não saturados

2 - $S_{base} = 15 \text{ mVA}$, $V_{base} = 4.160$, $I_{base} = 2.082 \text{ A}$.

- Sistema de excitação

Fabricante : ABB
 Tipo: Sem escovas
 Modelo: GLA 600B
 Tensão a 100% de carga : 75 V
 Corrente : 10 A
 Potência : 750 W
 Representação matemática fornecida : Tipo 2 conforme [10]
 Parâmetros : conforme tabela 7.2-2

Tabela 7.2-2 Parâmetros do AVR

| Parâmetro | Valor |
|-------------|-------|
| T_R | 0.023 |
| K_A | 700 |
| T_A | 0.01 |
| V_{Rmax} | 7.9 |
| V_{Rmin} | -7.8 |
| K_E | 1.0 |
| T_E | 0.33 |
| K_F | 0.01 |
| T_{F1} | 1.5 |
| T_{F2} | 0.34 |
| S_{Emax} | 0.95 |
| $S_{E0.75}$ | 0.93 |

O sistema de controle de velocidade dessa unidade pode operar na situação isócrona ou na situação com “droop”. Durante o desenvolvimento desse trabalho utilizar-se-á apenas a situação isócrona pois todos os registros efetuados nessa unidade foram nessa situação, devido ao fato da geração principal operar com uma unidade funcionando e a outra em “standby”.

7.3 Representação da força motriz por modelos operacionais

Devido a indisponibilidade de dados as turbinas dessa plataforma serão representadas pelo modelo reduzido descrito na Fig. 5.5-5.

Os parâmetros que melhor reproduziram o comportamento observado em campo estão relacionados na Tabela 7.3-1.

Tabela 7.3-1

| Parâmetro | Valor |
|----------------|---------|
| ω_{Ref} | 1.0 |
| G_{Max} | 1.1 |
| T_1 | 1.1 |
| T_2 | 0.01 |
| K | 125-200 |
| P_s | 1.0 |

O conjunto de força motriz motor/regulador de velocidade é representado por modelo operacional conforme apresentado na Fig. 7.3-1.

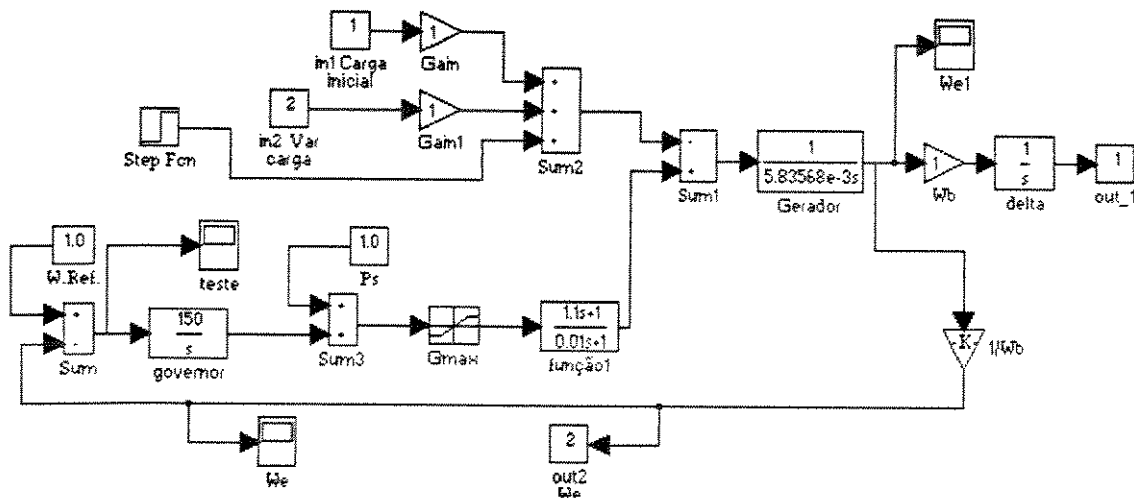


Figura 7.3-1 Representação da força motriz por modelo operacional, no formato Matlab.

Utilizando-se os parâmetros definidos anteriormente e aplicando-se um degrau de carga de 25% obteve-se a resposta de velocidade conforme Figs. 7.3-2 e 7.3-3.

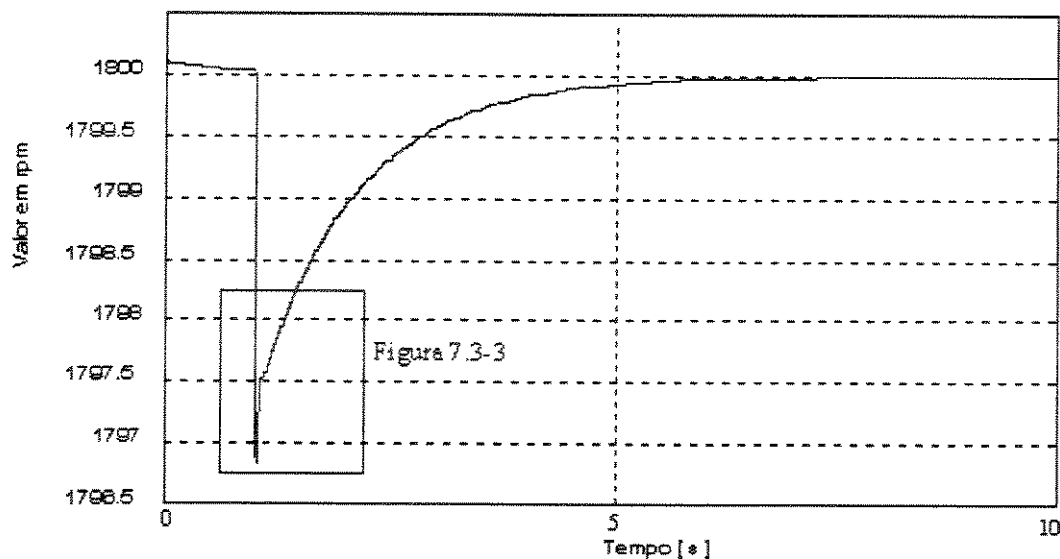


Figura 7.3-2 Curva da resposta de velocidade ao degrau de 25 %

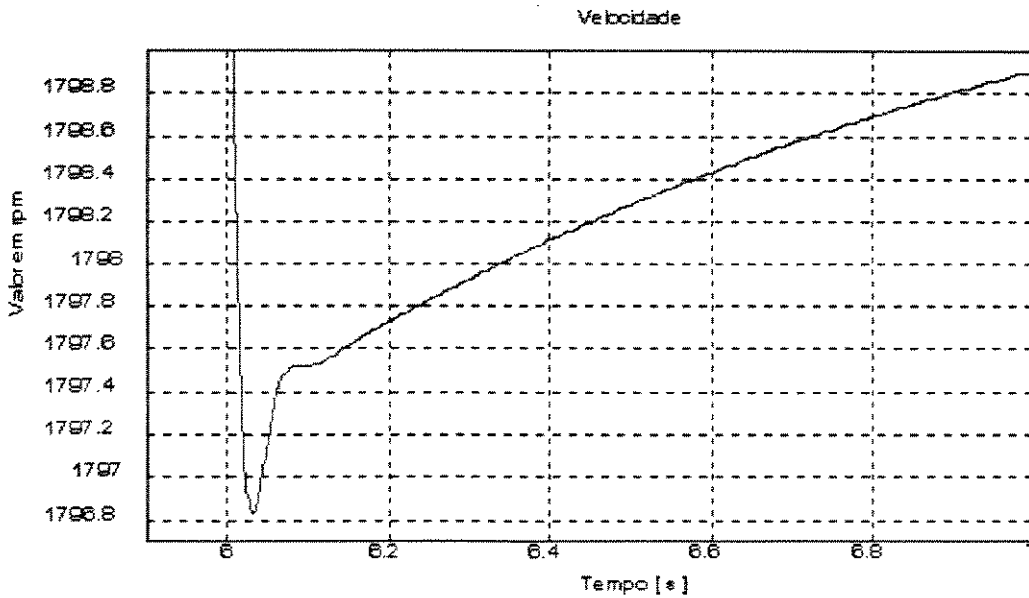


Figura 7.3-3 Detalhe da curva de velocidade selecionada na figura 7.3-2

Na Fig. 7.3-4 mostra-se a curva de frequência correspondente ao degrau na carga de 25%.

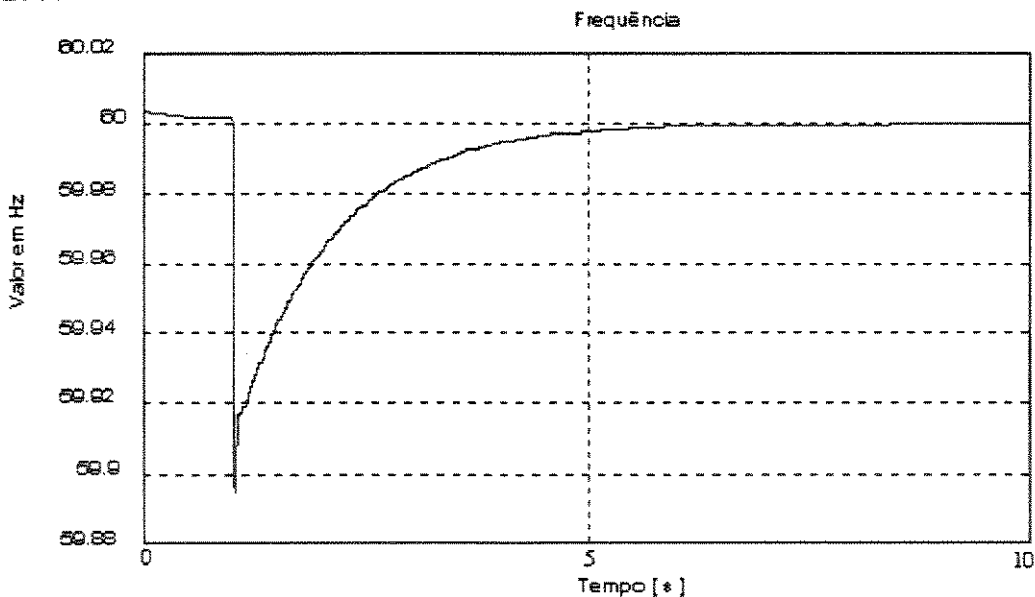


Figura 7.3-4 Curva da variação de frequência ao degrau de 25 %

Os resultados obtidos com a aplicação do degrau possuem comportamento similar aos resultados apresentados em [2] e [3], salientando-se que em [3] apenas são apresentados resultados de simulações com a turbina operando na situação com “droop”.

7.4 Ajuste dos parâmetros do AVR

Para ajustar esses parâmetros utilizou-se como padrão o resultado da curva de tensão obtido durante a partida do motor (809 KW) da bomba de injeção em “shutoff” mostrado na Fig. 7.4-1. Nas Figs. 7.4-2 e 7.4-3 apresenta-se a curva de tensão simulada para a partida do mesmo motor e na Tabela 7.4-1 tem-se os valores dos parâmetros fornecidos pelo fabricante e os valores ajustados.

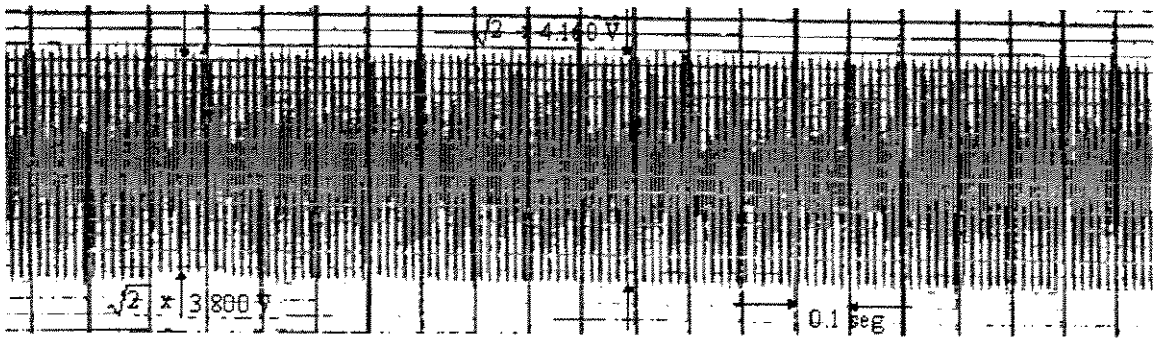


Figura 7.4-1 Curva de tensão registrada durante a partida da bomba de injeção.

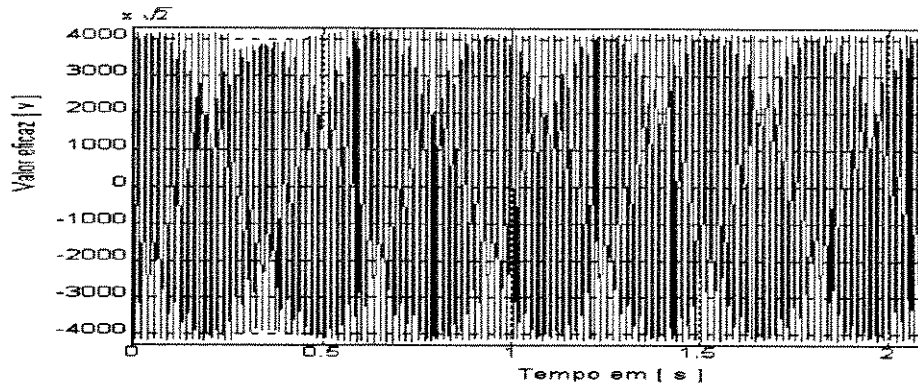


Figura 7.4-2 Curva de tensão com escala similar ao osciloscópio

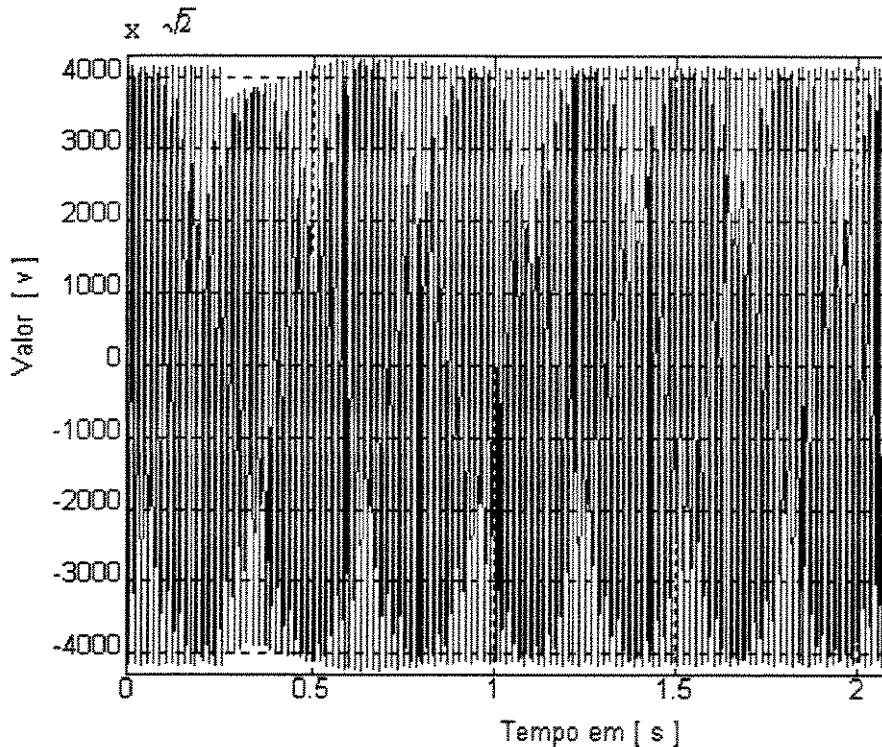


Figura 7.4-3 Curva de tensão com escala vertical ampliada

Na curva oscilografada verifica-se uma queda de tensão de 8,65% e na curva simulada um queda de 9,13%, apresentando um erro de 0,48 % do valor nominal . O tempo do transitório verificado na curva oscilografada é de 0,6 seg. e na curva simulada de 0,7 s, sendo que ambas apresentam um tempo de recuperação de 0,2 s. Com base nos

valores apresentados acima, considera-se satisfatória a representação do AVR pelo modelo proposto .

Tabela 7.4-1 Parâmetros do AVR

| Parâmetro | Valor ajustado | Valor do fabricante |
|----------------|----------------|---------------------|
| T_R | 0.023 | 0.023 |
| K_A | 900 | 700 |
| T_A | 0.01 | 0.01 |
| V_{Rmax} | 7.9 | 7.9 |
| V_{Rmin} | -7.8 | -7.8 |
| K_E | 1.0 | 1.0 |
| T_E | 0.08 | 0.33 |
| K_F | 0.01 | 0.01 |
| T_{F1} | 0.5 | 1.5 |
| T_{F2} | 0.04 | 0.34 |
| $S_{E_{max}}$ | 0.95 | 0.95 |
| $S_{E_{0.75}}$ | 0.93 | 0.93 |

obs:1- função de saturação = $0.8725 * e^{0.021 * E_{fd}}$
 2 - $E_{fdmax} = 4.0513$, $E_{fdmin} = -4.0513$

O AVR é representado por modelo operacional conforme Fig. 7.4-4, que corresponde ao Tipo 2 do IEEE.

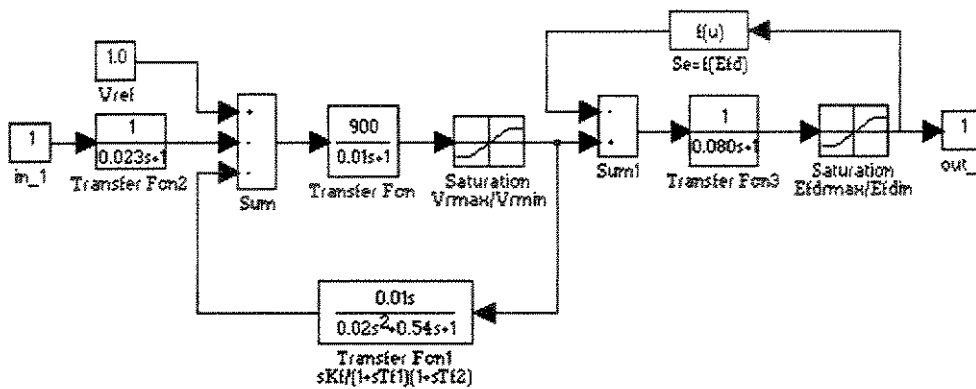


Figura 7.4-4 Representação do AVR por modelo operacional, no formato Matlab.

7.5 Simulação do sistema de geração da plataforma Petrobrás-18

Nesta seção serão apresentados os resultados das simulações da partida do motor de 809 KW(bomba de injeção) sob condições nominais, cujos resultados serão comparados com os dados fornecidos pelo fabricante, bem como em situação real operacional, cujos resultados serão comparados com os registros efetuados a bordo. As simulações utilizarão a representação por modelos operacionais apresentada na Figura 7.5-1, com parâmetros obtidos nas seções anteriores.

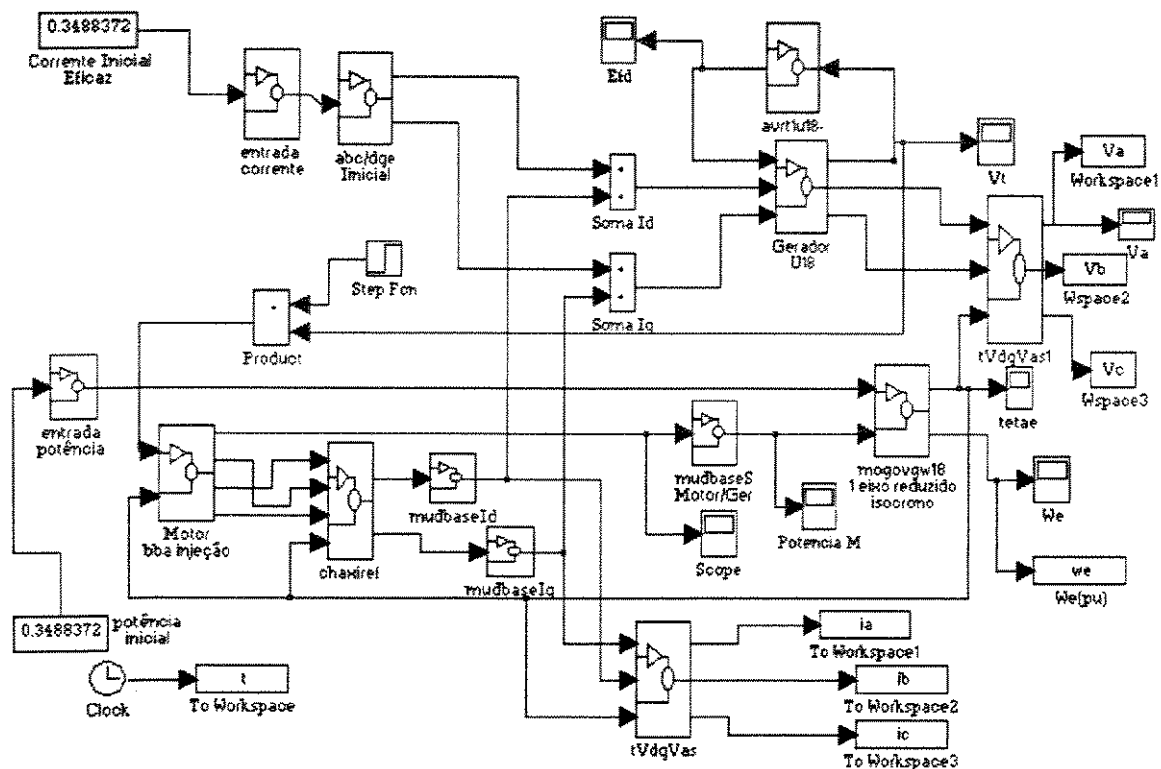


Figura 7.5-1 Representação do sistema de geração da plataforma Petrobrás-18 por modelos operacionais no formato Matlab.

Para melhor entendimento do modelo operacional apresentado na Figura 7.5-1 apresenta-se a seguir o significado resumido dos principais blocos:

- Gerador U18 - têm-se no seu interior a representação do modelo IV da máquina síncrona por diagrama de blocos da Figura 2.7;
- avrt1u18 - têm-se no seu interior a representação do AVR pelo modelo operacional apresentado na Figura 7.4-4;
- mogovgw18 - têm-se nesse bloco a representação da força motriz e equação mecânica do gerador conforme modelo operacional da figura 7.3-1;
- Motor bba injeção - nesse bloco encontra-se o modelo operacional do motor de indução conforme figura 4.4-1;
- tVdqVas - transforma as variáveis representadas nos eixos dq para variáveis abc;
- chaxiref - muda o referencial das variáveis de entrada, nesse caso do referencial fixo no rotor do motor para o referencial síncrono fixo no eixo do gerador;
- abc/dqe - transforma as variáveis abc em variáveis do eixo dq.

Para informações detalhadas do significado de cada bloco consultar biblioteca de blocos apresentada no Apêndice C.

• **Partida do motor de 809 KW - bomba de injeção**

Esse motor aciona a bomba de injeção de água e apresenta as seguintes características:

| | |
|----------------------|--|
| Fabricante: | Asea Brown Broveri |
| modelo: | QL 450 hb2 |
| capacidade: | 809 KW |
| Nº fases: | 03 |
| Tensão nominal: | 4.000 V |
| Velocidade nominal: | 3560 |
| Tipo do rotor: | Gaiola de esquilo |
| I_P / I_N : | 4,80 |
| Corrente nominal: | 132,5 |
| Corrente de partida: | 530 A |
| Escorregamento: | 0.72 % |
| Torque de partida: | 40 % |
| Torque máximo: | 160 % |
| Tempo de aceleração: | 5,2 s (100 % de carga e 80 % de tensão) 2,4 s (100 % de carga e 100% de tensão) |
| Parâmetros | : conforme tabela 7.5-1 |

Tabela 7.5-1 Parâmetros fornecidos pelo fabricante

| Parâmetros | Valor(p.u.) |
|------------|---------------|
| X_{ls} | 0,15133 |
| X_{lr} | 0,15612 |
| X_m | 4,76182 |
| R_s | 0,01208 |
| R_r | 0,007997 |
| J | 8,5 Kg.m |

obs: $S_{base} = 970 \text{ KVA}$, $V_{base} = 4.000 \text{ V}$, $Z_{base} = 16,50 \text{ ohms}$, $I_{base} = 140 \text{ A}$

Nas Figs. 7.5-2 e 7.5-3 observam-se as curvas de corrente e torque obtidas pela simulação em condições nominais de frequência e tensão, sem carga, utilizando-se os parâmetros fornecidos pelo fabricante.

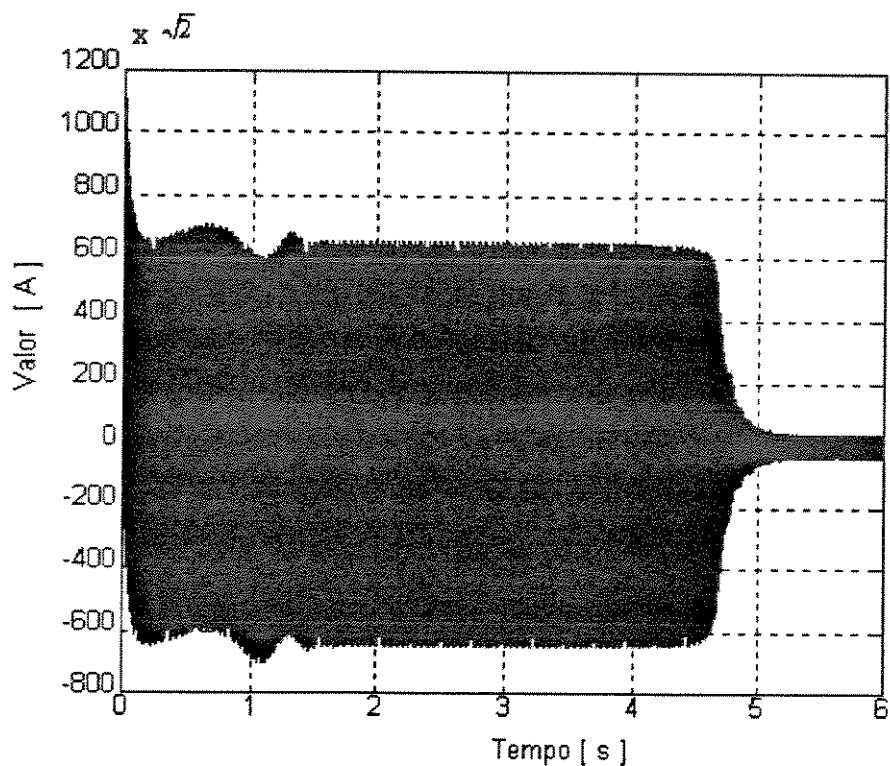


Figura 7.5-2 Curva de corrente de partida simulada do motor 809 KW

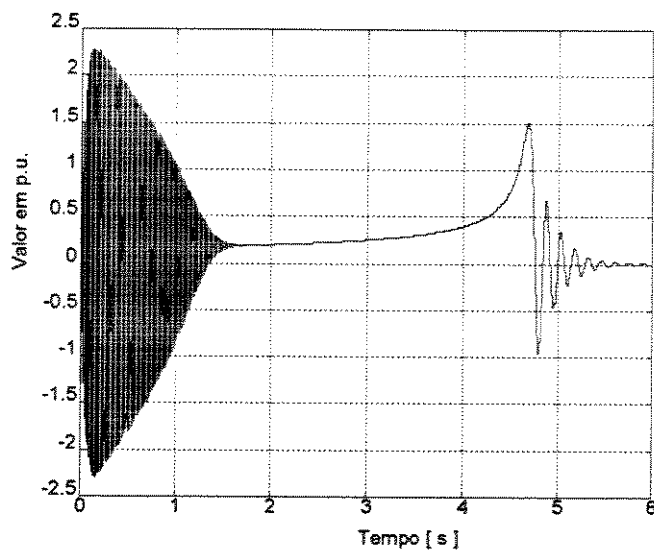


Figura 7.5-3 Curva de torque simulada do motor de 809 KW

Baseado nos resultados apresentados acima, verifica-se concordância do valor de torque máximo simulado com o valor fornecido pelo fabricante, e discordância com os valores de tempo e corrente de partida. Os valores dos parâmetros fornecido pelo fabricante foram relacionados no “data sheet” como valores para estudo de estabilidade.

Ao ser informado da discrepância encontrada nas simulações, o fornecedor informou que os parâmetros fornecidos são ajustados para responder a curva de torque e que as diferenças de valores deveriam ficar dentro do que estabelece a NBR 7094 - ABNT (Máquinas Elétricas girantes - Motores de indução) Tabela 17, pag 35, ou seja +20% da corrente ou potência aparente garantida com rotor bloqueado, -15% do torque de partida garantido e -10% do torque máximo garantido. Com base nessas informações, conclui-se que os parâmetros foram ajustados para responder à curva de torque e ficar dentro da tolerância para corrente e potência aparente na partida.

Na Fig. 7.5-4 mostra-se a curva oscilografada de corrente do sistema de geração da plataforma, com corrente inicial de 733A e um gerador no barramento, durante a partida do motor de 809 kW com a bomba em “shutoff”.

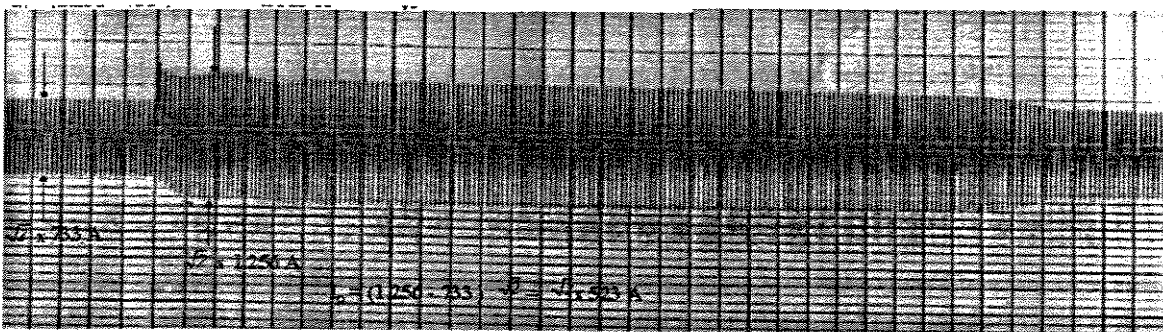


Figura 7.5-4 Corrente oscilografada no barramento principal durante partida do motor de 809 kW

De acordo com o valor registrado, verifica-se que a corrente de partida desse motor está compatível com o valor fornecido pelo fabricante, porém o tempo de partida (3,5 s) está incompatível com o valor fornecido pelo fabricante (2,4 s) na condição de partida com 100% de carga. Portanto houve a necessidade de ajustar o valor do momento de inércia para 4,4 Kg.m² para que houvesse concordância entre o tempo de partida simulado e o tempo verificado em campo. Na Fig. 7.5-6 mostra-se a curva de corrente de partida para esse motor obtida através de simulação, utilizando-se os parâmetros do motor fornecido pelo fabricante e o momento de inércia ajustado.

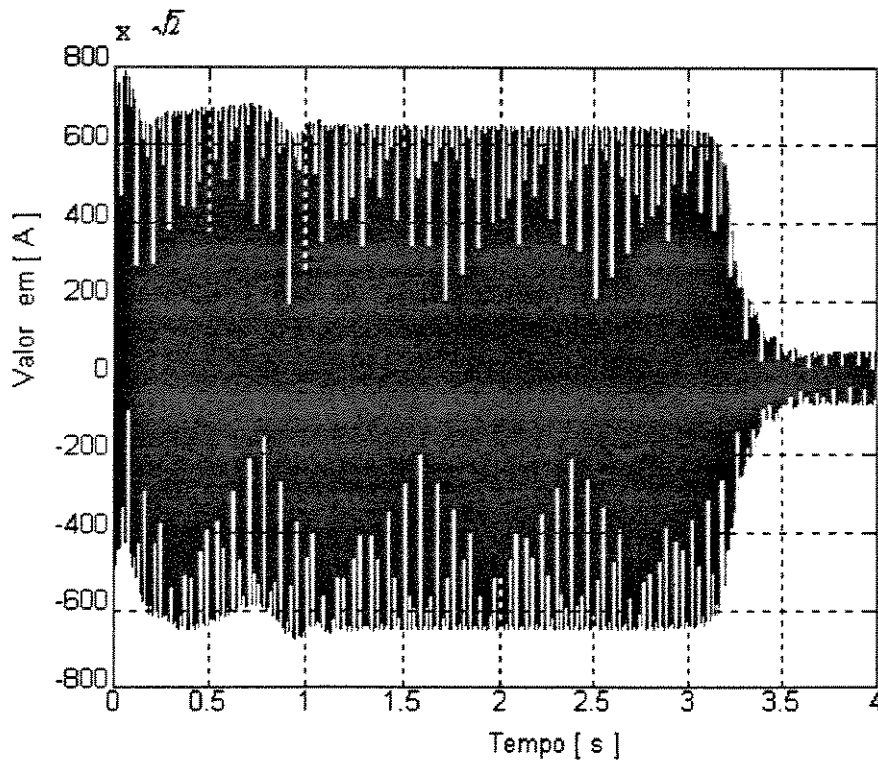


Figura 7.5-6 Curva da corrente de partida simulada do motor de 809 kW

Na Fig. 7.5-7 apresenta-se a curva de frequência obtida na partida desse motor. Como os registros efetuados nessa plataforma foram executados somente com a utilização de um oscilógrafo, não foi possível o registro de frequência com precisão adequada e por esta razão não será apresentada a comparação entre o resultado simulado e o registrado a bordo.

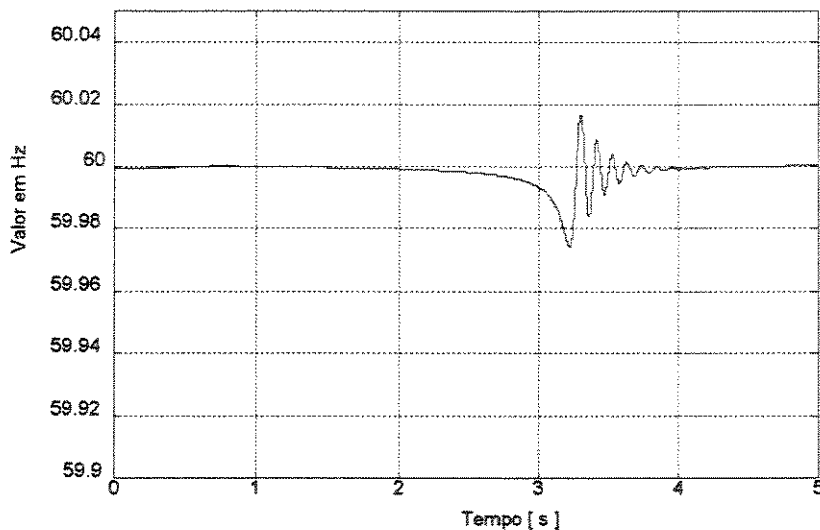


Figura 7.5-7 Curva de frequência simulada relativo a partida do motor de 809 KW

7.6 Conclusão

A representação do AVR por modelo operacional do Tipo 2 IEEE, proposto em IEEE [15], e indicado pelo fabricante, após os ajustes efetuados mostrou-se satisfatório, com uma pequena restrição quanto ao “overshooting” observado na recuperação da tensão após a queda verificado na partida do motor.

Na modelagem do motor de indução utilizada neste capítulo, observou-se as dificuldades discutidas no capítulo anterior quanto a não concordância dos valores obtidos nas simulações utilizando-se os parâmetros calculados e fornecidos pelo fabricante, quando comparados com os valores ensaiados pelo fabricante ou medidos em campo, e novamente verifica-se a necessidade do ajuste da curva de torque.

A representação da turbina a gás pelo modelo simplificado mostrou-se satisfatório na impossibilidade de utilização de modelos mais completos, por falta de dados confiáveis.

Como esse sistema de geração tem uma capacidade instalada bem maior que a solicitação de carga na partida do motor simulado, conclui-se que a pequena queda no valor da frequência no momento da partida pode ser considerada como normal, sendo que a condição isócrona é mantida após o transitório, ou seja, a frequência volta ao valor nominal.

CAPÍTULO 8. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros. Na primeira seção serão abordadas as conclusões e na segunda as sugestões.

8.1 Conclusões

Verificou-se que a representação dos sistemas elétricos das plataformas Petrobrás-15 e Petrobrás-18 através de modelos operacionais é possível de ser realizada e apresenta resultados satisfatórios. Essa forma de modelagem pode ser estendida e adaptada à plataformas similares.

O uso de “softwares” do tipo Matlab mostrou-se adequado para realizar simulações dinâmicas.

A representação do AVR através dos modelos Tipo1 e Tipo2 do IEEE sugeridos em [15] mostrou-se satisfatório, apenas apresentando restrição quanto ao valor do “overshooting” observado.

Na determinação dos parâmetros dos motores de indução ficou clara a dificuldade de adequar-se as respostas simuladas com os resultados obtidos em campo, mesmo quando foram utilizados parâmetros fornecidos pelo fabricante e por isso foi necessário a realização de ajustes.

Na representação da força motriz as soluções adotadas para representar a turbina a gás e o motor diesel foram distintas, mas apresentaram resultados coerentes com os dados de campo ou com resultados de publicações no caso da turbina. A identificação da função de transferência do conjunto motor/gerador/regulador através da técnica de identificação de sistemas demonstrou que essa ferramenta pode ser empregada com sucesso, quando se depara com a inexistência de dados necessários para efetuar a representação desses componentes. No entanto, deve-se procurar obter durante o processo de medição valores os mais próximos possíveis dos valores reais para minimizar os erros, ou utilizar funções de transferência representando o efeito de medição para compatibilizar e poder comparar resultados simulados com resultados medidos.

8.2 Sugestões

Em termos de desenvolvimentos futuros, baseando-se nas dificuldades e resultados encontrados neste trabalho, sugerem-se as seguintes linhas de pesquisa:

- Desenvolvimento de programa computacional para efetuar ajuste nos parâmetros do motor de indução;
- Identificação individualizada de modelos operacionais para força motriz e reguladores utilizando-se a técnica de identificação de sistemas abordada neste trabalho;
- Estudo e definição de limites operacionais para sistema de geração de plataformas marítimas baseados em ensaios de campo; e
- Representar os transformadores nos modelos operacionais.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] ABNT - NBR 7094, Máquinas elétricas girantes - Motores de indução. Dezembro 1981.
- [2] Feltrin,A.C. Cálculo da estabilidade transitória em sistemas de energia elétrica utilizando esquema simultâneo implícito. Tese de mestrado. UNICAMP , março,1986.
- [3] Johnson, B. K. Willis, J. R. Tailoring induction motor analytical models to fit known motor performance characteristics and satisfy particular study needs. IEEE Transactions on Power Systems, vol 6, N^o 5, Setembro/Outubro, 1983.
- [4] Chalmers, B.J., Mulki, A. S. Design synthesis of double-cage induction motors. Proceedings IEE, vol 117, N^o 7, julho, 1970.
- [5] Bastian,J., Hannett,L.N., de Mello,F.P. Importance of Accuracy in Equipment Dynamic Modelling Some Case Studies. II Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão elétrica, 21-25 de Agosto de 1989 - São Paulo Paper IP-25.
- [6] Boeing Computer service, Power system dynamic analysis phase I, Palo Alto, Calif., EPRI EL-484 Project 670-1 , Final Report, Julho, 1977.
- [7] Clarke, E., Circuit Analysis of Power Systems, Vol I e Vol II, General Electric Series.
- [8] Dewan,S.B, Slemon,G.R., Straughen,H. Power semiconductor drives, John Wiley & Sons, 1984.
- [9] Dutra,D. Dinâmica de sistemas isolados. Tese de mestrado, UNICAMP fevereiro,1990.
- [10] Dommel, H.W. & Sato, N. Fast transient stability solutions. IEEE Trans. Power Apparatus Systems. Pas-91(4): 1643-650, Julho/Augosto, 1972.
- [11] Fouad,A. Transient stability Studies: Programs and Trends. Hemisphere Publishing Corporation. First Printing: 1983, pp. 112-115.
- [12] França, A.L.M. Simulação de Dinâmica de curto Prazo em Sistemas de Energia Elétrica: Comportamento do Esquema Alternado Implícito. 5º Congresso Brasileiro de Automática- Campina Grande, Volume 1, pp. 172-176,1984.
- [13] General Electric .Electric Utility Gas Turbine Application. General Electric, 1983.

- [14] Guimarães,G.C. Computer methods for transient stability analysis of isolated power generation systems with special reference to prime mover and induction motor modeling. Tese de doutorado , Universidade de Alberdeen, outubro,1990.
- [15] IEEE Commitee Report. Computer representation of Excitation Systems. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. Pas-87, N° 6, pp. 1460-1464, junho 1968.
- [16] IEEE Commitee report. Excitation System Model for Power System Stability Studies. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol Pas-100, N° 2, pp. 494-509, fevereiro, 1981.
- [17] Bromhead, J. R. Offshore electrical systems. IEE Proceedings, vol. 133, pt.C, N° 7, novembro, 1986.
- [18] Kimbark,E.W. Power System Stability: Synchronous Machine. Dover Publications, Inc, New York, 1968.
- [19] Krause,P.C. Thomas,C.H. Simulation of Symetrical Induction Machinery, IEEE Transactions Power Apparatus and System ,vol. 84, pp. 1038-1053, novembro, 1965.
- [20] Krause,P. C. Analysis of Electric Machinery. McGraw-Hill Book Company, 1986.
- [21] Ljung,L. MATLAB - System Identification Toolbox. "User Guide".
- [22] Ljung,L. System Identification : Theory for the User. Prentice-Hall, Inc, 1987.
- [23] Grackin, F.G.M., Schmus, W. The representation of system Load in stability studies. IEEE tutorial Course. Moder Concepts of Power system dynamics, pp. 41-46, New York, 1970.
- [24] Ju,P., Handschin,E., Wei, Z. N., Schlücking, U. Sequential parameter estimation of a simplified induction motor load model, IEEE 1995.
- [25] Stewart,R.E. The effects of power supply integrity on eletric submergible pumping systems, SPE - 9038, abril,1980
- [26] Waters,S.S., Willoughby, R.D. Modeling induction motors for system studies. IEEE Transactions on Industry Aplications, vol IA-19, n° 5, setembro/outubro, 1983.
- [27] Stott, B. Power system dynamic response calculations. Proceedings IEEE, 67(2): 219-41, fevereiro, 1979.
- [28] Stronach,A.F., Smith, J.R. Development of a Simulation Model of Turbo-Charged Diesel Engine Pime-Movers for Power System Studies. Eletrical Power & Energy Systems, vol 2, N° 2, abril, 1988.
- [29] Ta-Peng Tsao, Shi-Lin Chen, Ching-Lien Huang, Wei-Cheylin, "Dynamic response analysis of marine power systems", IEE proceedings, vol 135, Pt. C, n° 1, January 1988.

- [30] Lundstrom, W.O. Gas turbine power offsshore oil production. SPE 5354, abril, 1975.
- [32] Winterbone,D.E., Benson, R.S., Closs,G.D., Mortimer, A.G. A Comparison Between Experimental and Analytical Transient Test Results for a Turbocharged Diesel Engine. Proc. Instn. Mech. Engrs., vol 190 22/76, 1976.
- [33] Wright, W.F, Hawley, R., Dinely, J.L. Brushless Thyristor Excitation Systems. IEEE Transation on Power Apparatus and Systems, pp. 1848-1854, setembro/outubro, 1972.

APÊNDICE A

SISTEMAS DE REFERÊNCIA

A.1 Introdução

No estudo de modelagem de máquinas elétricas pode-se reduzir consideravelmente a complexidade das equações diferenciais que aparecem, ao se escolher um sistema de referência adequado, de tal forma a eliminar os coeficientes variantes no tempo destas equações.

Será desenvolvido neste apêndice uma transformação geral de modo que uma transformação real é conseguida simplesmente adotando uma velocidade para o referencial de eixos.

Embora esta transformação seja utilizada para análise de máquinas AC, em estudos de estabilidade normalmente é necessário recorrer-se a esta transformação para adequar as grandezas que interagem nos diversos elementos do sistema.

A.2 Equações de transformação - Mudança de variáveis

Quando se muda as equações de um sistema de eixos para outro, na realidade está-se efetuando mudança de variáveis, que é artifício normalmente utilizado na análise de máquinas AC e na compatibilização de grandezas em estudos de estabilidade.

A mudança de variáveis que realiza a transformação de um sistema trifásico estacionário para um sistema referencial arbitrário qualquer pode ser expresso por:

$$f_{qd0s} = K_s f_{abcs} \quad (\text{A.2-1})$$

obs: o índice s refere-se a "stationary"

onde,

$$(f_{qd0s})^T = [f_{qs} \ f_{ds} \ f_0] \quad (\text{A.2-2})$$

$$(f_{abcs})^T = [f_{as} \ f_{bs} \ f_{cs}] \quad (\text{A.2-3})$$

$$K_s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin\theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{A.2-4})$$

$$= \int_0^t \omega(\xi) d\xi + (0) \quad (\text{A.2-5})$$

onde, ξ - variável de integração.

$$(K_s)^{-1} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.2-6})$$

Embora a transformação para um sistema referencial arbitrário seja uma mudança de variáveis e não precise de um significado físico, é conveniente visualizar esta transformação como sendo relações trigonométricas entre as variáveis conforme mostrado na Fig A.2-1

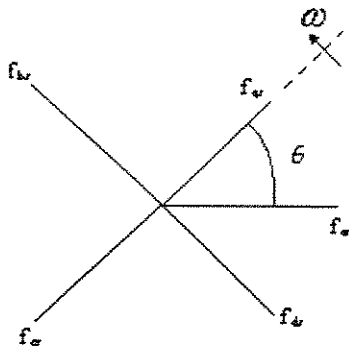


Fig. A.2-1 - Transformação de circuito estacionário retratado como relação trigonométrica

É importante notar que as grandezas f_{as} , f_{bs} e f_{cs} não são fasores, mas apenas quantidades instantâneas que podem ser qualquer função do tempo. Normalmente quando está-se lidando com máquinas AC associa-se a direção destas grandezas com a direção dos eixos magnéticos dos enrolamentos do estator, e a direção de f_{ds} e f_{qs} com a direção dos eixos direto e em quadratura respectivamente. Maiores detalhes poderão ser encontrados em Krause [20].

A.3 Variáveis de circuito estacionário transformado em sistema de referência arbitrário

Neste item desenvolve-se separadamente o caso de circuitos balanceados resistivos e indutivos por serem os de maior relevância para o desenvolvimento deste trabalho.

A.3.1 Elementos resistivos

Para sistema trifásico tem-se:

$$v_{abcs} = r_s i_{abcs} \quad (\text{A.3-1})$$

De (A.2-1)

$$v_{qd0s} = K_s r_s (K_s)^{-1} i_{qd0s} \quad (\text{A.3-2})$$

Por tratar-se de circuito equilibrado temos:

$$K_s r_s (K_s)^{-1} = r_s \quad (\text{A.3-3})$$

A.3.2 Elementos indutivos

Para um sistema trifásico term-se:

$$v_{abcs} = p \lambda_{abcs} \quad (\text{A.3-4})$$

onde p é o operador d/dt .

$$\begin{aligned} v_{qd0s} &= K_s v_{abcs} \\ &= K_s p \lambda_{abcs} \\ &= K_s p [(K_s)^{-1} \lambda_{qd0s}] \end{aligned} \quad (\text{A.3-5})$$

$$v_{qd0s} = K_s p [(K_s)^{-1}] \lambda_{qd0s} + K_s (K_s)^{-1} p \lambda_{qd0s} \quad (\text{A.3-6})$$

É facilmente demonstrado :

$$p[(K_s)^{-1}] = \omega \begin{bmatrix} -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 0 \\ -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.3-7})$$

Da mesma forma utilizando relações trigonométricas conhecidas teremos:

$$K_s p[(K_s)^{-1}] = \omega \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.3-8})$$

Utilizando (A.3-7) e (A.3-8) em (A.3-6) pode-se escrever

$$v_{qd0s} = \omega \lambda_{dqs} + p \lambda_{dq0s} \quad (\text{A.3 -9})$$

onde

$$(\lambda_{dqs})^T = [\lambda_{ds} \ -\lambda_{qs} \ 0] \quad (\text{A.3-10})$$

A equação (A.3-9) é normalmente apresentada na forma:

$$v_{qs} = \omega \lambda_{ds} + p \lambda_{qs} \quad (\text{A.3-11})$$

$$v_{ds} = -\omega \lambda_{qs} + p \lambda_{ds} \quad (\text{A.3-12})$$

$$v_{0s} = p \lambda_{0s} \quad (\text{A.3-13})$$

O primeiro termo de (A.3-11) e (A.3-12) é referido como tensão de velocidade, com a velocidade sendo a velocidade angular do sistema de referência arbitrário. Como (A.3-4) é genérico, segue-se que (A.3-11) - (A.3-13) é válido ignorando-se se o circuito magnético é linear ou não-linear e desprezando-se a forma da matriz indutância.

Para um sistema linear o fluxo concatenado pode ser expresso por :

$$\lambda_{abcs} = L_s i_{abcs} \quad (\text{A.3-14})$$

E o fluxo concatenado para um sistema referencial arbitrário pode ser escrito como:

$$\lambda_{qd0s} = K_s L_s (K_s)^{-1} i_{qd0s} \quad (\text{A.3-15})$$

A matriz indutância que é comum para máquinas síncronas e de indução é a da forma:

$$L_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2} L_{ms} & -\frac{1}{2} L_{ms} \\ -\frac{1}{2} L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2} L_{ms} \\ -\frac{1}{2} L_{ms} & -\frac{1}{2} L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (\text{A.3-17})$$

e pode-se demonstrar :

$$K_s L_s (K_s)^{-1} = \begin{bmatrix} L_{ls} + \frac{3}{2} L_{ms} & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + \frac{3}{2} L_{ms} & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix} \quad (\text{A.3-18})$$

A.4 Sistemas de referência normalmente utilizados

Por facilidade didática pode-se chamar os sistemas de referência como: arbitrário, estacionário, rotórico e síncrono. Apresenta-se a seguir na tabela A.1 um resumo característico destes sistemas de referência:

Velocidade
do
sistema de
referência

| | Interpretação | Variáveis | Transformação |
|------------------------|---|--|---------------|
| ω (genérico) | variáveis de circuito estacionário referido para sistema de referência arbitrário | f_{qd0s} ou f_{qs}, f_{ds}, f_{0s} | K_s |
| 0 | variáveis de circuito estacionário referido para sistema de referência estacionário | f_{qd0s}^s ou $f_{qs}^s, f_{ds}^s, f_{0s}^s$ | K_s^s |
| ω_r | variáveis de circuito estacionário referido para sistema de referência fixo no rotor | f_{qd0s}^r ou $f_{qs}^r, f_{ds}^r, f_{0s}^r$ | K_s^r |
| ω_e | variáveis de circuito estacionário referido para sistema de referência na velocidade síncrona | f_{qd0s}^e ou $f_{qs}^e, f_{ds}^e, f_{0s}^e$ | K_s^e |

O deslocamento angular para o sistema de referência K_s^s é zero e para K_s^r vale

$$\theta_r = \int_0^t \omega_r(\xi) d\xi \quad (A.4-1)$$

e para K_s^e vale

$$\theta_e = \int_0^t \omega_e(\xi) d\xi \quad (A.4-2)$$

onde ξ é a variável de integração.

A.5 Transformação entre sistemas de referência

Em muitos casos práticos, é necessário efetuar-se a mudança de sistemas de referência sem envolvermos as variáveis abc. Para estabelecer esta relação de transformação define-se x como o sistema de referência de origem e y o destino, representados na figura (A.5-1), então:

$$\hat{f}_{dq0s}^y = {}^xK^y \hat{f}_{qd0s}^x \quad (A.5-1)$$

que é:

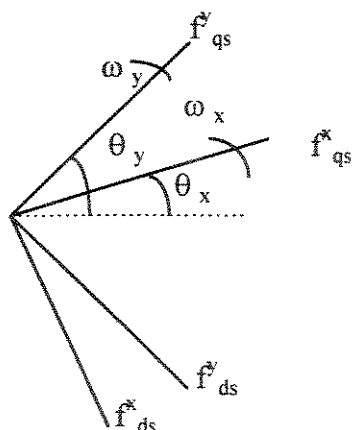


Figura A.5-1 Representação de dois sistemas de referência nos eixos dq

De (A.2-1)

$$f_{qd0s}^x = K_s^x f_{abcs} \quad (\text{A.5-2})$$

Substituindo (A.5-2) em (A.5-1) fornece

$$f_{qd0s}^y = {}^xK^y f_{abcs} \quad (\text{A.5-3})$$

No entanto de (A.2-1)

$$f_{qd0s}^y = K_s^y f_{abcs} \quad (\text{A.5-4})$$

então

$${}^xK^y K_s^x = K_s^y \quad (\text{A.5-5})$$

De onde

$${}^xK^y = K_s^y (K_s^x)^{-1} \quad (\text{A.5-6})$$

A transformação desejada é obtida substituindo-se os valores de K em (A.5-6) e que fornecerá:

$${}^xK^y = \begin{bmatrix} \cos(\theta_y - \theta_x) & -\sin(\theta_y - \theta_x) & 0 \\ \sin(\theta_y - \theta_x) & \cos(\theta_y - \theta_x) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.5-7})$$

APÊNDICE B

IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS

B.1 Introdução

Identificação de sistemas trata do problema da construção de modelos matemáticos de sistemas dinâmicos baseado na observação de dados.

A identificação do modelo a partir de dados observados envolve decisões a serem feitas pela pessoa que está pesquisando os modelos, bem como os recursos computacionais disponíveis para servir de base para estas decisões. O usuário normalmente passa por várias interações no processo para chegar ao modelo final, onde a cada passo as decisões anteriores são revisadas.

Neste trabalho o recurso computacional utilizado foi o “software” MATLAB através da caixa de ferramentas de Identificação de Sistemas, com auxílio da parte de simulação (“Simulink”).

B.2 “Software” MATLAB

MATLAB é um ambiente computacional técnico para computação simbólica, numérica e visualização de alta performance. MATLAB integra análise matemática, computação de matriz, processamento de sinais e gráficos em um ambiente de fácil utilização onde os problemas e soluções são expressos justo da forma como eles são escritos matematicamente - sem programação tradicional.

Este “software” também contém um conjunto de caixas de ferramentas (“toolbox”) utilizadas para solucionar uma particular classe de problemas. Áreas em que estas caixas de ferramentas estão disponíveis incluem processamento de sinais, projeto de sistema de controle, simulação de sistemas dinâmicos, identificação de sistemas redes neurais e outras.

B.3 Procedimento para Identificação de Sistemas

O problema do sistema de identificação é estimar um modelo para um sistema baseado em dados de entrada e saída. Existem várias maneiras para descrever um sistema e estimar tais descrições e, nesta seção, será fornecido um breve relato das principais formas de aproximação.

O procedimento para determinar o modelo de um sistema dinâmico a partir de dados observados de entrada e saída envolve basicamente:

- Os dados de entrada e saída,
- O conjunto de modelos candidatos (estrutura de modelo) e
- Um critério para selecionar um modelo particular, baseado nas informações dos dados (método de identificação)

O ciclo para realizar a identificação do modelo pode ser definido como:

- 1 - coleta de dados do processo (sistema) a ser identificado;
- 2 - exame e preparação dos dados de tal forma a remover as tendências e pontos discrepantes, selecionar parte dos dados de interesse e filtrá-los para aumentar o range das frequências de maior importância;
- 3 - selecionar e definir a estrutura do modelo;
- 4 - computar o melhor modelo na estrutura de acordo com os dados de entrada e saída e critério de escolha;
- 5 - examinar as propriedades do modelo escolhido; e
- 6 - se o modelo é bom o suficiente, então pare; se não é, volte ao passo 3 e tente outro modelo. Avaliar também outros métodos de estimação (passo 4) ou trabalhar os dados de entrada e saída (passo 2).

A caixa de ferramentas de identificação de sistemas oferece várias funções para cada um destes passos, exceto para o primeiro. Outras caixas de ferramentas também poderão ser utilizadas dependendo do problema a ser estudado e do usuário.

B.4 Modelos de Identificação de Sistemas

B4.1 Introdução

A configuração básica de entrada e saída é mostrado na figura b.1.

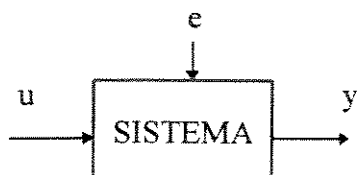


Figura b.1 - Configuração básica de entrada e saída

Assumindo intervalos de amostragem unitário, existe um sinal de entrada

$$u(t); t = 1, 2, \dots, N$$

e um sinal de saída

$$y(t); t = 1, 2, \dots, N$$

Assumindo que os sinais são relacionados por um sistema linear, a relação entre eles pode ser escrita como

$$y(t) = G(q) u(t) + v(t) \quad (\text{B-1})$$

onde:

$G(q)$ = função de transferência;

q é o operador de deslocamento-para-frente.

$v(t) = H(q) e(t)$ (ruído imensurável), sendo $e(t)$ ruído branco com variância λ

Para maiores detalhes consultar Ljung [21] e Ljung [22].
Logo de (c.1) teremos no domínio do tempo:

$$y(t) = G(q) u(t) + H(q) e(t) \quad (B-2)$$

B.4.2 Representação polinomial das funções de transferência

A equação (B.2) pode ser escrita da forma polinomial como sendo:

$$A(q)y(t) = \frac{B(q)}{F(q)} u(t - nk) + \frac{C(q)}{D(q)} e(t) \quad (B-3)$$

onde: $G(q) = q^{-nk} \frac{B(q)}{A(q)}$ e $H(q) = \frac{1}{A(q)}$ (B-4)

nk = números de retardos da entrada para saída

$$A(q) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{na} q^{-na} \quad (B-5)$$

na = ordem do polinômio $A(q)$

$$B(q) = b_1 + b_2 q^{-1} + \dots + b_{nb} q^{-nb+1} \quad (B-6)$$

nb = ordem do polinômio $B(q)$

$$C(q) = 1 + c_1 q^{-1} + \dots + c_{nc} q^{-nc} \quad (B-7)$$

nc = ordem do polinômio $C(q)$

$$F(q) = 1 + f_1 q^{-1} + \dots + f_{nf} q^{-nf} \quad (B-8)$$

nf = ordem do polinômio $F(q)$

Virtualmente todas as estruturas de modelos lineares representados por caixas-pretas podem ser obtidos a partir da forma geral (B-3) ou seja:

Estrutura Arx : esta estrutura de modelo é obtida para $nc = nd = nf = 0$, sendo:

$$A(q)y(t) = B(q) u(t-nk) + e(t) \quad (B-9)$$

Estrutura Armax: é uma estrutura de modelo mais geral obtida para $nd = nf = 0$, sendo:

$$A(q)y(t) = B(q) u(t-nk) + C(q) e(t) \quad (B-10)$$

Estrutura OE ("output error"): esta estrutura de modelo é obtida para $na = nc = nd = 0$, sendo:

$$y(t) = \frac{B(q)}{F(q)} u(t - nk) + e(t) \quad (B-11)$$

Estrutura BJ (Box-Jenkins): esta estrutura de modelo é obtida para $n_a = 0$:

$$y(t) = \frac{B(q)}{F(q)} u(t - nk) + \frac{C(q)}{D(q)} e(t) \quad (B-12)$$

Estrutura IV4 (“instrumental variável”): é uma estrutura de modelo derivado do modelo Arx, verificar seções 5.7 de Ljung [21] e 7.6 de Ljung [22].

Da mesma forma alguns tipos de modelos podem ser definidos para sistemas com um número arbitrário de entradas, com a seguinte forma:

$$A(q)y(t) = \frac{B_1(q)}{F_1(q)} u_1(t - nk_1) + \dots + \frac{B_{n_u}(q)}{F_{n_u}(q)} u_{n_u}(t - nk_{n_u}) + \frac{C(q)}{D(q)} e(t) \quad (B-13)$$

B.4.3 Estimativa de modelos paramétricos

No MATLAB a caixa de ferramentas de identificação de sistemas contém várias funções para modelos paramétricos. Eles utilizam a mesma estrutura de comando:

$$th = \text{function}([y \ u]), ths) \quad (B-14)$$

As variáveis \underline{y} e \underline{u} são vetores coluna que contêm a saída e a entrada do sistema, enquanto a matriz \underline{ths} especifica a estrutura particular do modelo a ser estimado. O modelo estimado resultante está contido em \underline{th} . Ele é codificado no formato theta. Este é o formato básico para representação de modelos na caixa de ferramentas de identificação de sistemas. O formato theta pode ser transformado para o formato de função de transferência utilizando-se o comando:

$$[\text{num}, \text{den}] = \text{th2tf}(th) \quad (B-15)$$

ou no formato de estado de espaço utilizando-se o comando:

$$[A, B, C, D, X0] = \text{th2ss}(th) \quad (B-16)$$

Modelo Arx - é obtido pelo comando (c-17) que é uma derivação de (c-14):

$$th = \text{arx}(z, [n_a \ n_b \ n_k]) \quad (B-17)$$

Modelo IV4 - é obtido pelo comando (c-17) da mesma forma:

$$th = \text{iv4}(z, [n_a \ n_b \ n_k]) \quad (B-18)$$

A partir das funções `arx`, `armax`, `oe`, `bj`, e `iv4` obtêm-se modelos de tempo-discreto, e a transformação entre representações de tempo-discreto e tempo-contínuo é efetuado através dos comandos:

$$\text{thc} = \text{thd2thc}(\text{th}) \quad (\text{discreto para contínuo}) \quad (\text{B-19})$$

$$\text{thd} = \text{thc2thd}(\text{th}, T) \quad (\text{contínuo para discreto}) \quad (\text{B-20})$$

A função de transferência obtida a partir de (B-15) poderá estar representando sistemas de tempo-contínuo ou de tempo-discreto, dependendo da natureza da função `theta` utilizada para a sua determinação. Neste trabalho utilizaremos sistemas de tempo-contínuo.

Os modelos `Arx` e `IV4`, são os modelos mais simples e serão utilizados neste trabalho por fornecerem resultados satisfatórios, não implicando que os outros modelos não forneçam bons resultados.

B.4.4 Intervalo de amostragem

A caixa de ferramenta de identificação de sistemas do MATLAB assume um intervalo de amostragem $t+1$, a menos de especificação ao contrário. Isto significa que a unidade da frequência torna-se “radianos por intervalo de amostragem”, e que toda transformação entre modelos de variáveis discretas e variáveis contínuas fornece valores numéricos dos parâmetros correspondentes a unidade “...por intervalo de amostragem” ao contrário de “...por segundos”. Para obter unidades físicas corretas nesses casos, o intervalo de amostragem deve ser especificado de acordo com a amostragem dos dados, ou seja, utilizar no comando que forma a função `theta` estruturas que seja possível especificar o intervalo de amostragem, por exemplo:

- estrutura `arx`

normalizado : `th = arx(z,nn)`

real : `th = arx(z,nn,maxsize,T)`, onde

`T` = intervalo de amostragem

`maxsize` = número de elementos que serão armazenados nas matrizes

“default” = 4.096

ou = 8.188

APÊNDICE C

BIBLIOTECA DE BLOCOS

Nesse apêndice será apresentado os blocos que foram utilizados na elaboração dos modelos funcionais dos componentes dos sistemas elétricos estudados. Para facilidade de compreensão os blocos serão apresentados em três grupos:

- blocos básicos;
- blocos do sistema elétrico da plataforma Petrobrás-15; e
- blocos do sistema elétrico da plataforma Petrobrás-18.

C.1. Blocos básicos

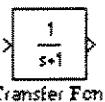
- Somador : soma os sinais de entrada definindo-se a propriedade de adição ou subtração através da mudança do sinal de \pm ou \mp .



- Ganho : incrementa um ganho negativo ou positivo ao sinal de entrada conforme especificado.



- Função de transferência: cria uma função de transferência a partir da especificação dos valores do numerador e denominador em ordem decrescente do expoente de s .



- Integrador: integra o sinal de entrada.



- Step: muda o valor da saída de um valor inicial para um valor final em determinado tempo conforme valores especificados.



- Clock : registra o tempo de simulação.



- Constante: fornece um sinal de saída constante conforme especificado.



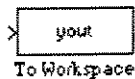
- **From workspace** : importa um sinal da área de trabalho do MATLAB, sendo **T** o vetor tempo e **U** o sinal desejado.



- **Scope** : janela para acompanhamento das variáveis durante a simulação, pode ser conectado a qualquer ponto do diagrama de blocos.



- **To workspace** : envia uma variável para a área de trabalho do MATLAB de acordo com o número de pontos especificados.



- **Produto** : opera o produto entre as grandezas de entrada.



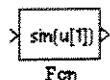
- **Rate** : determina a taxa de variação da variável de entrada.



- **Saturação** : especifica valores máximo e mínimo da variável de entrada.



- **Fcn** : aplica uma função ou um conjunto de funções existentes na biblioteca do MATLAB utilizando a variável de entrada como argumento.



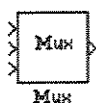
- **Outport** : exporta uma variável de um bloco para outro dentro de um mesmo diagrama.



- **Inport** : importa uma variável de outro bloco do mesmo diagrama.

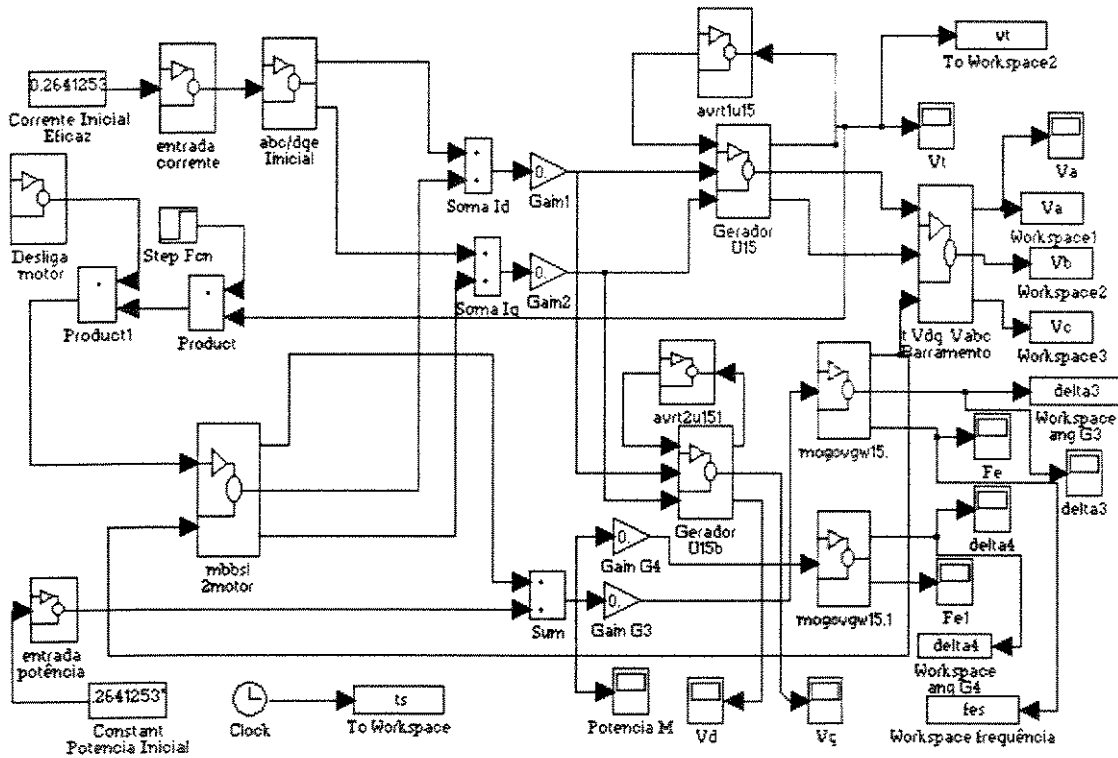


- **Mux** : multiplexador que agrupa várias linhas de valores lineares juntos em único vetor linha.

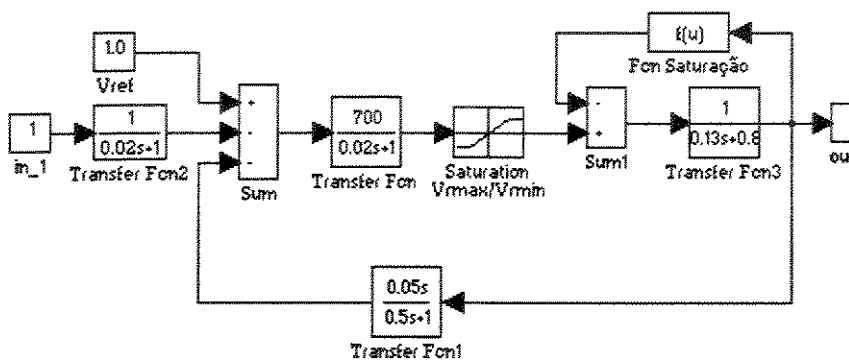


C.2. Blocos do sistema elétrico da plataforma Petrobrás-15

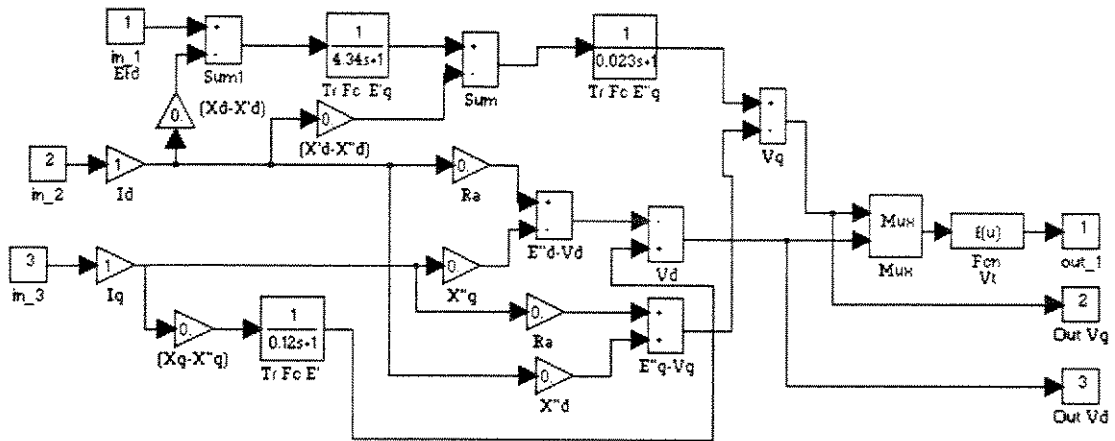
- Modelo operacional do sistema elétrico : conjunto de blocos associados para representar o sistema completo.



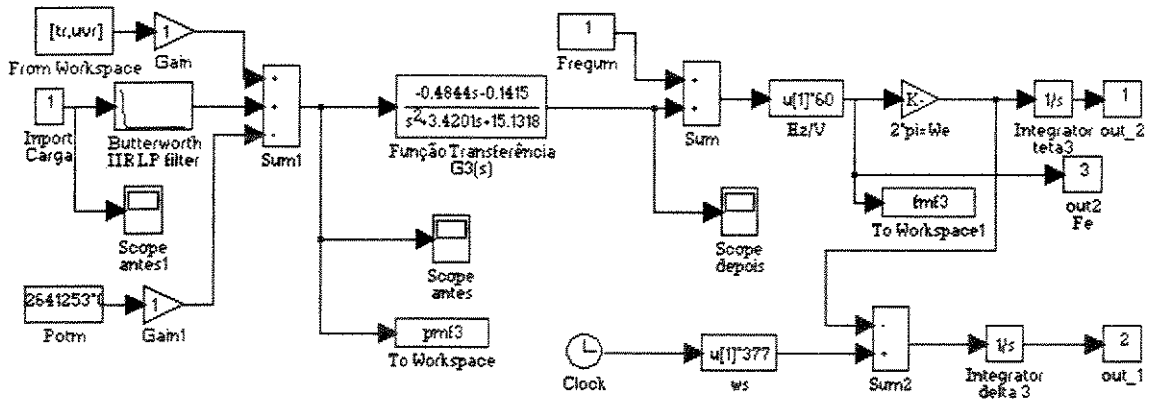
- avrt1U15 e avrt2U15b : representação do AVR pelo modelo 1 IEEE.



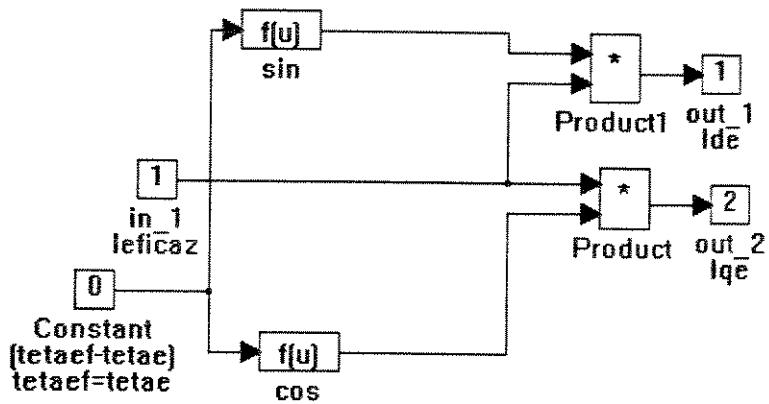
- Gerador U15 e Gerador U15b: representação por modelo operacional dos geradores



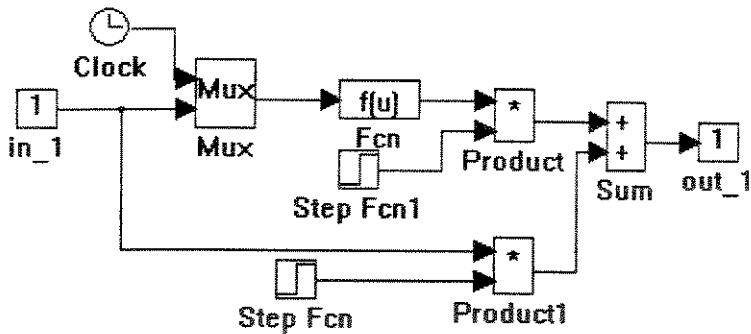
- mogovgw15. e mogovgw15.1: função de transferência agregada do conjunto motor/gerador/regulador de velocidade.



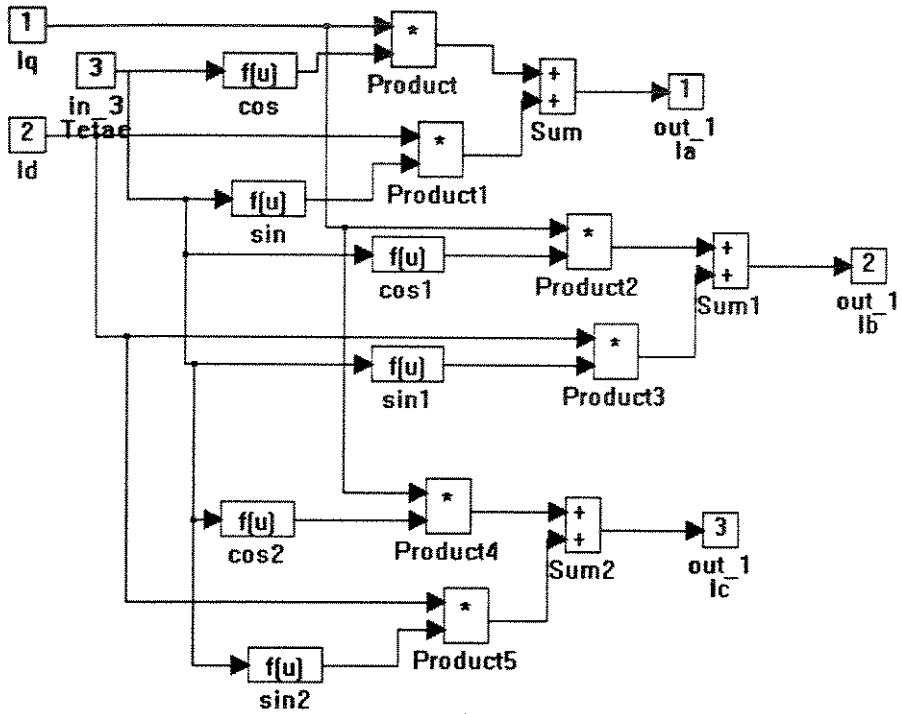
- mbbs1 2motor: modelo operacional para dois motores das bombas de lastro.



- entrada corrente e potência : circuito de atenuação para entrada das cargas iniciais.

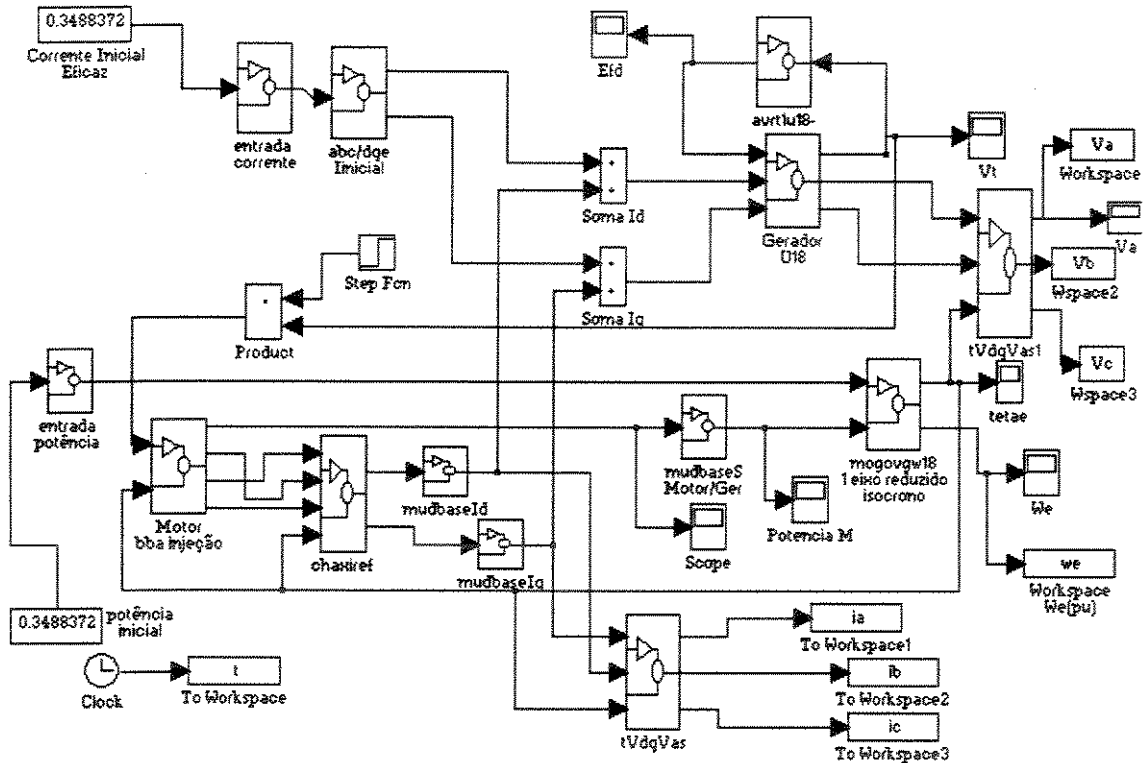


- tVdq Vabc Barramento: transforma os valores de tensão do eixo dq em valores abc.

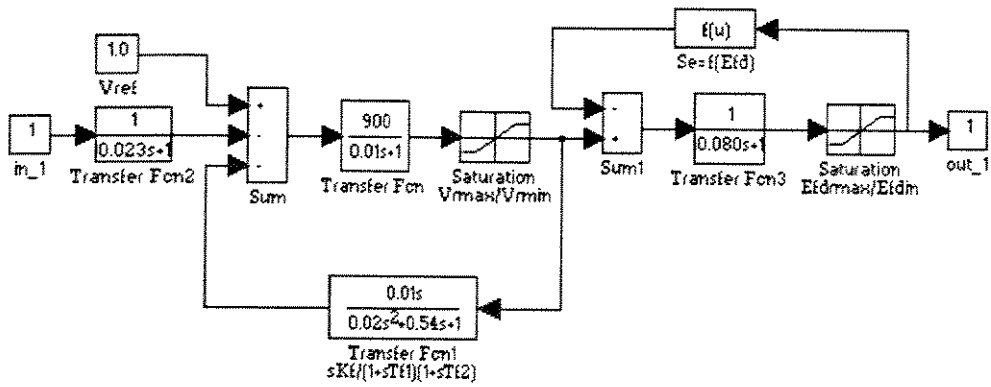


C.3. Blocos do sistema elétrico da plataforma Petrobrás-18

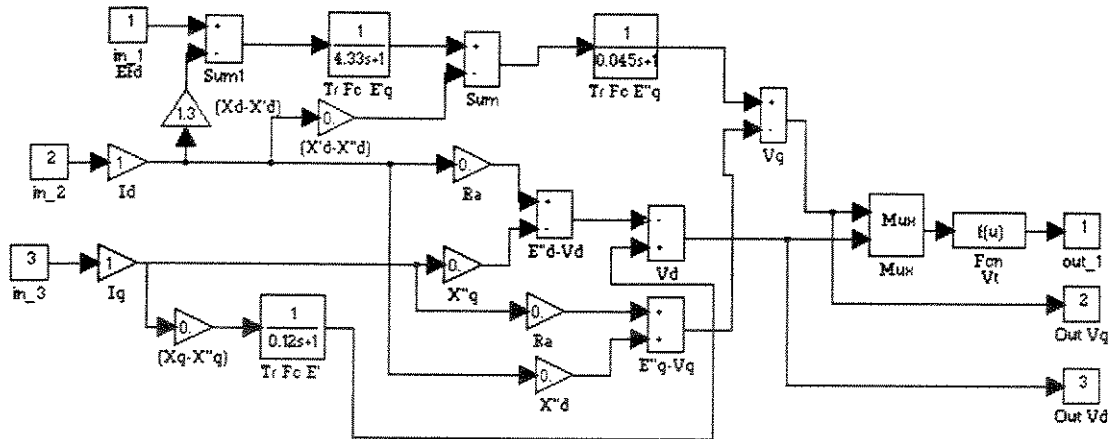
- Modelo operacional do sistema elétrico: conjunto de blocos associados para representar o sistema completo.



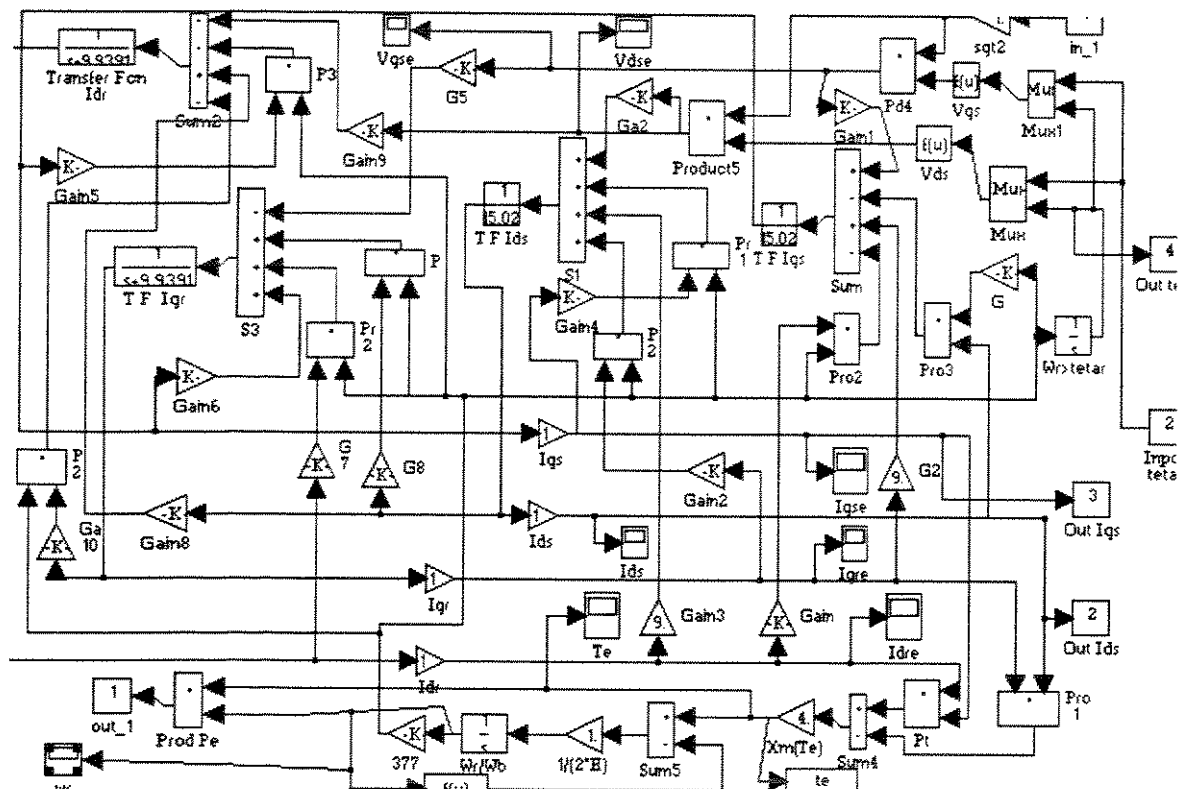
- avrt1U18: representação do AVR pelo modelo 2 IEEE



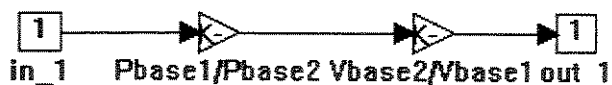
- Gerador U18: modelo operacional do gerador.



- motor bba injeção: modelo operacional do motor da bomba de injeção.



- mudbaseIq e mudbaseId : mudança de base da corrente ,da base do motor para a base do gerador



- mudbase S motor/gerador: mudança de base da potência, da base do motor para a base do gerador.

