



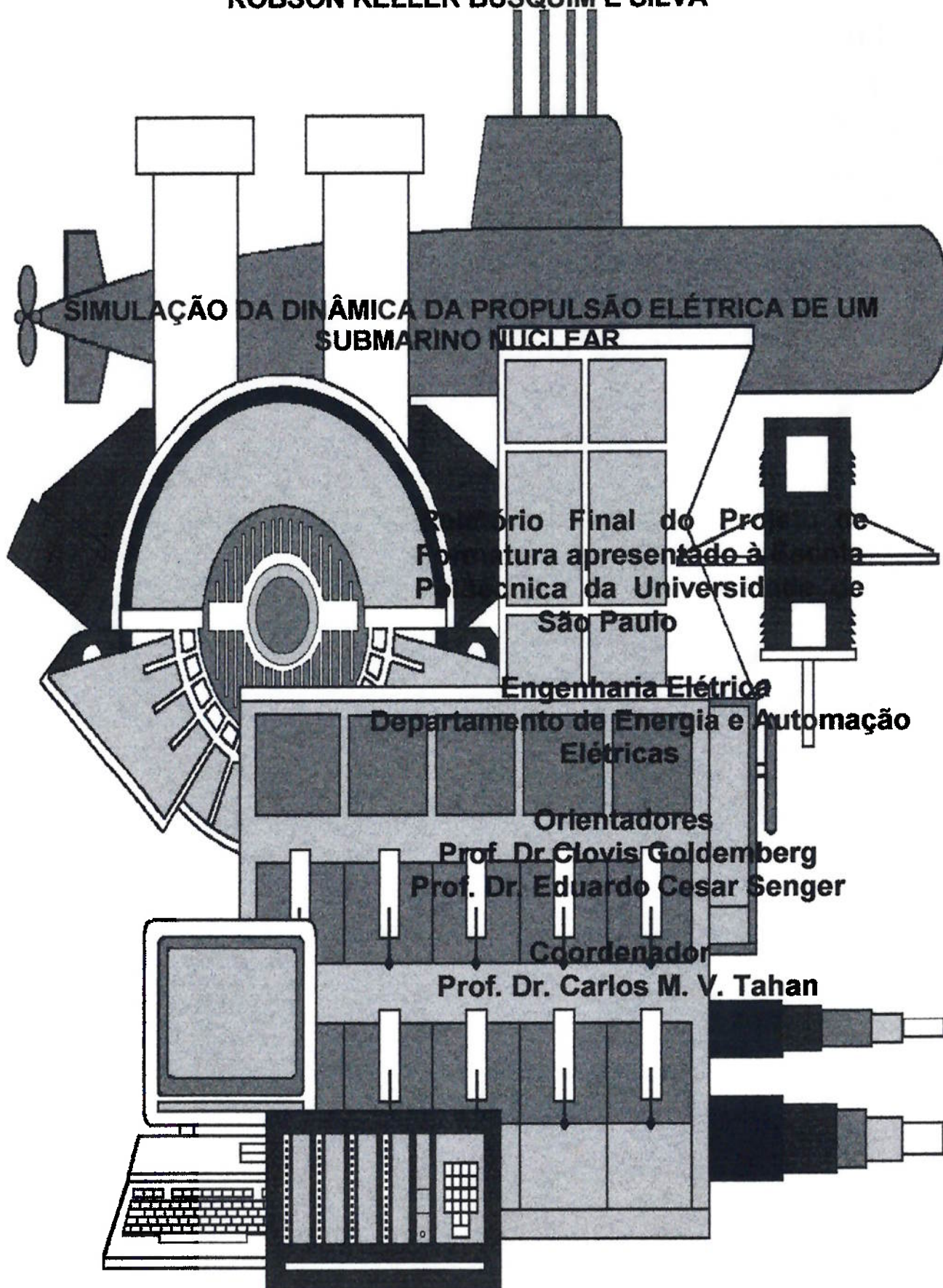
ROBSON KELLER BUSQUIM E SILVA

**SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM
SUBMARINO NUCLEAR**

Relatório Final do Projeto de
Formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo

São Paulo
Dezembro / 1999

ROBSON KELLER BUSQUIM E SILVA



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

Trabalho Final do Projeto de
Formatura apresentado à
Politécnica da Universidade de
São Paulo

Engenharia Elétrica
Departamento de Energia e Automação Elétricas

Orientadores
Prof. Dr. Clovis Goldemberg
Prof. Dr. Eduardo Cesar Senger

Coordenador
Prof. Dr. Carlos M. V. Tahan

São Paulo
Dezembro / 1999

AGRADECIMENTOS

À minha esposa Andréa Hummel Santos Busquim, pelo estímulo e incansável compreensão.

Aos meus pais, pelo apoio dado durante toda a minha vida.

Aos integrantes do PEA, em especial aos professores Clóvis e Senger, pelas orientações durante o projeto.

Ao CCEMSP e à Marinha, pelo apoio prestado.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

**SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE
UM SUBMARINO NUCLEAR**

1	INTRODUÇÃO.....	4
2	OBJETIVO.....	9
3	DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DE INTERESSE DO PROJETO	10
3.1	MOTOR DE PROPULSÃO (MEP - CC).....	10
3.2	TURBO-GERADORES DE PROPULSÃO (TGPs)	15
3.3	RETIFICADORES DOS TURBO-GERADORES DE PROPULSÃO	16
3.4	SISTEMA DE EXCITAÇÃO ESTÁTICA DOS TURBO-GERADORES DE PROPULSÃO ..	17
3.5	RESISTOR DE FRENAGEM DO EIXO PROPULSOR.....	18
3.6	CONVERSOR ESTÁTICO DE POTÊNCIA DE EXCITAÇÃO DO MEP-CC.....	18
3.7	CONVERSOR ESTÁTICO DE ARMADURA DO MEP - CC.....	20
4	DESCRIÇÃO DA OPERAÇÃO.....	21
4.1	CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO AVANTE	21
4.1.1	<i>Operação na condição A</i>	<i>24</i>
4.1.2	<i>Operações nas condições B, C e D</i>	<i>24</i>
4.1.3	<i>Operação à potência máxima</i>	<i>25</i>
4.2	CONDIÇÕES NORMAIS DE OPERAÇÃO DE FRENAGEM	25
4.3	CONDIÇÕES NORMAIS DE OPERAÇÃO À RÉ.....	29
4.4	CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO EM EMERGÊNCIA	29
4.4.1	<i>Sistema em operação com um único gerador</i>	<i>29</i>
4.4.2	<i>Sistema em operação parcial do motor de propulsão.....</i>	<i>29</i>
4.4.3	<i>Sistema em operação com falha nos dois turbo-geradores</i>	<i>30</i>
5	CARACTERÍSTICAS DE CONTROLE	30
5.1	COMANDO E CONTROLE	30
5.1.1	<i>Equipamentos.....</i>	<i>30</i>
5.1.2	<i>UCP</i>	<i>33</i>
5.1.2.1	<i>Variáveis a serem indicadas na UCP</i>	<i>33</i>

**SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE
UM SUBMARINO NUCLEAR**

5.1.3	<i>Conjunto de Manobra de Propulsão (Painel de Potência do MEP-CC)</i>	34
5.1.4	<i>Sistema de Controle (Central)</i>	34
5.1.5	<i>Variáveis a serem controladas</i>	35
5.2	MODO DE CONTROLE PARA OPERAÇÃO AVANTE	35
5.3	MODO DE CONTROLE PARA OPERAÇÃO À RÉ	36
6	PARÂMETROS	38
7	FERRAMENTA COMPUTACIONAL	45
8	EQUACIONAMENTO	46
9	MODELAMENTO LINEAR DO ACIONAMENTO	68
9.1	INTRODUÇÃO	68
9.2	ANÁLISE DO CAMPO DO MEP-CC	68
9.2.1	<i>Observações preliminares sobre a malha de corrente de campo do MEP-CC</i>	69
9.2.2	<i>Ajuste do controlador de corrente de campo do MEP-CC</i>	70
9.2.3	<i>Resultados no domínio do tempo</i>	71
9.3	ANÁLISE DA EXCITATRIZ DO GERADOR SÍNCRONO	72
9.3.1	<i>Observações preliminares sobre a malha de corrente da excitatriz</i>	73
9.3.2	<i>Ajuste do controlador de corrente da excitatriz</i>	73
9.3.3	<i>Resultados no domínio do tempo</i>	74
9.4	ANÁLISE DA MALHA DE CORRENTE DE ARMADURA DO MEP-CC	76
9.4.1	<i>Comentários em relação ao diagrama de controle da Armadura do MEP-CC</i>	77
9.4.2	<i>Ajuste do controlador de corrente da armadura</i>	80
9.4.3	<i>Resultados no domínio do tempo</i>	81
9.5	ANÁLISE DA MALHA DE VELOCIDADE DO MEP-CC	84
9.5.1	<i>Comentários em relação ao diagrama de controle da Velocidade do MEP</i>	85
9.5.2	<i>Ajuste do controlador de velocidade do MEP-CC</i>	88
9.5.3	<i>Resultados no domínio do tempo</i>	89

**SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE
UM SUBMARINO NUCLEAR**

10	SIMULAÇÕES DO ACIONAMENTO LINEAR.....	92
10.1	INTRODUÇÃO	92
10.2	SIMULAÇÃO DO MEP-CC ISOLADO	92
10.3	SIMULAÇÃO COMPLETA DA PLANTA ELÉTRICA PARA PEQUENO DEGRAU.....	95
11	ANÁLISE DAS NÃO-LINEARIDADES.....	99
11.1	INTRODUÇÃO	99
11.2	ANÁLISE DO CONTROLADOR.....	99
11.3	ANÁLISE DO CAMPO DO MEP-CC	101
11.3.1	<i>Observações preliminares sobre a malha de corrente de campo do Motor.....</i>	<i>101</i>
11.3.2	<i>Ajuste do controlador de corrente de campo do MEP-CC.....</i>	<i>102</i>
11.3.3	<i>Resultados no domínio do tempo.....</i>	<i>102</i>
11.4	ANÁLISE DA EXCITATRIZ DO GERADOR SÍNCRONO.....	104
11.4.1	<i>Observações preliminares sobre a malha de corrente da excitatriz.....</i>	<i>104</i>
11.4.2	<i>Ajuste do controlador de corrente da excitatriz.....</i>	<i>105</i>
11.4.3	<i>Resultados no domínio do tempo.....</i>	<i>105</i>
11.5	ANÁLISE DA MALHA DE CORRENTE DE ARMADURA DO MEP-CC	107
11.5.1	<i>Observações preliminares sobre a malha de corrente da Armadura</i>	<i>107</i>
11.5.2	<i>Ajuste do controlador de corrente da armadura.....</i>	<i>108</i>
11.5.3	<i>Resultados no domínio do tempo.....</i>	<i>109</i>
11.6	ANÁLISE DA MALHA DE VELOCIDADE DO MEP-CC	111
11.6.1	<i>Comentários em relação ao diagrama de controle da Velocidade do MEP</i>	<i>112</i>
11.6.2	<i>Ajuste do controlador de velocidade do MEP-CC.....</i>	<i>112</i>
11.6.3	<i>Resultados no domínio do tempo.....</i>	<i>113</i>
11.7	SIMULAÇÃO FINAL DA PLANTA ELÉTRICA	116
12	AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS.....	119
13	CONCLUSÃO	120
14	BIBLIOGRAFIA.....	121



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

1 INTRODUÇÃO

A idéia do projeto que será apresentado nos itens seguintes surgiu do desejo de se procurar conciliar as imposições feitas pela disciplina, com a oportunidade de desenvolver um trabalho relacionado com a Marinha do Brasil, uma vez que faço parte do convênio Marinha/USP.

A existência de um trabalho realizado por professores da USP para o CTMSP (antiga COPESP) mostrou-se bastante interessante ao englobar praticamente todo o escopo do curso de Máquinas Elétricas e, também, ao apresentar uma situação bem próxima da realidade no que concerne aprovar ou não a realização de um projeto (neste caso, a construção do planta propulsora do submarino nuclear).

Os resultados desse estudo anterior, registrados em dois relatórios (Modelamento da Planta de Propulsão (COPESP – Relatório Final) [2] e Conversor de Campo do Gerador e Interface [3]), são indispensáveis para o desenvolvimento deste projeto, pois representam rico material didático. Uma ressalva importante a ser colocada neste momento é que as simulações do estudo de referência foram realizadas no programa SIMNON versão 3.20, o que não será feito neste trabalho. A ferramenta computacional escolhida foi o MATLAB, o que foi uma escolha muito interessante, por ser uma ferramenta computacional poderosa.

Este projeto mostrou-se oportuno também pelo fato que, como a Marinha tinha o desejo de construir a instalação de propulsão elétrica do submarino nuclear, foi solicitada um estudo junto à empresa Siemens e, a proposta [1] apresentada tornou-se outra fonte de consulta importante para a realização desse estudo.

O conjunto formado pelo material didático do curso de Energia e Automação Elétricas e pelos materiais acima citados (resultante de atividades profissionais) coloca



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

lado a lado teoria e prática, tornando-se o fator motivante para o desenvolvimento do projeto.

Com posse destes materiais, o ponto de partida foi limitar o estudo para tornar possível realizá-lo dentro do prazo estipulado. Apesar do nome do projeto já esclarecer que se trata somente da propulsão elétrica, é importante ressaltar que certos componentes da planta não serão estudados, como será visto a seguir.

O Sistema Elétrico de Propulsão é constituído basicamente por um sistema Ward-Leonard — sistema constituído por um motor de corrente contínua alimentado por turbo-geradores de tensão variável — formado por:

- Turbo-geradores de Propulsão (TGP-1 e TGP-2);
- Excitatrizes Estáticas dos Geradores (EE-1 e EE-2);
- Unidade de Controle da Propulsão (UCP);
- Retificadores a Diodo (RD-1 e RD-2);
- Resistores de Frenagem (RF-1 e RF-2);
- Motor de Corrente Contínua (MEP - CC);
- Bateria (BAT);
- Conversor Estático C.C. para Alimentar a Armadura (CEA);
- Conjunto de Manobra da Propulsão (CMP); e
- Sistema de Excitação Estática do MEP - CC.

A Unidade de Controle da Propulsão (UCP) e o Conjunto de Manobra da Propulsão (CMP), apesar de citados e com breve descrição neste trabalho, não serão efetivamente simulados. Esses componentes poderão fazer parte de propostas subseqüentes.

**SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE
UM SUBMARINO NUCLEAR**

As idéias apresentadas a seguir identificam os componentes mais importantes. Os mesmos podem ser visualizados na figura 2.1.

O MEP-CC será alimentado, em condições normais, por dois geradores elétricos síncronos através de duas pontes retificadoras não controladas. Os geradores elétricos de propulsão (GEPs), por sua vez, serão acionados por turbinas a vapor, operando na velocidade de 6000 rpm e gerando energia a 100 Hz, com tensão variável continuamente de zero a nominal.

Em condições de falha total do sistema de geração da propulsão o MEP-CC pode ainda ser alimentado por um banco de baterias através de um conversor estático CC-CC.

Uma outra forma de representar o sistema está na figura 2.2. As características principais da configuração mostrada na figura 2.2 são:

- Os barramentos CC são eletricamente isolados, o que reduz a potência de curto-circuito.
- A mesma permite, quando em potência reduzida ou em condições de emergência, operar com apenas um turbogerador acionando duas ou quatro amaduras, através do disjuntor de interligação dos barramentos CC (estes, porém, não são considerados como barramento único).
- A frenagem dinâmica do MEP-CC é realizada com o auxílio dos resistores, devidamente dimensionados para absorver a energia gerada pelo torque de arraste e a energia cinética do eixo de propulsão.



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

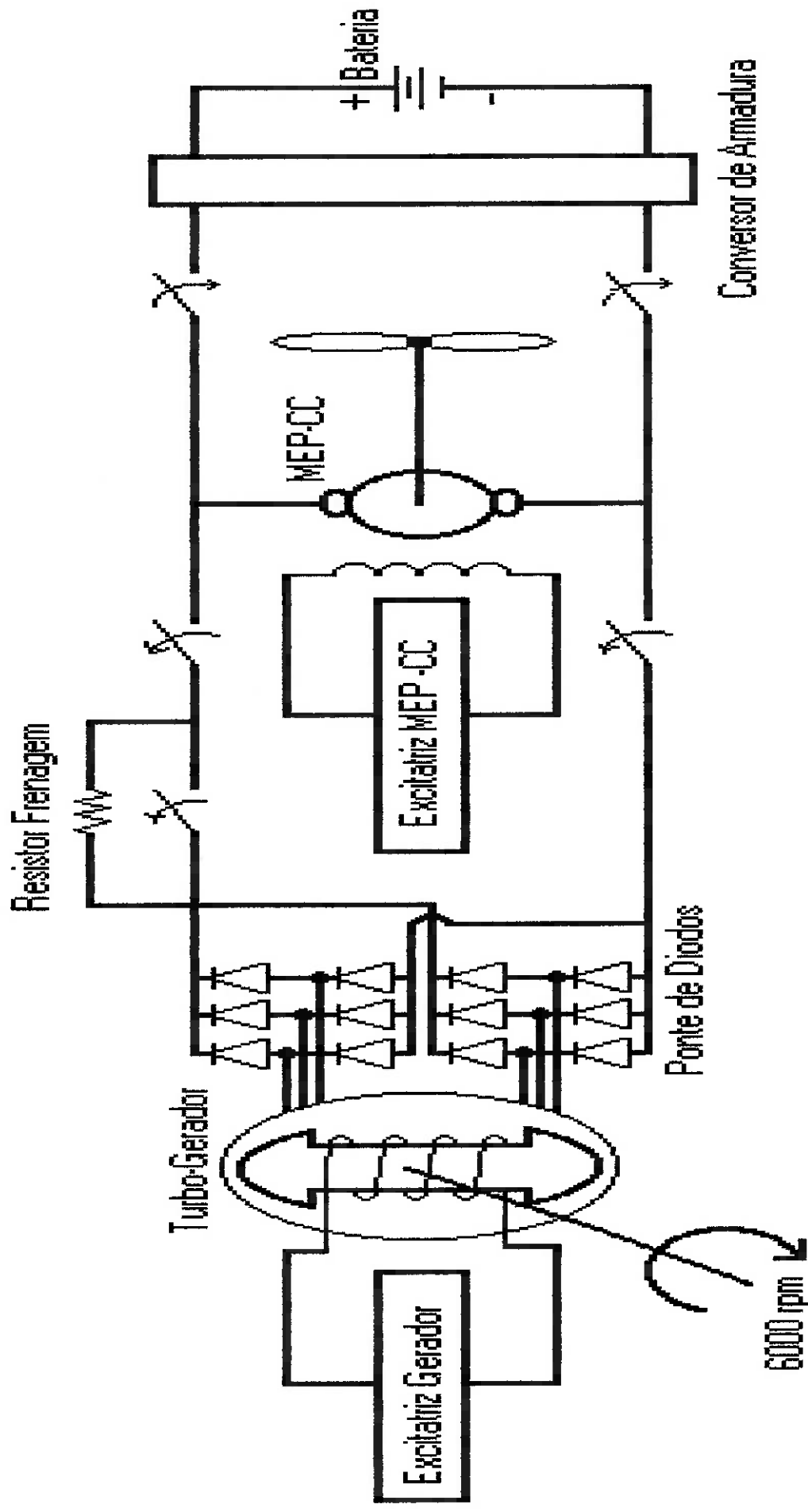


Figura 1.1 : Esquema da Propulsão Elétrica do Submarino Nuclear.



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

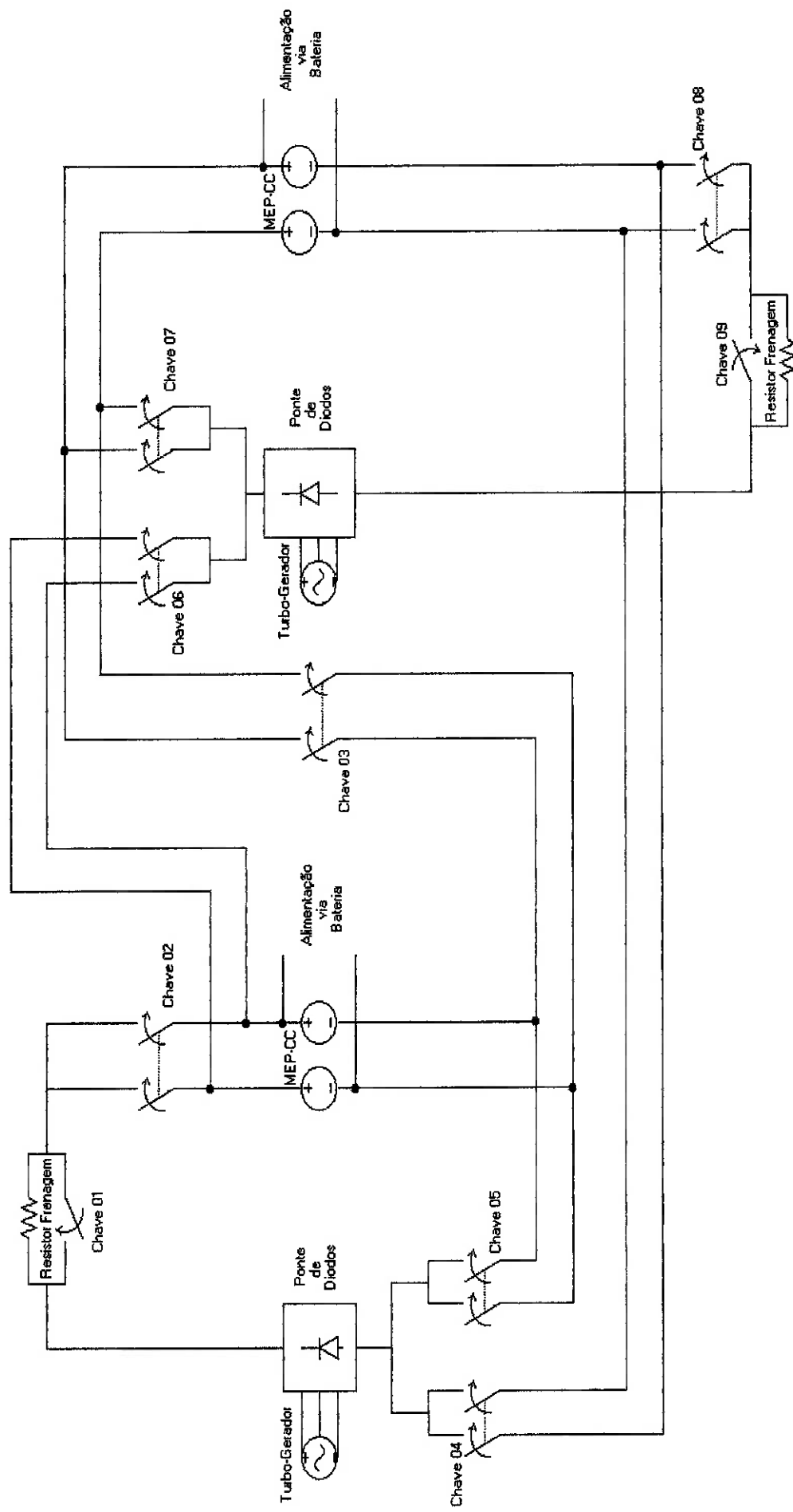


Figura 1.2: Circuito Principal do Sistema de Propulsão.



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

2 OBJETIVO

O objetivo do projeto é simular, com o auxílio de uma ferramenta computacional conveniente, o comportamento dinâmico de uma instalação de propulsão elétrica de corrente contínua de um submarino nuclear. Inicialmente será desenvolvido um modelo e as simulações consistirão, basicamente, da análise desse modelo a fim de se obter pequenas e, também, grandes variações na velocidade do submarino.

O projeto apresentará o modelamento da planta elétrica de propulsão utilizando um motor de corrente contínua alimentado por sistemas formados por turbo-geradores de corrente alternada e pontes retificadoras não-controladas.

A construção de um submarino, ainda mais em se tratando de um submarino nuclear, envolve (assim como qualquer grande projeto) três importantes itens: tempo para se projetar o submarino; tempo para se construir o submarino e, sustentando estes dois itens, recursos financeiros elevados.

É importante, portanto, após a fase de projeto, buscar se obter uma avaliação prévia do resultado final. Isto pode ser obtido através de simulações, focando diversos aspectos construtivos: hidrodinâmica, planta elétrica, propulsão, dentre outros.

Deseja-se com este projeto, portanto, fornecer subsídios para a aprovação ou não da propulsão elétrica do submarino nuclear permitindo, assim, evitar a realização de um projeto inviável e economizando, evidentemente, tempo e dinheiro.



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

3 DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DE INTERESSE DO PROJETO

Este tópico destina-se a descrever os componentes de interesse do projeto, citados na introdução. Todas as informações foram retiradas da proposta técnica da Siemens S.A. [1].

3.1 MOTOR DE PROPULSÃO (MEP - CC)

- O motor elétrico de corrente contínua destina-se a propulsão Naval e é construído em configuração de quatro circuitos de armadura, com cada par de circuitos enrolado num bloco comum e excitado pelo mesmo campo, isolados entre si e com as bobinas montadas num conjunto de quatro camadas. Outrossim, a excitação de cada par de circuitos de armadura (cada bloco rotórico) é feita por dois enrolamentos de excitação separados para que num imaginável caso técnico de distúrbio num dos enrolamentos de excitação ainda permaneça cerca de 70% do fluxo de excitação.
- Cada meio motor, ou seja, cada par de circuitos de armadura tem dois enrolamentos separados (dois comutadores) que podem ser comandados separadamente, como se fossem dois motores independentes. Cada enrolamento (armadura) tem comutadores próprios e correspondentes enrolamentos de compensação e de interpolos no estator que são todos idênticos aos da armadura do mesmo bloco rotórico e, também, independentes entre si.
- Cada meio motor (cada par de armaduras) possui um único enrolamento de excitação que, conforme visto no primeiro parágrafo, está dividido em 2 enrolamentos parciais independentes.



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

- O motor é excitado com enrolamentos de campo independentes. São empregados enrolamentos de interpolos e de compensação. A operação é estável em toda a faixa de velocidade e de tensões de armadura e campo.
- A máquina opera em regime de serviço contínuo, desenvolvendo potência de 7350 KW à rotação básica de 200 rpm e alimentada em tensão de 1000 VCC.
- A variação da velocidade (rotação) é obtida pela variação da tensão de armadura do motor, através da variação da excitação do gerador que o alimenta.
- Em regime de emergência, o motor pode ter dois de seus circuitos de armadura desligados, desenvolvendo, nesse caso, a velocidade de até 135 rpm, ou seja, 67% da velocidade básica, correspondendo à potência de 2400 KW.
- A versatilidade de operação permite, também, o funcionamento com apenas um de seus circuitos de armadura, desenvolvendo nesse caso, velocidade de até 90 rpm, ou seja, 45% da velocidade básica, correspondendo a potência de 800 KW, em serviço contínuo.
- A inversão no sentido da velocidade é feita por meio de frenagem dinâmica, conectando os terminais das armaduras a um resistor de frenagem. Uma vez parado, os terminais dos campos do motor são invertidos e, em seguida, inicia-se o processo de nova partida, porém no sentido inverso.
- Devido ao fato de as bobinas de armaduras estarem situadas nas mesmas ranhuras, estes enrolamentos estão plenamente acoplados. As tensões induzidas pelos campos de excitação e de interpolos são idênticas em ambas as armaduras, o que beneficia a comutação e a divisão de carga para operação em paralelo.
- O motor é projetado de tal modo que tenha um casamento perfeito com outros componentes do sistema propulsor para assegurar operação estável em todas as condições de funcionamento, seja em regime estacionário, em manobras e em



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

reversão. Nisso, foi prevista rotação à direita (marcha avante) do motor de propulsão sendo que a rotação à esquerda, por causa da comutação otimizada para a rotação à direita, só permite por curto tempo 35% de potência nominal e 50% de momento nominal, para condições de manobra.

- A expectativa de vida útil da máquina é de 150000 horas de funcionamento num período de 20 anos. Essa expectativa é prevista para as seguintes condições de funcionamento:

(a) - 15000 horas desenvolvendo 7350 KW a 200 rpm.

(b) - 35000 horas desenvolvendo 3600 KW a 150 rpm.

(c) - 75000 horas desenvolvendo 2300 KW a 130 rpm.

(d) - 25000 horas desenvolvendo 500 KW a 70 rpm.

- A resistência de isolamento de materiais isolantes da classe F, quando corrigidos à temperatura de 20 graus centígrados, não é menor que 50 M Ω para circuitos de campo e 25 M Ω para circuitos de armadura.

- A extremidade avante do eixo do motor está provida de meios para extração de todo conjunto rotórico e é fornecida com um disco dentado para acionar um tacogerador, um conta-giros e um emissor de impulsos.

- O motor opera continuamente, sem comprometimento da sua vida útil ou de seus componentes, nas seguintes condições:

a) - Potências de até 500 KW a 70 rpm, alimentado com tensões de armadura e campo reduzidas, com ausência total de ventilação forçada.

b) - Potência de até 3600 KW a 100 rpm, alimentado com tensões de armadura e campo reduzidas, com os moto-ventiladores ligados em meia velocidade.

c) - Potência de até 7350 KW a 200 rpm, alimentado com 1000 V pelo circuito de armadura, e campo com tensão máxima de 286 V e mínimo de 206 V

**SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE
UM SUBMARINO NUCLEAR**

(tensão nominal = 260 V). Nisso, a sobre-elevação de temperatura para a classe de isolamento F é plenamente utilizada.

- O sistema de alimentação da armadura é constituído por geradores hexafásicos, com retificação de onda completa a diodos. O campo é alimentado por um sistema cuja parte de alimentação de corrente contínua pode variar de 206 a 286 VCC (260 VCC = nominal).
- O motor tem condições de operar com 1.5 vezes a corrente nominal de armadura, durante 60 segundos, em qualquer velocidade até 200 rpm, sem aquecimento danoso.
- O motor tem condições de operar com 1.5 vezes a corrente nominal de armadura, durante 10 segundos, para garantir as condições plenas de frenagem dinâmica.
- De acordo com as relações potência/rotação fornecidas, calcula-se que para 36 rpm existe uma potência de saída do motor de aproximadamente 78KW. O rendimento do circuito de armadura do motor a 78 KW e 36 rpm é de 88%. O rendimento global do motor, nesse ponto de operação (circuitos de armadura e excitação) é de, no mínimo, 86 % (os valores mencionados valem para operação Ward-Leonard).
- O rendimento mínimo do circuito de armadura do rotor a 7350 KW e 200 rpm é de 96%. O rendimento global do motor, nesse ponto de operação (circuitos de armadura e excitação, exclusive moto-ventiladores), é de, no mínimo, 95%.
- O motor será projetado de tal modo que a combinação com todas as condições de carga, dentro da faixa de operação, garanta à planta propulsora regulação de velocidade estável. Devido a impossibilidade da colocação de enrolamento auxiliar de compensação série, também para o tipo de operação "remoto/manual" é prevista uma regulação de divisão de carga subalterna.



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

- A regulação da velocidade do motor é positiva, isto é, a velocidade decresce à carga crescente. A regulação da velocidade do motor não excede 5% (cinco por cento) da máxima velocidade nominal. O desvio da corrente de armadura na divisão de carga dos circuitos de armadura que operam em paralelo, não excede em 5 % o valor médio, em qualquer condição de operação.
- Para qualquer condição de carga, desde a condição de vazio até a plena carga, e considerando valores de tensões de pico-a-pico, a tensão de ondulação do comutador, em qualquer frequência entre 0 (zero) e 16 KHz, não excede 2% da tensão de saída nominal.
- O motor é projetado para operar em temperaturas ambientais de até 50 graus centígrados e 29 graus de temperatura de entrada da água de refrigeração.
- A elevação da temperatura é tal que a temperatura total, incluindo a temperatura ambiente máxima especificada (50 graus centígrados), não exceda o valor permissível para a classe de isolamento F. Esta elevação permissível de temperatura para a classe de isolamento indicada é levada totalmente em consideração.

DADOS DO MOTOR:

Item..... : MEP-CC

Quantidade..... : 1 (uma unidade)

Potência requerida..... : 500 / 3600 / 7350 KW

Potência nominal..... : 7350 KW

Tensão de campo..... : (206 - 286 V)

Tensão de armadura..... : 0 - 1000 V

Número de armaduras..... : 4

**SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE
UM SUBMARINO NUCLEAR**

Número de rotores..... : 2

Excitação..... : Independente, 1 por bloco rotórico

Fator de serviço..... : 1.0

Rotação a plena carga..... : 200 rpm

Tempo de aceleração mínima..... : 10 segundos

Tempo de aceleração máxima..... : 18 segundos

Método de acionamento..... : Geradores/Retificadores

Sensor de temperatura ambiente..... : não tem

Temperatura ambiente..... : 50 ° Celsius

Resistência de aquecimento (V)..... : 110V / 60Hz

Resistência de aquecimento (potência.)..... : 2000 W

Classe de isolamento..... : F

Corrente nominal..... : 7660 A (1937 A por armadura)

Conjugado de partida..... : 130 KN*m

Conjugado nominal..... : 350 KN*m

Conjugado máximo..... : 530 KN*m

Peso total máximo..... : 80 T (previsão 77 T)

Sentido de rotação..... : Horário / Anti- Horário

Momento de inércia do rotor..... : 11470 Kg.m²

Regime de serviço..... : Contínuo

3.2 TURBO-GERADORES DE PROPULSÃO (TGP's)

Os Geradores Elétricos de Propulsão (GEPS) são em número de 2 (dois), cada um ligado em dupla estrela a 30° e alimentam, através de duas pontes retificadoras

**SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE
UM SUBMARINO NUCLEAR**

não-controladas, barramentos CC de tensão continuamente variável. Estes geradores têm arrefecimento ar-água e lubrificação forçada nos mancais.

Os Geradores Elétricos de Propulsão são acionados por turbinas a vapor, operando na velocidade de 6000 rpm e gerando energia a 100Hz, com tensão variável continuamente de zero a nominal.

É oportuno afirmar que será considerado durante este estudo que as turbinas em nenhum momento variarão suas velocidades, ou seja, a regulação das turbinas é excelente.

DADOS DOS TURBO-GERADORES:

Tipo..... : Síncrono, com polos lisos
Potência de saída dos retificadores..... : 3800 KW
Velocidade..... : 6000 rpm
Número de polos..... : 2
Fases..... : 6
Tensão..... : 0 a 750 VCA
Regime de operação..... : Contínuo
Grau de proteção..... : IP54
Arrefecimento..... : Trocador ar-água
Peso..... : 8700 Kg

3.3 RETIFICADORES DOS TURBO-GERADORES DE PROPULSÃO

**SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE
UM SUBMARINO NUCLEAR**

Os retificadores (dois) de onda completa não-controlados são responsáveis pela retificação da tensão de saída dos TGP's. Cada retificador é composto por duas pontes de 6 diodos ligadas em paralelo na saída.

DADOS DOS RETIFICADORES:

Tipo..... : Não controlado
Potência..... : 3800 KW
Variação de Tensão..... : 0 a 1000 VCC
Arrefecimento..... : Água tratada

**3.4 SISTEMA DE EXCITAÇÃO ESTÁTICA DOS TURBO-GERADORES DE
PROPULSÃO**

Cada Turbo-Gerador de Propulsão tem um sistema de excitação estática, responsáveis pela variação contínua da tensão nos terminais dos mesmos.

DADOS DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO ESTÁTICA DOS TGP's:

Tipo..... : CC – CC transistorizada
Potência..... : 20 KW
Tensão de Saída..... : 0 a 125 VCC
Tensão de Alimentação..... : 260 VCC +10% -20%
Peso..... : 600 Kg
Arrefecimento..... : Água doce



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

3.5 RESISTOR DE FRENAGEM DO EIXO PROPULSOR

O sistema de frenagem garante a desaceleração completa do eixo propulsor, através da ligação direta entre o motor e resistor de frenagem. A operação de desaceleração é realizada num intervalo de tempo não superior a 10 segundos.

O torque de desaceleração resistente ao movimento será de 246 KNm, com valor máximo não superior a 417 KNm e mínimo não inferior a 208 KNm. A rotação para estes pontos de operação se dá entre 70 e 88 rpm.

O disjuntor para o resistor de frenagem está colocado no conjunto de manobra da propulsão. O resistor será refrigerado por trocador de calor ar-água.

DADOS DO RESISTOR DE FRENAGEM:

Potência dissipada..... : 2300 KW

Tensão..... : 1000 VCC

Peso..... : 500 Kg

Arrefecimento..... : a Água

3.6 CONVERSOR ESTÁTICO DE POTÊNCIA DE EXCITAÇÃO DO MEP-CC

A excitação do MEP-CC é feita através de dois conversores CC-CC, sendo que cada conversor alimenta o campo de um bloco rotórico. Os conversores têm uma corrente de saída regulada variável e são alimentados a partir de um barramento CC (banco de baterias).

**SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE
UM SUBMARINO NUCLEAR**

Os conversores foram projetados e construídos com redundância total nas suas partes de regulação e circuito de potência, de modo que uma falha em um canal de regulação ou no circuito de potência não implique na perda da excitação do MEP-CC. Os conversores têm basicamente as seguintes proteções:

- (a) sobrecorrente;
- (b) curto-circuito;
- (c) baixa tensão no circuito de disparo; e
- (d) sobretemperatura.

O conversor CC-CC garante uma corrente de excitação reduzida ao MEP-CC na faixa de carga parcial e plena na faixa de operação perto da potência nominal (7.350 KW) na condição avante e, também, na frenagem do motor. Na condição à ré inverte a polaridade do campo para a reversão do torque do MEP-CC.

O conversor CC-CC opera em harmonia com todo o sistema de propulsão, recebendo sinais da UCP para garantir a estabilidade da planta de propulsão em todos os modos de operação descritos anteriormente.

DADOS DO CONVERSOR:

Tipo..... : CC-CC
Potência..... : 22 KW
Tensão de Entrada..... : 260 VCC +10% -20%
Tensão de Saída..... : 0 a 181 VCC
Peso..... : 1100 Kg
Arrefecimento..... : Água doce



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

3.7 CONVERSOR ESTÁTICO DE ARMADURA DO MEP - CC

A função básica do conversor é alimentar o MEP-CC quando o mesmo estiver ligado ao banco de baterias. Para isso as armaduras do MEP-CC são conectadas a dois conversores CC-CC alimentados a partir de um barramento CC (Banco de Baterias), com tensão de saída continuamente variável, de modo que o MEP-CC possa operar com velocidade variável de 11 a 36 rpm.

Para se conseguir um dimensionamento favorável do conversor CC-CC de armadura, inclusive rendimento, os dois circuitos de armadura de cada bloco rotórico são ligados em série.

Pressupondo que o conjunto de manobra da propulsão seja instalado nas proximidades do MEP-CC e dos painéis dos conversores (choppers), utiliza-se um disjuntor deste conjunto de manobra da propulsão para a ligação em série dos circuitos de armadura.

O conversor CC-CC apresenta redundância na sua parte de controle e circuito de potência, de modo que uma falha em um canal de controle ou no circuito de potência não implique na perda de alimentação da armadura.

O conversor CC-CC para alimentação de armadura está montado no painel de conversores. O conversor CC-CC de armadura opera com tensão de saída variável na faixa de 5% a 95% da tensão de entrada, controlada pela UCP, dentro da faixa de tensão de bateria colocada à disposição.

Para a frenagem, o conversor de CC-CC da armadura está devidamente projetado para reverter potência para a bateria.

DADOS DO CONVERSOR:

**SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE
UM SUBMARINO NUCLEAR**

Tipo..... : CC – CC
Potência..... : 82 KW
Tensão de Entrada..... : 260 VCC +10% -20%
Tensão de Saída..... : Variável
Peso..... : 1500 Kg

4 DESCRIÇÃO DA OPERAÇÃO**4.1 CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO AVANTE**

O sistema de propulsão opera avante de acordo com a tabela 4.1 na condição normal, utilizando sempre as quatro armaduras do motor, com velocidade continuamente variável de 11 a 200 rpm. Com relação a esta tabela, é importante salientar que todos os exames e cálculos foram feitos com base na curva característica do hélice :

$$P [KW] = 4 x \left[25 \left(\frac{n}{100} \right) + 225 \left(\frac{n}{100} \right)^3 \right] \quad n \text{ em } [RPM] \quad (4.1)$$

(fornecida pela Siemens)

Com isso, os valores de potência a serem alcançados poderão diferir ligeiramente dos prescritos na tabela 4.1.

**SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE
UM SUBMARINO NUCLEAR**

Outrossim, os rendimentos mencionados nos itens subsequentes englobam as perdas do motor sem levar em conta os dispositivos de excitação/conversores de armadura e as perdas nos ventiladores.

MODO DE OPERAÇÃO	FONTE DE ENERGIA	ROTAÇÃO (RPM)	POTÊNCIA (KW)
CONDIÇÃO A	BATERIA	36	78
CONDIÇÃO B	TG1 OU TG2	70	315
CONDIÇÃO C	TG1 OU TG2	129	1935
CONDIÇÃO D	TG1 E /OU TG2	146	2782
MÁXIMA	TG1 E TG2	200	7350

TABELA 4.1: Relação entre Modo de Operação, Rotação e Potência

De acordo com a condição que se deseja operar, é necessário manobrar com as chaves mostradas na figura 4.1 para se obter a fonte de energia adequada. A tabela 4.2 mostra quais chaves precisam estar fechadas ou abertas para selecionar as fontes de energia existentes.

FONTE DE ENERGIA	CHAVES FECHADAS	CHAVES ABERTAS
Bateria	4,5,6,7	1,2,3,8,9
TGP-1	1,2,4,5,6,7	3,8
TGP-2	4,5,6,7,8,9	2,3
TGP-1 e TGP-2	1,2,5,7,8,9	3,4,6

TABELA 4.2: Posição das Chaves para cada Fonte de Energia selecionada



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

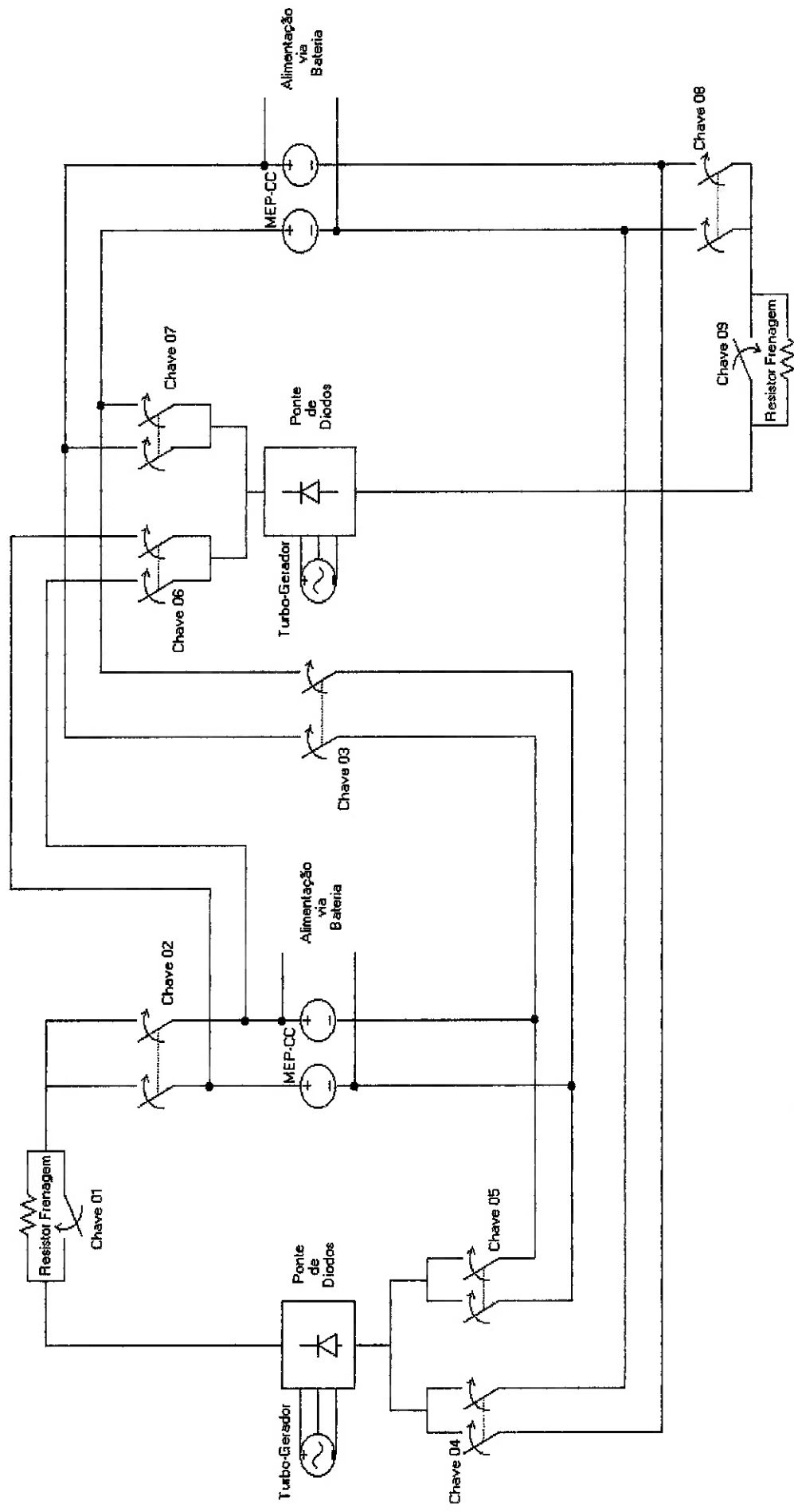


Figura 4.1: Circuito Principal do Sistema de Propulsão.

**SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE
UM SUBMARINO NUCLEAR****4.1.1 Operação na condição A**

Nesta condição de operação o motor é alimentado diretamente do barramento CC das baterias, através de um conversor estático CC-CC localizado no painel de comando e controle. As seguintes características são obedecidas nesta faixa de operação:

- Potência máxima do motor..... 78 KW
- Velocidade máxima do motor..... 36 rpm
- Rendimento máximo global do motor..... 86%
- Sistema de arrefecimento..... natural
- Tensão nominal de alimentação..... 260 VCC (+10%,-20%)
- Nível máximo de ruído elétrico..... 38Vpp (Ondulação de tensão) (pico a pico)

4.1.2 Operações nas condições B, C e D

Nestes modos de operação o motor é alimentado por um ou dois turbo-geradores (TGP-1 ou TGP-2) e a variação de velocidade é estabelecida fundamentalmente pela tensão de excitação do gerador. Outrossim, também o campo do motor é alimentado com corrente de excitação variável para otimizar o rendimento e/ou ajustar as partes de operação correspondentes.

Nestas formas de operação os geradores alimentam os enrolamentos de armadura do motor de propulsão (MEP-CC), obedecendo às seguintes características operacionais:

**SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE
UM SUBMARINO NUCLEAR**

CARACTERÍSTICA	CONDIÇÃO		
	B	C	D
Potência Máxima do Motor (KW)	315	1935	2782
Velocidade Máxima (rpm)	70	129	146
Rendimento Mínimo Global do Motor (%)	92	94	94
Sistema de Arrefecimento ar/água operando a:	Sem	50%	50%

4.1.3 Operação à potência máxima

Nesta condição, a planta elétrica de propulsão desenvolve máxima potência, quando então o motor está à máxima velocidade. As seguintes características operacionais serão obedecidas nesta forma de funcionamento:

CARACTERÍSTICAS	CONDIÇÃO DE POTÊNCIA MÁXIMA
Potência Máxima do Motor (KW)	7350
Velocidade Máxima (rpm)	200
Rendimento Mínimo Global (%)	95
Sistema de Arrefecimento ar/água operando a :	100%

4.2 CONDIÇÕES NORMAIS DE OPERAÇÃO DE FRENAGEM

A frenagem é do tipo dinâmica onde toda a energia é dissipada em resistores dimensionados para tal finalidade.

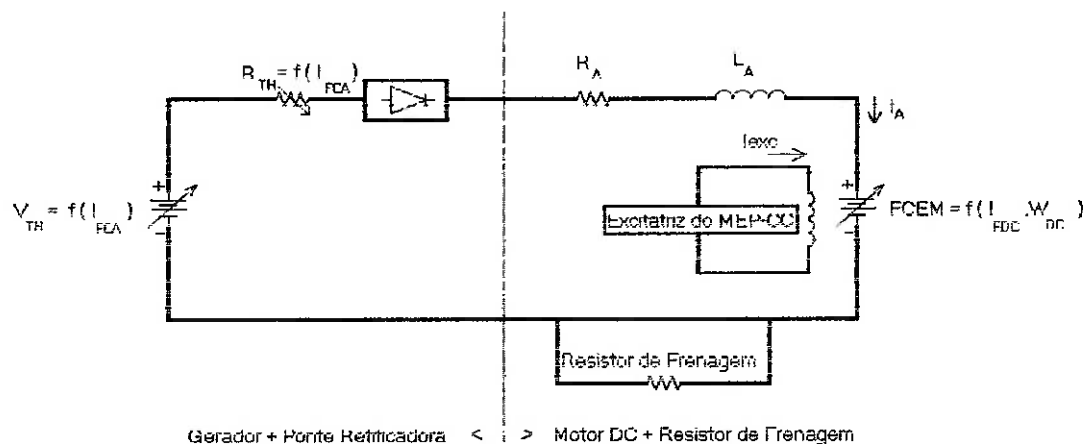


SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

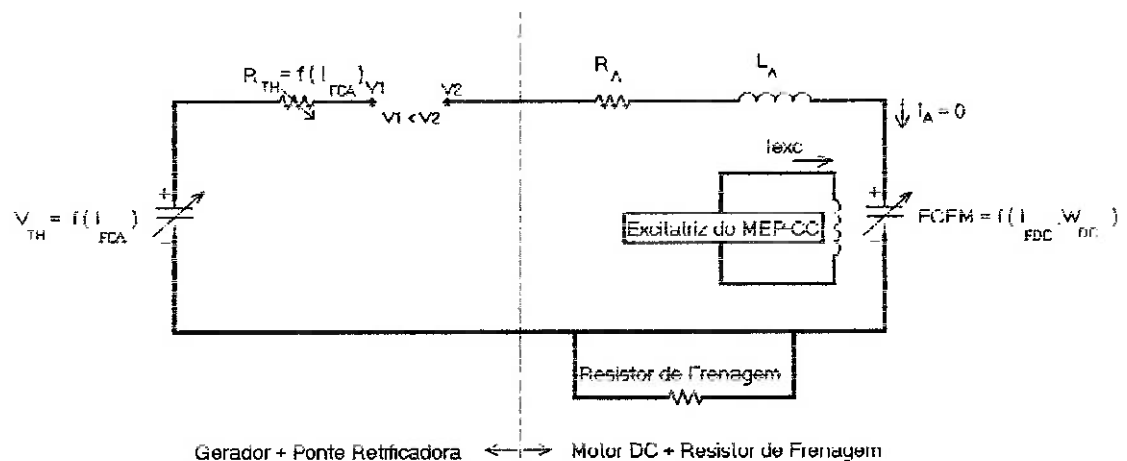
Para esta forma de operação, o motor está ligado aos resistores e o sistema de controle e variação de velocidade garantirá, na condição de até 9% da velocidade máxima, um torque de frenagem variável.

LÓGICA DE INVERSÃO DE VELOCIDADE

Existe uma sequência bem-definida para a operação de frenagem. A seguir é apresentado a sequência constituída da frenagem completa, com inversão no sentido de rotação.



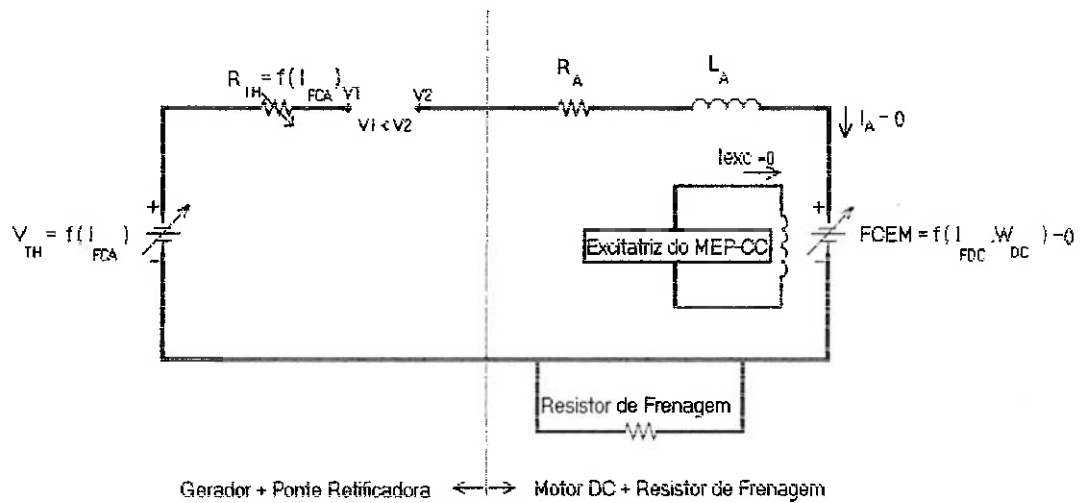
Situação 01 : Rotação no sentido horário.



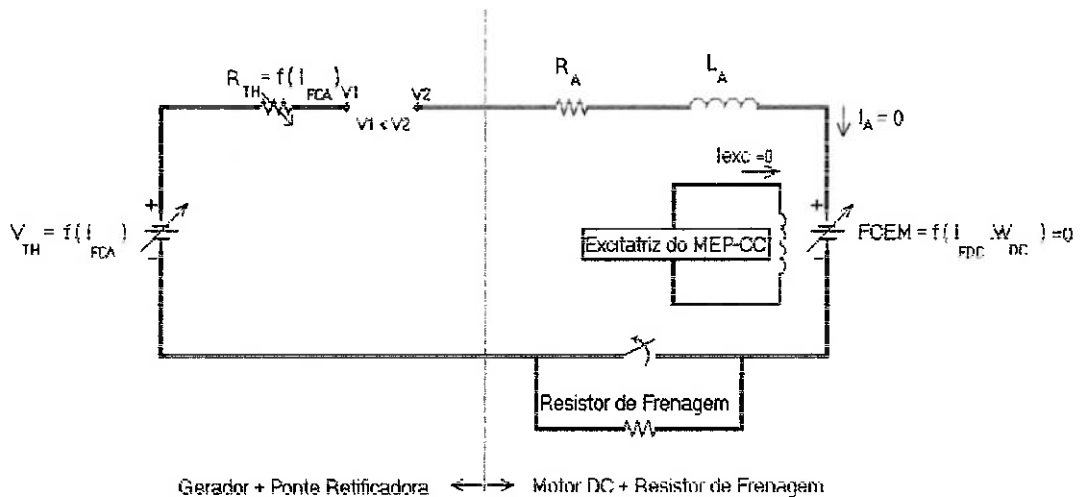
Situação 02: $I_A = 0$. Com isso $T = K_\phi I_A = 0$ (mas $K_\phi \neq 0$, $w \neq 0$).



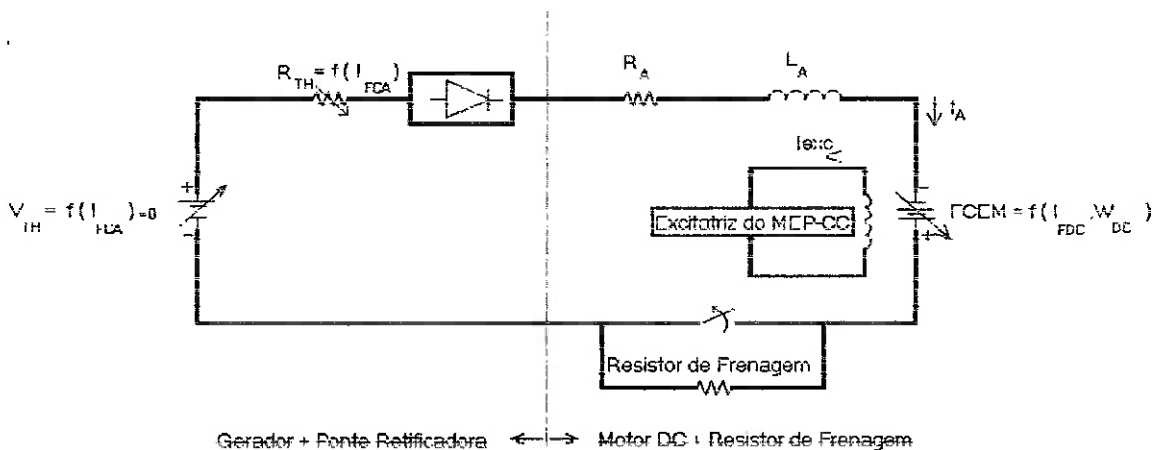
SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR



Situação 03: $I_{EXC} = 0$ ($K\phi = 0$). Com isso, $FCEM = K\phi w = 0$ (mas $w \neq 0$).



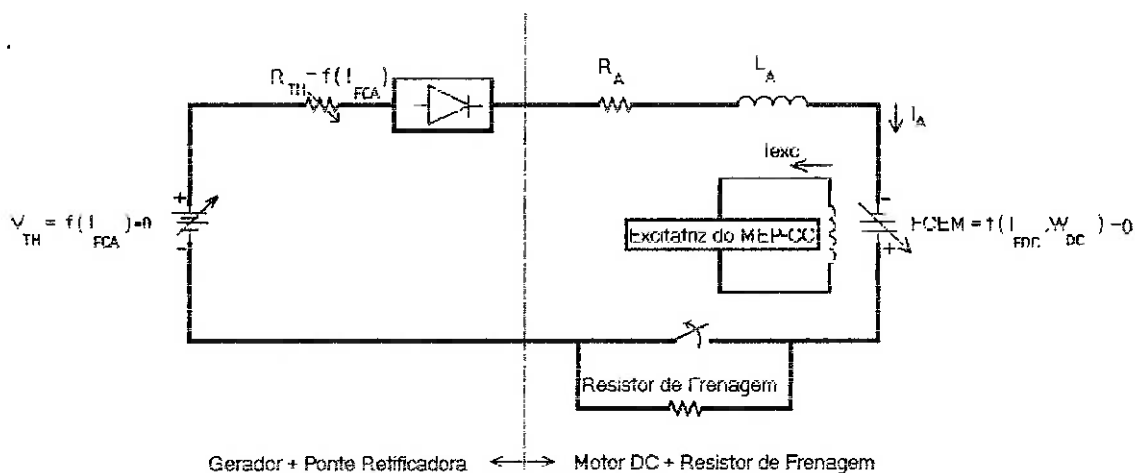
Situação 04: Inserir Resistor de Frenagem no circuito ($w \neq 0$).



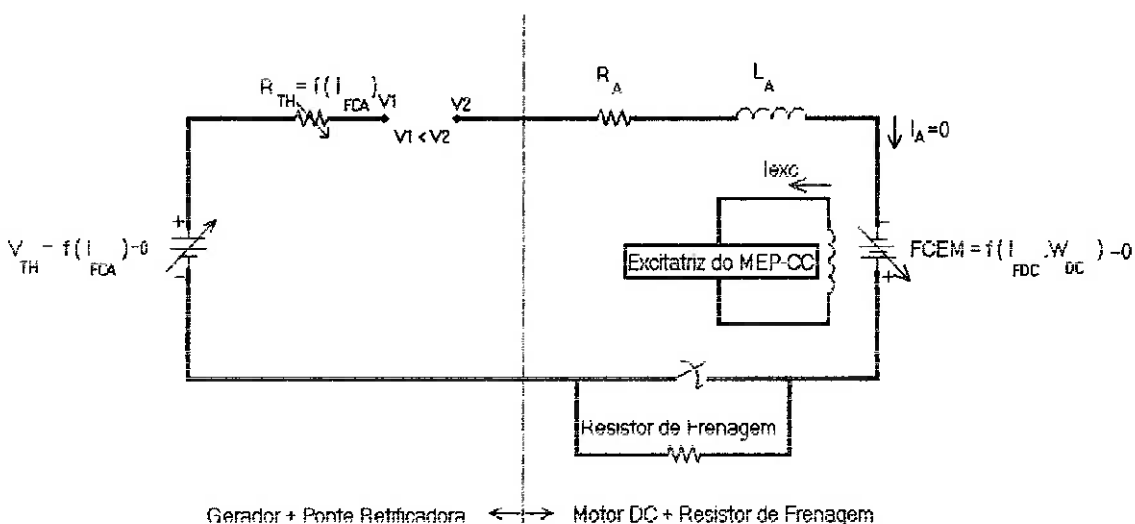
Situação 05: Aumentar I_{EXC} no sentido contrário (como $w \neq 0$ haverá $FCEM \neq 0$).



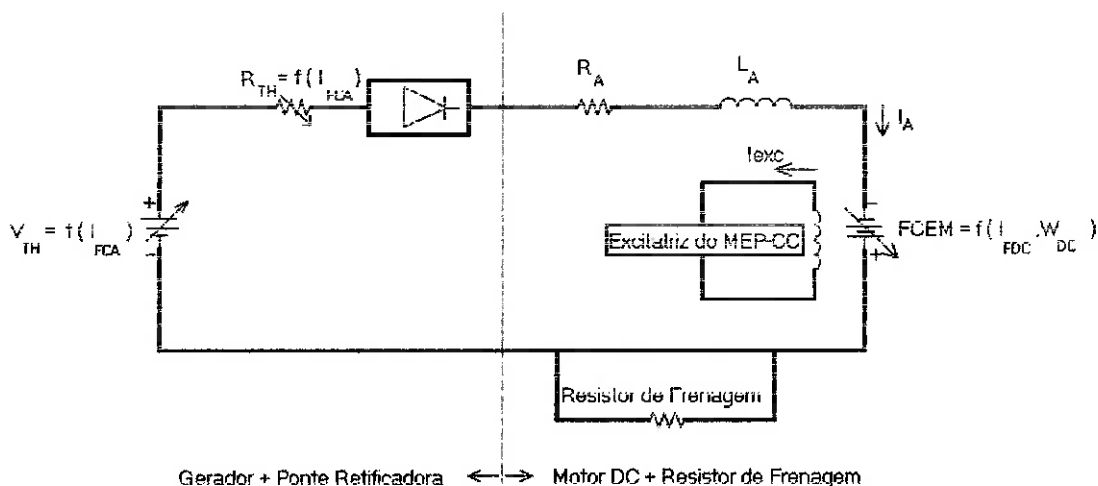
SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR



Situação 06: $w=0$. Com isso $FCEM = K_\phi w = 0$ (mas $K_\phi \neq 0$).



Situação 07 : Retirar Resistor de Frenagem do circuito ($w = 0$).



Situação 08 : Aumentar I_A , obtendo rotação no sentido anti-horário.



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

4.3 CONDIÇÕES NORMAIS DE OPERAÇÃO À RÉ

Concluída a operação de frenagem, a unidade de controle da propulsão, através do controle de lógica de inversão (LIV), dá informação ao sistema de variação de velocidade do motor para que o mesmo tenha condições de operar desde zero até 135 rpm em sentido contrário, desenvolvendo torque limitado a 50% do valor nominal . Estes valores dependem, exclusivamente, da característica do hélice, no sentido de marcha a ré.

4.4 CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO EM EMERGÊNCIA

4.4.1 Sistema em operação com um único gerador

A operação com um único gerador ocorre por ocasião da falha completa ou manutenção de um dos turbo-geradores de propulsão, podendo o sistema operar, nesta condição, normalmente até a potência de 2782 KW, com o motor a uma velocidade de até 146 rpm. Nesta forma de operação, os barramentos CC podem ser ou não interligados através do disjuntor de interligação e, assim, as quatro armaduras do motor são energizadas. A proteção e monitoração deste sistema não permite sobrecarga em nenhum dos equipamentos em operação.

4.4.2 Sistema em operação parcial do motor de propulsão

Quando da operação parcial do MEP-CC , as seguintes valores são adotados conforme a característica da operação :



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

(a) Dois circuitos de armadura de blocos rotóricos diferentes em operação:

- 2400KW / 135 rpm e 100% arrefecimento.

(b) Dois circuitos de armadura de bloco rotórico comum em operação:

- 1880KW / 125 rpm e 100% arrefecimento.

(c) Um circuito de armadura em operação:

- 800KW / 90 rpm e 100% arrefecimento.

4.4.3 Sistema em operação com falha nos dois turbo-geradores

Quando da falha dos dois turbo-geradores e por decisão do operador do sistema de controle (central), a planta propulsora é alimentada através de dois conversores CC-CC, conectados ao banco de baterias. Nesta forma de operação o canal de controle da UCP é comutado da posição "TGPs" para "BAT", mantendo todas as características operacionais da planta, sob consideração da potência dos conversores CC-CC.

5 CARACTERÍSTICAS DE CONTROLE

5.1 COMANDO E CONTROLE

5.1.1 Equipamentos

O Sistema Elétrico de Propulsão é constituído pelos equipamentos abaixo relacionados e cuja interação é mostrada na figura 5.1:



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

- Motor elétrico CC (MEP-CC) com quatro armaduras montadas em dois blocos rotóricos sobre um único eixo.
- Dois turbo-geradores que alimentam, através dos retificadores, barramentos CC independentes, de tensão continuamente variável.
- Dois sistemas de excitação estática, um para cada turbo-gerador.
- Dois retificadores de onda completa não controlados.
- Dois sistemas de excitação estática do MEP-CC para regulação da corrente de campo quando o motor opera à vante, à ré e na frenagem.
- Dois conversores CC-CC para alimentar a armadura, como opção de alimentação do MEP-CC.
- Uma unidade de controle da propulsão (UCP).
- Um painel de potência, onde são colocados os disjuntores, fusíveis e demais acessórios, necessários à proteção do circuito de potência de propulsão.
- Dois resistores de frenagem, para absorver toda energia gerada durante a frenagem do MEP-CC.
- Um painel de comando e controle onde são colocados as UCP's, medidores, aparelhos para operação local, compartimento de transdutores para transmissão de sinais para controle central, sistema de comando dos ventiladores e sistema de alimentação auxiliar. As duas UCP's são montadas no painel de modo independente e fisicamente separadas no sentido de garantir a necessária redundância física.
- Dois painéis separados fisicamente para a montagem dos conversores CC-CC de excitação do gerador.



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

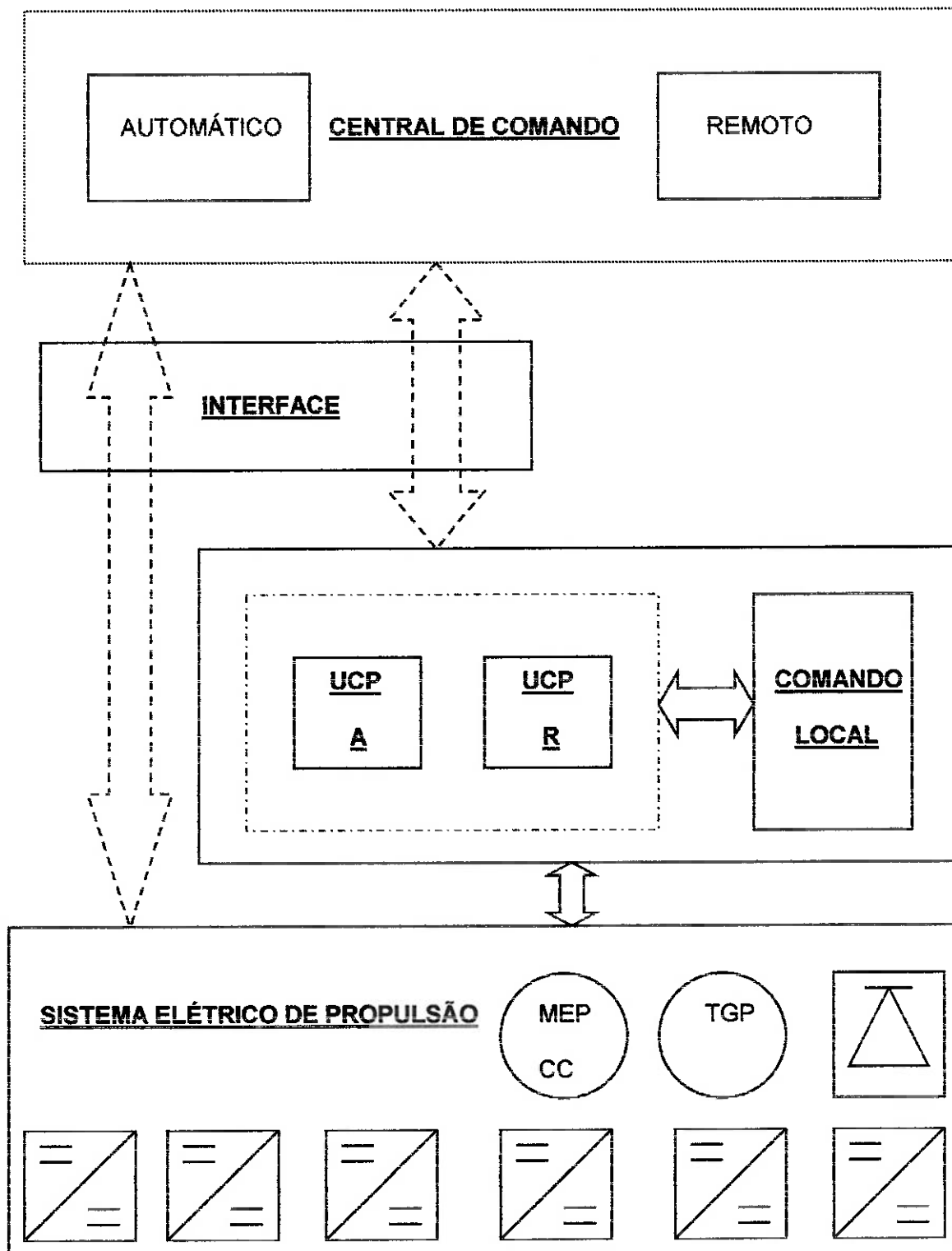


Figura 5.1 : Diagrama de blocos do sistema de controle de propulsão



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

5.1.2 UCP

A unidade de controle da propulsão visa, a partir dos sinais de referência de entrada estabelecidos pelo sistema de controle, controlar e observar toda a parte elétrica da planta de propulsão, tendo como variável básica de referência a velocidade de regime do eixo propulsor. São previstas formas de operação manual e automática.

Por outro lado, esta mesma unidade de controle supervisiona e monitora variáveis como: velocidade do eixo propulsor, potência disponível nos turbo-geradores, corrente máxima dos geradores, divisão de carga entre eles, temperatura de operação nos mancais, nos enrolamentos das máquinas elétricas, nos retificadores, nos conversores estáticos CC-CC, temperatura da água na entrada dos trocadores de calor, etc.

Também estabelece, através de informações geradas pelo sistema de controle, toda a lógica para operações, como segue:

- (a) condições normais de operação a vante, através de um turbo-gerador, dois turbo-geradores ou pelo banco de baterias;
- (b) condições normais de operação de frenagem com uso do resistor de frenagem;
- (c) condições normais de operação a ré através de um turbo-gerador, dois turbo-geradores ou do banco de baterias;
- (d) condições de operação em emergência, através da operação com apenas um turbo-gerador, com motor de propulsão nas condições impostas no item 4.4.1.

5.1.2.1 Variáveis a serem indicadas na UCP

- Corrente de excitação dos TGPs;
- Corrente de armadura do MEP-CC;



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

-
- Corrente de Excitação;
 - Tensão de barramentos CC; e
 - Tensão das amaduras.

5.1.3 Conjunto de Manobra de Propulsão (Pannel de Potência do MEP-CC)

Este conjunto tem com objetivo manobrar e proteger o circuito elétrico de potência. Para tal, permite as seguintes configurações de operação:

- (a) Motor de propulsão conectado aos barramentos independentes de corrente contínua correspondente a cada turbo-gerador.
- (b) Motor de propulsão conectado a um barramento de corrente contínua quando apenas um gerador de propulsão está em operação, alimentando as amaduras.
- (c) Motor de propulsão conectado ao barramento CC do banco de baterias, através do conversor estático CC-CC.
- (d) Resistores de frenagem acoplados aos terminais do motor, por ocasião da frenagem.

5.1.4 Sistema de Controle (Central)

Este sistema emite os sinais de referência de velocidade e comando para a UCP.

Ele também recebe os sinais necessários para garantir a integridade do sistema elétrico em qualquer condição de operação da planta propulsora.



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

5.1.5 Variáveis a serem controladas

- Rotação do motor.

Todas as demais variáveis a serem controladas no Sistema Elétrico de Propulsão são estabelecidas em função da rotação do motor, da sua forma de operação e da configuração elétrica do sistema.

5.2 MODO DE CONTROLE PARA OPERAÇÃO AVANTE

Um sinal de referência de velocidade (W_r), gerado a partir do controle central, atua na unidade de controle da propulsão que, por sua vez, atua nos sistemas de excitação estática dos geradores de propulsão, possibilitando aos mesmos a variação na tensão terminal, após os retificadores, numa faixa de zero a 1000 VCC. Acompanhando esta variação de tensão, o MEP-CC proporciona uma variação contínua de velocidade desde 11 até 200 rpm. Esta forma de variação de velocidade é o típico sistema Ward-Leonard.

Para o controle e proteção operacional da planta, as Excitatrizes Estáticas (EE-1 e EE-2) e a Unidade de Controle da UCP atuam da seguinte maneira: uma vez estabelecido o sinal de referência, oriundo do controle central, ele passa pelo gerador de rampa 1, dentro da UCP (figura 5.2) e, depois, é comparado com o sinal de realimentação de velocidade que é gerado pelo tacogerador acoplado ao eixo do motor de propulsão. O sinal de erro, assim gerado, é utilizado em duas partes básicas; a primeira para estabelecer o sinal de entrada do sistema de excitação dos geradores e, a segunda, para estabelecer, através do sistema de Lógica de Inversão de Velocidade (LIV), a informação da operação de frenagem, para indicar a inversão de



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

velocidade nos circuitos de alimentação de campo do MEP-CC e, também, para atuar nos disjuntores que interligam os resistores de frenagem à malha CC.

Na primeira parte o sinal passa pelo bloco controlador PI, cujo sinal de saída I é transmitido integralmente ao sistema de excitação estática de cada gerador, a menos que a respectiva máquina esteja: (a) - operando em frequência inferior a 100Hz, (b) - operando em condições de vapor abaixo do mínimo permitido ou (c) - operando eletricamente em potência superior aquela disponível na turbina. Aquela condição que impuser o valor mínimo de excitação dita o valor I_{E1} ou I_{E2} do sistema de excitação estática do gerador. Este sinal, após a comparação com o sinal de realimentação de corrente do estator do gerador, gera o sinal de erro para a excitatriz estática.

Finalmente, é prevista a divisão equitativa de carga dos geradores mesmo que eles, eletricamente, estejam isolados. Esta divisão é obtida comparando-se as correntes reais I_{A1} e I_{A2} de cada máquina e fazendo com que o sinal ΔI gerado atue em I_0 , gerando respectivamente I_1 e I_2 , de referência, para cada excitatriz.

Por outro lado, havendo falha parcial permanente num dos sistemas turbo-geradores, retificadores ou excitatrizes, causando uma limitação na potência máxima gerada, o sistema de supervisão equitativa de carga limita a potência total da planta ao valor da máxima potência disponível nos equipamentos sem defeitos.

5.3 MODO DE CONTROLE PARA OPERAÇÃO À RÉ

Concluída a operação de frenagem (item 4.2 – LIV), o acionamento volta a se desenvolver como descrito no item 5.2.

A única ressalta importante a salientar é que o motor, em sentido contrário, tem condições de operar desde zero até 135 rpm, desenvolvendo torque limitado a 50 % do valor nominal.

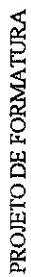


Figura 5.2 : Esquema Básico do Controle da Propulsão.



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

6 PARÂMETROS

Os parâmetros a serem utilizados serão (exceto o turbo-gerador) , a princípio, os mesmos usados no estudo realizado anteriormente [2], mencionado na Introdução desse relatório (página 4).

MOTOR DE PROPULSÃO (MEP - CC)

Os parâmetros do MEP-CC fazem parte de três conjuntos de equações, quais sejam:

- Equações Elétricas
- Equações de Conversão Eletromecânica de Energia
- Equações Mecânicas

Equações Elétricas

Para se estabelecer as equações elétricas do MEP-CC deve se ter em mente que a máquina possui dois blocos rotóricos e dois enrolamentos de campo, um para cada bloco rotórico. Associado a cada bloco tem-se ainda dois comutadores, ou seja, dois circuitos independentes, que podem ser ligados em série ou em paralelo. Internamente à máquina cada um destes circuitos é composto por um enrolamento de armadura, um enrolamento de interpolos e um enrolamento de compensação.

Desta forma, para cada bloco, são válidas as seguintes equações elétricas:



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

$$v_1(t) = r_1 * i_1(t) + \frac{d(L_1 * i_1(t))}{dt} + \frac{d(M * i_2(t))}{dt} + e(t) \quad (6.1)$$

$$v_2(t) = r_2 * i_2(t) + \frac{d(L_2 * i_2(t))}{dt} + \frac{d(M * i_1(t))}{dt} + e(t) \quad (6.2)$$

$$v_F(t) = r_F * i_F(t) + \frac{d(L_F * i_F(t))}{dt} \quad (6.3)$$

Onde:

- $v_1(t)$ e $v_2(t)$ são as tensões aplicadas aos circuitos 1 e 2;
- $i_1(t)$ e $i_2(t)$ são as correntes que circulam pelos circuitos 1 e 2;
- r_1 e r_2 são as resistências dos circuitos 1 e 2 respectivamente;
- L_1 e L_2 são as indutâncias próprias dos circuitos 1 e 2;
- r_F e L_F são, respectivamente, corrente e tensão de campo;
- $i_F(t)$ e $v_F(t)$ são, respectivamente, corrente e tensão de campo; e
- $e(t)$ é a tensão motriz induzida pelo enrolamento de campo no enrolamento de armadura.

É importante realçar que L_1 , por exemplo, não é a indutância somente de armadura do motor de corrente contínua, mas sim a indutância de um circuito série, composto por um enrolamento de armadura, um de compensação e um de interpolos.

Neste trabalho (como no trabalho anterior) será desprezado o efeito da variação de indutância com o tempo.

Os circuitos 1 e 2 serão considerados em paralelo:

$$v(t) = Req * i(t) + Leq * \frac{d i_2(t)}{dt} + e(t) \quad (6.4)$$

Onde:

$$Req = \frac{r_1}{2} = \frac{r_2}{2} \quad (6.5)$$

$$Leq = \frac{L_1 + L_2 - M^2}{L_1 + L_2 - 2 * M} \quad (6.6)$$



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

Essas equações foram calculadas para o bloco que contém os circuitos de armadura 1 e 2. Para o outro bloco (circuitos 3 e 4) as equações também são válidas.

Os quatro circuitos serão considerados ligados em paralelo.

Portanto, pode-se adotar a idéia de um motor de corrente contínua "equivalente", que agrupa estes diversos circuitos de armadura em um único circuito equivalente. Em outras palavras, serão considerados R_A e L_A como sendo, respectivamente, a resistência e a indutância equivalentes para a configuração em paralelo das armaduras do motor de corrente contínua.

Valores numéricos representativos do sistema real:

$$R_A = 7,5 \text{ m}\Omega$$

$$L_A = 0,5 \text{ mH}$$

Equações de Conversão Eletromecânica de Energia

$$e(t) = K * \varphi(t) * n(t) \quad (6.7)$$

$$C(t) = K * \varphi(t) * i(t) \quad (6.8)$$

Equação Mecânica

$$C_{TOTAL}(t) = C_A(t) + C_B(t) = C_{RES} + J * \frac{dw}{dt} \quad (6.9)$$

Onde:

- C_{TOTAL} é o conjugado eletromagnético desenvolvido total;
- C_A é o conjugado eletromagnético desenvolvido pelo bloco A; e
- C_B é o conjugado eletromagnético desenvolvido pelo bloco B.

O valor de J (Momento de Inércia do Motor) é $11470 \text{ Kg} * \text{m}^2$ (por bloco rotórico).



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

Para o cálculo das várias grandezas eletromagnéticas envolvidas na simulação do estudo anterior foi utilizado o Método dos Elementos Finitos.

Em função do estabelecimento de prioridades e da racionalização do tempo, não será possível refazer estes cálculos e serão adotados os resultados anteriores.

Todas essas grandezas foram calculadas através do software FEMAG como sendo dependentes da corrente de armadura e da corrente de campo. Essas grandezas são: as indutâncias próprias do circuitos 1 e 2, a indutância própria do circuito de campo, a mútua entre o circuito 1 e 2 e o fluxo por polo. O detalhamento do cálculo das indutâncias acima citadas encontra-se no Documento Técnico DET.01.RT.03, Relatório Final do Mapeamento de Campo Eletromagnético. Já no apêndice 8.1 encontram-se os gráficos das quatro primeiras grandezas.

Todos os valores calculados pelo Método dos Elementos Finitos foram feitos a partir das curvas B-H adotadas no Documento Técnico DET.01.RT.03.

Foram analisadas diversas condições de funcionamento do MEP-CC, ou seja, calculou-se L_1 , L_2 , M , L_f e φ para os valores de corrente de campo de 70 % a 100 % da nominal e corrente de armadura de 20 % a 150 % da nominal.

Deste modo pode-se realizar a simulação do MEP-CC levando em conta a variação destas grandezas.

Todas as indutâncias que são mostradas no anexo 7.1 são apresentadas na forma de três gráficos, quais sejam:

- um gráfico que mostra a variação da indutância em função da corrente de campo e armadura (3D);
- um gráfico que mostra para um valor fixo de campo a dependência da indutância com a corrente de armadura;
- um gráfico que mostra para um valor fixo de campo a dependência do logaritmo da indutância com a corrente de armadura.

**SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE
UM SUBMARINO NUCLEAR****TURBO-GERADORES DE PROPULSÃO (TGP's)**

Neste item desejou-se encontrar uma máquina síncrona com as mesmas características dos TGP's do projeto mas, infelizmente, não foi possível devido as características especiais requeridas pelos turbo-geradores.

A máquina síncrona encontrada é da Siemens e tem as seguintes características:

Tipo:..... Síncrono, com polos salientes

Potência :..... 3700 KVA

Número de polos :..... 4 polos

Número de fases:..... 3

Velocidade:..... 1800 rpm a 60 Hz

Apesar disso, será apresentado os valores dos parâmetros encontrados, pois serão tratados como uma primeira aproximação:

X_d 3,1 pu

X_q 2,8 pu

X_d' 0,34 pu

X_q' 0,25 pu

X_q'' 0,256 pu

X_2 0,252 pu

r_1 0,013 pu

T_d 0,061 s

T_d' 0,268 s

T_d'' 0,022 s



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

RETIFICADORES DOS TURBO-GERADORES DE PROPULSÃO

Os diodos serão considerados “chaves ideais”.

SISTEMA DE EXCITAÇÃO ESTÁTICA DOS TURBO-GERADORES DE PROPULSÃO

Bateria

Tensão: 350 V

Resistência: 0,012 Ω

Filtro

Indutância: 15 μ H

Capacitância: 36 mF

Excitatriz

Indutância: 670 mH

Resistência: 0,392 Ω

RESISTOR DE FRENAGEM DO EIXO PROPULSOR

Potência dissipada..... : 2300 KW

Tensão..... : 1000 VCC



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

CONVERSOR ESTÁTICO DE POTÊNCIA DE EXCITAÇÃO DO MEP - CC

Bateria

Tensão: 350 V

Resistência: 0,012 Ω

Filtro

Indutância: 0 (não calculado no estudo anterior)

Capacitância: 0 (não calculado no estudo anterior)

Campo

Indutância: 8,7 H

Resistência: 3,6 Ω

CONVERSOR ESTÁTICO DE ARMADURA DO MEP - CC

O conversor de alimentação dos enrolamentos das 'armaduras' do motor, através de baterias, utiliza uma configuração com três transistores, três diodos e um enrolamento com 'tap' central. O presente trabalho não apresenta o estudo do MEP-CC alimentado pelas baterias e, por isso, não há necessidade dos parâmetros do conversor, até mesmo porque não foi encontrado tais valores nas publicações de referência.



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

7 FERRAMENTA COMPUTACIONAL

Ao iniciar o projeto existiam três ferramentas computacionais que poderiam ser utilizadas nas simulações deste projeto: MATLAB, PSCAD/EMTDC e EMTP/ATP.

O software escolhido foi o MATLAB. As características determinantes para esta escolha foram:

- Maior familiaridade dos orientadores e também minha com este software;
- Existência de uma toolbox do simulink (POWER SYSTEM) contendo grande parte dos componentes que se deseja simular.

O EMTP/ATP [5] é um simulador digital com aplicações em estudos que envolvam a análise de condições de operação em regimes permanente e transitório da rede elétrica. Apesar de possuir um módulo denominado "UM Module – Universal Machine Module", com modelos de máquinas síncronas (trifásico) e Máquinas de Corrente Contínua (DC- Direct Current) existem uma série de restrições à sua simulação.

Basicamente o UM Module foi adicionado ao software EMTP/ATP para lidar com a interação dinâmica entre máquinas e a rede elétrica. Não é um módulo originalmente idealizado para simular as máquinas isoladamente. Consequentemente, o algoritmo existente não trata diretamente as seguintes situações:

- desequilíbrio assimétrico de enrolamentos polifásicos;
- distribuição assimétrica de enrolamentos polifásicos
- fluxo de dispersão;
- distribuição não senoidal de fluxo no entreferro;
- reação da armadura e efeitos de interpolos em máquinas CC;
- Elementos do circuito dependentes da frequência; e
- Parâmetros variando no tempo.



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

Há a possibilidade de se fazer aproximações transferindo alguns efeitos das máquinas para os circuitos conectado aos seus terminais.

O PSCAD/EMTDC [5] é um software canadense com características semelhantes ao ATP pois também é utilizado para simulações envolvendo a rede elétrica. Foi observado que ele é pouco difundido no Departamento de Energia e Automação Elétricas. Talvez seja por isso que ele tenha sido o primeiro a ser deixado de lado, preferindo-se os outros dois e tendendo-se ao MATLAB.

8 EQUACIONAMENTO

MOTOR DE PROPULSÃO (MEP - CC)

As equações do MEP-CC já foram citadas anteriormente mas vale a pena ressaltar que elas fazem parte de três conjuntos:

- Equações Elétricas
- Equações de Conversão Eletromecânica de Energia
- Equações Mecânicas

A partir destas equações é possível chegar ao modelo do Motor de propulsão (MEP-CC) do submarino.

As equações apresentadas a seguir são resultantes da manipulação das equações do capítulo 6.



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

Equações Elétricas

Considerando os quatro circuitos em paralelo e com todos os parâmetros iguais:

$$\bullet \quad V_A(t) = R_A * I_A(t) + L_A * \frac{d I_A(t)}{dt} + e(t) \quad (8.1)$$

Onde:

$$R_A = \frac{r_1}{2} = \frac{r_2}{2} = \frac{r_3}{2} = \frac{r_4}{2} \quad (8.2)$$

$$Leq = \frac{L_1 + L_2 - M^2}{L_1 + L_2 - 2 * M} \quad (\text{para os circuitos 1 e 2}) \quad (8.3)$$

$$\text{Portanto, } L_A = 2 \text{ Leq. Como } L_1 = L_2 = L, \text{ teremos: } L_A = 2 * \frac{L^2 - M^2}{2 * L - 2 * M} = L + M \quad (8.4)$$

$$\bullet \quad v_F(t) = r_F * i_F(t) + \frac{d(L_F * i_F(t))}{dt} \quad (8.5)$$

Equações de Conversão Eletromecânica de Energia

$$\bullet \quad F(t) = K * \varphi * n(t) = K_F * n(t) \quad (8.6)$$

$$\bullet \quad C_{TOTAL}(t) = K * \varphi * i(t) = K_T * I_A(t) \quad (8.7)$$

Cálculo de K_F e K_T

Analisando o gráfico (3D) **Indutância de Campo X Corrente de Campo X Corrente de Armadura** do anexo 8.1e considerando :

- a indutância não sendo dependente da Corrente de Armadura; e
- a variação da Indutância do Campo do MEP-CC linear em relação à Corrente de Campo, segundo a seguinte curva:



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

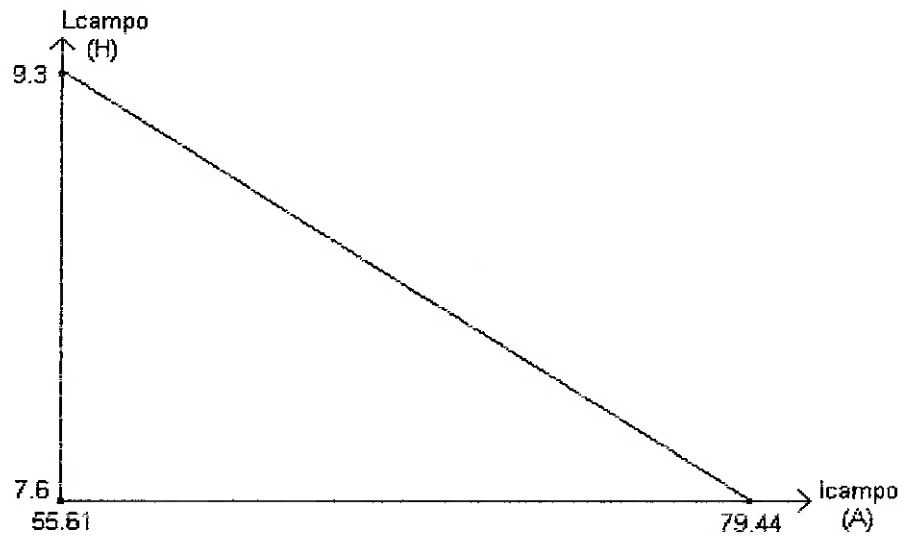


Figura 8.1 : Indutância de Campo X Corrente de Campo

A equação dessa curva é:

$$L = \frac{[316.156 - 1.7 * I]}{23.83} \quad (8.8)$$

Multiplicando por I teremos:

$$L.I = \frac{[316.156 * I - 1.7 * I^2]}{23.83} \quad (8.9)$$

- Equação do fluxo em função da Indutância e da Corrente que passa por ela:

$$L = \frac{N\phi}{I} \quad (8.10)$$

- Equação de KE e KT:

$$KE = KT = \frac{Z_A * p * \phi}{2a * \pi} \quad (8.11)$$

Onde: Z_A = nº condutores da armadura
 $2a$ = nº derivações

Partindo-se das seguintes considerações:

**SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR**

- a potência nominal do motor DC é $P_N = 7350 \text{ KW}$
- a rotação nominal do motor DC é $w_N = 200 \text{ RPM} = 20,94 \text{ rad/s}$

Calcula-se o conjugado nominal do motor DC (4 armaduras):

$$T_N = \frac{P_N}{\omega_N} = \frac{7350 \text{ KW}}{20,94 \text{ rad/s}} = 351.003 \text{ KN.m} \quad (8.12)$$

Está sendo considerado a operação de 4 armaduras. Cada grupo de 2 armaduras é alimentado independentemente por um dos geradores síncronos, sendo que a corrente nominal de cada grupo de armaduras é $I_N = 3700$. A corrente nominal considerando as quatro armaduras ligadas em paralelo será $I_N = 7660 \text{ A}$.

Portanto, sabendo-se que $KE_n = KT_n = T_n / I_n$ e admitindo os valores acima chega-se a :

$$KE_N = KT_N = \frac{351003}{7660} = 45.823 \quad (8.13)$$

Considerando o valor de LI para corrente nominal (72.22 A) e substituindo ϕ por LI/N, teremos:

$$\frac{Z_A * p}{2a * \pi * N} = 0.078186906 \text{ (cte)} \quad (8.14)$$

Portanto:

$$KE = KT = 0.078186906 * LI \quad (8.15)$$

Ou seja:

$$KE = KT = 1.0373168046 * I_{CAMPO} - 0.0055777482 \text{ 25} * I_{CAMPO}^2 \quad (8.16)$$

Equação Mecânica

$$\bullet \quad C_{TOTAL}(t) = C_{RES} + J * \frac{dw}{dt} \quad (8.17)$$

**SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR**

Onde C_{res} é o conjugado resistente da carga e a sua curva $f(\omega)$ pode ser obtida a partir da equação da potência necessária em cada velocidade, mostrada no item 4.1 e repetida a seguir:

$$P[KW] = 4 \times \left[25 \left(\frac{n}{100} \right) + 225 \left(\frac{n}{100} \right)^3 \right] \quad n \text{ em } [RPM] \quad (8.18)$$

Para modificar a unidade de velocidade de rpm para rd/s usa-se:

$$n[RPM] = \frac{30}{\pi} \omega[rd/s] \quad (8.19)$$

Resultando:

$$P(\omega)[W] = 4000 \times \left[25 \left(\frac{30\omega}{100\pi} \right) + 225 \left(\frac{30\omega}{100\pi} \right)^3 \right] \quad \omega \text{ em } [rd/s] \quad (8.20)$$

Dividindo a equação anterior por ω obtém-se a função do conjugado resistente da carga $f(\omega)$:

$$f(\omega)[N.m] = 4000 \times \left[25 \left(\frac{30}{100\pi} \right) + 225 \omega^2 \left(\frac{30}{100\pi} \right)^3 \right] = 9549.3 + 783.7 \omega^2 \quad (8.21)$$

Portanto, podemos escrever a seguinte equação(em Laplace):

$$C_{TOTAL}(s) = C_{RES} + J * s * w \quad (8.22)$$

$$w = \frac{[KT * I_A - f(\omega)]}{J * s} \quad (8.23)$$

Utilizando o Matlab/Simulink [4] [6] como ferramenta computacional foi possível representar o MEP-CC como mostrado a seguir:



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

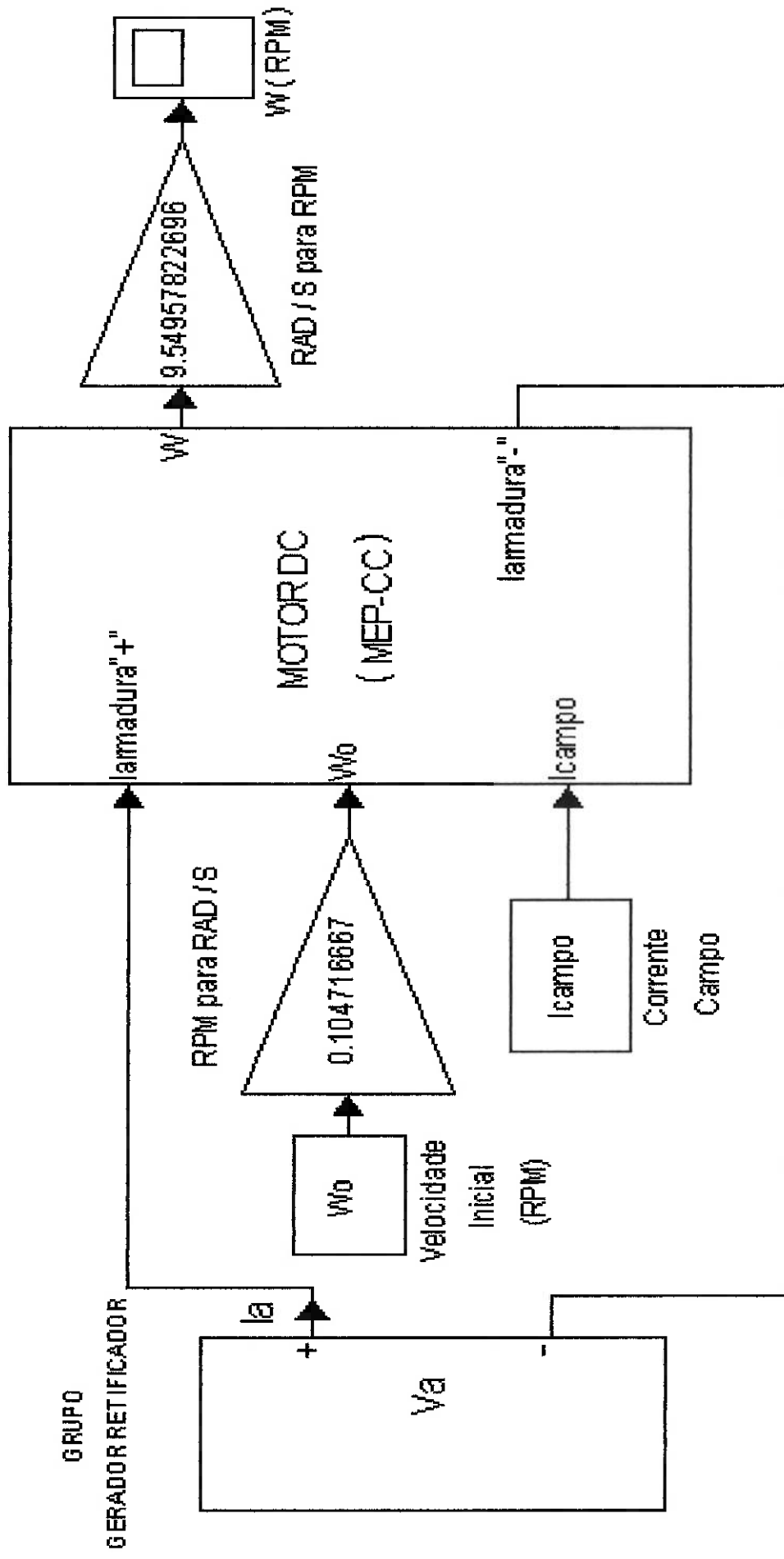


Figura 8.2 : Esquema do Motor Elétrico de Propulsão (MEP-CC) do Submarino Nuclear.



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

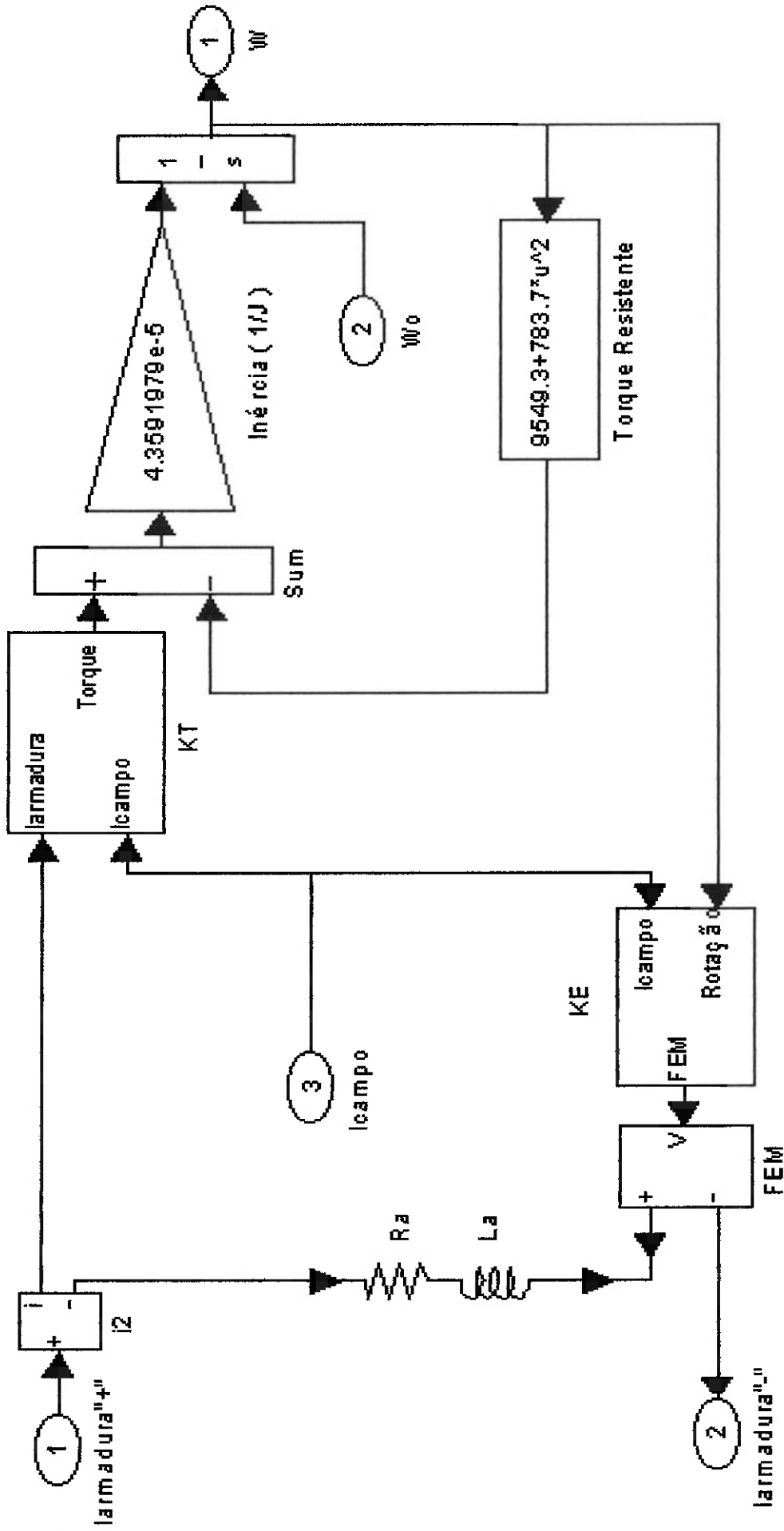


Figura 8.3 : Esquema do Interior do bloco MEP-CC do Submarino Nuclear.



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

SISTEMA GERADOR-RETIFICADOR

No estudo realizado anteriormente [2] o conjunto gerador-retificador-motor DC foi considerado como um único sistema. Verificou-se naquele estudo que não é possível separar estes sistemas individualmente. Esse raciocínio será considerado também neste projeto.

Cada turbo-gerador (6 fases) foi considerado como sendo dois trifásicos (A e B) alimentando o motor DC através da ponte retificadora não-controlada (olhar figura 8.4). Nesta análise:

- Foi adotado a idéia de um motor de corrente contínua "equivalente" (R_A e L_A sendo, respectivamente, a resistência e a indutância equivalentes para uma dada configuração das armaduras dos motores de corrente contínua).
- Inicialmente foi desprezado a existência de reação da armadura.
- Os diodos foram considerados chaves ideais.

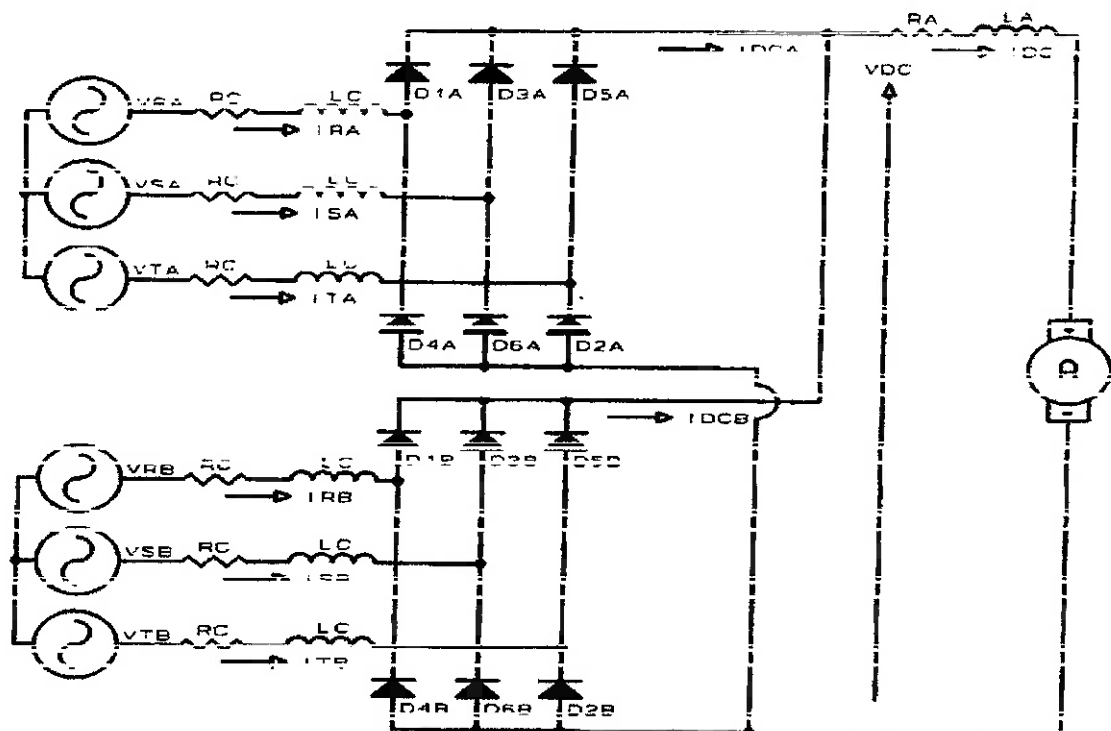


Figura 8.4: Diagrama esquemático do sistema gerador-retificador-motor DC



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

Pode-se dividir a análise em quatro situações:

1) Análise rudimentar do funcionamento do sistema gerador-retificador-motor DC

Esta análise foi feita considerando-se a indutância de comutação L_c nula e infinitamente grande a indutância de armadura L_A . Existem 12 configurações possíveis, sendo a passagem entre cada uma instantânea e o sistema permanece 30° elétricos em cada uma destas configurações.

A sequência de configurações que seria observada seria: MODO 12A00B (conduzem os diodos 1 e 2 do trifásico A e nenhum diodo do trifásico B), seguindo-se os modos MODO 00A12B, MODO 23A00B, MODO 00A23B, MODO 34A00B, MODO 00A34B, MODO 45A00B, MODO 00A45B, MODO 56A00B, MODO 00A56B, MODO 61A00B, MODO 00A61B, recomeçando a sequência a seguir.

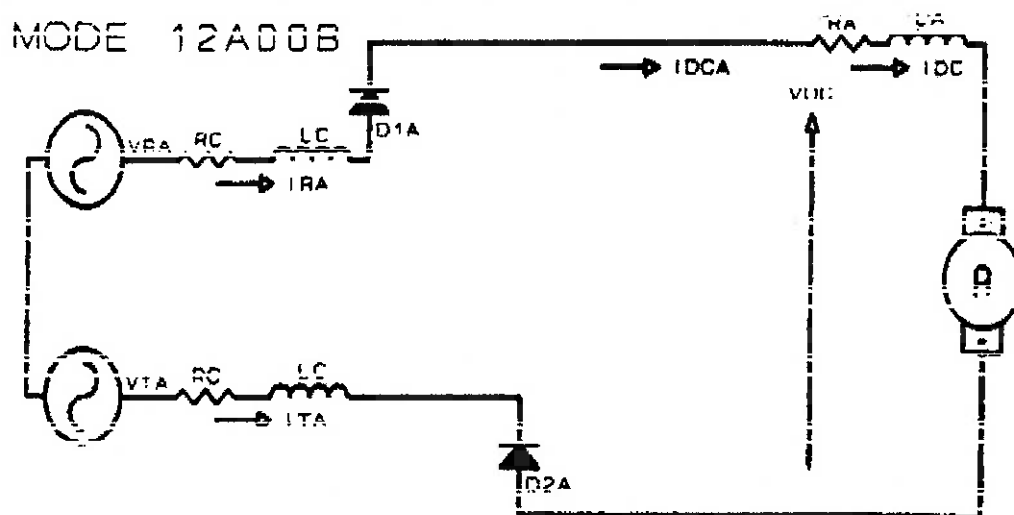


Figura 8.5 : Representação do modo de operação básico.



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

2) Funcionamento do sistema incluindo as comutações entre trifásicos

Esta análise partiu do princípio que existe impossibilidade física de que o processo de comutação entre os trifásicos A e B ocorra instantaneamente. Ou seja, existem alguns intervalos nos quais os dois trifásicos conduzem simultaneamente. Durante estes intervalos a corrente diminui em um dos trifásicos e aumenta no outro, até anular a corrente no primeiro trifásico e que o segundo assuma a corrente total que circula pelo motor DC.

Existem 12 configurações possíveis deste processo de comutação pois esta alternância entre trifásicos ocorre 12 vezes por ciclo.

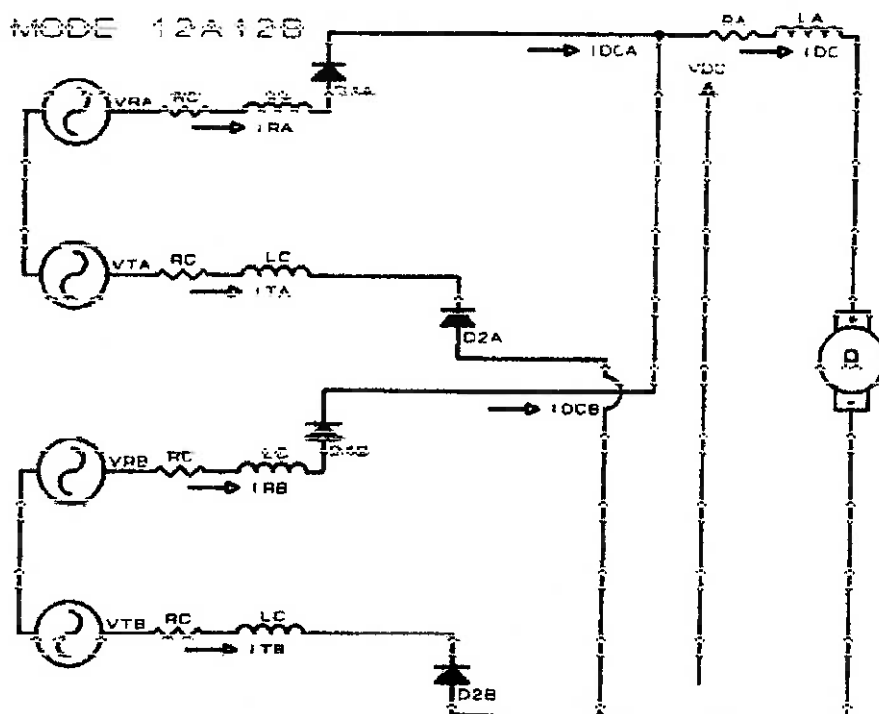


Figura 8.6: Representação simplificada da comutação entre trifásicos.



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

3) Funcionamento do sistema incluindo as comutações internas aos trifásicos

Não há nenhuma garantia de que o processo de comutação entre os trifásicos se complete em menos de 30° elétricos. Isto dependerá essencialmente do valor de L_c , do nível de corrente a ser comutado e das tensões internas do gerador. Pode ocorrer que o processo de comutação entre os trifásicos A e B não chegue a se completar plenamente. Ou seja, a corrente não chega a se anular em nenhum dos trifásicos. Sendo assim, em cada instante os dois trifásicos conduzem simultaneamente (com correntes distintas). Entretanto, dentro de cada trifásico existe uma alternância entre as fases (e diodos) que conduzem. Existem 12 configurações possíveis de comutação interno aos trifásicos.

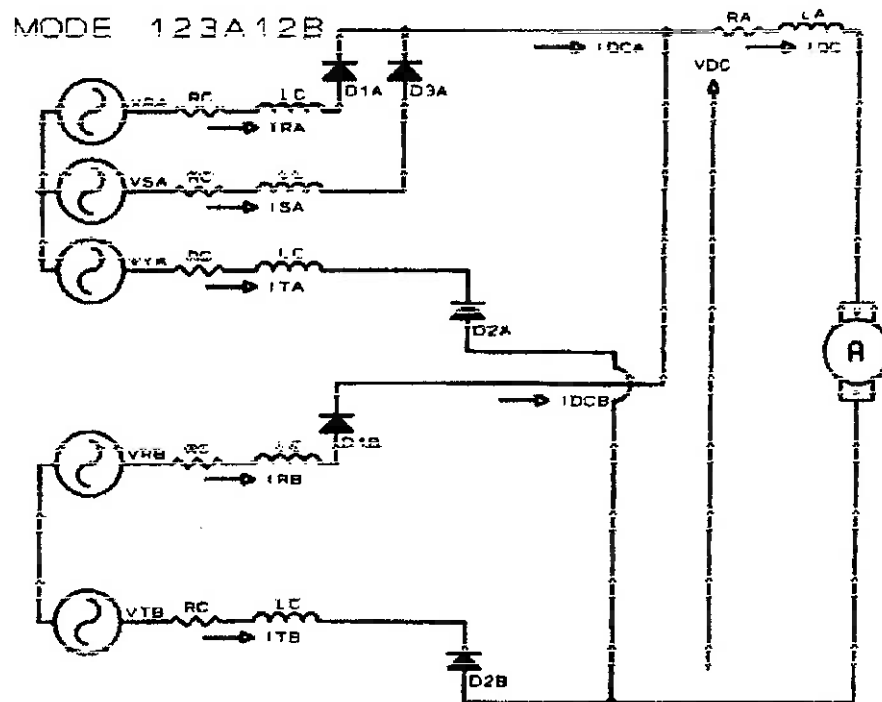


Figura 8.7 : Representação do modo de comutação interno ao trifásico.



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

4) Funcionamento do sistema incluindo a sobreposição das comutações internas aos trifásicos

Não há nenhuma garantia de que o processo de comutação interna a cada um dos trifásicos se complete em menos do que 30° elétricos. Isto dependerá essencialmente do valor de L_c , do nível de corrente a ser comutado e das tensões internas do gerador. Pode ocorrer que o processo interno de comutação do trifásico A e B se sobreponha, ao menos parcialmente. Ou seja, antes que o trifásico A termine a sua comutação terá início a comutação interna do trifásico B. Neste caso existirá a condução simultânea de 6 diodos, sendo 3 em cada um dos trifásicos.

Existem 12 configurações representativas da sobreposição do processo de comutação interno aos trifásicos.

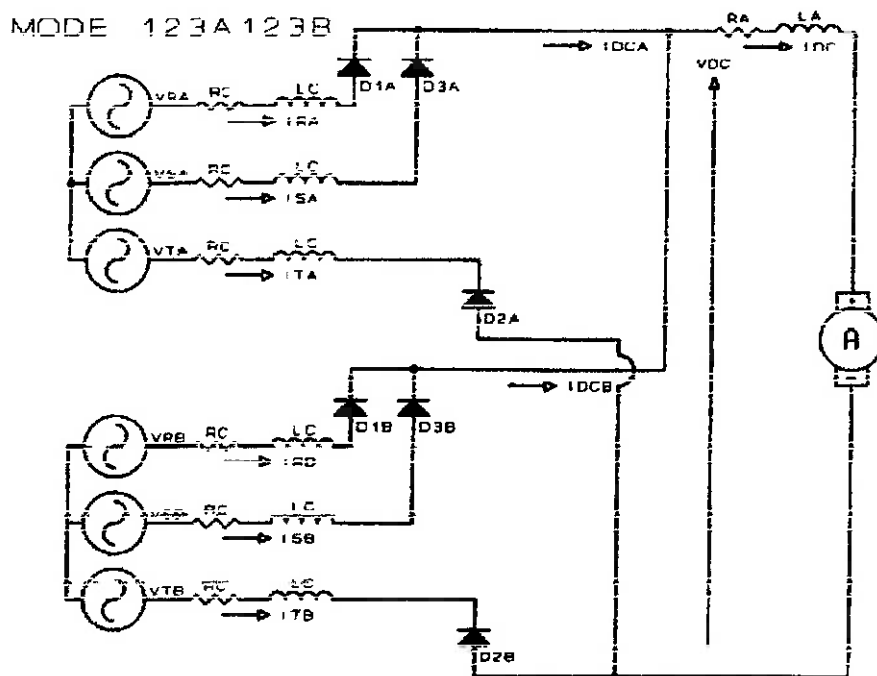


Figura 8.8 : Representação do modo de comutação interno ao trifásico.



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

Equacionamento simplificado do sistema combinado gerador + retificador

A partir da determinação da sequência geral de configurações foi possível realizar o equacionamento e simulação para cada tipo de funcionamento. Com os resultados pôde-se traçar a curva de regulação do retificador, em função da tensão interna do gerador. A curva de saturação do gerador (Siemens) foi graficamente representada através de uma interpolação polinomial utilizando o MATLAB. A curva de regulação do sistema combinado gerador + retificador resultou da combinação da curva de regulação do gerador com a curva de regulação do retificador.

A partir dos gráficos resultantes e manipulação das fórmulas encontradas chegou-se ao modelo simplificado mostrado na figura 8.9. Trata-se de um equivalente Thévenin, no qual tanto a tensão como a impedância são funções unicamente da corrente de campo. No caso da tensão, temos uma função não-linear, obtida a partir da curva de saturação do gerador em vazio, resultando:

$$V_{TH} [V] = \frac{2.4216 \times 750}{\sqrt{3}} [0.0635 I_F^3 - 0.5172 I_F^2 + 1.4329 I_F] \text{ onde } i_F [PU] = \frac{I_F [A]}{84.8 [A]} \quad (8.24)$$

Simplificando os cálculos obtém-se:

$$V_{TH} [V] = 1.0919 \times 10^{-4} I_F^3 - 0.0754 I_F^2 + 17.7183 I_F \quad \text{onde } I_F \text{ e' dado em } [A] \quad (8.25)$$

A impedância equivalente foi obtida através de uma interpolação linear em cada uma das curvas do gráfico da Regulação do sistema gerador-retificador. O coeficiente angular de cada reta (obtida através do método dos mínimos quadrados) foi calculado. Tais coeficientes demonstram que é possível considerar que a impedância equivalente seja dada por uma função linear da corrente de campo.

A expressão obtida para Z_{TH} é:

$$Z_{TH} [\Omega] = 1.2212 \times 10^{-3} I_F - 0.2775 \quad \text{onde } I_F \text{ e' dado em } [A] \quad (8.26)$$

Trata-se de um equivalente Thevenin, no qual a tensão como a impedância são funções unicamente da corrente de campo.



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

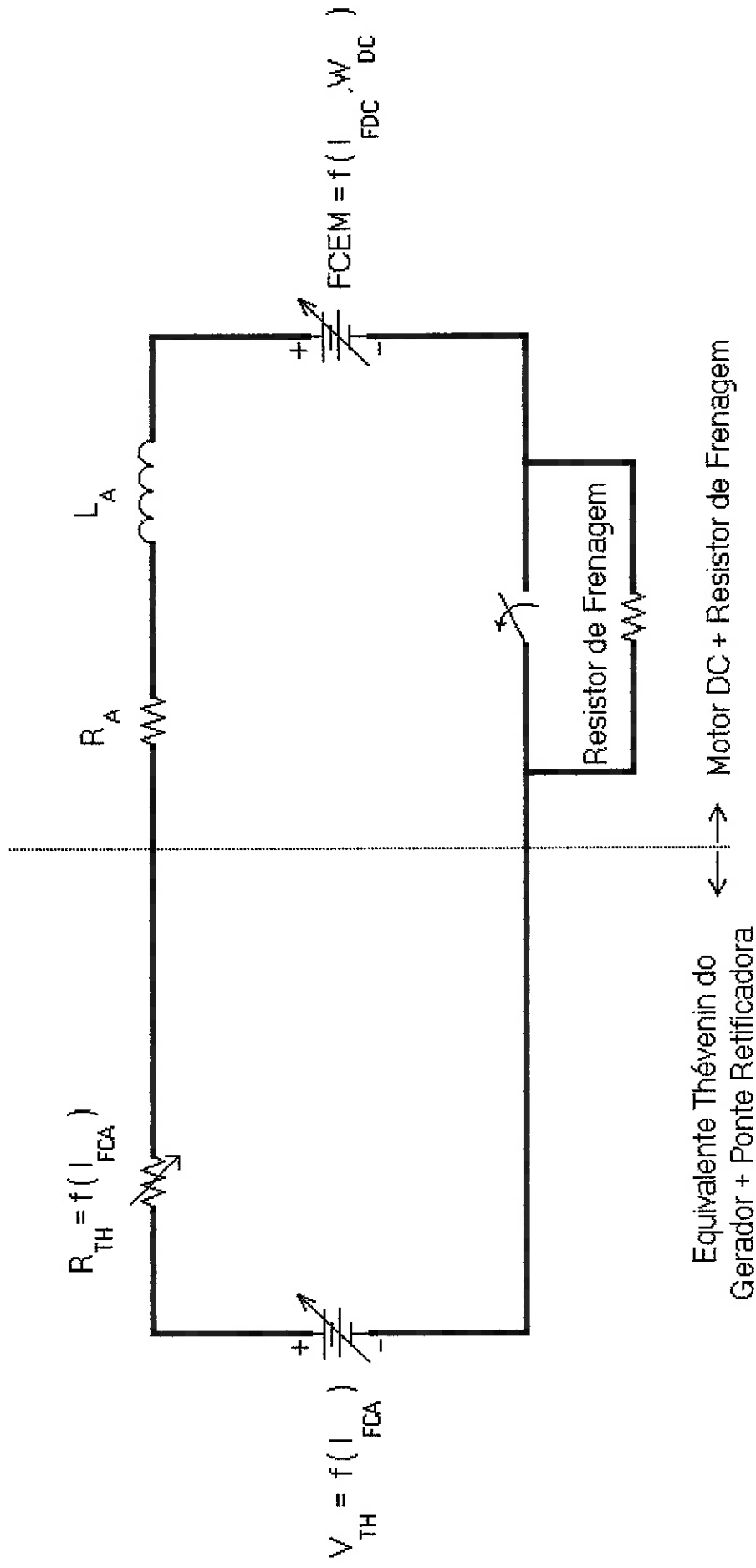


Figura 8.9 : Diagrama Ilustrativo do Sistema Gerador Síncrono , Ponte Retificadora e Motor DC.



GRUPO GERADOR RETIFICADOR





**SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE
UM SUBMARINO NUCLEAR**

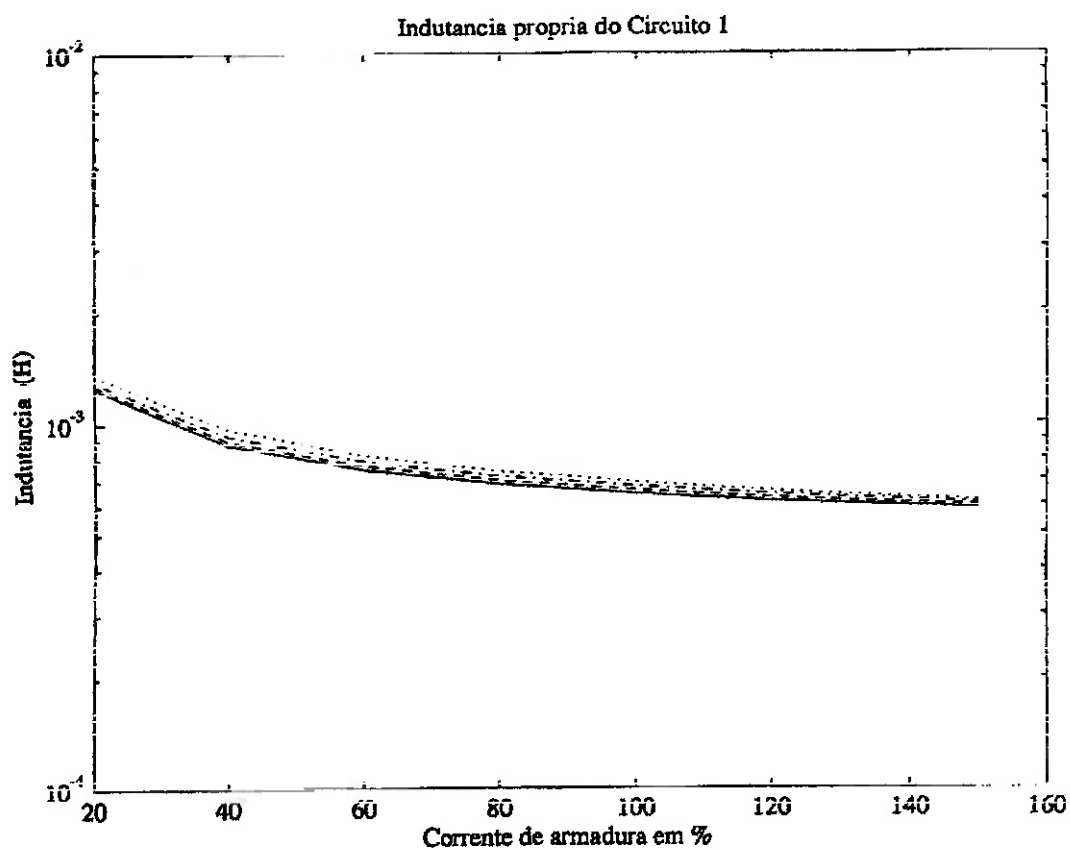
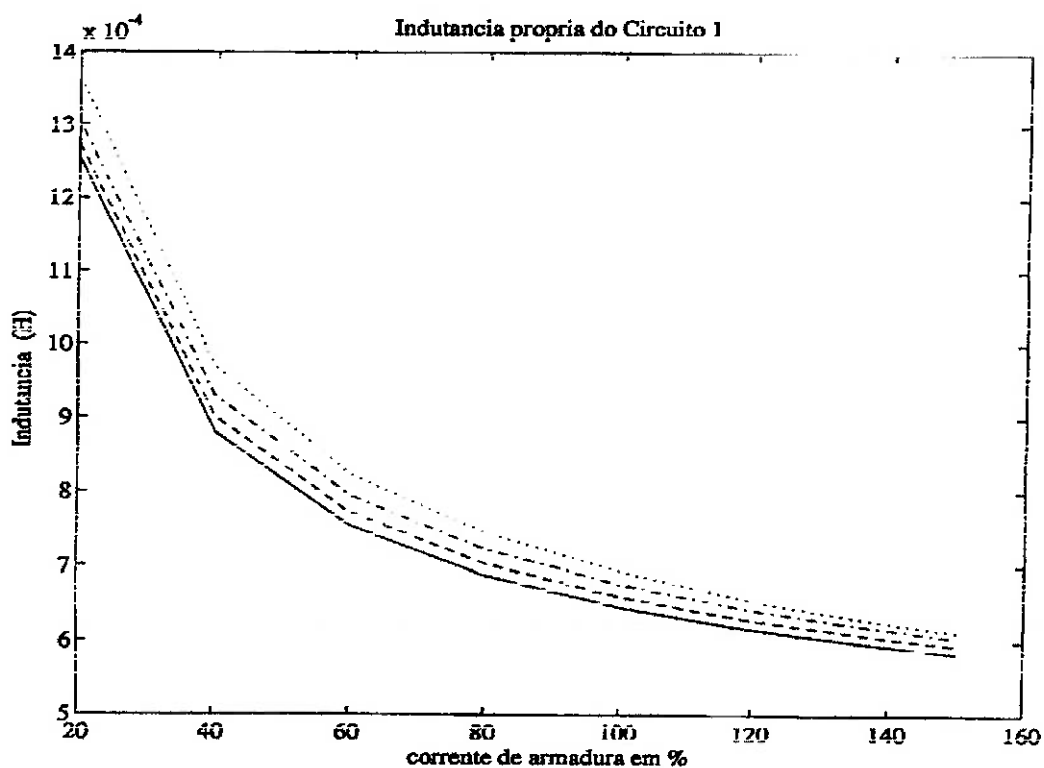
APÊNDICE 8.1

CONVENÇÃO:

Corrente de Campo em %	Tipo de Linha
70	
80	-----
90	-----
100	_____

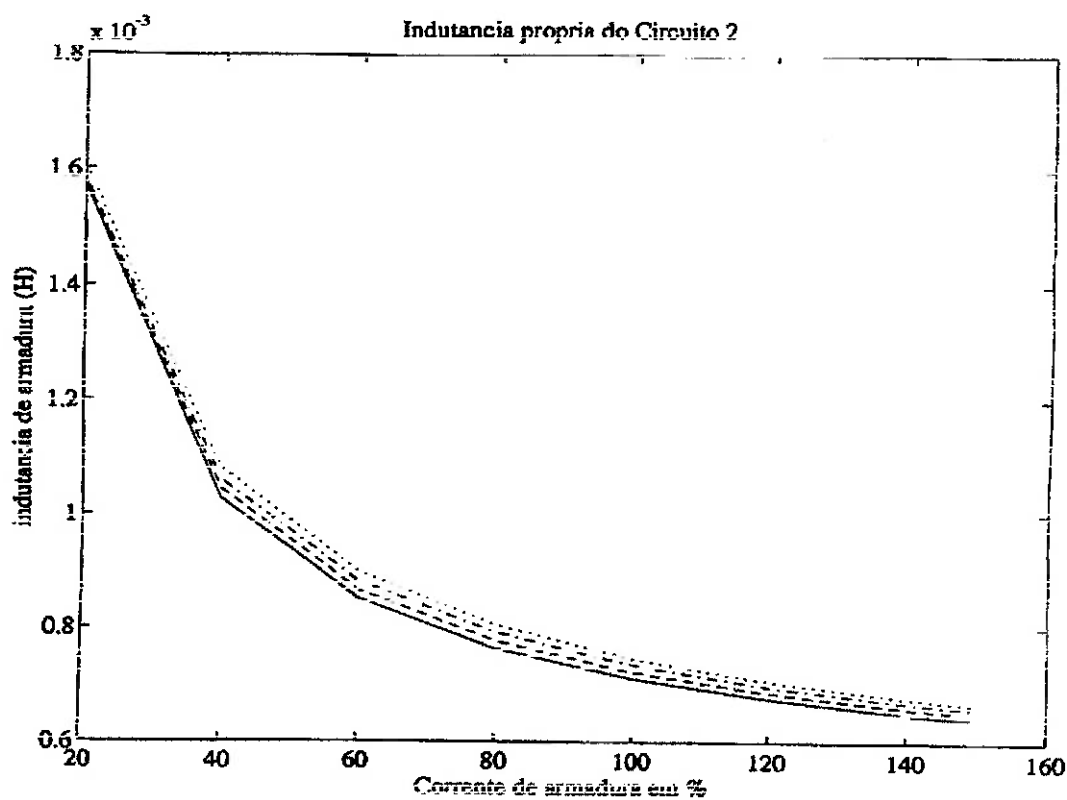
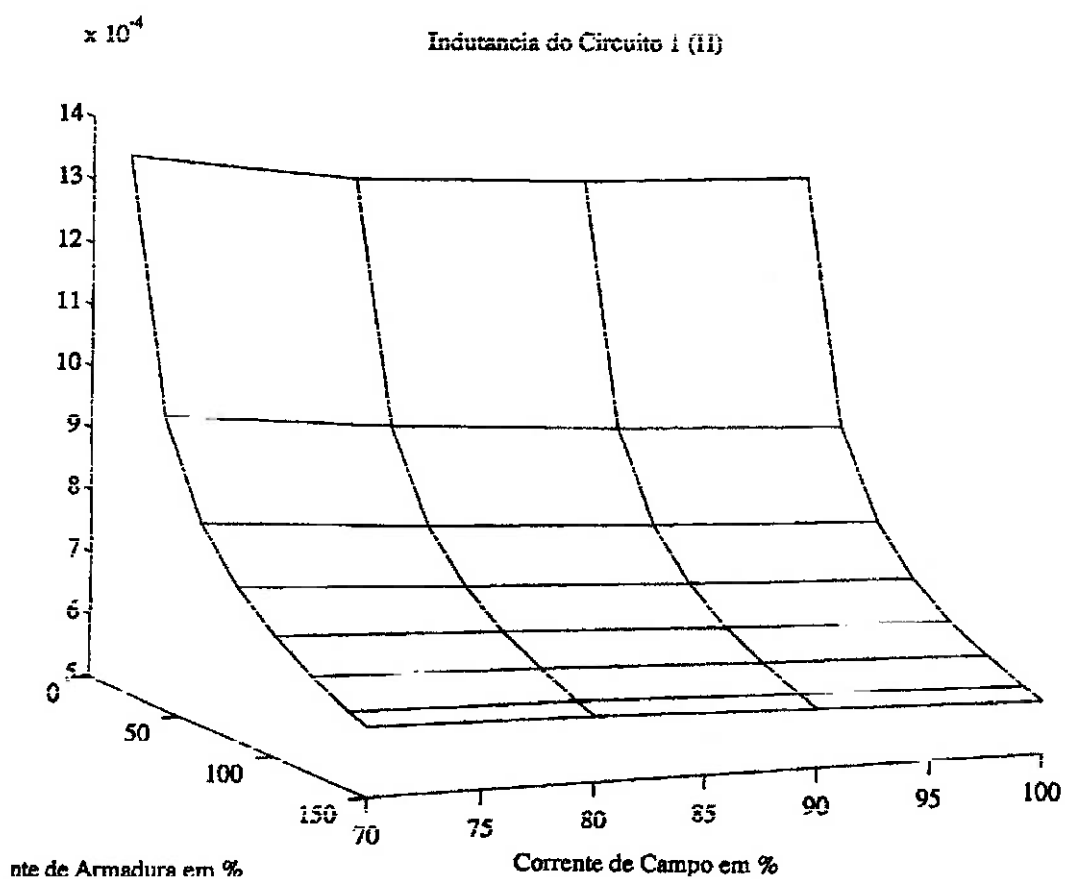


SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR



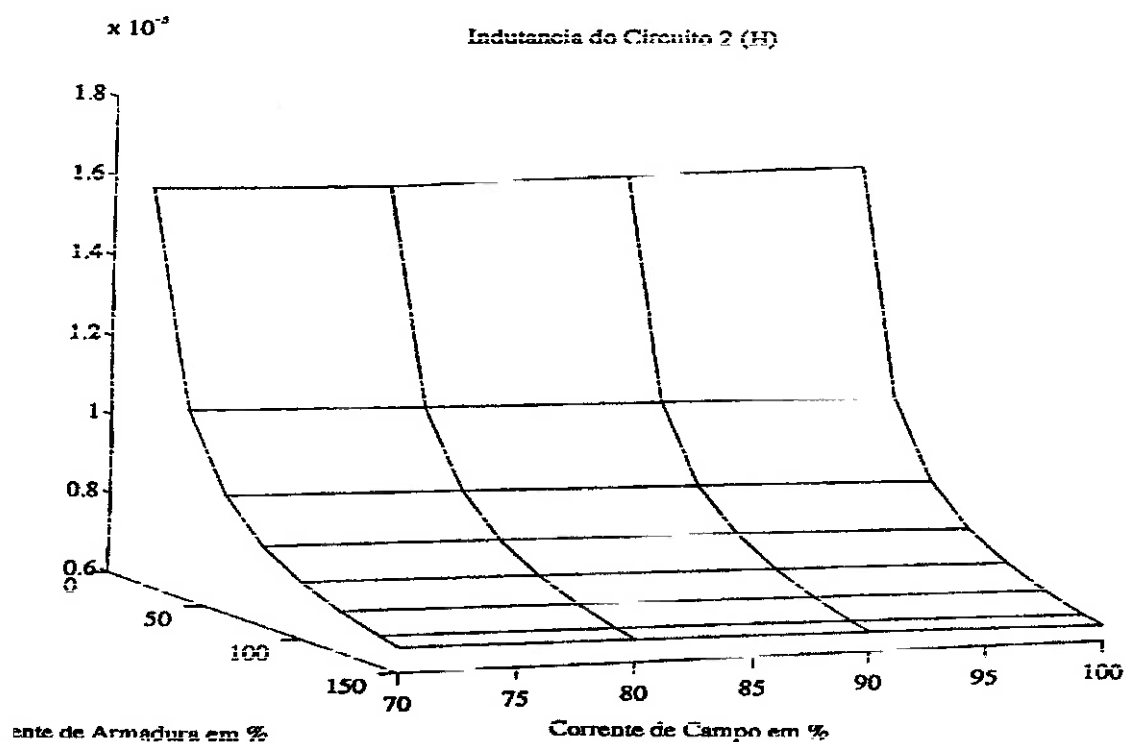
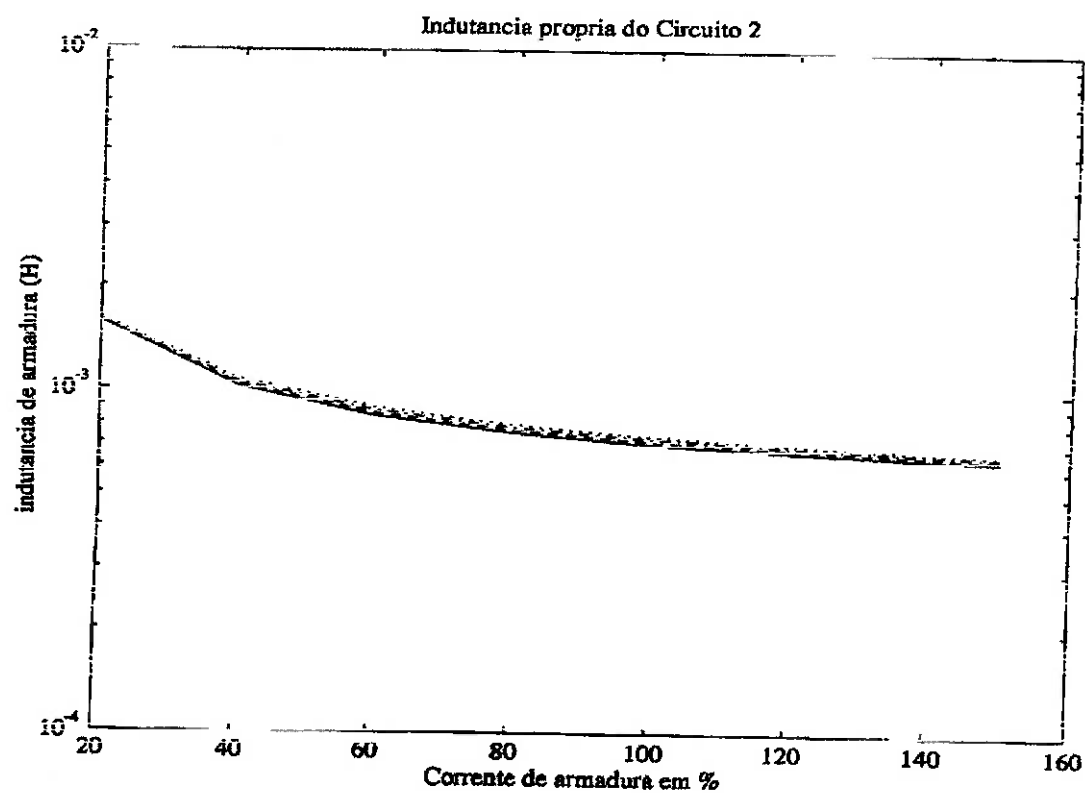


SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR



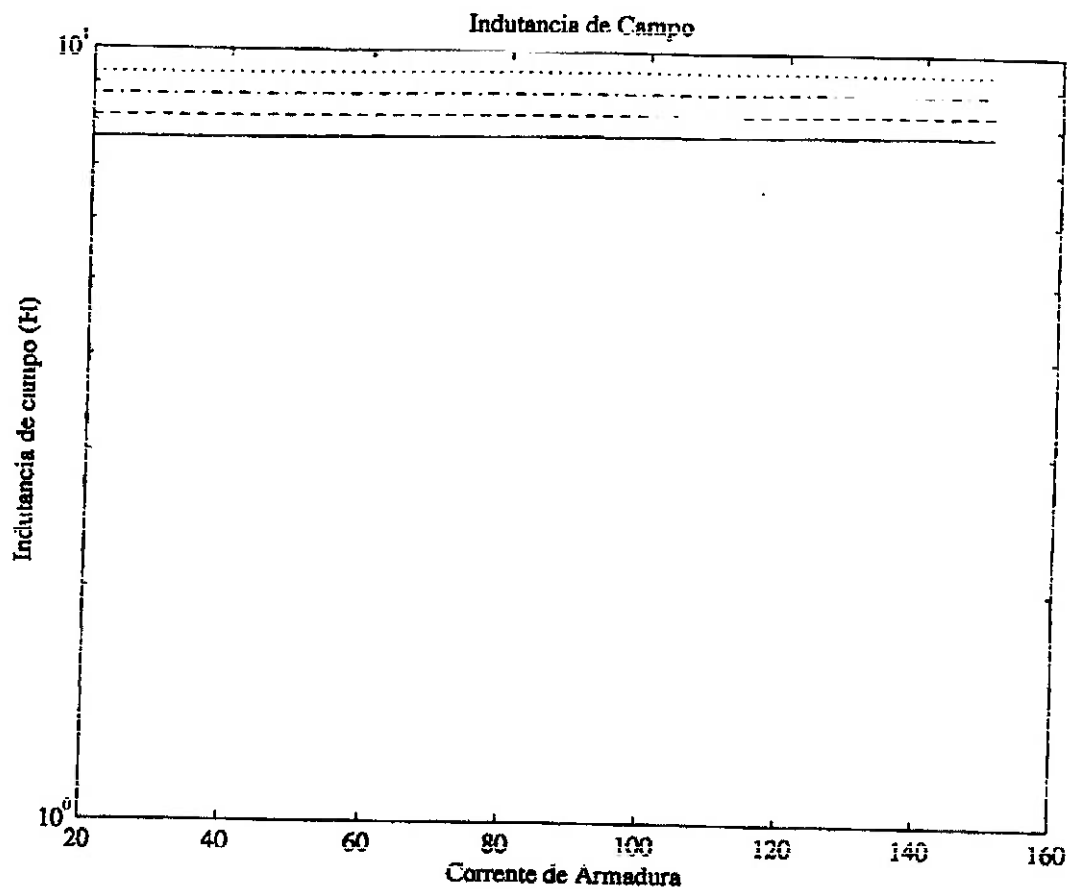
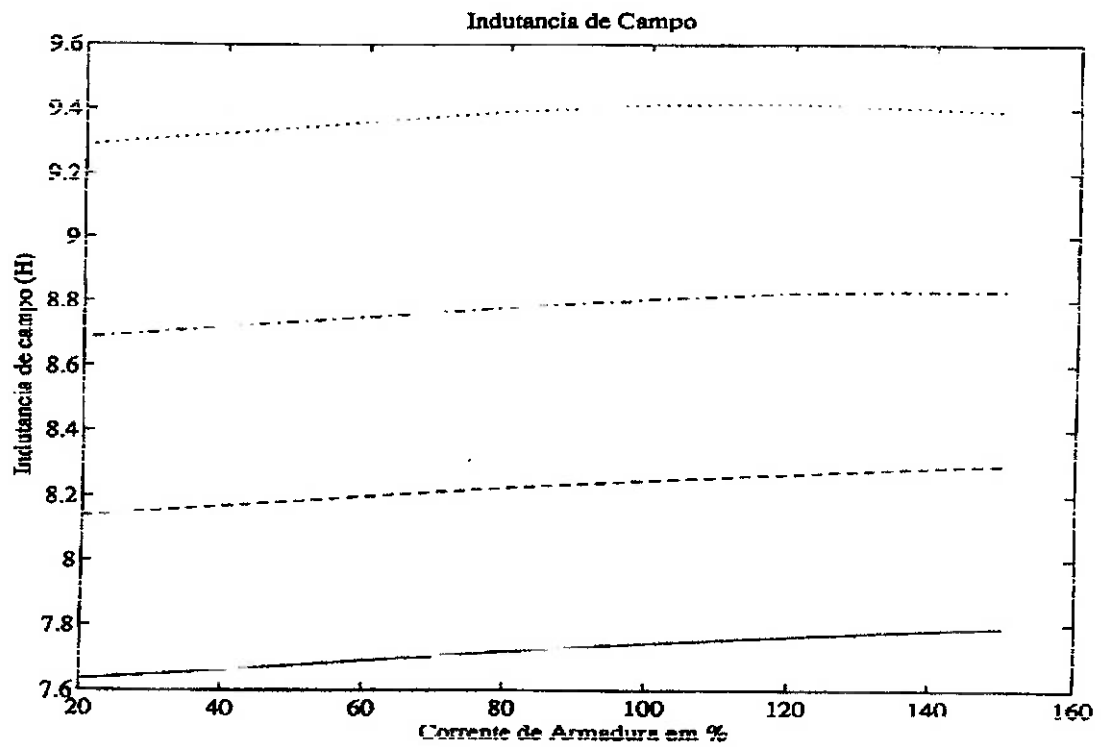


SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR



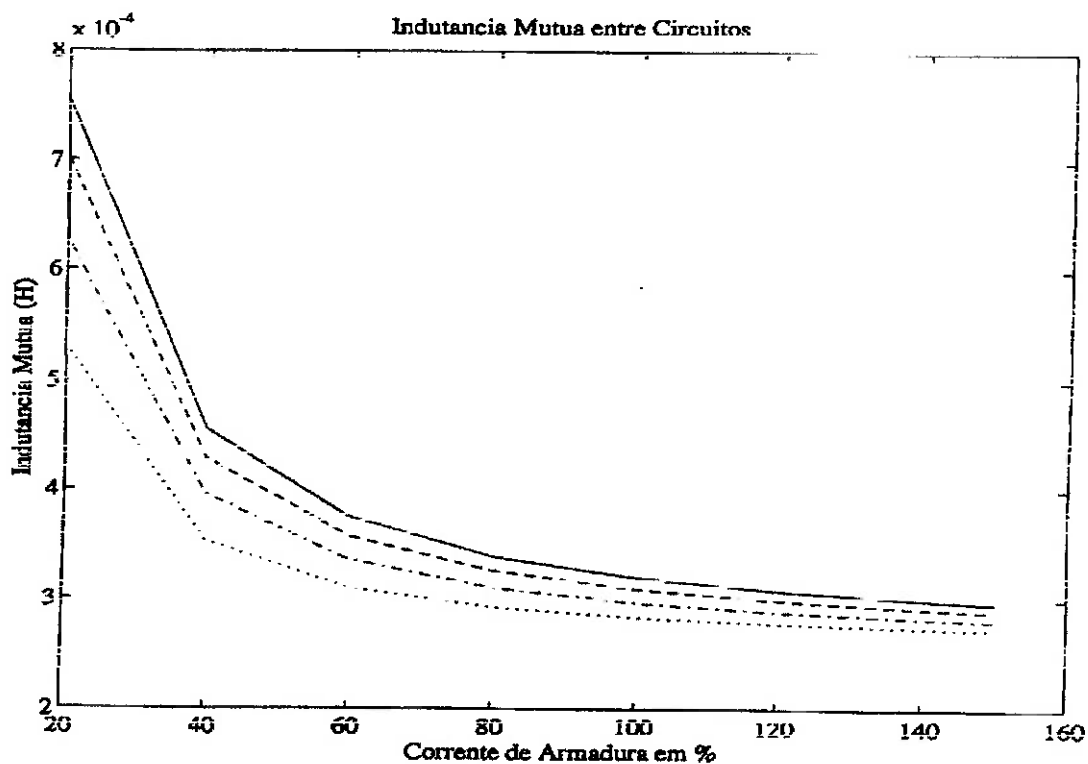
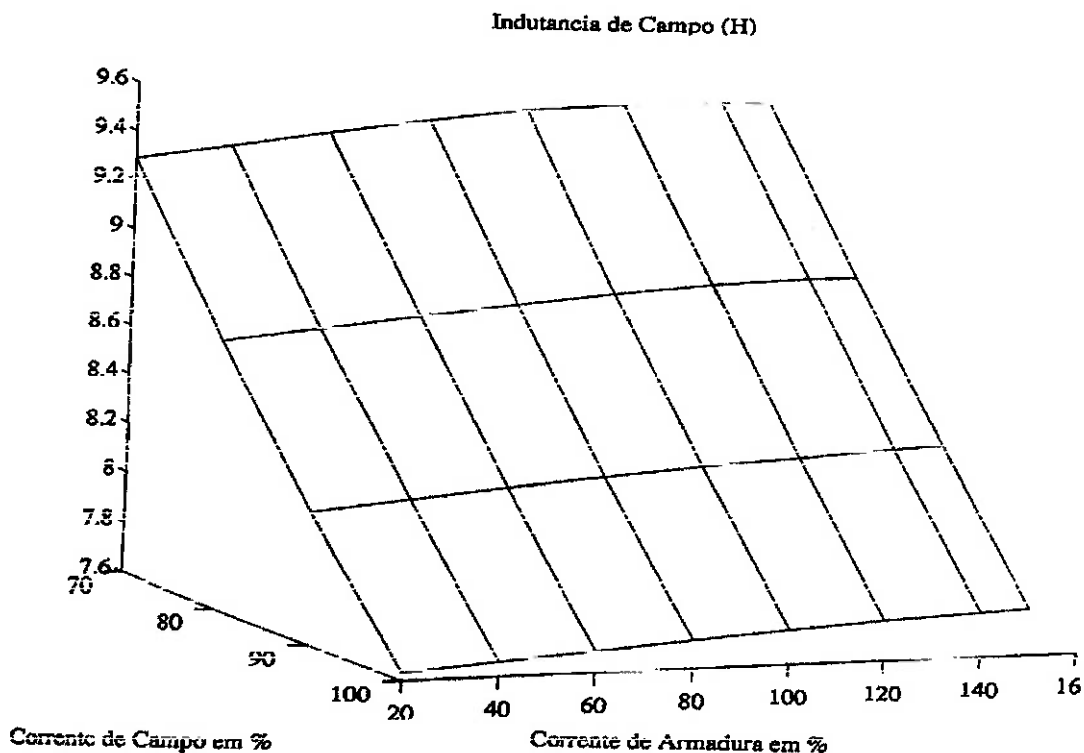


SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR



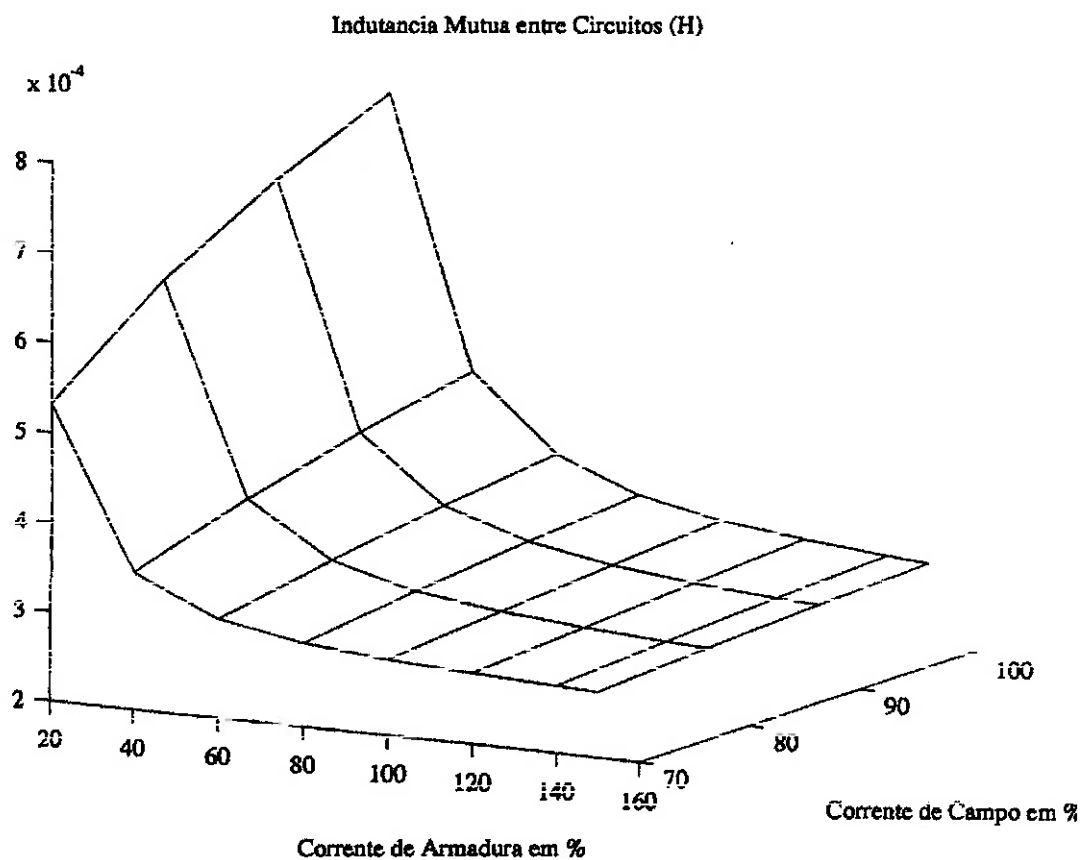
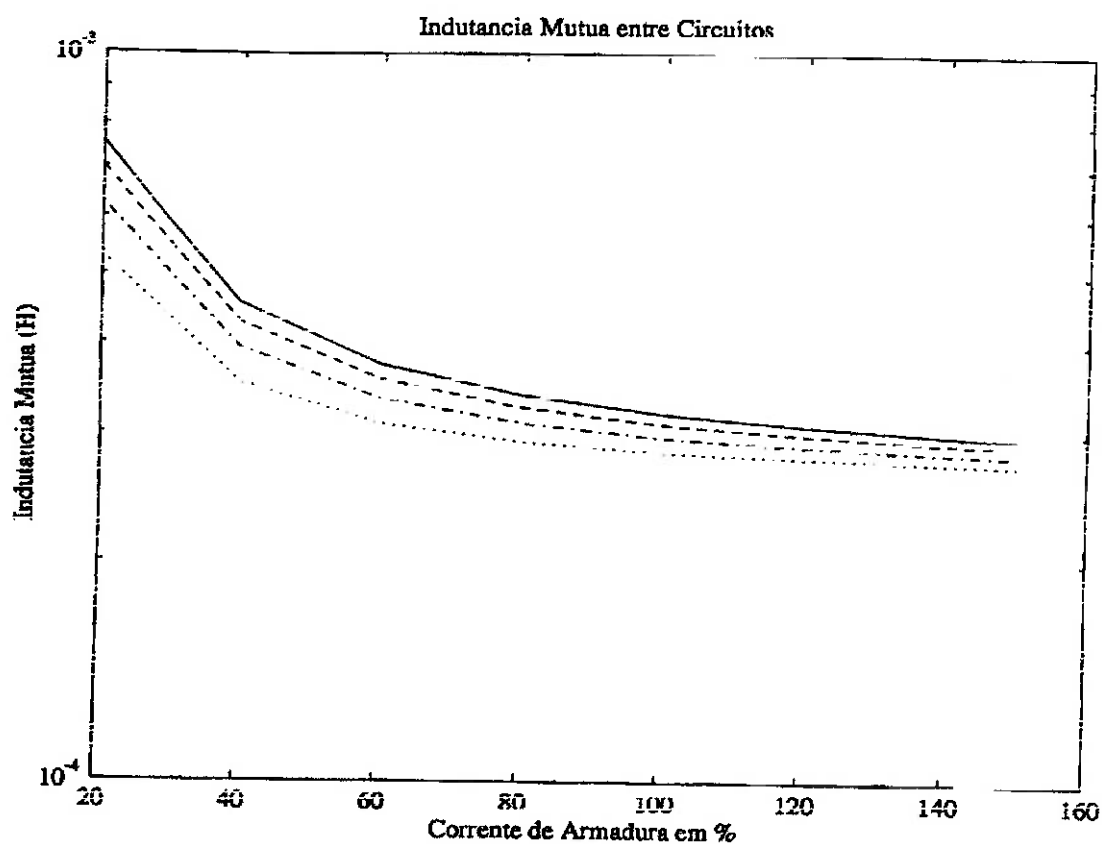


SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR





SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR





9 MODELAMENTO LINEAR DO ACIONAMENTO

9.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será feita uma análise **linear** do funcionamento das principais malhas de controle do acionamento. Esta análise permite ajustar os ganhos dos diversos controladores. O MATLAB [4][6] será a ferramenta computacional utilizada neste capítulo.

9.2 ANÁLISE DO CAMPO DO MEP-CC

O estudo do controlador de campo do motor DC é análogo ao controle da excitatriz do gerador síncrono. A discussão sobre o circuito de controle do campo do motor DC pode ser efetuada tendo em vista o diagrama de blocos dado na figura 9.1.

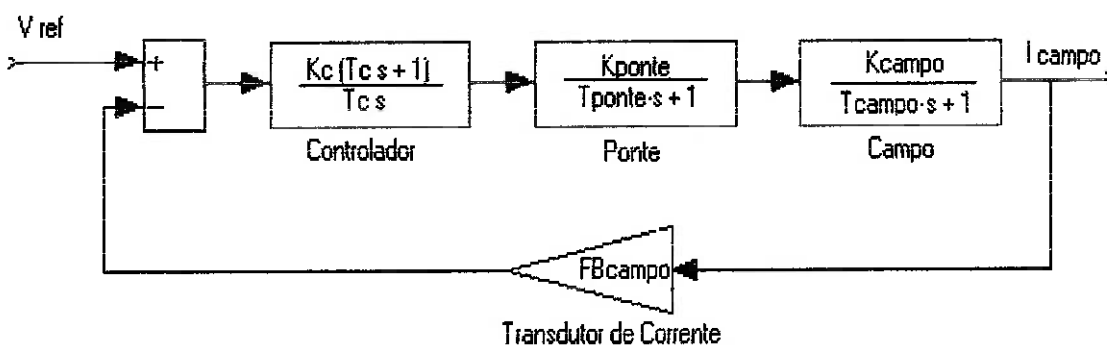


Figura 9.1: Diagrama esquemático da malha de controle de campo do motor DC

Neste diagrama aparecem 4 blocos que são descritos a seguir:

- O enrolamento de campo pode ser representado por um sistema de primeira ordem, no qual o ganho $K_{\text{campo}} = 1 / R_{\text{campo}}$ indica quantos amperes resultam por cada



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

unidade de tensão aplicada. Define-se também a constante de tempo $T_{\text{campo}} = L_{\text{campo}} / R_{\text{campo}}$.

- b) O amplificador de potência é composto por uma ponte completa ("full-bridge") de transistores, podendo operar nos quatro quadrantes do plano tensão×corrente. A frequência de chaveamento deste amplificador de potência é bastante elevada, da ordem de 1 kHz. Para efeitos de análise podemos considerá-lo como sendo um amplificador linear e contínuo, com ganho K_{ponte} [Volt/Volt] e com um atraso equivalente T_{ponte} que será da ordem de 1 ms [3].
- c) O controlador considerado será do tipo proporcional-integral. O ganho será K_c e o zero introduzido pelo controlador será T_c . O ganho K_c tem dimensão [Volt/Volt].
- d) O transdutor de corrente, com ganho FB_{campo} , tem dimensão [V/A].

9.2.1 Observações preliminares sobre a malha de corrente de campo do Motor

O sinal de comando do controlador é limitado entre ± 10 Volts, valores típicos quando se utilizam amplificadores operacionais. Nesta condição, o amplificador de potência estará completamente "on" ou "off", aplicando a tensão da bateria diretamente no enrolamento de campo do motor DC.

O ganho do amplificador de potência pode ser facilmente calculado considerando que 10 Volts correspondem à $V_{\text{ponte}} = V_{\text{bat}}$. Portanto, o ganho $K_{\text{ponte}} = V_{\text{bat}} / 10$, sendo evidente que o mesmo varia em função da tensão da bateria.

Não será considerada a variação da constante de tempo T_{campo} do enrolamento de campo, que ocorre em primeiro lugar devido à não linearidade dos materiais magnéticos. Também não será considerada a variação do "ganho" do campo K_{campo} , provocada pela variação de temperatura do enrolamento.



Não será necessário a presença de um pré-filtro que atue sobre a referência de corrente de campo do motor DC, para evitar "overshoot" excessivo, porque será utilizado a Otimização em Amplitude.

9.2.2 Ajuste do controlador de corrente de campo do MEP-CC

O ajuste dos ganhos do controlador será feito de acordo com o "ótimo em amplitude" [7]. Os valores da Malha de Corrente do Campo são os seguintes:

$$\begin{aligned}R_{Campo} &= 3.6 \, \Omega \\L_{Campo} &= 8.6 \, H \\T_{Campo} &= \frac{L_{Campo}}{R_{Campo}} \approx 2.42 \, s \\T_{ponte} &= 1 \times 10^{-3} \, s \\K_{Campo} &= \frac{1}{R_{Campo}} \approx 0.2778 \, A/V \\K_{ponte} &= 35 \, V/V \, (\text{para } V_{Bat} = 350 \, Volts) \\FB_{Campo} &= \frac{10}{72.22} \left[\frac{V}{A} \right] = 0.1385 \left[\frac{V}{A} \right]\end{aligned} \tag{9.1}$$

Como existem duas constantes de tempo na malha a ser controlada, T_{exc} e T_{ponte} o controlador utilizado será do tipo PI.

Basicamente, a idéia deste tipo de ajuste é utilizar os seguintes conceitos:

$$\sigma = \text{Menor constante de tempo} = 1 \, ms \tag{9.2}$$

$$\sigma_1 = \text{Maior constante de tempo} = 1,71 \, s \tag{9.3}$$

$$K_p = K_{ponte} * K_{campo} * FB_{campo} = 35 \times 0.2778 \times 0.1385 = 1.3466 \tag{9.4}$$

$$T_{PI} = \frac{T_c}{K_c} = 2 \times K_p \times \sigma = 2 \times 1.3466 \times 1 \, ms = 2.6932 \, ms \tag{9.5}$$



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

Portanto, a função de transferência (FT_{PI}) do controlador será:

$$FT_{PI} = \frac{[2.42 \cdot s + 1]}{2.6932m \cdot s} \quad (9.6)$$

9.2.3 Resultados no domínio do tempo

Simulando o sistema linear no domínio do tempo para um pequeno degrau de corrente de campo (A) na referência foi obtida a figura 9.2.

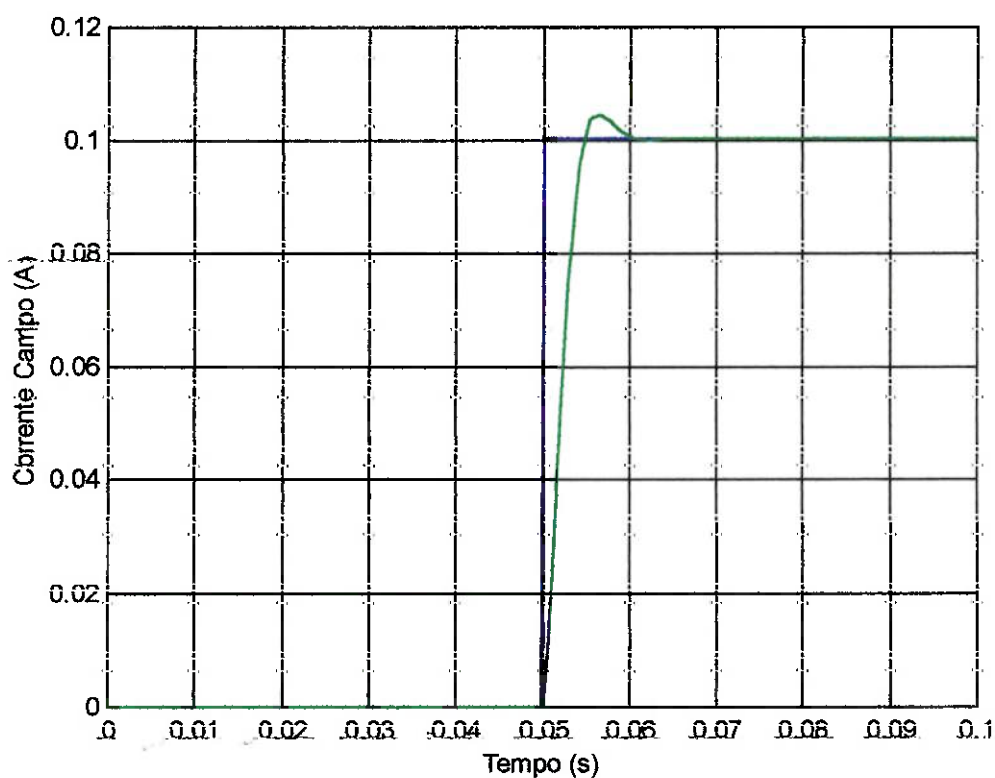


Figura 9.2: Resposta ao degrau do sistema compensado.



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

9.3 ANÁLISE DA EXCITATRIZ DO GERADOR SÍNCRONO

A discussão sobre o circuito de controle da excitatriz pode ser efetuada tendo em vista o diagrama de blocos dado na figura 9.3.

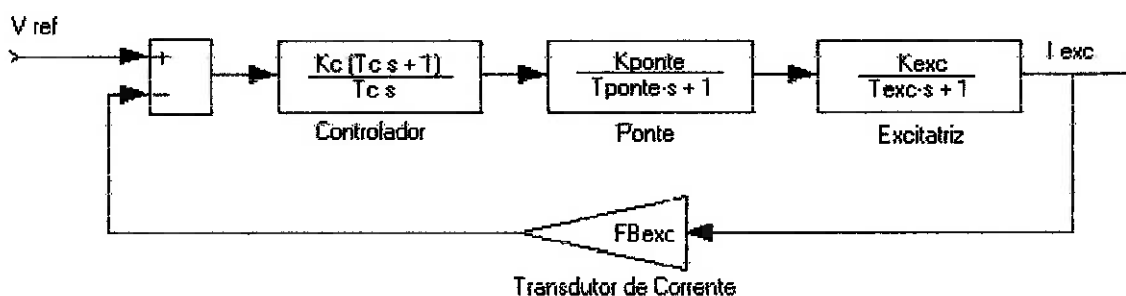


Figura 9.3: Diagrama esquemático da malha de controle da Excitatriz

Neste diagrama aparecem 4 blocos que são descritos a seguir:

- A excitatriz pode ser representada por um sistema de primeira ordem, no qual o ganho $K_{exc} = 1 / R_{exc}$ indica quantos amperes resultam por cada unidade de tensão aplicada. Define-se também a constante de tempo $T_{exc} = L_{exc} / R_{exc}$.
- O amplificador de potência é composto por uma ponte completa ("full-bridge") de transistores, podendo operar nos quatro quadrantes do plano tensão X corrente. A frequência de chaveamento deste amplificador de potência é bastante elevada, da ordem de 1 kHz. Para efeitos de análise podemos considerá-lo como sendo um amplificador linear e contínuo, com ganho K_{ponte} [Volt/Volt] e com um atraso equivalente T_{ponte} que será da ordem de 1 ms [3].
- O controlador considerado será do tipo proporcional-integral. O ganho será K_c e o zero introduzido pelo controlador será T_c . O ganho K_c terá dimensão [Volt/Volt].
- O transdutor de corrente, com ganho FB_{exc} , terá dimensão [V/A].



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

9.3.1 Observações preliminares sobre a malha de corrente da excitatriz

O sinal de comando do controlador é limitado entre ± 10 Volts, valores típicos quando se utilizam amplificadores operacionais. Nesta condição, o amplificador de potência estará completamente "on" ou "off", aplicando a tensão da bateria diretamente nos terminais da excitatriz.

O ganho do amplificador de potência pode ser facilmente calculado considerando que 10 Volts correspondem à $V_{\text{ponte}} = V_{\text{bat}}$. Portanto, o ganho $K_{\text{ponte}} = V_{\text{bat}}/10$, sendo evidente que o mesmo varia em função da tensão da bateria.

Não será considerada a variação da constante de tempo T_{exc} da excitatriz. Tal variação ocorre em primeiro lugar devido à não linearidade dos materiais magnéticos. Em segundo lugar, as correntes do estator da máquina síncrona provocam variações de fluxo no rotor (reação de armadura), afetando a indutância vista pelos terminais da excitatriz. O caso limite é o do curto-circuito nos terminais da máquina, reduzindo a indutância do valor original de 670 mH para 51 mH. Também não será considerada a variação do "ganho" da excitatriz K_{exc} , provocado pela variação de temperatura do enrolamento.

9.3.2 Ajuste do controlador de corrente da excitatriz

O ajuste dos ganhos do controlador será feito de acordo com o "ótimo em amplitude" [7]. Os valores da Malha de Corrente da Excitatriz são os seguintes:



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

$$\begin{aligned}T_{Exc} &= 1.71 s \\T_{ponte} &= 1 \times 10^{-3} s \\K_{Exc} &= 2.551 A/V \\K_{ponte} &= 35 V/V \text{ (para } V_{Bat} = 350 \text{ Volts)} \\FB_{exc} &= \frac{10}{250} \left[\frac{V}{A} \right] = 0.04 \left[\frac{V}{A} \right]\end{aligned} \quad (9.7)$$

Como existem duas constantes de tempo na malha a ser controlada, T_{exc} e T_{ponte} o controlador utilizado será do tipo PI.

Basicamente, a idéia deste tipo de ajuste é utilizar os seguintes conceitos:

$$\sigma = \text{Menor constante de tempo} = 1 \text{ ms} \quad (9.8)$$

$$\sigma_1 = \text{Maior constante de tempo} = 1.71 \text{ s} \quad (9.9)$$

$$K_p = K_{ponte} * K_{exc} * FB_{exc} = 35 \times 2.551 \times 0.04 = 3.5714 \quad (9.10)$$

$$T_{PI} = \frac{T_c}{K_c} = 2 \times K_p \times \sigma = 2 \times 3.5714 \times 1 \text{ ms} = 7.1428 \text{ ms} \quad (9.11)$$

Portanto, a função de transferência (FT_{PI}) do controlador será:

$$FT_{PI} = \frac{[1.71 \bullet s + 1]}{7.1428 \text{ m} \bullet s} \quad (9.12)$$

O uso desta técnica de ajuste **não** exige a presença de um pré-filtro para a filtragem no sinal de referência a fim de evitar "overshoot" excessivo.

9.3.3 Resultados no domínio do tempo

Simulando o sistema linear no domínio do tempo para um pequeno degrau de corrente de excitação (A) na referência foi obtido a figura 9.4.

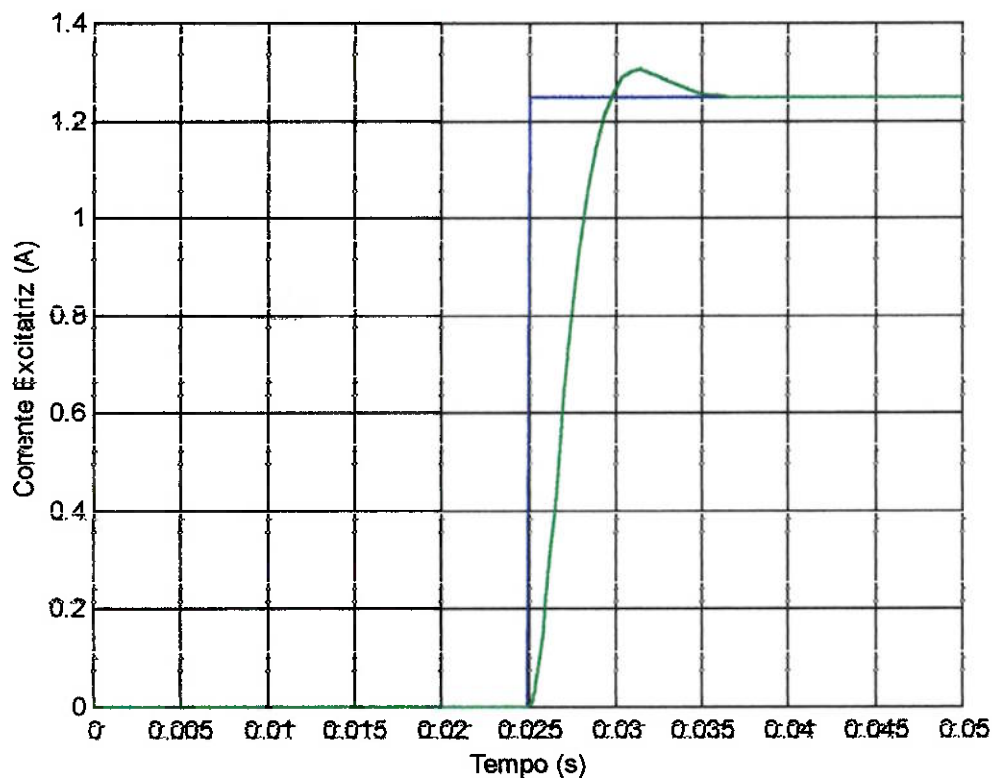
**SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE
UM SUBMARINO NUCLEAR**

Figura 9.4: Resposta ao degrau do sistema compensado.

O sistema resultante pode ser representado por um sistema equivalente de 1ª ordem. Os cálculos foram realizados a partir do Matlab, usando a função chamada *Malha_Fechada.m*.

A função de transferência encontrada deste sistema equivalente é dada por:

$$FT_{EqExc}(s) = \frac{25}{[2m \bullet s + 1]} \quad (9.13)$$

Simulando novamente o sistema linear no domínio do tempo para um pequeno degrau de corrente de excitação (A) na referência e considerando a função equivalente acima foi obtido a figura 9.5.



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

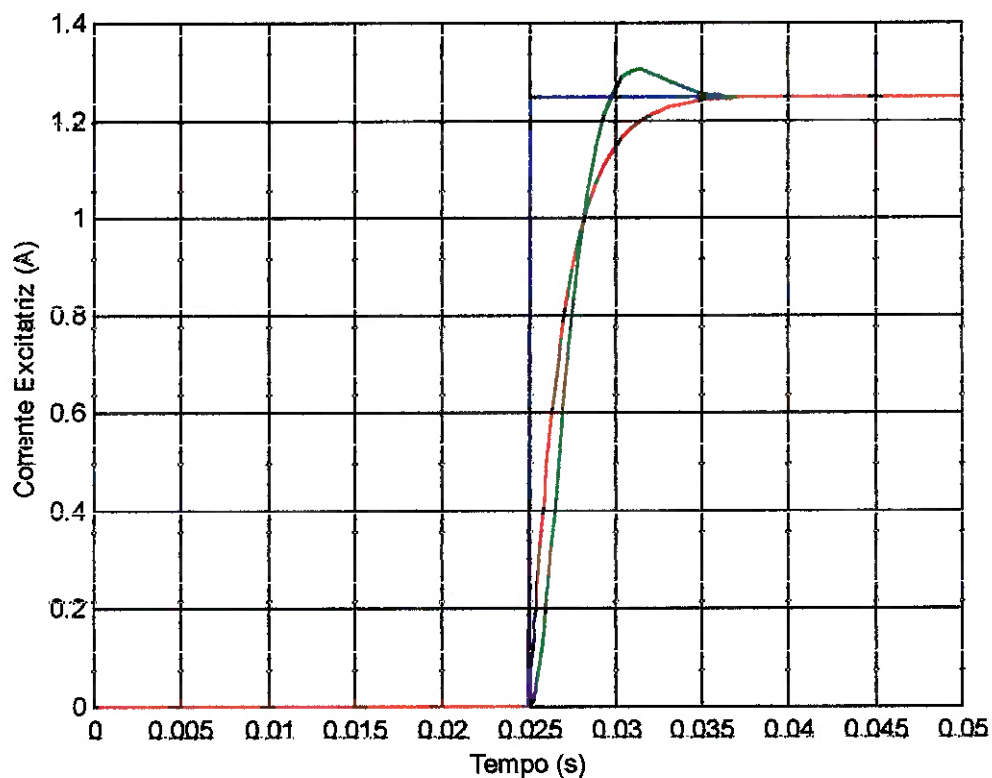


Figura 9.5: Resposta (verde) ao degrau (azul) do sistema compensado, juntamente com a resposta obtida para o sistema equivalente simplificado (vermelho).

Verifica-se na figura 9.5 que esta representação simplificada é adequada. Esta representação será utilizada no ajuste da malha de corrente de armadura.

9.4 ANÁLISE DA MALHA DE CORRENTE DE ARMADURA DO MEP-CC

A discussão sobre o circuito de controle de corrente de armadura pode ser efetuada tendo em vista o diagrama de blocos dado na figura 9.6.



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

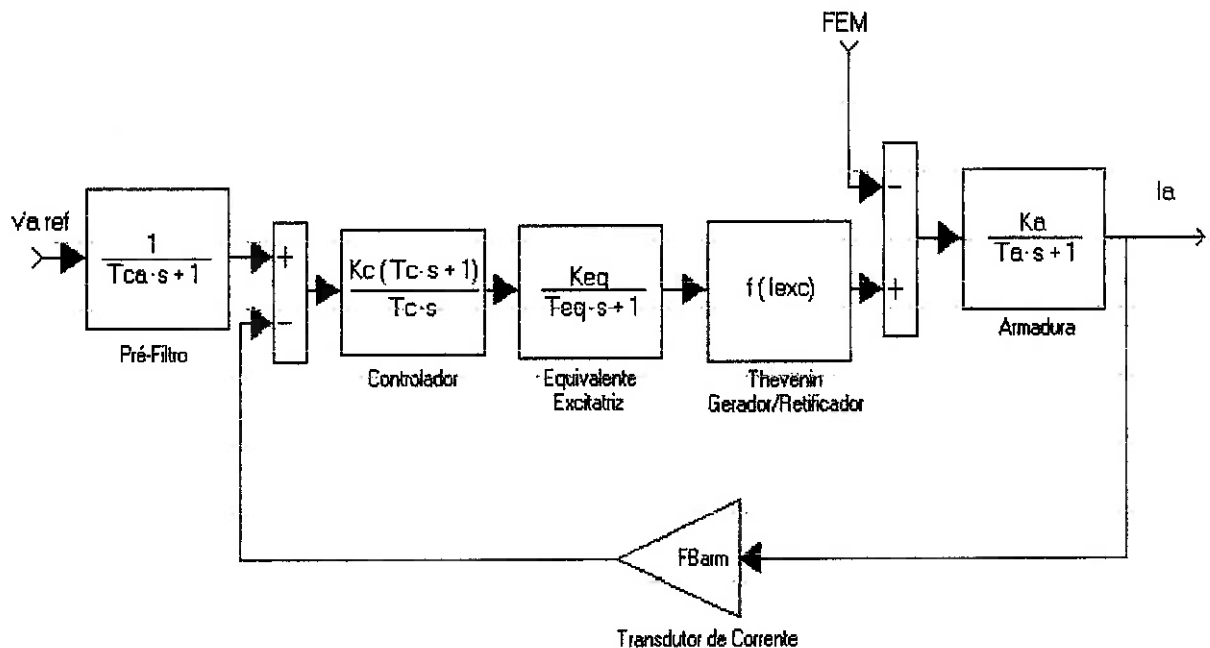


Figura 9.6: Diagrama esquemático da malha de controle de corrente de armadura do motor DC.

9.4.1. Comentários em relação ao diagrama de controle da Armadura do Motor

Alguns comentários devem ser feitos com relação à este diagrama:

- a) A excitatriz foi representada por um sistema de 1ª ordem equivalente, na forma estabelecida no item anterior. Do ponto de vista dimensional, o ganho deste sistema é [Amperes/Volt]. Numericamente:

$$\frac{1}{FB_{exc}} = \frac{1}{0.04} = 25 \left[\frac{A}{V} \right] \quad (9.14)$$

- b) O controlador de corrente de armadura, do tipo proporcional integral, tem ganho K_c , em unidades [Volt/Volt] e constante de tempo T_c [s].
- c) O pré-filtro para a referência de corrente de armadura já foi incluído no diagrama, com o valor T_c [s], uma vez que esta malha será ajustada pelo critério do "ótimo simétrico".



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

d) O transdutor de corrente de armadura está representado pelo ganho FB_{arm} [Volt/Ampere]. Numericamente considera-se que uma corrente de 7660 A produz um sinal de feedback de 10 Volts, o que equivale a fazer $FB_{arm} = 10 / 7660 = 1.3055 \times 10^{-3}$ [V / A].

e) O gerador síncrono e a ponte retificadora são representados pelo equivalente Thevenin obtido no Capítulo 8. Ou seja, considera-se uma fonte de tensão que depende unicamente da corrente de campo e cuja dependência é não-linear. O comportamento desta fonte de tensão para pequenas variações na corrente de campo pode ser obtido derivando-se a equação obtida em relação à I_f . Resulta:

$$K_G = \frac{dV_{DC}[V]}{dI_f} = 3.2757 \times 10^{-4} I_f^2 - 0.1508 I_f + 17.7183 \quad I_f \text{ em } [A] \quad (9.15)$$

Este "ganho incremental" K_G do gerador depende do ponto de operação do sistema e será considerado como valor típico o resultado obtido com 50% da corrente nominal de campo, ou seja $50\% \times 84.8 \text{ A} = 42.4 \text{ A}$. Obtém-se, portanto:

$$K_G = \frac{dV_{DC}[V]}{dI_f} = 11.91 \left[\frac{V}{A} \right] \quad (9.16)$$

f) A impedância interna do equivalente Thevenin do sistema gerador síncrono e ponte retificadora também é dada por uma função que só depende da corrente de campo. Entretanto, esta é uma impedância válida para condições de **regime permanente**, quando decorre tempo suficiente para que o efeito de reação de armadura provoque a queda de tensão nos terminais do retificador. Quando o estudo se refere a transitórios "rápidos" onde não chega a ocorrer uma variação do nível de fluxo da máquina, a impedância a ser considerada é aquela provocada apenas pelo efeito das comutações da ponte de diodos. O valor a ser adotado como típico será $R_{TH} = 0.0193 \Omega$.



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

g) Associando o equivalente Thévenin do sistema gerador + retificador ao modelo do motor DC resulta o diagrama:

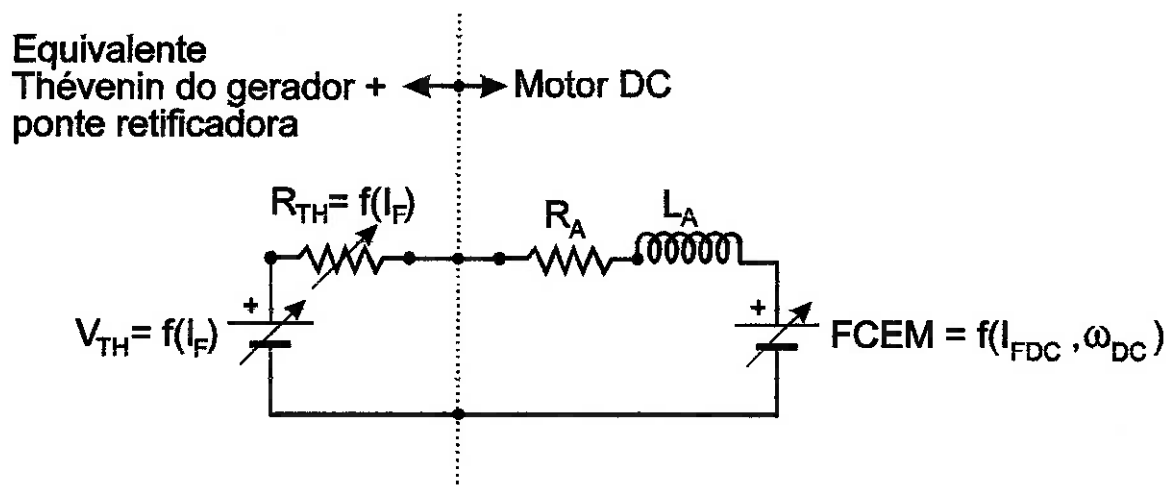


Figura 9.7: Diagrama ilustrativo do sistema gerador síncrono, ponte retificadora e motor.

h) A impedância interna do equivalente Thevenin do sistema gerador síncrono e ponte retificadora e impedância interna do motor DC podem ser combinados. A função de transferência que nos dá a corrente de armadura em função da diferença de tensões existentes é:

$$\frac{I_A(s)}{[V_{Th}(s) - FCEM(s)]} = \frac{K_A}{T_A s + 1} \quad (9.17)$$

Os valores de K_A e T_A são dados por:

$$K_A = \frac{I}{R_{TH} + R_A} \left[\frac{A}{V} \right] \quad T_A = \frac{L_A}{R_{TH} + R_A} [s] \quad (9.18)$$

É evidente que os valores K_A e T_A dependem tanto do ponto de operação do gerador como do motor DC. Apesar disso, eles serão considerados constantes, o que equivale a escolher um ponto de operação como típico.

**SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE
UM SUBMARINO NUCLEAR**

i) A FCEM do motor DC aparece no diagrama da figura 9.7 como uma variável independente (como perturbação externa). Esta forma de representação será considerada baseada no argumento que diz que "independente da inércia ser elevada ou não, a malha de corrente de armadura será ajustada de forma que as perturbações originadas pela variação da FCEM do motor DC sejam minimizadas".

9.4.2 Ajuste do controlador de corrente da armadura

O ajuste dos ganhos do controlador será feito de acordo com o "ótimo simétrico" [7] pois, como foi visto, a FCEM do motor DC é uma variável independente (como perturbação externa).

Os valores da Malha da Armadura são os seguintes:

$$\begin{aligned}T_{eq} &= 2 \text{ ms} \\K_{eq} &= 25 \text{ A/V} \\K_G &= 11.91 \text{ V/A} \\R_{TH} &= 0.0193 \Omega \\R_A &= 7.5 \times 10^{-3} \Omega \\L_A &= 0.5 \times 10^{-3} \text{ H} \\FB_{arm} &= 0.0013055 \text{ V/A}\end{aligned}\tag{9.19}$$

Inicialmente foram calculados os seguintes valores :

$$\begin{aligned}T_A &= 18.7 \text{ ms} \\K_A &= 37.31 \text{ A/V}\end{aligned}\tag{9.20}$$

Como existem duas constantes de tempo na malha a ser controlada, T_{eq} e T_A o controlador utilizado será do tipo PI.

Basicamente, a idéia deste tipo de ajuste (Ótimo Simétrico) é utilizar os seguintes conceitos:

**SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR**

$$\sigma = \text{Menor constante de tempo} = 2\text{ms} \quad (9.21)$$

$$\sigma_1 = 4 \times \sigma = 8 \text{ ms} \quad (9.22)$$

$$K_p = K_{eq} * K_G * K_A * FB_{arm} = 25 \times 11.91 \times 37.31 \times 0.0013055 = 14.50287 \quad (9.23)$$

$$T_y = 2 \times K_p \times \sigma = 58.01148 \text{ ms} \quad (9.24)$$

$$T_{PI} = \frac{T_c}{K_c} = \frac{T_y \times \sigma_1}{T_A} = \frac{0.05801148 \times 8 \text{ m}}{18.7\text{m}} = 24.81775 \text{ ms} \quad (9.25)$$

Portanto, a função de transferência (FT_{PI}) do controlador será:

$$FT_{PI} = \frac{[0.008 \bullet s + 1]}{24.81775\text{m} \bullet s} \quad (9.26)$$

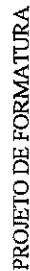
O uso desta técnica de ajuste exige a presença de um pré-filtro para a filtragem no sinal de referência a fim de evitar "overshoot" excessivo. A função de transferência do pré-filtro será a seguinte:

$$FT_{PRE} = \frac{1}{[0.008 \bullet s + 1]} \quad (9.27)$$

9.4.3 Resultados no domínio do tempo

A malha utilizada na simulação é apresentada na figura 9.8.

Simulando o sistema linear no domínio do tempo (com pré-filtro) para um pequeno degrau de corrente de armadura na referência foi obtido a figura 9.9. Nesta simulação foi utilizada a malha completa da excitatriz (e não a função de transferência equivalente).



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

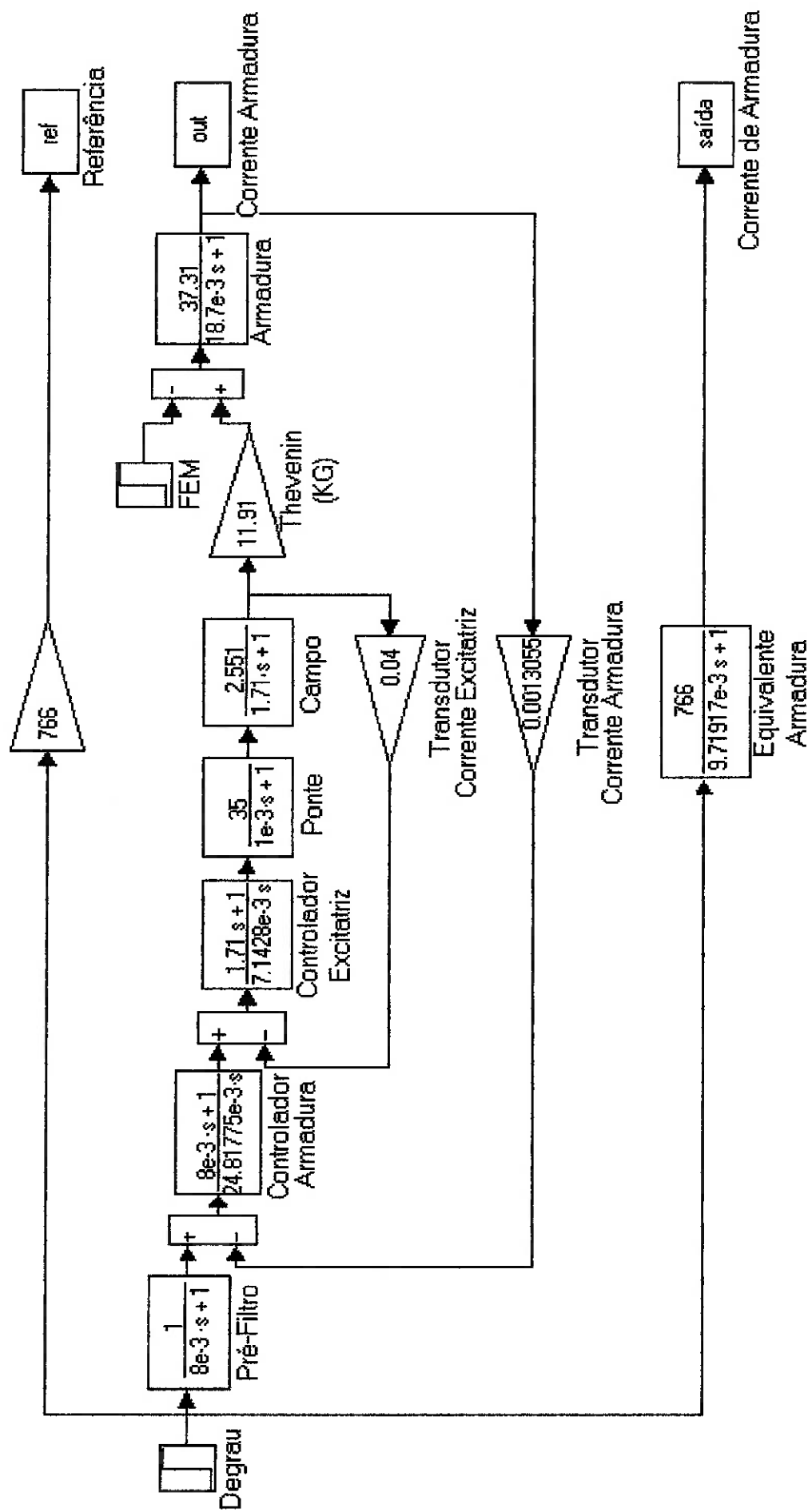


Figura 9.8 : Diagrama Ilustrativo da Malha de Corrente de Armadura do MEP-CC.



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

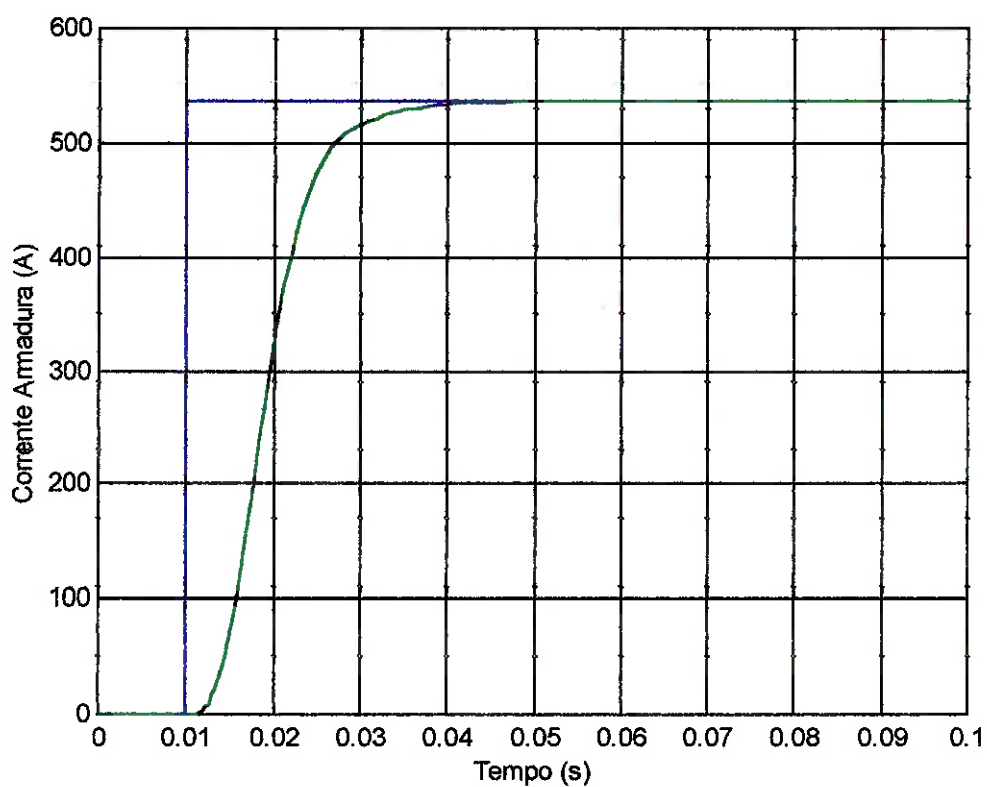


Figura 9.9 : Resposta ao degrau do sistema compensado.

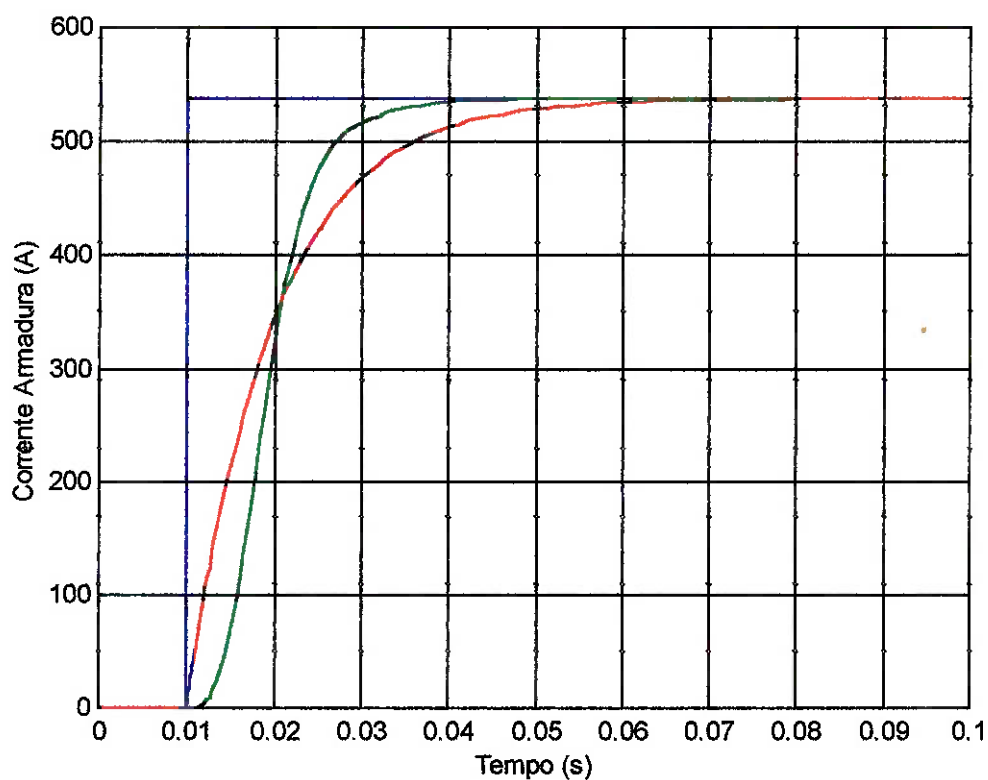


Figura 9.10: Resposta (verde) ao degrau (azul) do sistema compensado, juntamente com a resposta obtida para o sistema equivalente simplificado (vermelho).



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

O sistema resultante pode ser representado por um sistema equivalente de 1ª ordem. Os cálculos foram realizados a partir do Matlab, usando a função chamada *Malha_Fechada.m*.

A função de transferência encontrada deste sistema equivalente é dada por:

$$FT_{Eq Arm}(s) = \frac{766}{[9.71917m \cdot s + 1]} \quad (9.28)$$

Verifica-se na figura 9.10 que esta representação simplificada é adequada. Esta representação será utilizada quando efetuarmos o ajuste da malha de velocidade do motor DC.

9.5 ANÁLISE DA MALHA DE VELOCIDADE DO MEP-CC

A discussão sobre o circuito de controle de velocidade pode ser efetuada tendo em vista o diagrama de blocos dado na figura 9.11

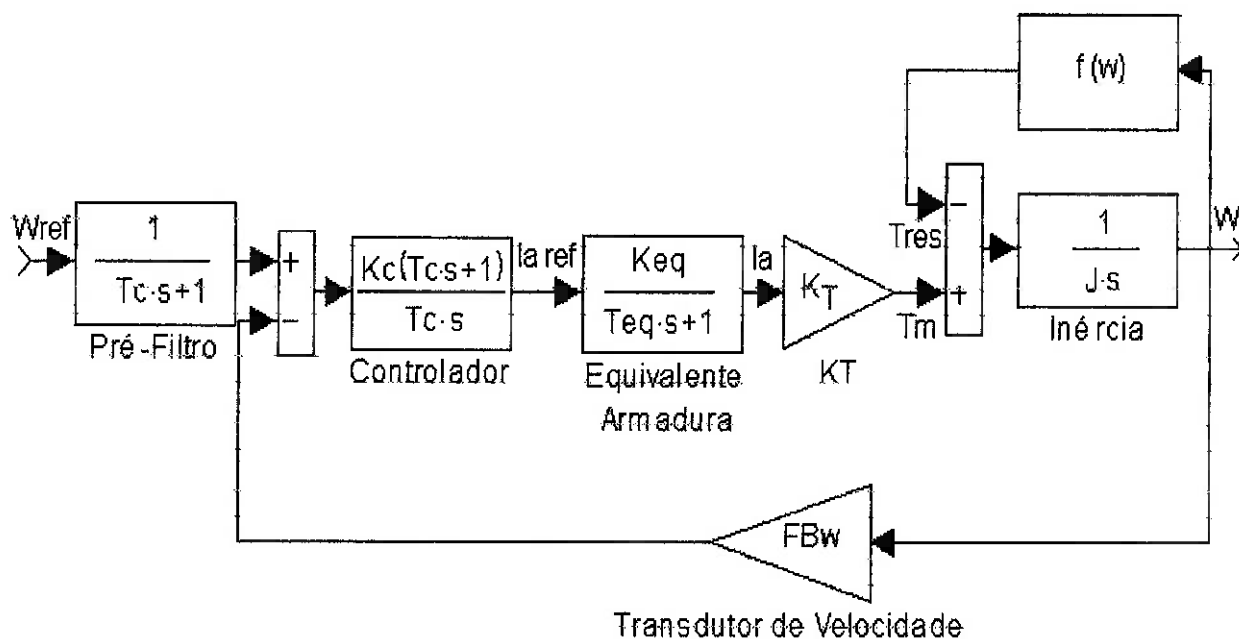


Figura 9.11: Diagrama esquemático da malha de controle de velocidade do MEP-CC.



9.5.1 Comentários em relação ao diagrama de controle da Velocidade do MEP

Alguns comentários devem ser feitos com relação à este diagrama:

- A malha de corrente de armadura foi representada por um sistema de 1ª ordem equivalente, na forma estabelecida mno item anterior. Do ponto de vista dimensional, o ganho deste sistema é [Ampere/Volt].
- O controlador de velocidade, do tipo proporcional-integral, tem ganho K_c , em unidades [Volt/Volt] e constante de tempo T_c [s].
- O pré-filtro para a referência de corrente de armadura já foi incluído no diagrama, com o valor T_c [s], uma vez que esta malha será ajustada pelo critério do "ótimo simétrico".
- O transdutor de velocidade está representado pelo ganho FBw [Volt/(rd/s)]. Numericamente será considerado que uma rotação de 200 rpm (20.94 rd/s) produz um sinal de feedback de 10 Volts, o que equivale a fazer $FBw = 10 / 20.94 = 0.477555$ [V/(rad/s)].
- O motor DC é considerado um gerador de torque, com ganho K_T [N.m/A].

Numericamente este valor pode ser obtido a partir das seguintes considerações:

- a potência nominal do motor DC é $P_N = 7350$ KW
- a rotação nominal do motor DC é $\omega_N = 200$ RPM = 20,94 rad/s

Calcula-se o conjugado nominal do motor DC (4 armaduras):

$$T_N = \frac{P_N}{\omega_N} = \frac{7350}{20,94} \frac{KW}{rad / s} = 351.003 \text{ KN.m} \quad (9.29)$$

Está sendo considerado a operação de 4 armaduras. Cada grupo de 2 armaduras é alimentado independentemente por um dos geradores síncronos, sendo que a corrente nominal de cada grupo de armaduras é $I_N = 3700$. A corrente nominal considerando as quatro armaduras ligadas em paralelo será $I_N = 7660$ A.



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

Portanto:

$$K_T = \frac{353003}{7660} = 45.823 \frac{N.m}{A} \quad (9.30)$$

- f) A curva de conjugado resistente da carga $f(\omega)$ foi obtida no capítulo anterior (8.21) mas vale a pena repeti-la aqui:

$$f(\omega) [N.m] = 9549.3 + 783.7 \omega^2 \quad (9.31)$$

O coeficiente angular desta função $f(\omega)$ depende do ponto de operação, e vale:

$$B(\omega) = \frac{df(\omega)}{d\omega} = 1567.4 \omega \left[\frac{N.m}{rd/s} \right] \quad (9.32)$$

Agrupando os blocos referentes à carga temos o diagrama:

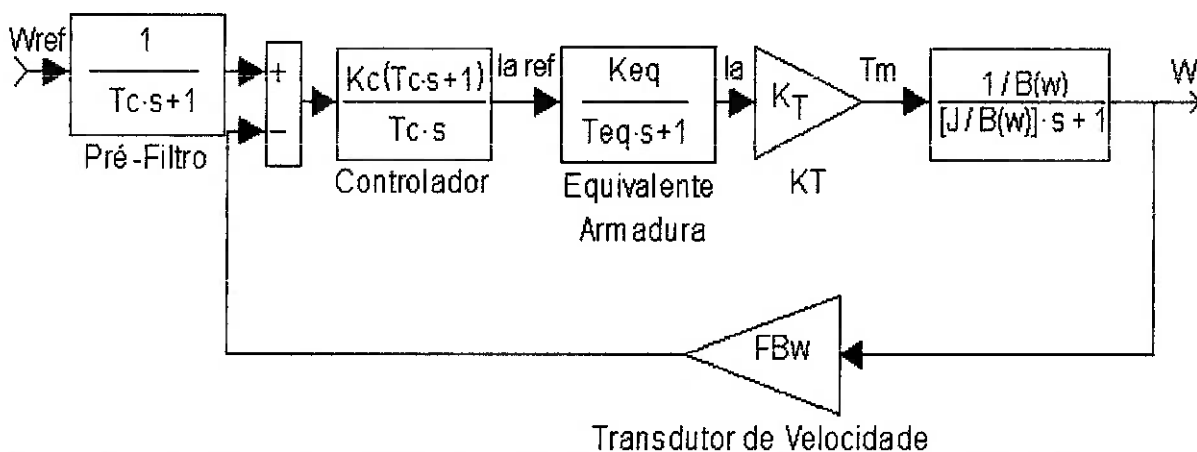


Fig. 9.12: Diagrama esquemático da malha de controle de velocidade do motor DC.

O sistema mecânico possui um comportamento que depende do ponto de operação, apesar da inércia permanecer constante. A seguir é apresentada uma tabela na qual se mostra o valor numérico do polo e do ganho do sistema mecânico, em função da velocidade.



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

Variação do ganho e da constante de tempo do sistema mecânico

$\omega [rd / s]$	1	5	10	20
$1 / B(\omega) [(rd/s)/N.m]$	6.38×10^{-4}	1.28×10^{-4}	6.38×10^{-5}	3.19×10^{-5}
$T_{mec} = J / B(\omega) [s]$	16.1	3.2	1.61	0.80

Deveria ser escolhido um ponto de operação para fazer o ajuste do controlador de velocidade. Entretanto isto não é necessário pelas razões expostas abaixo.

Aplicando as expressões para o "ótimo simétrico" ideal:

$$T_{PI} = T_c / K_c \quad (9.33)$$

$$K_c = T_c / T_{PI} \quad (9.34)$$

$$\sigma = \text{Menor constante de tempo} = T_{eq} \quad (9.35)$$

$$\sigma_1 = 4 \times \sigma \quad (9.36)$$

$$K_p = K_{eq} * K_T * [1 / B(w)] * FB_w \quad (9.37)$$

$$T_y = 2 \times K_p \times \sigma = 2 * K_{eq} * K_T * [1 / B(w)] * FB_w * T_{eq} \quad (9.38)$$

$$T_{PI} = \frac{T_c}{K_c} = \frac{T_y \times \sigma_1}{K_c [1 / B(w)]} = \frac{2 * K_{eq} * K_T * [1 / B(w)] * FB_w * T_{eq} * 4 * T_{eq}}{[J / B(w)]} = \frac{8 * K_{eq} * K_T * FB_w * T_{eq}^2}{J} \quad (9.39)$$

$$\text{Logo : } K_c = \frac{J}{2 * K_{eq} * K_T * FB_w * T_{eq}} \quad (9.40)$$

Observa-se que na equação de K_c não existe mais a dependência em relação ao ponto de operação do sistema mecânico (ou seja, independe de $B(\omega)$). Do ponto de vista do diagrama de blocos, isto equivaleria a ajustar o sistema simplificado dado na figura 9.13.



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

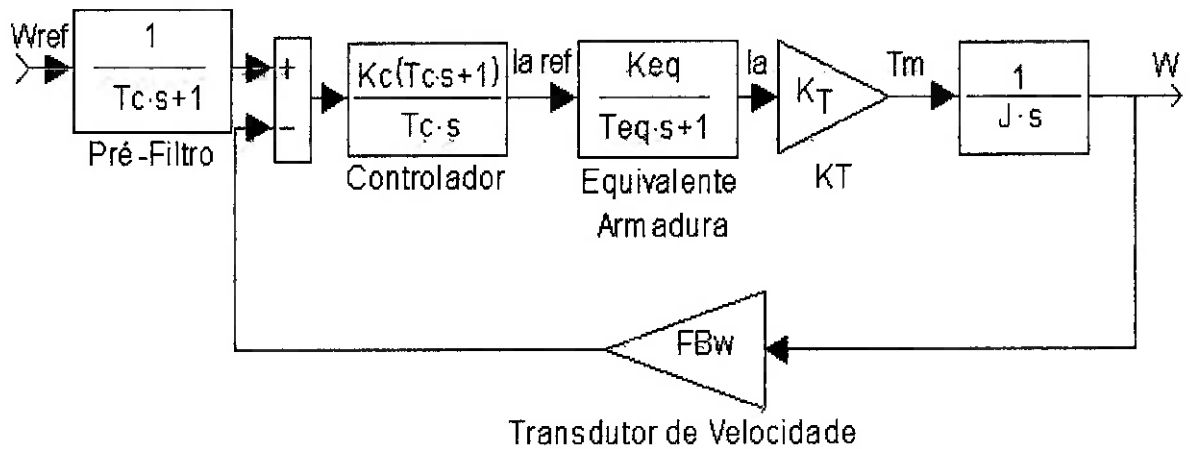


Figura 9.13: Diagrama simplificado usado no ajuste da malha de controle de velocidade do MEP-CC

9.5.2 Ajuste do controlador de velocidade do MEP-CC

O ajuste dos ganhos do controlador será feito de acordo com o "ótimo simétrico".

Os valores da Malha de Velocidade são os seguintes:

$$\begin{aligned} K_{eq} &= 766 \text{ A/V} \\ K_T &= 45.823 \text{ N.m/A} \\ J &= 22940 \text{ kg.m}^2 \\ T_{eq} &= 9.71917 \text{ ms} \\ FB_w &= 0.477555 \text{ V/(rad/s)} \end{aligned} \quad (9.41)$$

Como existem duas constantes de tempo na malha a ser controlada, T_{eq} e J o controlador utilizado será do tipo PI.

Utilizando os conceitos de Otimização em Simetria [7], teremos:

$$\sigma = \text{Menor constante de tempo} = 9.71917 \text{ ms} \quad (9.42)$$

$$\sigma_1 = 4 \times \sigma = 38.8767 \text{ ms} \quad (9.43)$$

$$K_p = K_{eq} * K_T * FB_w = 766 \times 45.823 \times 0.477555 = 16762.38 \quad (9.44)$$

$$T_y = 2 \times K_p \times \sigma = 325.833 \text{ s} \quad (9.45)$$

$$T_{PI} = \frac{T_c}{K_c} = \frac{T_y \times \sigma_1}{T_A} = \frac{325.833 \times 38.8767 \text{ ms}}{22940} = 0.5522 \text{ ms} \quad (9.46)$$



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

Portanto, a função de transferência (FT_{PI}) do controlador será:

$$FT_{PI} = \frac{[0.0388767 \cdot s + 1]}{0.5522m \cdot s} \quad (9.47)$$

O uso desta técnica de ajuste exige a presença de um pré-filtro para a filtragem no sinal de referência a fim de evitar "overshoot" excessivo. A função de transferência do pré-filtro será a seguinte:

$$FT_{PRE} = \frac{1}{[0.0388767 \cdot s + 1]} \quad (9.48)$$

9.5.3 Resultados no domínio do tempo

A malha utilizada na simulação é apresentada na figura 9.15.

Simulando o sistema linear no domínio do tempo (com pré-filtro) para um pequeno degrau de velocidade na referência foi obtido a figura 9.14. Nesta simulação foi utilizada a malha completa da armadura (e não a função de transferência equivalente).

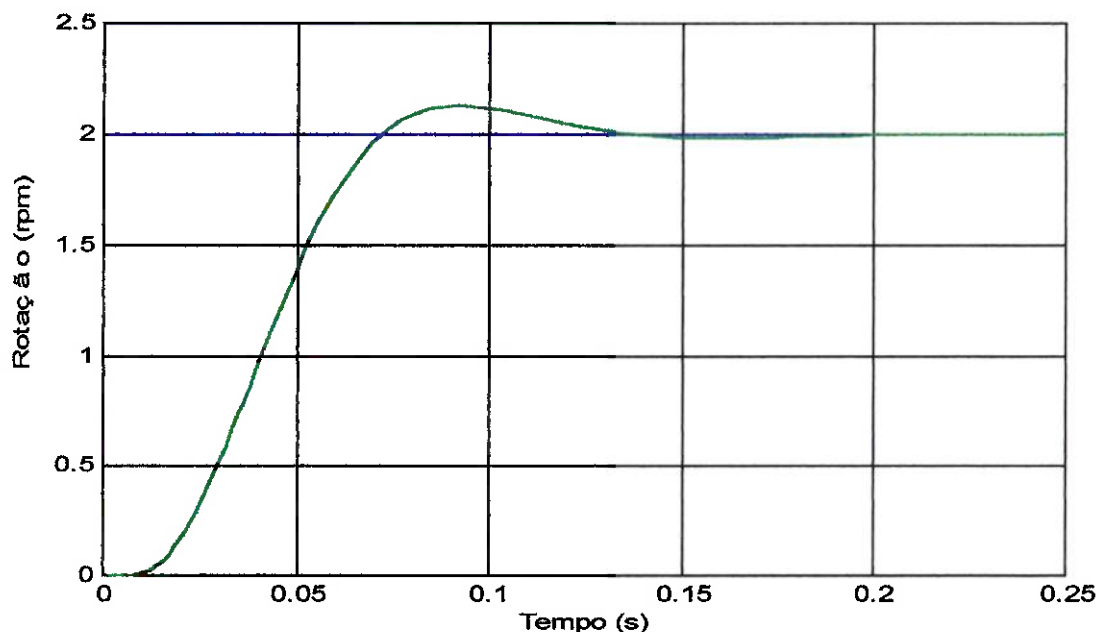


Figura 9.14: Resposta ao degrau de velocidade.



PROJETO DE FORMATURA

SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

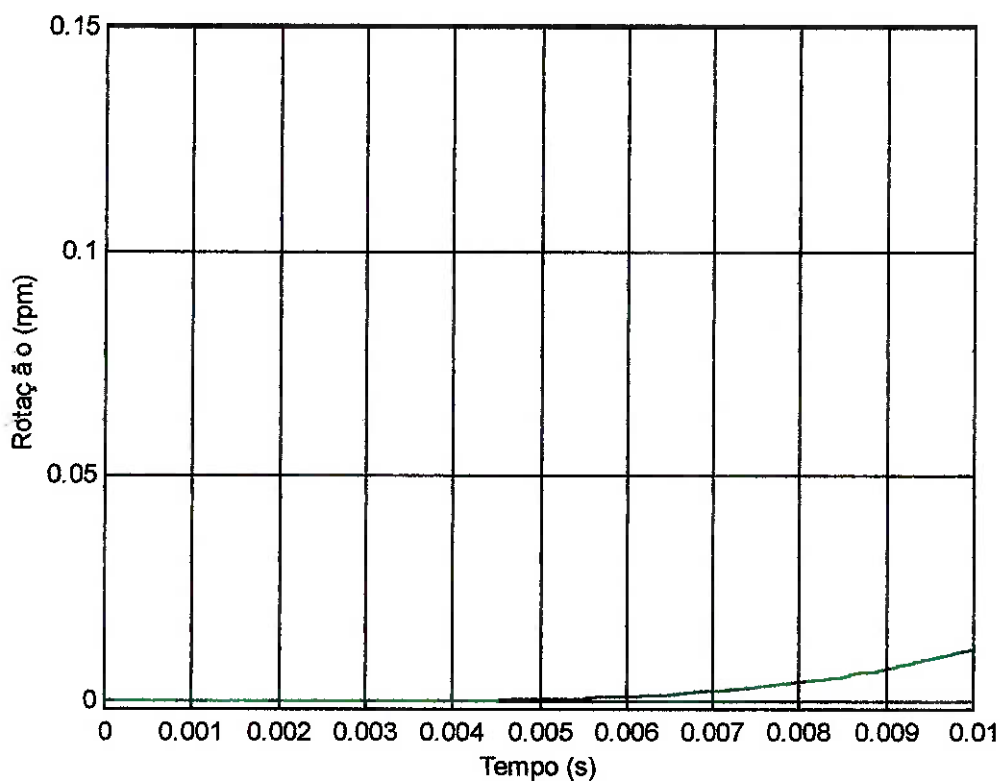


Fig 9.16: Resposta ao degrau da malha de velocidade, com um tempo de simulação muito pequeno.

Apesar dos dois gráficos (figuras 9.14 e 9.16) apresentarem, aparentemente, valor inicial nulo para a velocidade, é possível verificar através da figura 9.15 que isto não traduz a realidade. Os *displays* mostram que todos os valores são **não-nulos** no instante 0.0015s, inclusive a velocidade no eixo.



10 SIMULAÇÕES DO ACIONAMENTO LINEAR

10.1 INTRODUÇÃO

O modelamento apresentado no capítulo 9 foi implementado e simulado no MATLAB [4]. Inicialmente será apresentado os resultados da simulação do MEP-CC, conforme as figuras 8.2 e 8.3 [6]. Finalmente será apresentado a simulação para um pequeno degrau na entrada (análise linear) de toda a propulsão elétrica.

10.2 SIMULAÇÃO DO MEP-CC ISOLADO

O gráfico a seguir foi obtido a partir da simulação do MEP-CC equacionado de acordo com o capítulo 8 e modelado de acordo com a figura 10.4. Os *displays* da figura mostram os valores de Rotação, Corrente de Armadura e Tensão de Armadura.

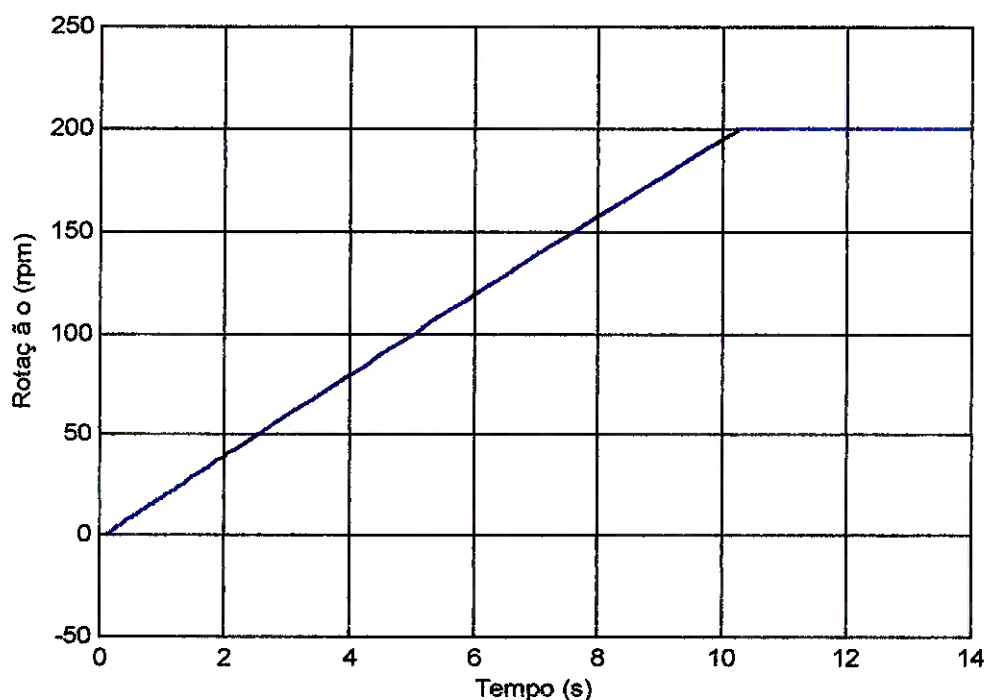


Figura 10.1 : Rotação para Tensão de Armadura próxima à nominal.



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

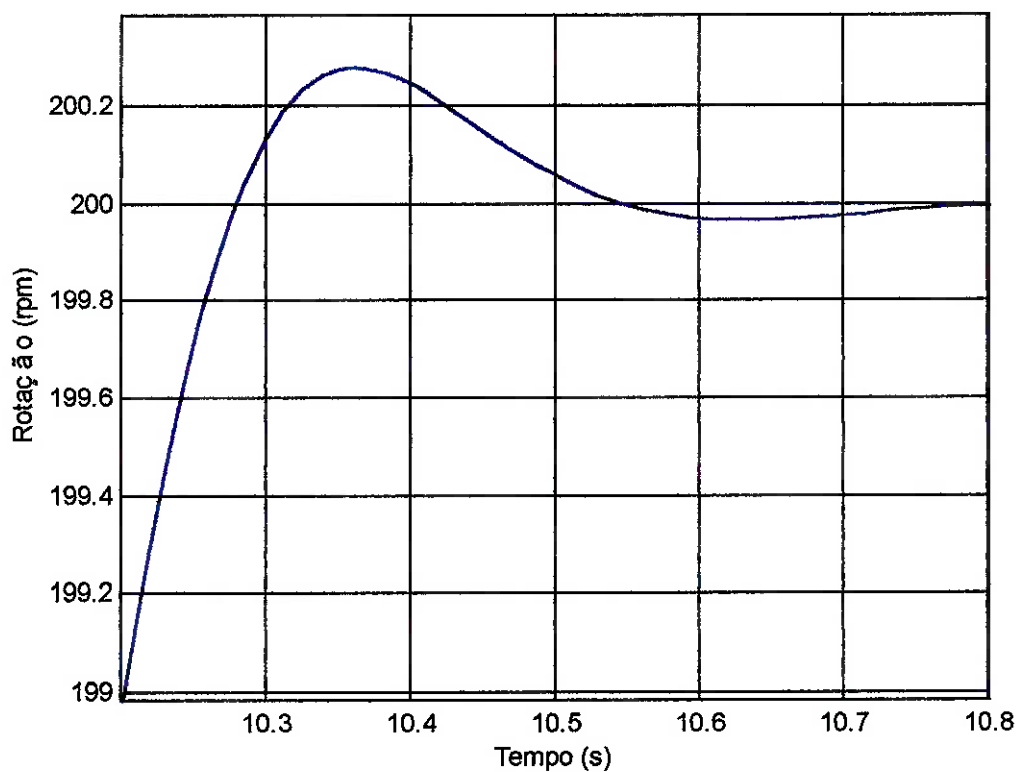


Figura 10.2: Rotação para Tensão de Armadura próxima à nominal (ZOOM).

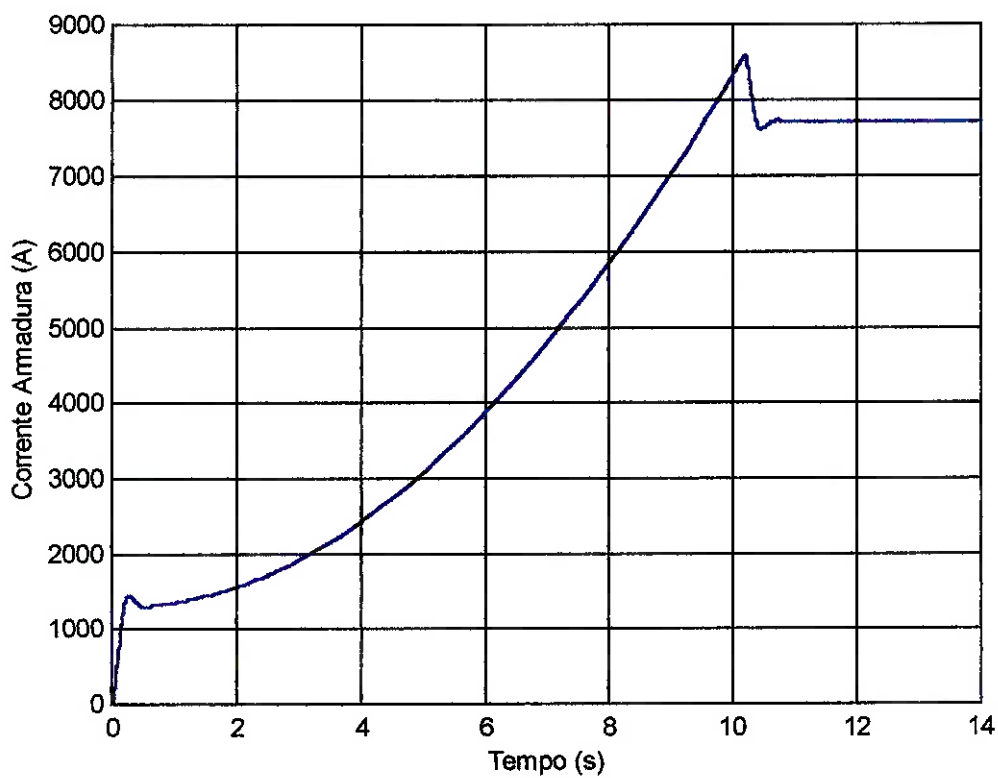


Figura 10.3: Corrente de armadura para Tensão próxima à nominal.



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

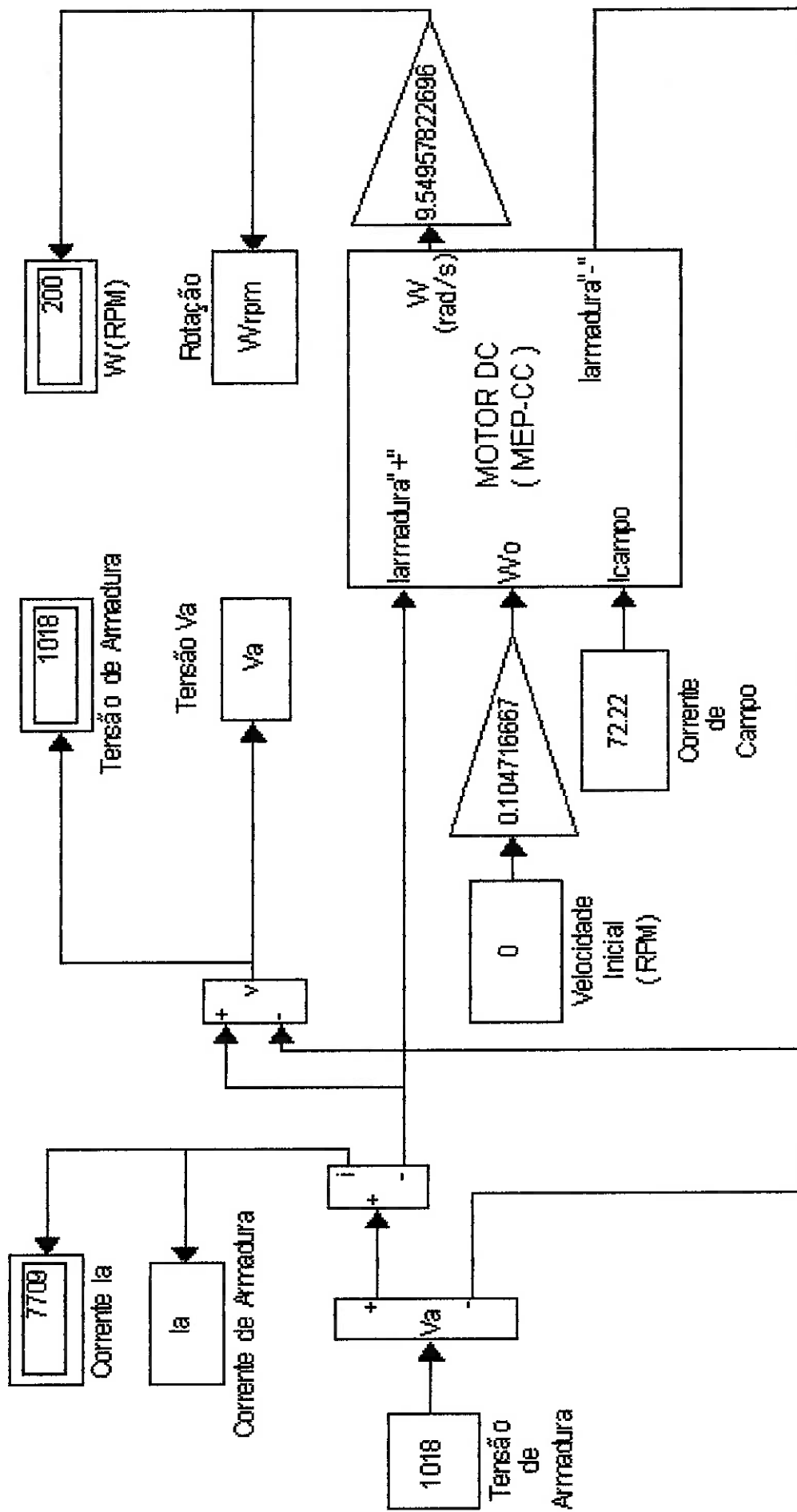


Figura 10.4 : Diagrama Ilustrativo do MEP-CC.



10.3 SIMULAÇÃO COMPLETA DA PLANTA ELÉTRICA PARA PEQUENO DEGRAU

As figuras a seguir são resultados da simulação da propulsão elétrica para um pequeno degrau na referência. A figura 10.5 é resultado de um degrau de 0.06 [V] na entrada, que corresponde a um degrau de 1.2 RPM. Esta figura mostra que, inicialmente, a rotação torna-se negativa. Isto não corresponde à realidade mas, como o Torque Resistente possui uma parcela que não depende da rotação w , o resultado torna-se negativo até que a o Torque Eletromagnético torne-se maior do que o valor independente de w .

As figuras 10.6 e 10.7 mostram diversos sinais da malha da propulsão elétrica.

A figura 10.8 mostra o diagrama completo utilizado na simulação.

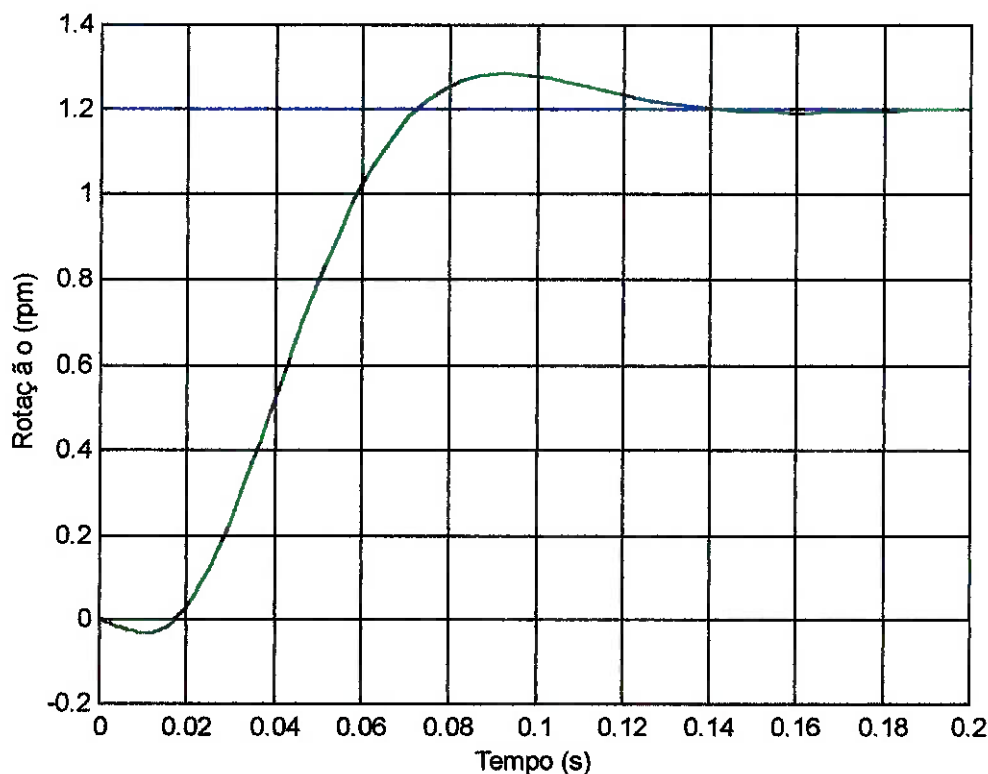


Figura 10.5: Rotação no eixo para um degrau de 0.06 [V] (1.2 RPM) na entrada.

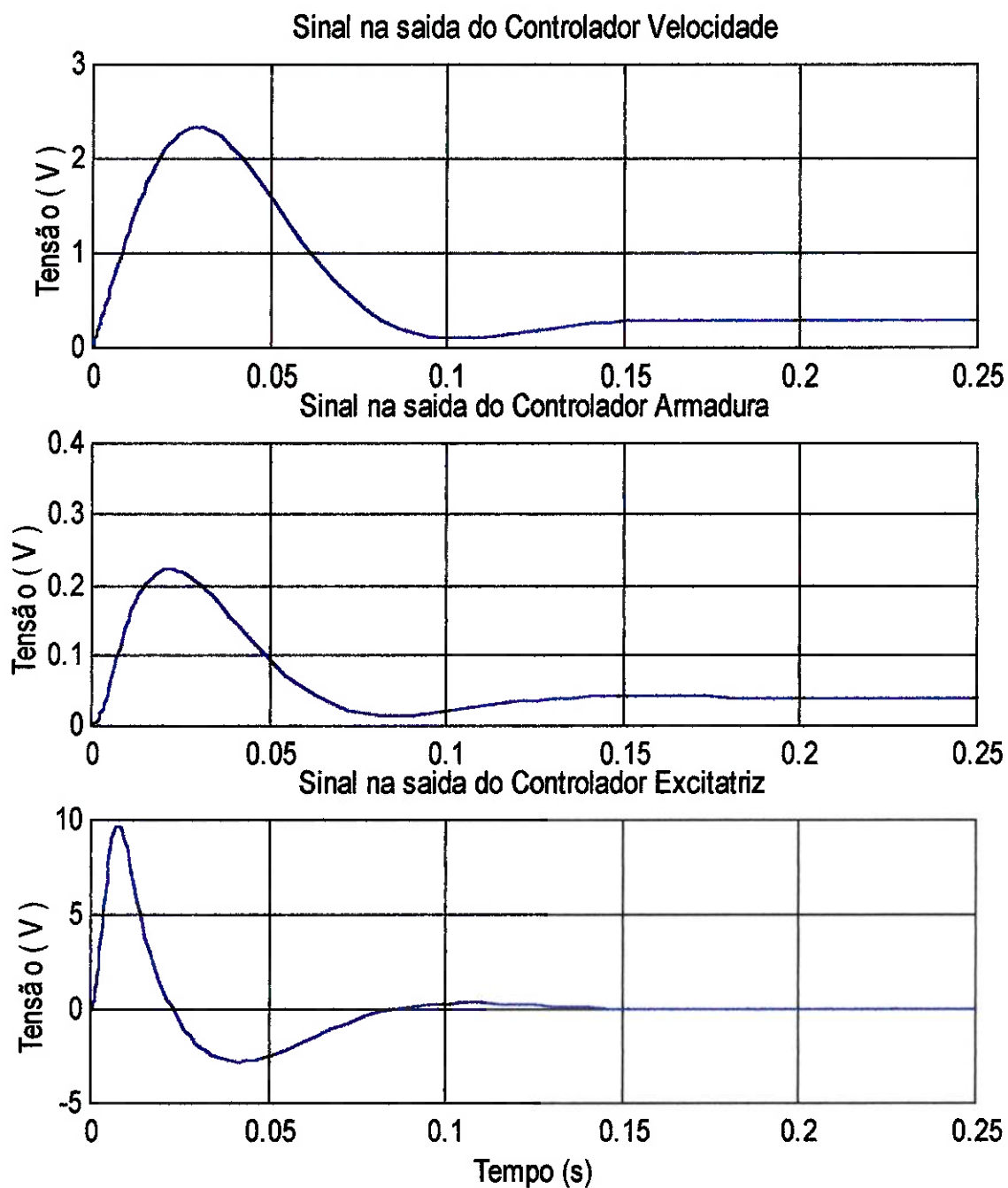
**SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE
UM SUBMARINO NUCLEAR**

Figura 10.6 : Sinais nas saídas dos controladores da malha da propulsão elétrica do submarino nuclear.

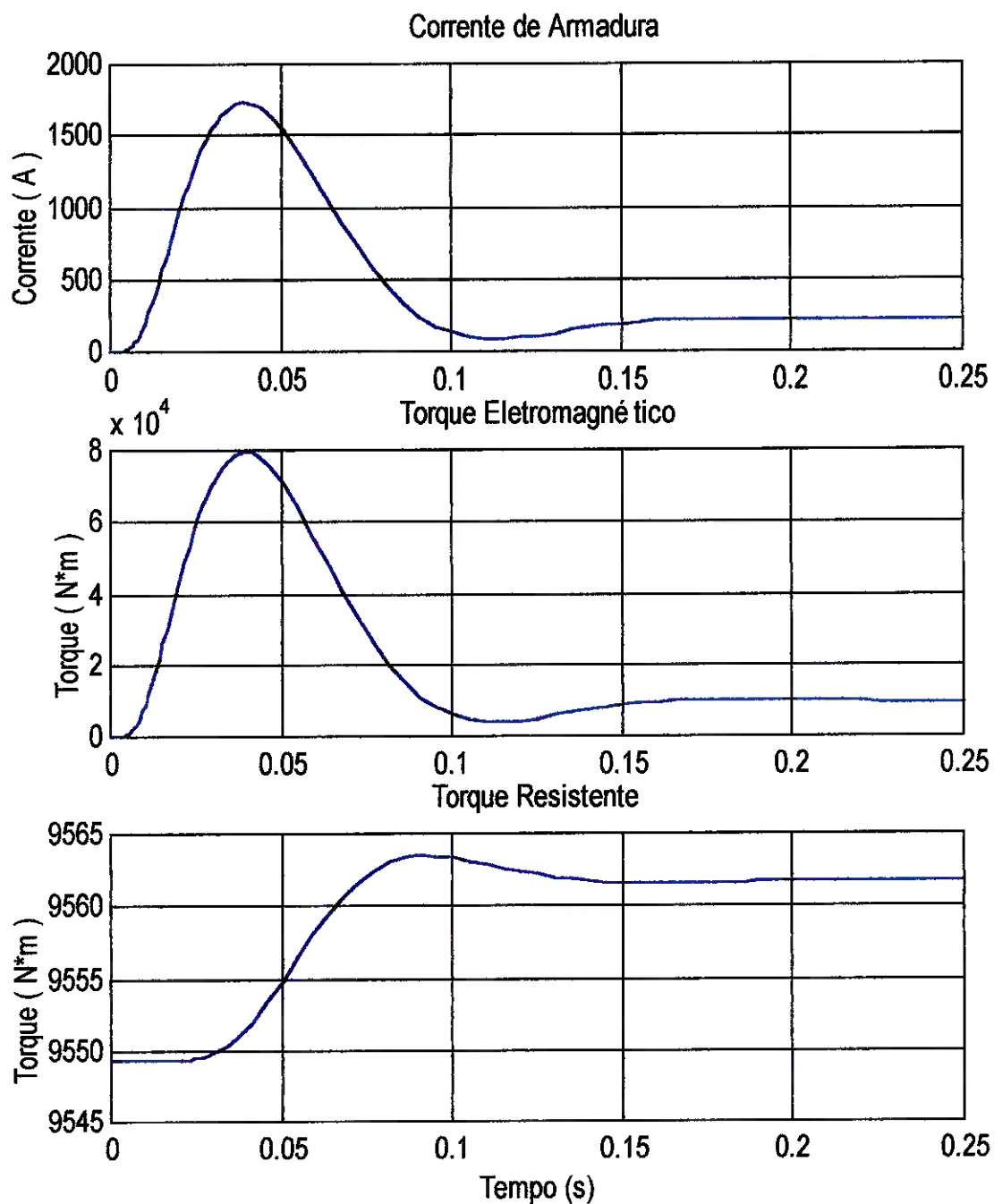
**SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE
UM SUBMARINO NUCLEAR**

Figura 10.7 : Corrente de Armadura, Torque Eletromagnético e torque Resistente.



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

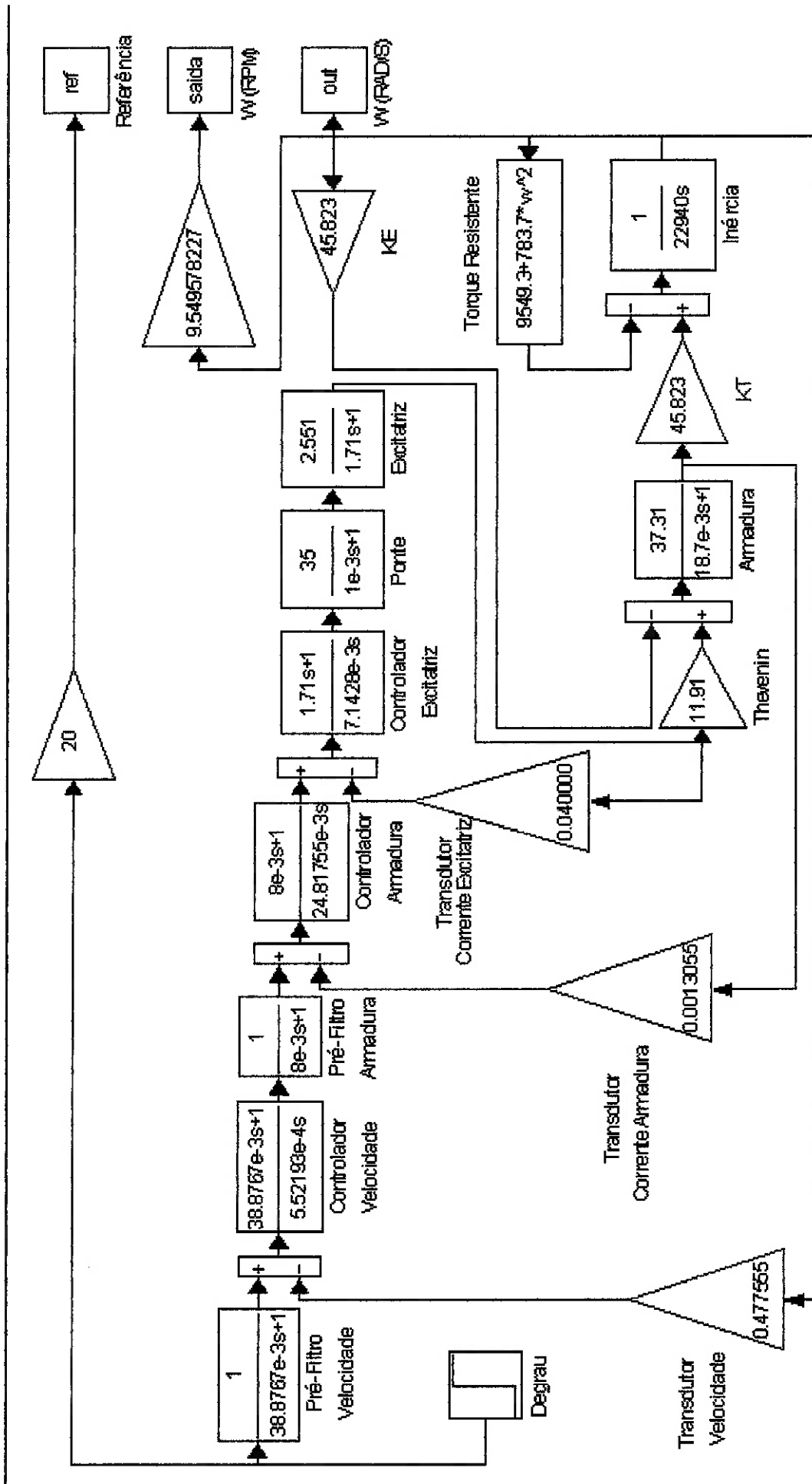


Figura 10.8 : Diagrama Ilustrativo da Propulsão Elétrica do Submarino Nuclear utilizado na simulação linear.



11 ANÁLISE DAS NÃO-LINEARIDADES

11.1 INTRODUÇÃO

Os itens anteriores apresentaram o estudo linear do acionamento e, portanto, a análise somente é válida para pequenas variações em torno de um ponto de operação. Neste capítulo será considerado nas simulações que o sinal de comando dos controladores é limitado entre ± 10 Volts, valores típicos quando se utilizam amplificadores operacionais. Todos os sinais serão monitorados para que nenhum componente apresente valores acima dos limites máximos tolerados.

11.2 ANÁLISE DO CONTROLADOR

O controlador será representado de uma forma um pouco diferente dos itens anteriores. Em todos os casos foi utilizado um controlador Proporcional-Integral e, neste capítulo, o valor proporcional será separado do valor integral sendo utilizado uma técnica que permite, no momento em que o circuito começa a saturar, inibir a parte integral, mantendo o ganho proporcional multiplicando o erro.

Um bloco do simulink (saturation) será acrescentado ao controlador para limitar os sinais entre $+10$ V e -10 V, ou seja, será considerado que os amplificadores operacionais dos controladores trabalham com valores de tensão de alimentação neste intervalo. O diagrama de blocos dado na figura 11.1 mostra o circuito que compõe o controlador proporcional-integral.



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

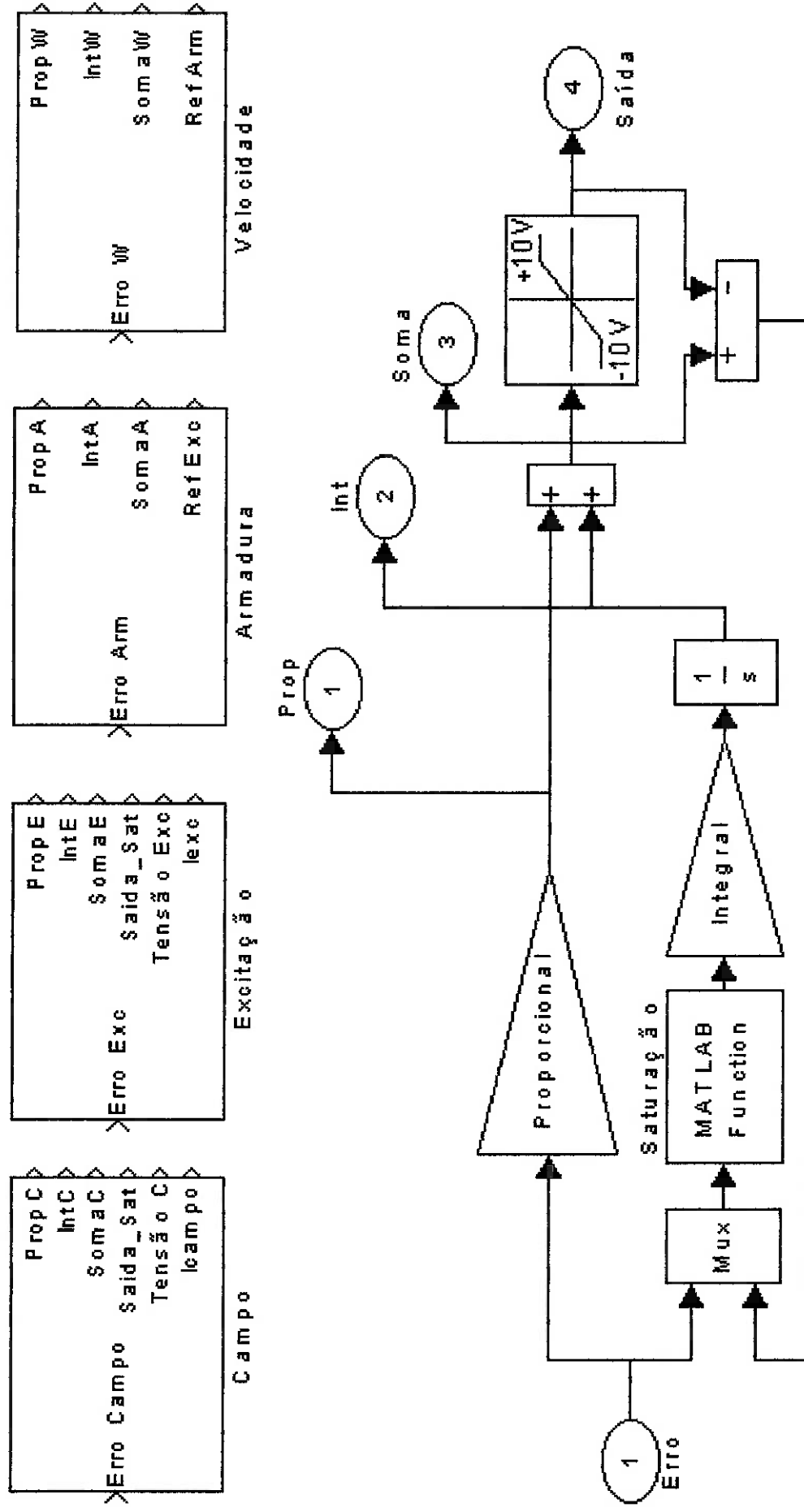


Figura 11.1 : Diagrama ilustrativo do circuito que compõe o controlador proporcional-integral (PI).



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

11.3 ANÁLISE DO CAMPO DO MEP-CC

O estudo do controlador de campo do motor DC é análogo ao controle da excitatriz do gerador síncrono. A discussão sobre o circuito de controle do campo do motor DC pode ser efetuada tendo em vista o diagrama de blocos dado na figura 11.2.

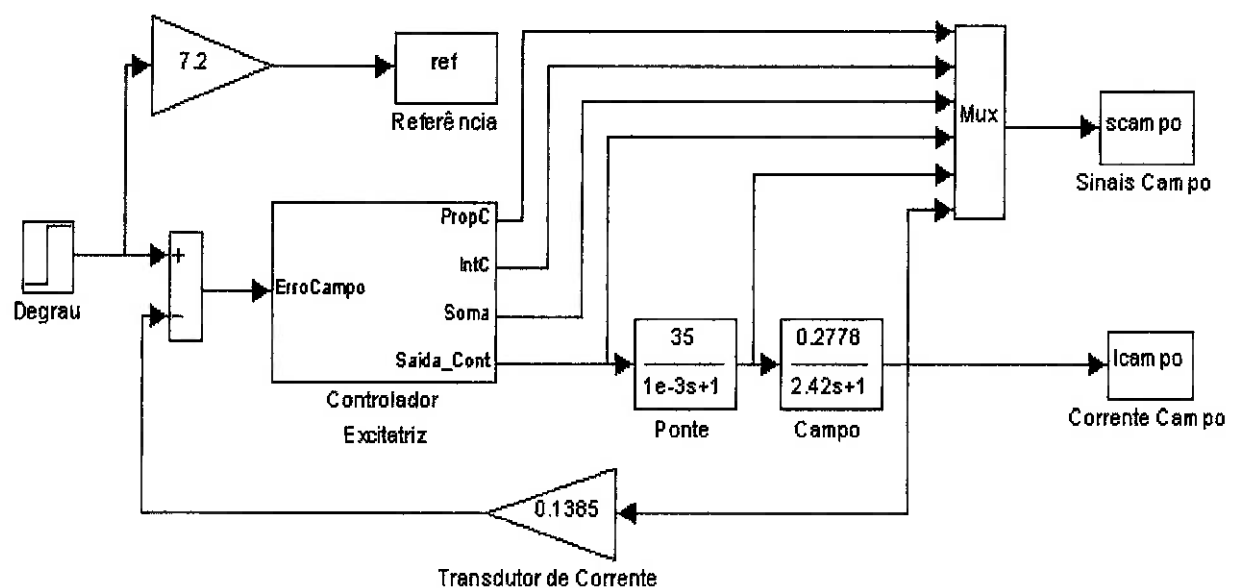


Figura 11.2: Diagrama esquemático da malha de controle de campo do motor DC

11.3.1 Observações preliminares sobre a malha de corrente de campo do Motor

Os blocos do diagrama acima, com exceção do controlador, são os mesmos definidos no capítulo 9 e valem as mesmas definições e valores encontrados.

O sinal de comando do controlador é limitado entre ± 10 Volts, valores típicos quando se utilizam amplificadores operacionais. Nesta condição, o amplificador de potência estará completamente "on" ou "off", aplicando a tensão da bateria diretamente no enrolamento de campo do motor DC.



11.3.2 Ajuste do controlador de corrente de campo do MEP-CC

O ajuste dos ganhos do controlador será feito de acordo com o "ótimo em amplitude" [7]. Como existem duas constantes de tempo na malha a ser controlada, T_{exc} e T_{ponte} o controlador utilizado será do tipo PI.

A idéia será alterar os valores do ganhos proporcional e integral até que a resposta fique de acordo com o desejado.

Várias simulações foram realizadas para se chegar a uma resultado satisfatório e definir a função de transferência (FT_{PI}) do controlador, que será:

$$FT_{PI} = \frac{[0.992 \cdot s + 1]}{0.2 \cdot s} \quad (11.1)$$

ou

$$FT_{PI} = \frac{5}{s} + 4.61 \quad (11.2)$$

O uso desta técnica de ajuste não exige a presença de um pré-filtro para a filtragem no sinal de referência a fim de evitar "overshoot" excessivo.

11.3.3 Resultados no domínio do tempo

Simulando o sistema linear no domínio do tempo para dois degraus de corrente de campo na referência foram obtidas as figuras 11.3. e 11.4.

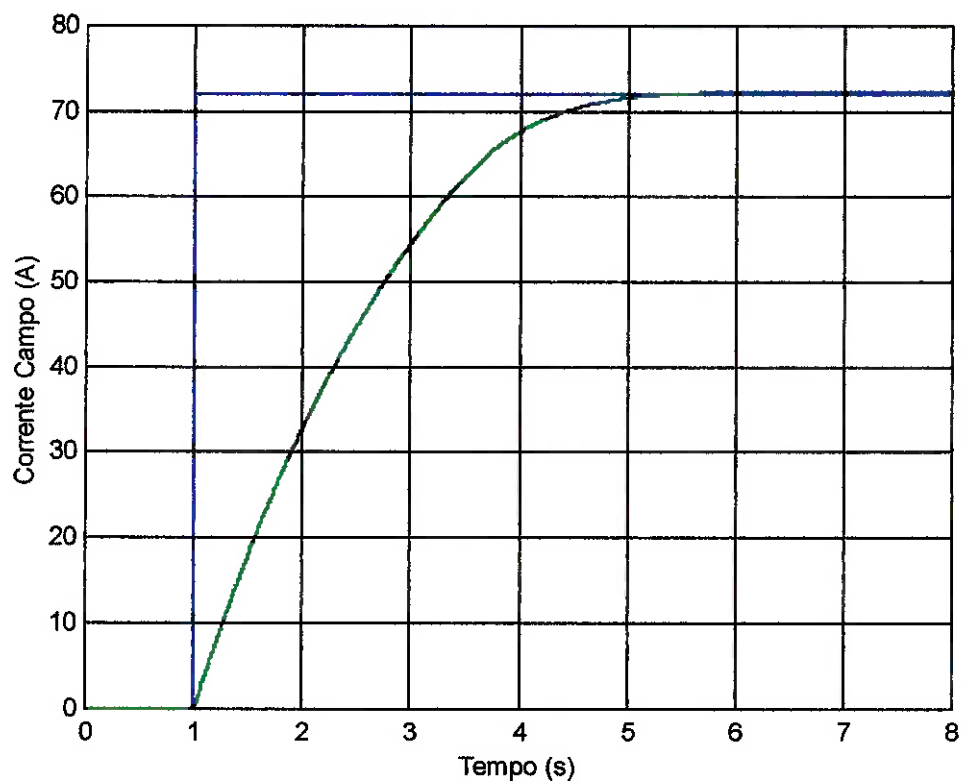
**SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE
UM SUBMARINO NUCLEAR**

Figura11.3: Resposta ao degrau (10 V ou 72.22 A) do sistema compensado.

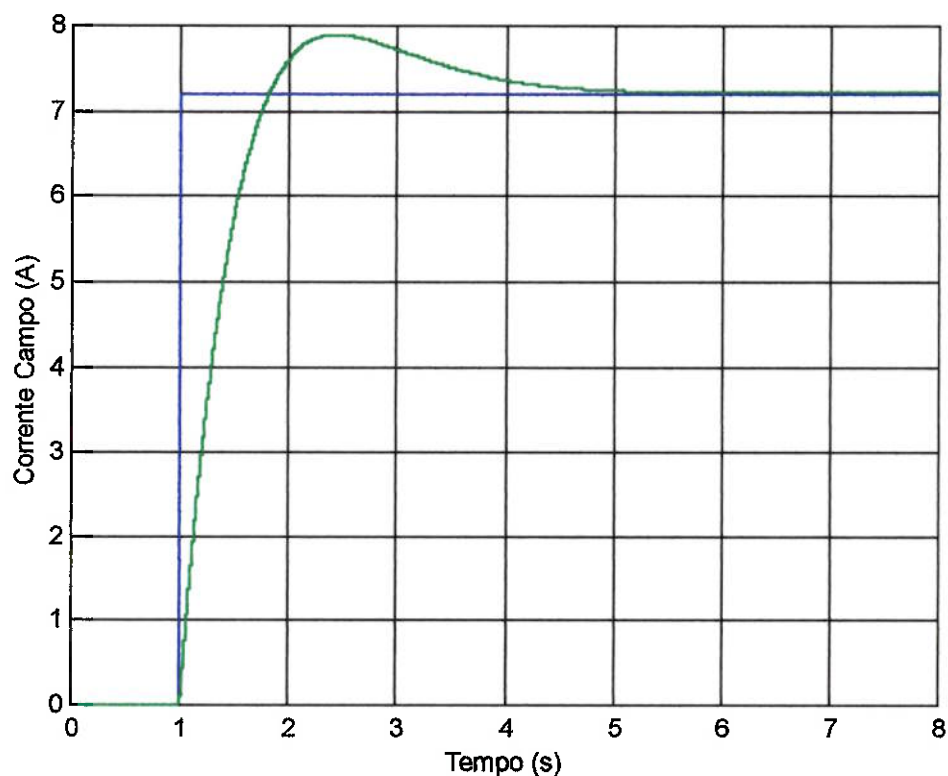


Figura 11.4 : Resposta ao degrau (1 V ou 7.222 A) do sistema compensado.



11.4 ANÁLISE DA EXCITATRIZ DO GERADOR SÍNCRONO

A discussão sobre o circuito de controle da excitatriz pode ser efetuada tendo em vista o diagrama de blocos dado na figura 11.5.

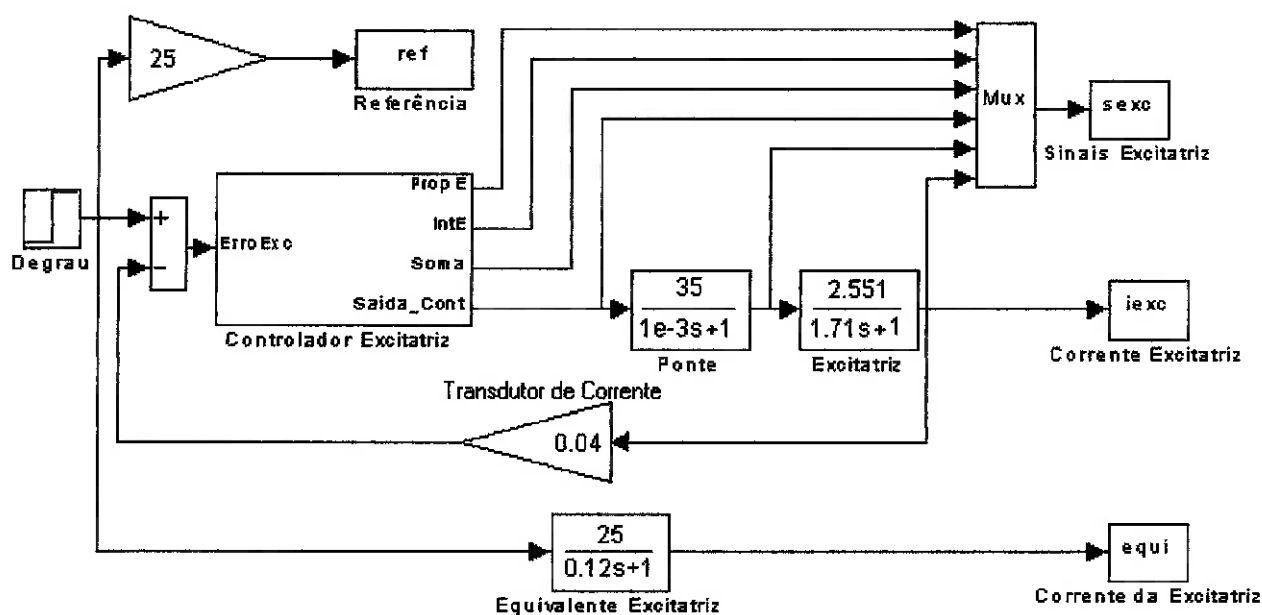


Figura 11.5: Diagrama esquemático da malha de controle da Excitatriz e Circuito Equivalente

11.4.1 Observações preliminares sobre a malha de corrente da excitatriz

Os blocos do diagrama acima, com exceção do controlador, são os mesmos definidos no capítulo 9 e valem as mesmas definições e valores encontrados.

O sinal de comando do controlador é limitado entre ± 10 Volts, valores típicos quando se utilizam amplificadores operacionais. Nesta condição, o amplificador de potência estará completamente "on" ou "off", aplicando a tensão da bateria diretamente nos terminais da excitatriz.



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

11.4.2 Ajuste do controlador de corrente da excitatriz

O ajuste dos ganhos do controlador será feito de acordo com o "ótimo em amplitude" [7]. Como existem duas constantes de tempo na malha a ser controlada, T_{exc} e T_{ponte} o controlador utilizado será do tipo PI.

A idéia será alterar os valores do ganhos proporcional e integral até que a resposta fique de acordo com o desejado.

Várias simulações foram realizadas para se chegar a uma resultado satisfatório e definir a função de transferência (FT_{PI}) do controlador, que será:

$$FT_{PI} = \frac{[0.101667 \bullet s + 1]}{16.67m \bullet s} \quad (11.3)$$

ou

$$FT_{PI} = \frac{60}{s} + 6.1 \quad (11.4)$$

O uso desta técnica de ajuste não exige a presença de um pré-filtro para a filtragem no sinal de referência a fim de evitar "overshoot" excessivo.

11.4.3 Resultados no domínio do tempo

Simulando o sistema no domínio do tempo para um degrau na referência foi obtido a figura 11.6.

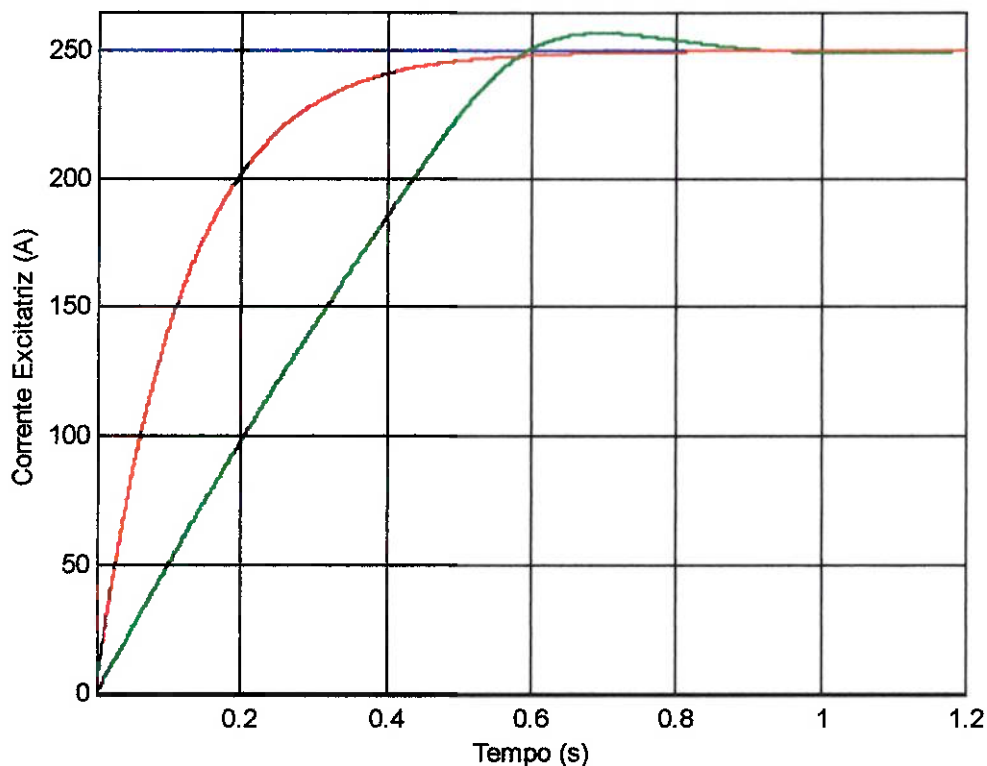
**SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE
UM SUBMARINO NUCLEAR**

Figura 11.6: Resposta (verde) ao degrau (azul) do sistema compensado, juntamente com a resposta obtida para o sistema equivalente simplificado (vermelho).

O sistema resultante pode ser representado por um sistema equivalente de 1ª ordem.

A função de transferência encontrada deste sistema equivalente é dada por:

$$FT_{EqExc}(s) = \frac{25}{[0.12 \bullet s + 1]} \quad (11.5)$$

Verifica-se na figura 11.6 que esta representação simplificada é, de certa forma, adequada. Esta representação será utilizada no ajuste da malha de corrente de armadura.



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

11.5 ANÁLISE DA MALHA DE CORRENTE DE ARMADURA DO MEP-CC

A discussão sobre o circuito de controle de corrente de armadura pode ser efetuada tendo em vista o diagrama de blocos dado na figura 11.7.

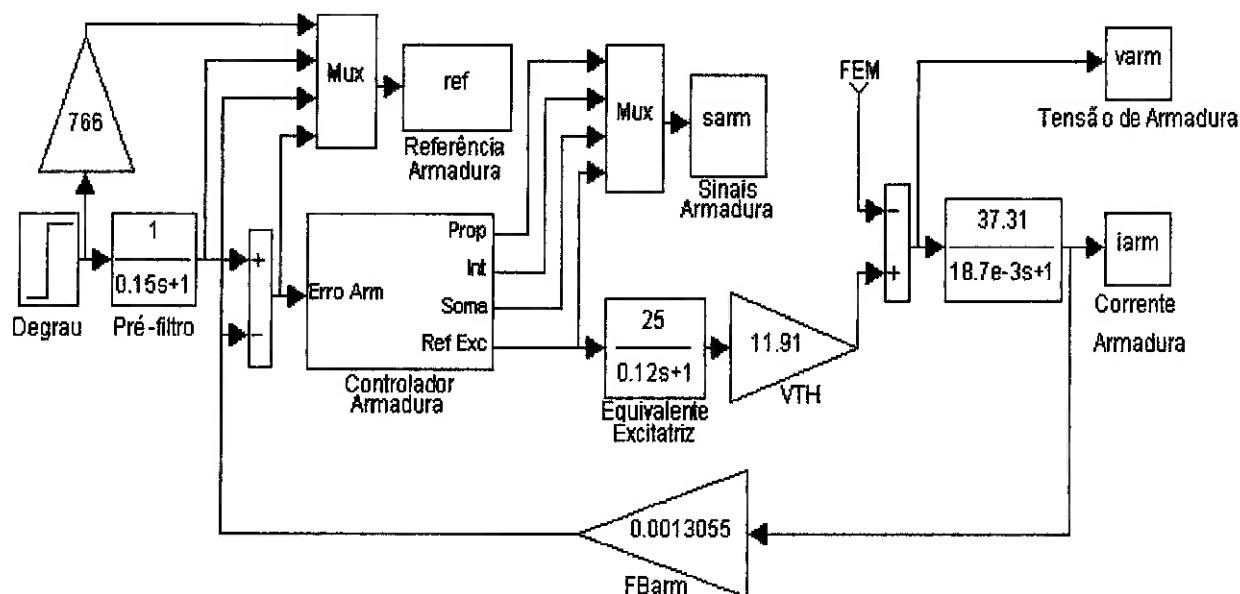


Figura 11.7: Diagrama esquemático da malha de controle de corrente de armadura do motor DC e o circuito equivalente.

11.5.1 Observações preliminares sobre a malha de corrente da Armadura

Os blocos do diagrama acima, com exceção do controlador, são os mesmos definidos no capítulo 9 e valem as mesmas definições e valores encontrados.

O sinal de comando do controlador é limitado entre ± 10 Volts, valores típicos quando se utilizam amplificadores operacionais.

O pré-filtro para a referência de corrente de armadura já foi incluído no diagrama, uma vez que esta malha será ajustada pelo critério do "ótimo simétrico".



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

11.5.2 Ajuste do controlador de corrente da armadura

O ajuste dos ganhos do controlador será feito de acordo com o "ótimo simétrico" [7]. pois, como foi visto, a FCEM do motor DC é uma variável independente (como perturbação externa).

Os valores da Malha da Armadura são os seguintes:

$$\begin{aligned}
 T_{eq} &= 0.12 \text{ s} \\
 T_A &= 18.7 \text{ ms} \\
 K_{eq} &= 25 \text{ A/V} \\
 K_A &= 37.31 \text{ A/V} \\
 K_G &= 11.91 \text{ V/A} \\
 R_{TH} &= 0.0193 \Omega \\
 R_A &= 7.5 \times 10^{-3} \Omega \\
 L_A &= 0.5 \times 10^{-3} \text{ H} \\
 FB_{arm} &= 0.0013055 \text{ V/A}
 \end{aligned} \tag{11.6}$$

Como existem duas constantes de tempo na malha a ser controlada, T_{eq} e T_A o controlador utilizado será do tipo PI.

Basicamente, a idéia deste tipo de ajuste (Ótimo Simétrico) é utilizar os seguintes conceitos:

$$\sigma = \text{Menor constante de tempo} = 18.7 \text{ ms} \tag{11.7}$$

$$\sigma_1 = 4 \times \sigma = 74.8 \text{ ms} \tag{11.8}$$

$$K_p = K_{eq} * K_G * K_A * FB_{arm} = 25 \times 11.91 \times 37.31 \times 0.0013055 = 14.50287 \tag{11.9}$$

$$T_y = 2 \times K_p \times \sigma = 58.01148 \text{ ms} \tag{11.10}$$

$$T_{PI} = T_c = \frac{T_y \times \sigma_1}{K_c \times T_A} = \frac{0.05801148 \times 74.8 \text{ ms}}{0.12} = 0.3381 \text{ s} \tag{11.11}$$

$$K_c \quad T_A \quad 0.12$$

Portanto, a função de transferência (FT_{PI}) do controlador será:

$$FT_{PI} = \frac{[0.0748 \bullet s + 1]}{0.3381 \bullet s} \tag{11.12}$$

ou

$$FT_{PI} = \frac{2.9577}{s} + 0.221236 \tag{11.13}$$



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

O uso desta técnica de ajuste exige a presença de um pré-filtro para a filtragem no sinal de referência a fim de evitar "overshoot" excessivo. Várias simulações foram realizadas para se encontrar o valor ideal para o pré-filtro. Chegou-se ao seguinte valor para a função de transferência do pré-filtro:

$$FT_{PRE} = \frac{1}{[0.16 \bullet s + 1]} \quad (11.14)$$

11.5.3 Resultados no domínio do tempo

A malha utilizada na simulação é apresentada na figura 11.9.

Simulando o sistema linear no domínio do tempo (com pré-filtro) para um degrau de corrente de armadura na referência foi obtido a figura 11.8. Nesta simulação foi utilizada a malha completa da excitatriz (e não a função de transferência equivalente).

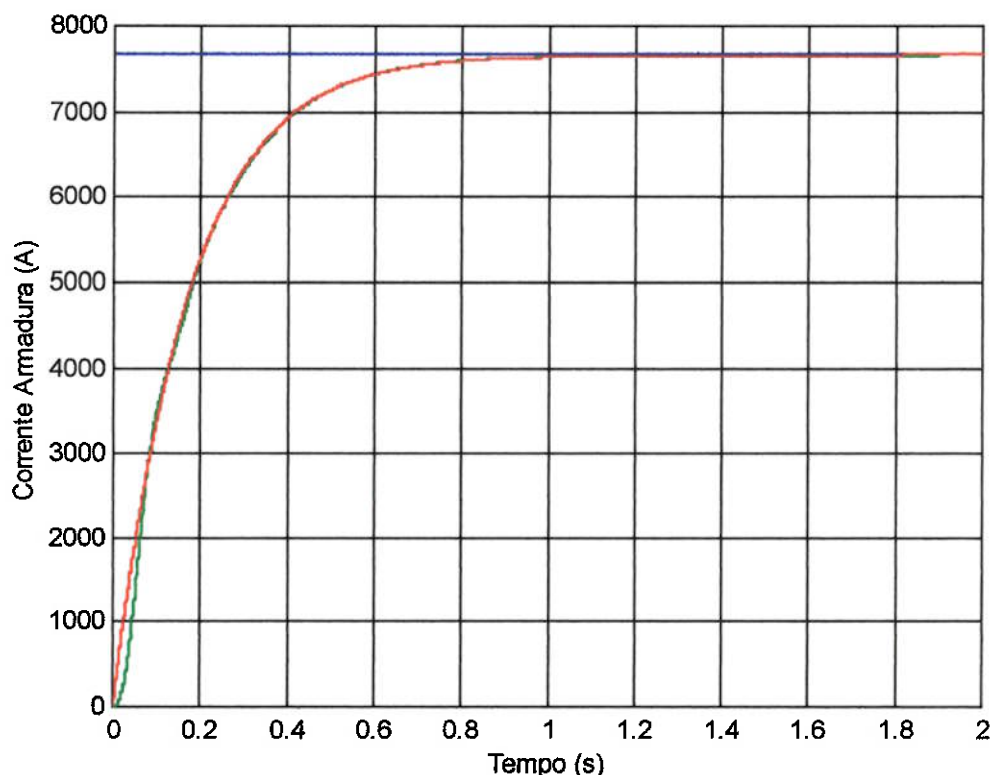
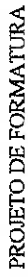


Figura 11.8: Resposta (verde) ao degrau (azul) do sistema compensado, juntamente com a resposta obtida para o sistema equivalente simplificado (vermelho).



O diagrama ilustra o controle de um motor de indução, dividido em duas partes principais: o controle de corrente de armadura e o controle de tensão de armadura.

Controle de Corrente de Armadura:

- A referência de corrente de armadura (i_{arm}^{ref}) é comparada com a corrente de armadura real (i_{arm}) para gerar o erro de corrente ($e_{i_{arm}}$).
- O erro de corrente é processado por um controlador de corrente, composto por uma ação proporcional ($K_p = 0.04$) e uma ação integral ($K_i = 0.0013055$).
- A saída do controlador de corrente é a referência de tensão de armadura (v_{arm}^{ref}).

Controle de Tensão de Armadura:

- A referência de tensão de armadura (v_{arm}^{ref}) é comparada com a tensão de armadura real (v_{arm}) para gerar o erro de tensão ($e_{v_{arm}}$).
- O erro de tensão é processado por um controlador de tensão, composto por uma ação proporcional ($K_p = 0.04$) e uma ação integral ($K_i = 0.0013055$).
- A saída do controlador de tensão é a referência de corrente de armadura (i_{arm}^{ref}), fechando o laço de controle.

Modelo do Motor:

- O modelo do motor é representado por um bloco de transferência que recebe a tensão de armadura (v_{arm}) e a corrente de armadura (i_{arm}) como entradas.
- A saída do modelo é a corrente de armadura real (i_{arm}).

Simulação:

- A simulação é realizada no software MATLAB/Simulink.
- Os resultados da simulação são exibidos em gráficos de tensão de armadura e corrente de armadura ao longo do tempo.

Página 110 de 121



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

O sistema resultante pode ser representado por um sistema equivalente de 1ª ordem. A função de transferência encontrada deste sistema equivalente é dada por:

$$FT_{EqExc}(s) = \frac{766}{[0.17 \cdot s + 1]} \quad (11.15)$$

Verifica-se na figura 11.8 que esta representação simplificada é adequada. Esta representação será utilizada no ajuste da malha de velocidade do motor DC.

11.6 ANÁLISE DA MALHA DE VELOCIDADE DO MEP-CC

Como foi visto anteriormente (capítulo 9) na equação de K_c (9.40) não existe dependência em relação ao ponto de operação do sistema mecânico (ou seja, independe de $B(\omega)$). Portanto, do ponto de vista do diagrama de blocos do controle de velocidade, isto equivaleria a ajustar o sistema simplificado dado na figura 11.10.

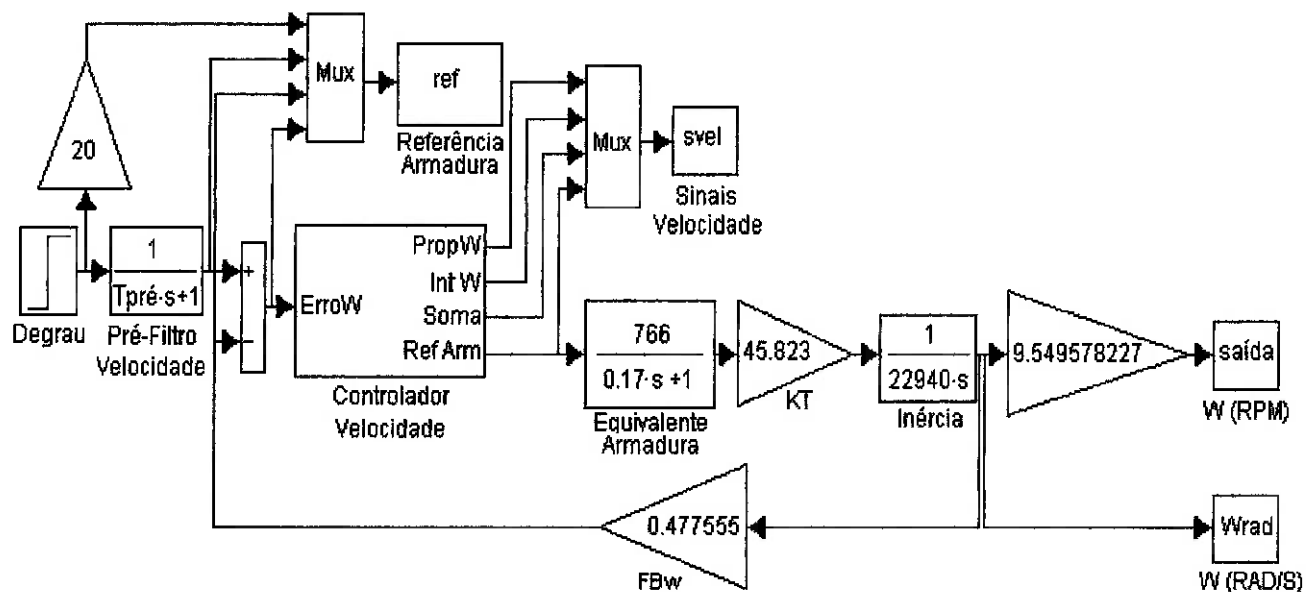


Figura 11.10: Diagrama simplificado usado no ajuste da malha de controle de velocidade do MEP-CC



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

11.6.1 Comentários em relação ao diagrama de controle da Velocidade do MEP

Os blocos do diagrama acima, com exceção do controlador, são os mesmos definidos no capítulo 9 e valem as mesmas definições e valores encontrados.

O sinal de comando do controlador é limitado entre ± 10 Volts, valores típicos quando se utilizam amplificadores operacionais.

11.6.2 Ajuste do controlador de velocidade do MEP-CC

O ajuste dos ganhos do controlador será feito de acordo com o "ótimo simétrico" [7].

Os valores da Malha de Velocidade são os seguintes:

$$\begin{aligned}K_{eq} &= 766 \text{ A} / \text{V} \\K_T &= 45.823 \text{ N.m} / \text{A} \\J &= 22940 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \\T_{eq} &= 0.17 \text{ s} \\FB_{\omega} &= 0.477555 \text{ V} / (\text{rad/s})\end{aligned}\tag{11.16}$$

Como existem duas constantes de tempo na malha a ser controlada, T_{eq} e J o controlador utilizado será do tipo PI.

Utilizando os conceitos de Otimização em Simetria, teremos:

$$\sigma = \text{Menor constante de tempo} = 0.17 \text{ s}\tag{11.17}$$

$$\sigma_1 = 4 \times \sigma = 0.68 \text{ s}\tag{11.18}$$

$$K_p = K_{eq} * K_T * FB_{\omega} = 766 \times 45.823 \times 0.477555 = 16762.38\tag{11.19}$$

$$T_y = 2 \times K_p \times \sigma = 5699.2092 \text{ s}\tag{11.20}$$

$$T_{PI} = \frac{T_C}{K_C} = \frac{T_y \times \sigma_1}{T_A} = \frac{5699.2092 \times 0.68}{22940} = 0.16893907 \text{ s}\tag{11.21}$$

**SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE
UM SUBMARINO NUCLEAR**

Portanto, a função de transferência (FT_{PI}) do controlador será:

$$FT_{PI} = \frac{[0.68 \bullet s + 1]}{0.1689 \bullet s} \quad (11.22)$$

ou

$$FT_{PI} = \frac{5.9193}{s} + 4.02512 \quad (11.23)$$

O uso desta técnica de ajuste exige a presença de um pré-filtro para a filtragem no sinal de referência a fim de evitar "overshoot" excessivo. Várias simulações foram realizadas para se encontrar o valor ideal para o pré-filtro, chegando-se ao seguinte valor para a função de transferência :

$$FT_{PRE} = \frac{1}{[1.4 \bullet s + 1]} \quad (11.24)$$

11.6.3 Resultados no domínio do tempo

A malha utilizada na simulação é apresentada na figura 11.13.

Simulando o sistema linear no domínio do tempo (com pré-filtro) para dois degraus de velocidade na referência foram obtidos as figuras 11.11 e 11.12. Nesta simulação foi utilizada a malha completa da armadura (e não a função de transferência equivalente). A figura 11.11 apresenta o resultado da simulação para um degrau de 10 V ou 200 RPM na referência. A figura 11.12 apresenta o resultado para um degrau de 5 V ou 100 RPM na referência.



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

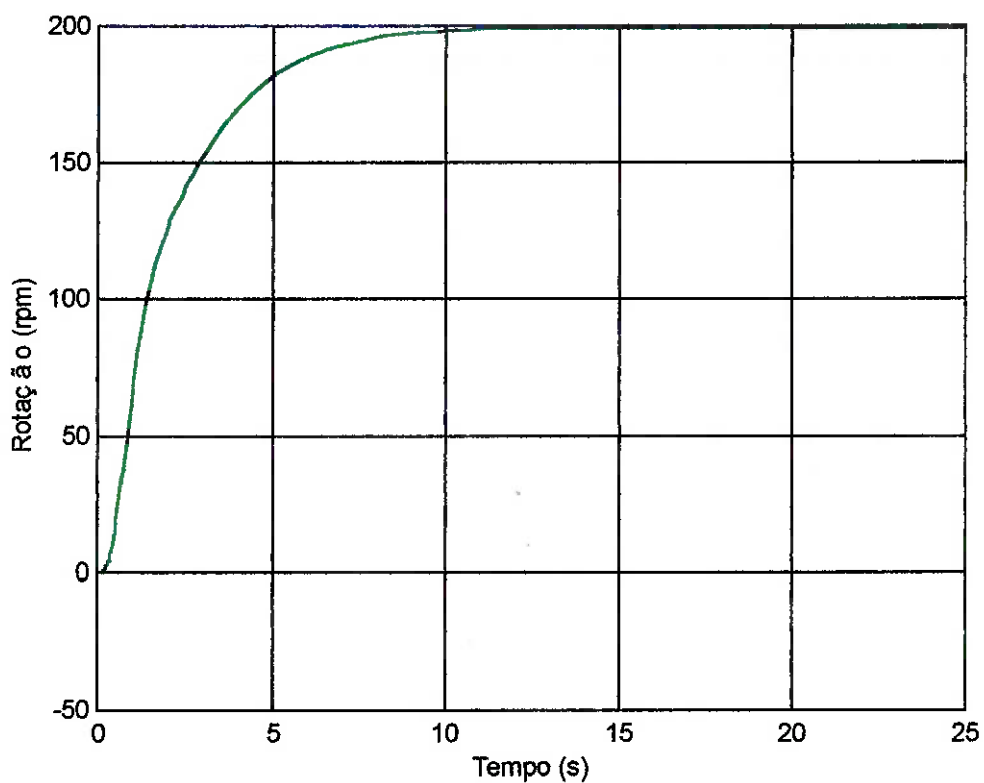


Figura 11.11: Resposta ao degrau (10 V) para a malha de velocidade.

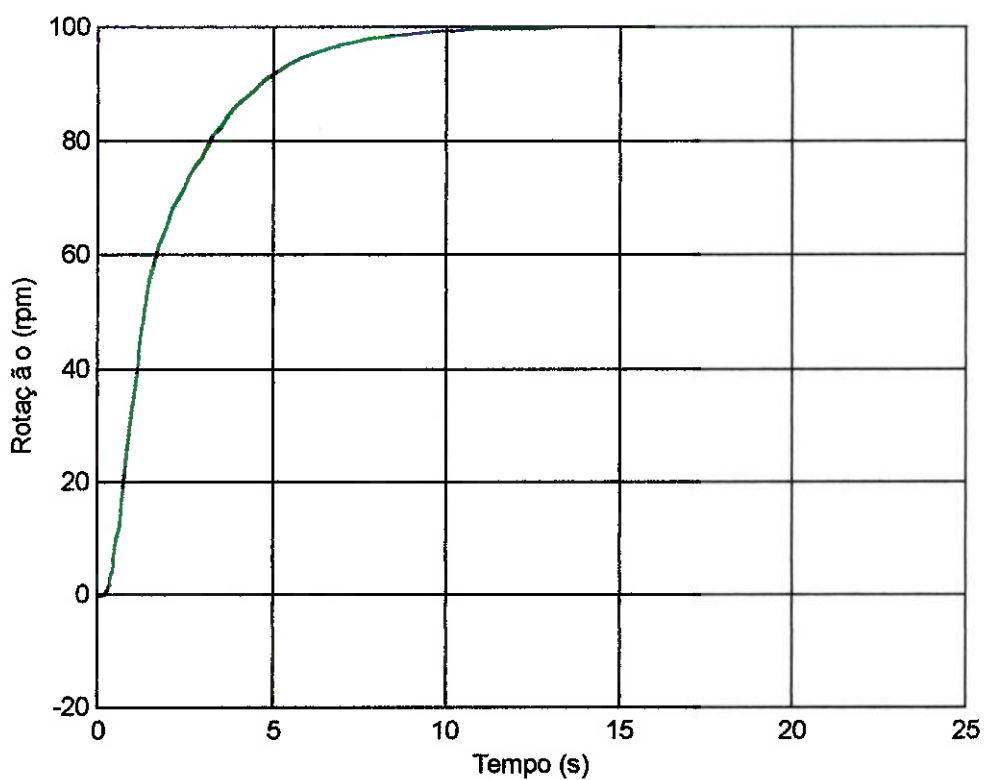


Figura 11.12: Resposta ao degrau (5 V) para a malha de velocidade.

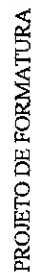
[illegible]

Figura 11.13 : Diagrama ilustrativo da planta elétrica do submarino nuclear considerando-se a saturação.



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

11.7 SIMULAÇÃO FINAL DA PLANTA ELÉTRICA

As figuras a seguir são resultados da simulação da propulsão elétrica, levando-se em conta a limitação de ± 10 V . A figura 11.13 mostra o diagrama completo utilizado na simulação.

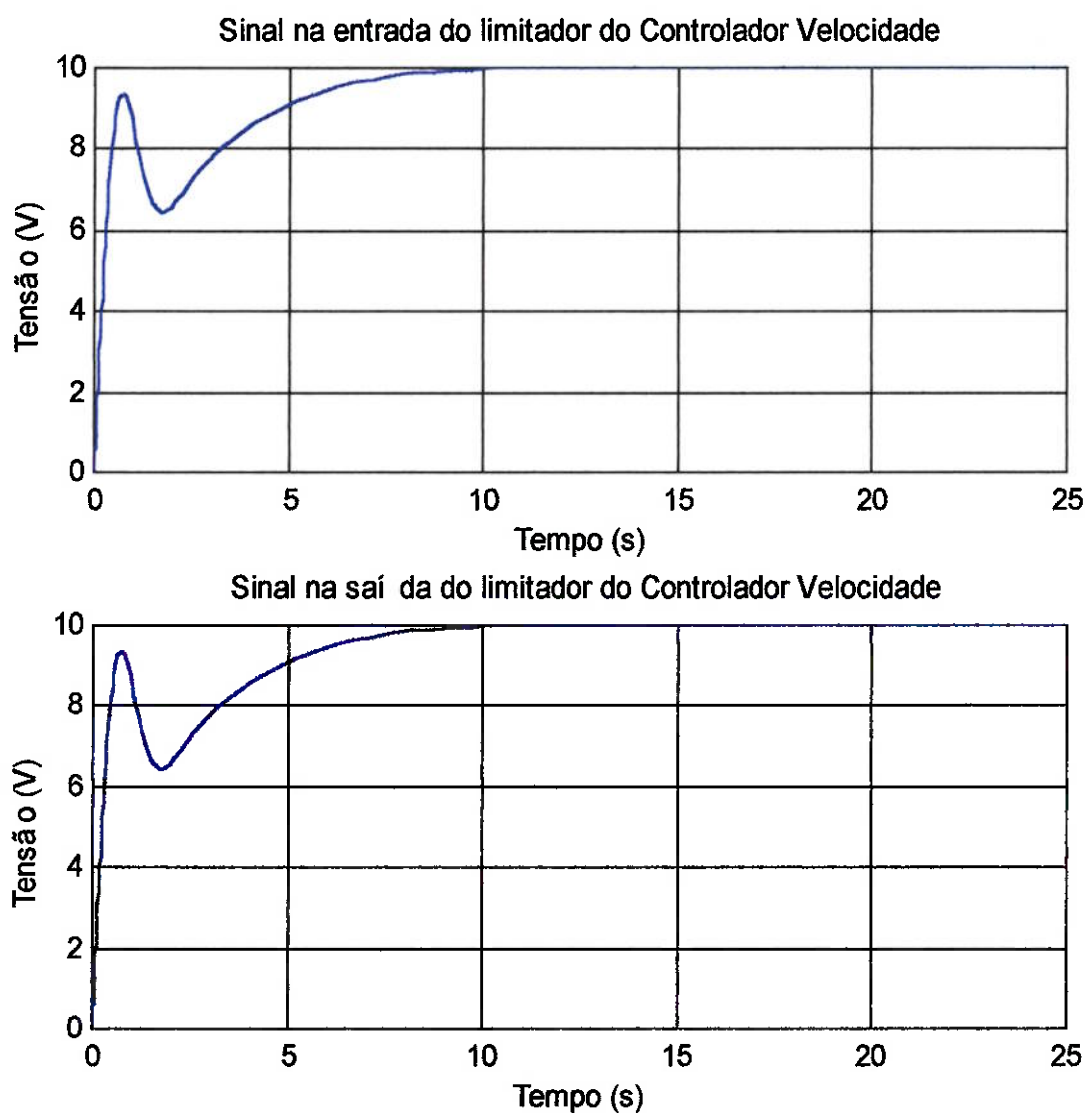


Figura 11.14: Sinal na entrada e na saída do limitador do Controlador de Velocidade.



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

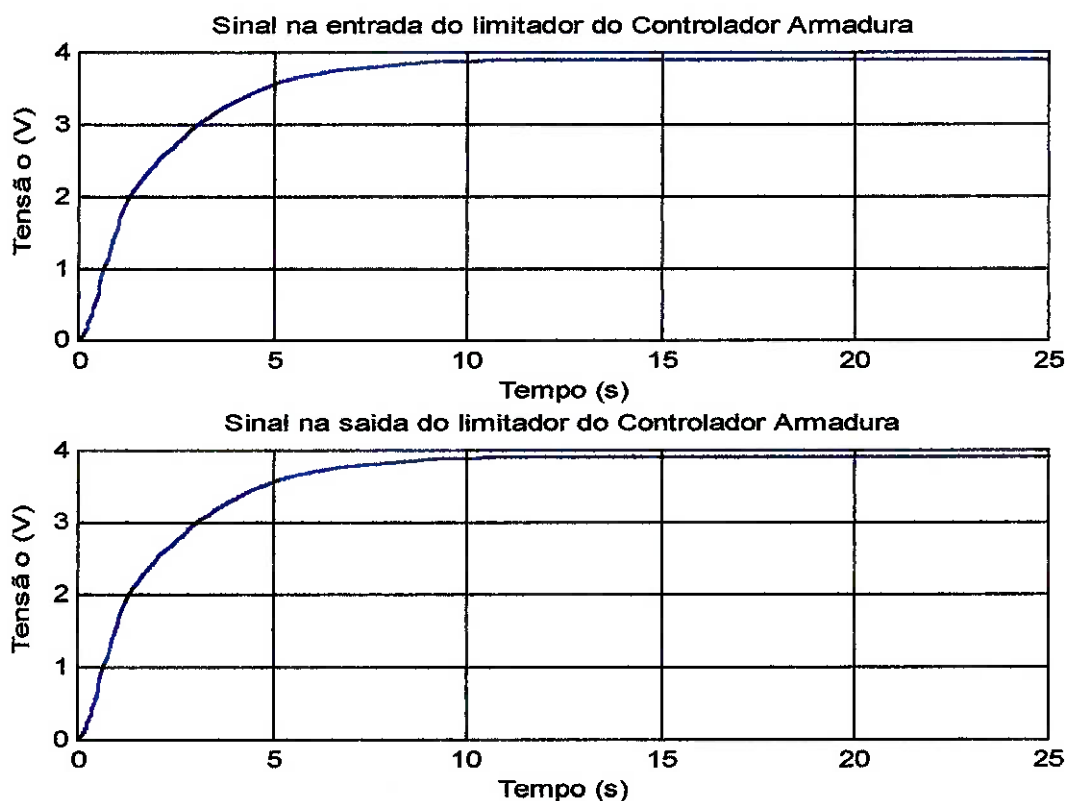


Figura 11.15: Sinal na entrada e na saída do limitador do Controlador de Armadura.

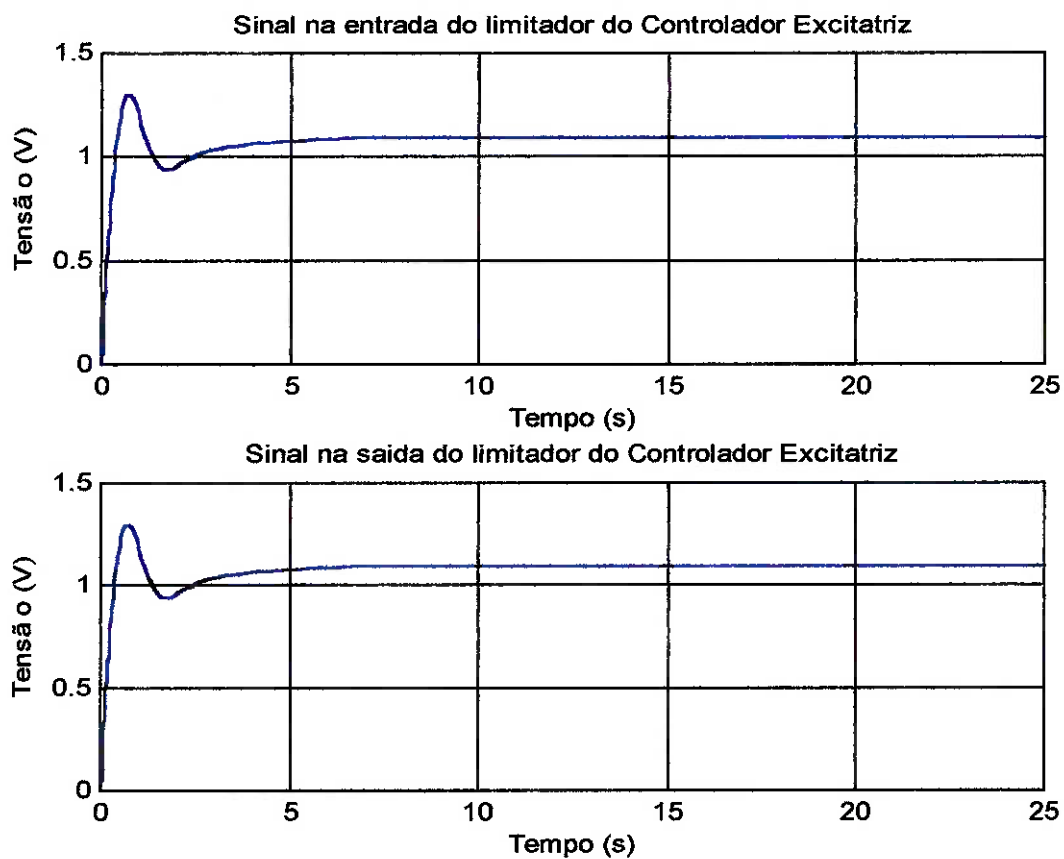


Figura 11.16: Sinal na entrada e na saída do limitador do Controlador da Excitatriz.



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

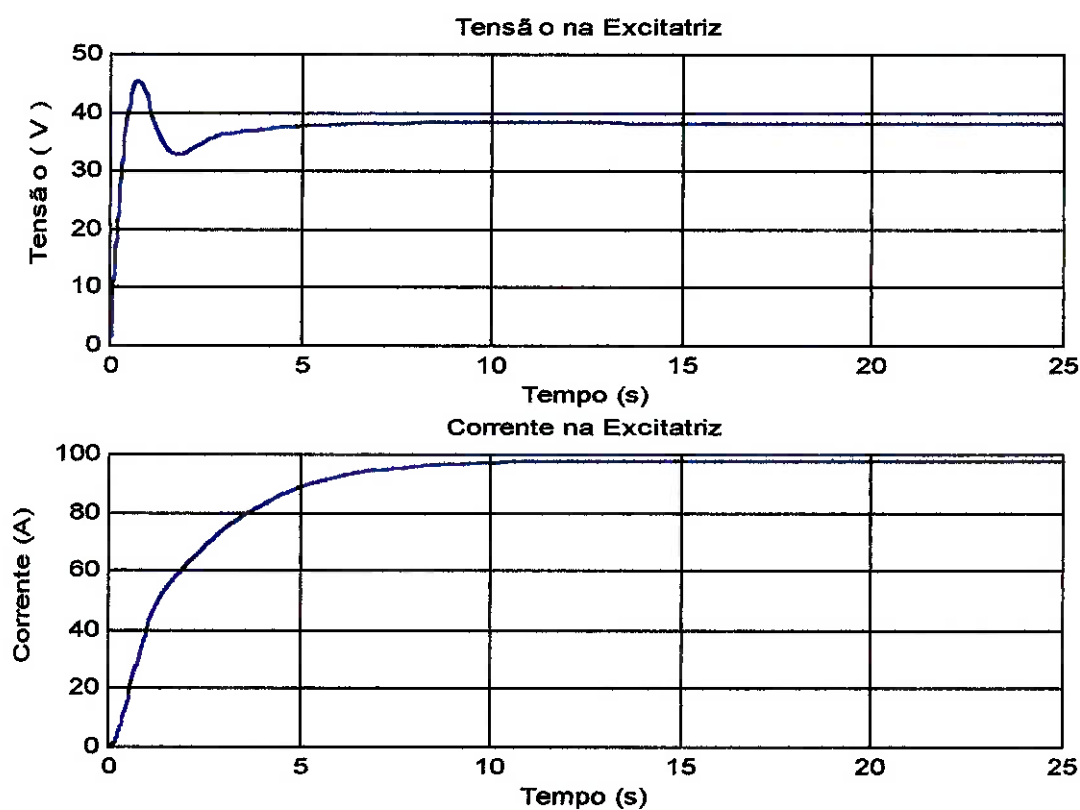


Figura 11.17: Tensão e Corrente na Excitatriz

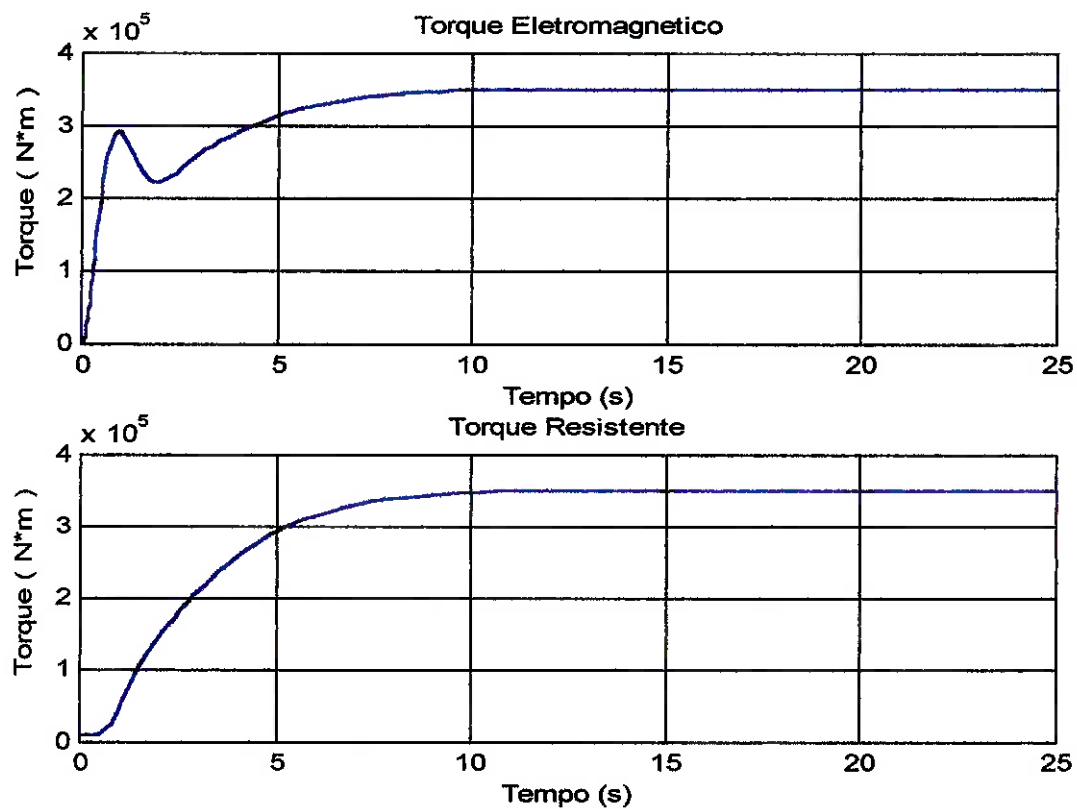


Figura 11.18: Torque Eletromagnético e Torque resistente.



SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE UM SUBMARINO NUCLEAR

12 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

O projeto ficou dividido em quatro partes bem definidas: descrição da propulsão elétrica, equacionamento, modelamento linear do acionamento e modelamento não-linear do acionamento. A descrição da propulsão elétrica está bem detalhada e isto facilitou, em muito, o eficiente equacionamento de toda a planta elétrica. O modelamento foi a parte mais complexa do projeto mas, a forma como foi desenvolvido, possibilitou um crescente domínio da teoria e, também, do software Matlab/Simulink, culminando como resultado as diversas malhas desenvolvidas, as figuras explicativas e, principalmente, os gráficos apresentados nas páginas precedentes.

A simulação para pequenas variações na velocidade do submarino foi apresentada a partir do modelamento linear da planta propulsora e desconsiderando a limitação (± 10 V) dos amplificadores operacionais dos controladores (PI). Embora não se tenha gráficos da saída dos controladores, elas foram monitoradas e os valores de referência aplicados (degraus) não provocam a saturação destes componentes. Isso quer dizer que o modelamento está correto e de acordo com as expectativas.

A simulação não-linear do acionamento mostra o submarino acelerando, a partir do repouso, em aproximadamente quinze segundos, o que está de acordo com as especificações do MEP-CC. Os gráficos do item 11.7 mostram que o modelamento está correto pois, para uma variação do repouso à nominal não há saturação dos componentes que compõem a planta propulsora do submarino nuclear.

**SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE
UM SUBMARINO NUCLEAR**

13 CONCLUSÃO

Ao término deste projeto que consumiu aproximadamente dez meses de intermináveis horas de exaustiva dedicação, quer na Escola Politécnica, quer em casa, tenho certeza que estou apresentando um resultado que me deixa orgulhoso e que atendeu plenamente todas às expectativas que foram feitas durante o seu início. Tecnicamente, tenho certeza que atingi a maior parte dos objetivos propostos. Infelizmente não foram todos, por contingências que sempre surgem. Mas o que foi mais importante foi a oportunidade de testemunhar o desenvolvimento e a implementação de um projeto de porte razoável (para alunos de graduação) desde a coleta de informações, o equacionamento, o modelamento, as simulações, até a sua ansiosamente esperada conclusão. Neste período foram inúmeras as dúvidas quanto aos caminhos a seguir, a definição de metas e critérios. Convivi com problemas que sempre ocorrem em desenvolvimentos de projetos semelhantes e que são absolutamente imprevisíveis e exigem muito mais do que conhecimento técnico. Exigem desenvoltura, bom senso, criatividade e, por que não dizer, "muito suor", para serem resolvidos. Por fim, chego ao término do curso com a mais firme das convicções de que tudo que foi aprendido efetivamente se converteu em ferramenta de trabalho para os futuros desafios que a carreira exigirá e, mais do que isso, que a fórmula do sucesso profissional se compõe de cada uma das pequenas coisas que foram aprendidas durante este período na USP.



**SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DA PROPULSÃO ELÉTRICA DE
UM SUBMARINO NUCLEAR**

14 BIBLIOGRAFIA

- [1] SIEMENS, Proposta Técnica, Licitação 0397/87.

- [2] LOBOSCO, ORLANDO S.; GOLDEMBERG, CLOVIS; ROSA, PAULO LA;
COPELIOVITCH, SIMÃO; LEBENZSTAIN, LUIZ, Modelamento da Planta de
Propulsão (COPESP) ; Relatório Final, PMQ.00.RT.03 , IEE-USP, 1994.

- [3] LOBOSCO, ORLANDO S. ; GOLDEMBERG, CLOVIS ; ROSA, PAULO LA;
COPELIOVITCH, SIMÃO; KAISER,WALTER ; Conversor de campo do Gerador e
Interface (COPESP) ; Relatório , PMQ.00.RT.01 , IEE-USP, 1993.

- [4] MATLAB/SIMULINK, Manual.

- [5] PSCAD/EMTDC e ATP, Manuais.

- [6] POWER SYSTEM BLOCKSET FOR USE WITH SIMULINK, Manual, primeira
versão.

- [7] LEONHARD, WERNER , Introduction to Control Engineering and Linear Systems.