



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUI
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**EMULAÇÃO DE TURBINA HIDRÁULICA VIA MOTOR CC
PELO CONTROLE EM ALOCAÇÃO POLINOMIAL RST**

JOÃO FERREIRA DA SILVA FILHO

**TUCURUI - PARÁ
MAIO- 2012**

JOÃO FERREIRA DA SILVA FILHO

EMULAÇÃO DE TURBINA HIDRÁULICA VIA MOTOR CC PELO CONTROLE EM ALOCAÇÃO POLINOMIAL RST

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentada ao colegiado da Faculdade de Engenharia Elétrica do Campus Universitário de Tucuruí da Universidade Federal do Pará como requisito final de avaliação para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. MSc. Raphael Barros Teixeira

**TUCURUÍ – PARÁ
MAIO – 2012**

JOÃO FERREIRA DA SILVA FILHO

EMULAÇÃO DE TURBINA HIDRÁULICA VIA MOTOR CC PELO CONTROLE EM ALOCAÇÃO POLINOMIAL RST

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentada ao colegiado da Faculdade de Engenharia Elétrica do Campus Universitário de Tucuruí da Universidade Federal do Pará como requisito final de avaliação para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

BANCA EXAMINADORA
23/05/2013

Prof. Msc. Raphael Barros Teixeira
Universidade Federal do Pará – Campus Universitário de Tucuruí
Orientador

Dr. Domingos Sávio das Virgens Alves
Universidade Federal do Pará – Campus Universitário de Tucuruí
Membro da Banca

Prof. Msc. Ewerton Ramos Granhen
Universidade Federal do Pará – Campus Universitário de Tucuruí
Membro da Banca

Eng. Eletricista Nielson Miranda Farias
Grupo Eletrobrás – Eletronorte
Membro da Banca

**TUCURUÍ – PARÁ
MAIO – 2012**

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUI FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

TÍTULO DO TRABALHO
EMULAÇÃO DE TURBINA HIDRÁULICA VIA MOTOR CC PELO CONTROLE EM ALOCAÇÃO POLINOMIAL RST





DISCENTES	MATRÍCULA
JOÃO FERREIRA DA SILVA FILHO	08134002018

BANCA EXAMINADORA	CONDIÇÃO
1. Prof. MsC. Raphael Barros Teixeira	Orientador
2. Eng. Nielson Miranda Farias Eletronorte - Eletronorte	Membro
3. Prof. Dr. Domingos Sávio das Virgens Alves	Membro
4. Prof. MsC. Ewerton Ramos Granhen	Membro

Data da Defesa: 23/05/2013	Hora de Início: 15:00h	Hora de Término: 17:00
----------------------------	------------------------	------------------------

Critérios	Nota dos Avaliadores			
	1	2	3	4
Trabalho escrito (Gramática, clareza, etc.)	9,0	9,0	8,0	9,0
Conteúdo Técnico	10,0	9,0	10,0	10,0
Sequência Lógica de Apresentação	10,0	10,0	10,0	10,0
Administração do tempo	10,0	10,0	10,0	9,0
Capacidade de expressão oral	10,0	10,0	10,0	10,0
Domínio do tema	10,0	10,0	10,0	10,0
Média por avaliador	9,8	9,7	9,7	9,7
Média Final	9,7			
Conteúdo Final				

Tucuruí – Pará, 23/05/2013

 Orientador	 Membro
 Membro	 Membro

Dedico este trabalho:

À minha amadíssima mãe Maria, que tanto sacrifício fez para que eu chegasse até aqui. Como eu poderei recompensa-la? Farei como o Perfeito me ordena, honrarei a senhora.

À minha espontânea irmã Lidiane, meu sereno cunhado-irmão Lázaro, minhas sobrinhas Eduarda e Vitória, joias que alegam nossa família.

A toda a minha família.

E à minha querida UMP (União de Mocidade Presbiteriana), que foi a âncora que o Senhor usou para que o mar revolto do meu coração junto aos tufões do mundo não me fizesse perder do meio dos justos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, sobre tudo, ao Deus Triúno, pois foi Ele quem me criou para glorifica-Lo. E quando em rebeldia insana o abandonei e busquei minha própria glória, Deus Pai planejou o meu resgate. Enviou o resgatador, Jesus Cristo o Deus Filho, que com doce e irresistível voz me chamou ao arrependimento e obediência, tendo pago cabalmente minha eterna e infernal dívida. E ainda que eu esteja manchado pela rebeldia, está comigo o Deus Espírito Santo, que me consola e me mantém são em minha jornada até a eternidade.

Agradeço a mulher mais forte que já conheci, minha mãe Maria. Sei de muitos, mas certamente não de todos, os desafios e sofrimentos que ela superou para que eu pudesse viver e chegar até aqui.

Agradeço a minha “paciente”, (risos), irmã Lidiane que me ensinou a contar até 100 já na 3ª série. Sem isso, eu certamente não teria chegado até aqui.

Agradeço ao meu orientador o professor Msc. Raphael Barros Teixeira pela disposição motivadora diante das dificuldades encontradas na construção deste trabalho. E também pelo esforço para encontrar tempo para esta orientação em meio a tantas responsabilidades.

*“Feliz o homem que acha sabedoria e o
homem que adquire conhecimento.”*
Provérbios 3.13

RESUMO

Desenvolve-se nesse trabalho uma estratégia de controle digital do motor CC (Corrente Contínua) para a emulação de uma turbina hidráulica do tipo Francis. Nisso, pretende-se cumprir uma etapa no processo de construção de uma Unidade Hidro Geradora (UGH) em escala reduzida, onde será possível o estudo no processo de geração de energia.

Apresenta-se uma descrição geral de unidade hidro geradora dando ênfase no processo de transformação da energia e destacando a turbina hidráulica e a máquina síncrona.

Então para atender o escopo do trabalho, desenvolve-se a modelagem matemática do motor CC em PU (por unidade), onde se faz considerações físicas e chega-se ao modelo utilizado para estratégia de controle.

Também se modela a turbina hidráulica, linear e não linear, obtendo uma função de transferência, em PU, que será responsável por gerar o sinal de referência de potência mecânica que será seguido pelo motor CC após atuação do controlador digital.

Para o controle digital, utiliza-se a estratégia de alocação polinomial na estrutura canônica RST (Regulação, Sensibilidade e Rastreamento). Desenvolve-se o conceito que define essa estrutura e projeta-se o controlador para a planta do motor modelada do motor CC.

Finalmente, consolida-se a proposta apresentando uma simulação em MATLAB 2010 – SIMULINK, que apresenta a turbina hidráulica modelada, o controlador digital RST e o motor CC em pu. Nessa simulação fica comprovada a viabilidade da emulação da turbina hidráulica por um motor CC, através de testes simulando a tomada de carga e a variação de velocidade em uma unidade hidro geradora.

Palavras-chaves: regulação de velocidade, controle digital, alocação polinomial, estrutura canônica RST, turbina hidráulica, motor CC.

ABSTRACT

This work develops a digital control strategy of DC (Direct Current) engine for emulation of a hydraulic turbine Francis type. It is intended to fulfill a step in the process of building a Hydro Generating Unit (UGH) on a reduced scale, where it will be possible to study the process of energy generation.

It presents an general description of hydro generating unit emphasizing the process of transformation of energy and highlighting the hydraulic turbine and the synchronous machine.

So to understand the scope of the work, It was developed the mathematical modeling of the CC engine in PU (by unit), which makes physical considerations and it arrives at the model used for control strategy.

It also models the hydraulic turbine, linear and nonlinear, obtaining a transfer function, in PU, which will be responsible for generating the reference signal of mechanical power which will be followed by CC engine performance after the digital controller.

For the digital control, we use the polynomial allocation strategy in RST (Regulation, Sensitivity and Tracking) canonical structure. It develops the concept that defines this structure and it projects the controller to the modeled engine plant of CC engine.

Finally, it consolidates the proposal by presenting a simulation in MATLAB 2010 - SIMULINK, which features the modeled hydraulic turbine, the RST digital controller and the CC engine in PU. It is proven in this simulation the feasibility of the hydraulic turbine emulation for a CC engine, through tests simulating the charging socket and the speed variation in a hydro generating unit.

Keywords: speed control, digital control, polynomial allocation, RST canonical structure, hydraulic turbine, DC engine.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Motor de Corrente Contínua do Laboratório de Conversão de Energia da UFPA.....	18
Figura 1.2–Gerador Síncrono e Motor de Corrente Contínua do Laboratório de Conversão de Energia da UFPA	19
Figura 2.1–Caixa Espiral de Uma Turbina Francis (www.itaipu.gov.br)	25
Figura 2.2 – Pré-distribuidor de uma Turbina Francis, adaptado de (www.itaipu.gov.br.).....	26
Figura 2.3–Pistões Hidráulicos de uma Turbina Francis, adaptado de (www.itaipu.gov.br.).....	27
Figura 2.4–Distribuidor de uma Turbina Francis, adaptado de (www.itaipu.gov.br.)	27
Figura 2.5 – Rotor e Eixo de uma Turbina Francis, adaptado de (www.itaipu.gov.br.)	28
Figura 2.6 – Tubo de Sucção de uma Turbina Francis (www.itaipu.gov.br.)	28
Figura 2.7–Turbina Hidráulica Francis com sistema mecânico e hidráulico adaptada de www.itaipu.gov.br.	29
Figura 2.8 – Esquema de um Sistema Hidráulico de Atuação, adaptado de Eletronorte, UHE Tucuruí.	30
Figura 2.9–Válvula Piloto, Eletronorte – UHE de Tucuruí	31
Figura 2.10–Válvula Distribuidora, Eletronorte – UHE de Tucuruí	31
Figura 2.11–Servo-Motor Principal, Eletronorte – UHE de Tucuruí.....	32
Figura 2.12 – Rotor e Estator, adaptado de www.impsa.com	34
Figura 2.13 – UHE em corte longitudinal, adaptado de Eletrobrás-Eletronorte Tucuruí	37
Figura 3.1–Diagrama de Blocos Completo da Estratégia de Controle	39
Figura 3.2 - Motor CC e Principais Partes Constituintes, adaptado de (www.tuveras.com).....	41
Figura 3.3 - Diagrama Esquemático do Motor CC, adaptado de DORF e BISHOP (2001).....	42
Figura 3.4 – Diagrama de Blocos da Dinâmica do Motor CC.....	43
Figura 3.5 – Digrama de Blocos da Dinâmica do Motor CC em PU	49
Figura 3.6 – Digrama de Blocos do Modelo Não-linear da Turbina Hidráulica, KUNDUR (1994).....	52
Figura 3.7 – Digrama de Blocos Simplificado do Servoposicionador, adaptado de (PAOLO, 2009).....	52
Figura 3.8 – Digrama de Blocos do Motor CC com Controlador	54
Figura 3.9 – Digrama de Blocos do Motor CC com Controlador PI e considerando a velocidade ω constante.....	54
Figura 3.10 – Digrama de Blocos utilizados para análise e projeto de sistema de controle de potência para o motor CC.....	55
Figura 3.11 – Controle proporcional-integral de uma carga constituída de inércia e atrito viscoso, adaptado de OGATA (2003).....	56

Figura 3.12 – Dinâmica das massas girantes do conjunto motor e gerador quando o sistema de controle de potência entra em regime permanente.....	58
Figura 4.1 – Diagrama de Blocos do Sistema Discretizado com Controlador RST ...	60
Figura 4.2 – Plano Z com pólos auxiliares e pólos dominantes destacados	64
Figura 5.1 – Diagrama de Blocos do Controlador de Potência RST e Parte Elétrica do Motor CC	68
Figura 5.2 – Resposta do Controlador de Potência a um Degrau de +1 pu e -0.5 pu	69
Figura 5.3 – Diagrama de Blocos do Regulador de Velocidade com Modos Mecânicos Simplificados\Linearizados.....	73
Figura 5.4 – Resposta do Regulador de Velocidade ao Degrau de -0.2 pu e +0.1 pu	74
Figura 5.1.1 – Resposta do Regulador de Velocidade a um Degrau de +0.1 pu na Referência de Velocidade	76
Figura 5.1.2 – Resposta de Tomada de Carga de 0.1 pu e Rejeição de Carga de 0.1 pu	77
Figura 5.1.3 – Regulador de Velocidade e Servoposicionador Respondendo a Uma Tomada de Carga de 0.2 pu e Uma Rejeição de Carga de 0.2 pu.....	78
Figura 5.1.4 – Controlador de Potência Respondendo a Uma Tomada de Carga de 0.2 pu e Uma Rejeição de Carga de 0.2 pu	79
Figura B.1 – Diagrama de Blocos da Emulação Completa	92
Figura B.2 – Subsistema do Regulador de Velocidade	93
Figura B.3 – Subsistema do Servoposicionador.....	93
Figura B.4 – Subsistema da Turbina Hidráulica não Linear Francis.....	94
Figura B.5 – Subsistema do Controlador de Potência na Armadura do Motor CC....	94
Figura B.6 – Subsistema do Motor CC em pu	95
Figura B.7 – Diagrama de Bloco do Controlador de Potência na Armadura do Motor CC com Dinâmica Elétrica do Motor CC	95
Figura B.8 – Diagrama de Bloco do Regulador de Velocidade com os Modos Mecânicos simplificados ou linearizados.....	96
Figura B.9 – Todos os Sinais Respondendo a Uma Tomada de Carga de 0.2 pu e Uma Rejeição de Carga de 0.2 pu	96
Figura B.10 – Diagrama de Blocos da Emulação Completa sem Subsistemas	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados de Placa do Motor CC	44
Tabela 2 – Parâmetros Calculados do Motor CC	46
Tabela 3 – Parâmetros do Modelo Matemático em PU do Motor CC.....	49
Tabela 4 – Requisitos Desejados para o Sistema Controlado e Parâmetros para Discretização (Dinâmica Elétrica).....	67
Tabela 5 – Parâmetros do Controlador Digital RST	68
Tabela 6 – Parâmetros dos Modos Mecânicos (Servoposicionador, Turbina e Motor CC).....	70
Tabela 7 – Requisitos Desejados para o Sistema Controlado e Parâmetros para Discretização (Modos Mecânicos).....	71
Tabela 8 – Parâmetros do Controlador Digital RST	72
Tabela 9 – Períodos de Amostragem da Emulação Completa.....	92

LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ONS	Operador Nacional do Sistema
PU	Por Unidade
RST	Regulação, Sensibilidade e Rastreamento
SEP	Sistema Elétrico de Potência
UGH	Unidade Hidro Geradora
UHE	Unidade Hidrelétrica

LISTA DE SÍMBOLOS

R_a	Resistência de armadura
L_a	Indutância de armadura
i_a	Corrente de armadura
v_a	Tensão de armadura
V_f	Tensão terminal de campo
R_f	Resistência de campo
L_f	Indutância de campo
i_f	Corrente de campo
V_f	Tensão de campo
B	Coeficiente de atrito viscoso
J	Momento de inércia
e_a	Tensão induzida
ω	Velocidade angular
Ω	Posição do Eixo
T_m	Torque Mecânico
T_l	Torque Elétrico
T_a	Torque Acelerante
K_t	Constante de torque
K_v	Constante de força contraeletromotriz
P_m	Potência mecânica
P_e	Potência elétrica
η	Rendimento
H	Constante de inércia
U	Velocidade da água no conduto
K_u	Constante de proporcionalidade
G	Posição do distribuidor
H'	Queda hidráulica no distribuidor
A_t	Ganho da turbina hidráulica
T_w	Tempo de partida da água
$R(z^{-1})$	Polinômio da estrutura canônica RST, Regulation (Regulação)
$S(z^{-1})$	Polinômio da estrutura canônica RST, Sensitivity (Sensibilidade)
$T(z^{-1})$	Polinômio da estrutura canônica RST, Tracking (Rastreamento)
$P(z^{-1})$	Equação de Bezout
\mathbf{x}	Vetor composto pelos parâmetros R e S
\mathbf{M}	Matriz de Silvester
ξ	Coeficiente de amortecimento
ω_n	Frequência natural
M_{ss}	Máximo valor de sobressinal
t_s	Tempo de acomodação
T_s	Período de amostragem

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	17
1.1. Contextualização.....	17
1.2. Emulação da Turbina Hidráulica	19
1.3. Objetivos	20
1.4. Revisão Bibliográfica.....	21
1.5. Apresentação do TCC.....	22
2. UNIDADE HIDROGERADORA.....	24
2.1. Turbina	24
2.2. Sistema de Acionamento Hidráulico – Servoposicionador	29
2.3. Máquina Síncrona	32
2.3.1. Constituição Básica	33
2.3.2. Princípio de Funcionamento.....	34
2.4. Descrição Geral da UGH.....	35
3. EMULAÇÃO DA TURBINA HIDRÁULICA POR MOTOR CC	39
3.1. Motor CC.....	39
3.1.1. Modelagem do Motor CC	41
3.1.2. Modelagem do Motor CC em PU.....	46
3.2. Modelagem da Turbina Hidráulica	49
3.3. Modelagem do Servoposicionador	52
3.4. Controle de Potência Mecânica do Motor CC	53
4. ESTRATÉGIA DE CONTROLE DIGITAL PARA EMULAÇÃO DA TURBINA HIDRÁULICA POR MOTOR CC	59
4.1. Estrutura Canônica RST	59
4.2. Projeto do Controlador por Alocação Polinomial de Pólos	62
5. PROJETO DOS CONTROLADORES.....	66
5.1. Projeto do Controlador de Potência do Motor CC	66
5.2. Resultados do Controlador de Potência do Motor CC	68
5.3. Projeto do Controlador dos Modos Mecânicos (Regulador de Velocidade)	69
5.4. Resultados do Controlador dos Modos Mecânicos (Regulador de Velocidade).....	73
5.5. Resultados	74

5.3.1. Resposta do Regulador de Velocidade ao Degrau.....	75
5.3.2. Tomada de Carga e Rejeição de Carga	76
5.3.3. Resposta do Regulador de Velocidade e Servoposicionador.....	78
5.3.4. Resposta do Controlador de Tensão na Armadura do Motor CC	79
6. CONCLUSÃO	81
6.1. Proposta para Trabalhos Futuros.....	82
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
APÊNDICE	85
A. Algoritmos em Matlab.....	85
A.1. Rotina Projeto_Completo	85
A.2. Carregamento dos Parâmetros	85
A.3. Rotina RST_Mec (Regulador e Velocidade).....	87
A.4. Rotina RST_Armadura	88
A.5. Rotina Resultados_Grafico.....	89
B. Diagrama de Blocos.....	92
B.1. Subsistema do Regulador de Velocidade.....	92
B.2. Subsistema do Servoposicionador	93
B.3. Subsistema da Turbina Hidráulica Não Linear	93
B.4. Subsistema do Controlador de Potência na Armadura do Motor CC	94
B.5. Subsistema do Motor CC	94
B.6. Diagrama de Blocos do Controlador de Potência.....	95
B.7. Diagrama de Blocos do Regulador de Velocidade com Modos Mecânicos Simplificados ou Linearizados	95
C. Todos os Sinais.....	96
D. Diagrama de Blocos da Emulação Completa sem Subsistemas.....	97

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

A matriz energética nacional conta com uma contribuição da energia hidráulica aproveitada da ordem 14,7%. Essa ordem representa 85,6% de toda energia elétrica gerada no país. Embora existam muitos motivos para o aumento da utilização de outras fontes de energia, tais como, restrições socioambientais e ambientais de projetos hidrelétricos e grandes avanços na utilização de fontes não convencionais, as expectativas são que a energia hidráulica continue sendo a principal fonte geradora de energia elétrica no Brasil, (ATLAS DA ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL, 2008).

À medida que o Sistema Elétrico de Potência (SEP) vai se interligando e expandindo para atender todo o território nacional, torna-se cada vez mais complexo manter uma interligação harmônica entre as unidades geradoras de energia, isso se dá devido o dinamismo no funcionamento do SEP. Assim, aumenta também a necessidade de estudos para a compreensão dessa expansão e suas interligações, como também a otimização na operação das Usinas Hidrelétricas (UHE).

Para estabelecer essa compreensão e otimização tem-se a necessidade de estudos específicos. No que diz respeito à otimização das usinas, há a necessidade da compreensão de todo seu funcionamento. Para isso, dado as várias etapas no processo de geração da energia, é indispensável o estudo de cada etapa desse processo. Entre as etapas, destaca-se a etapa de conversão de energia, que se dá na conversão da energia potencial, proveniente da coluna de água armazenada no reservatório, em energia cinética, quando a água flui com relativa pressão pelo conduto forçado até chegar ao caracol e encontrar a turbina hidráulica. Neste ponto, de encontro da água com a turbina, a água empurra as pás da turbina que possui um eixo onde surge um torque mecânico, assim, havendo a conversão da energia cinética de rotação em energia mecânica. Finalmente, o eixo da turbina está acoplado a um gerador síncrono onde ocorre a conversão da energia mecânica em energia elétrica.

Todo esse processo é apresentado em várias literaturas que tratam do assunto e conhecido matematicamente. No entanto, para o estudo apurado e

desenvolvimento de técnicas e ferramentas que possam ampliar a eficiência desse processo, não basta o estudo teórico. Pois, este não produz as observações e experiências que o contato com a planta real proporciona.

Sabe-se, entretanto, das dificuldades em ter acesso a uma unidade geradora de uma usina. Os custos e os riscos associados são altos no processo de experimentação. Então uma solução possível, seria uma UHE em escala reduzida. Contudo, tem-se o impedimento de produzir uma adequada queda d'água em laboratório para a obtenção da devida energia potencial que fluiria pelo conduto forçado, agora como energia cinética, até o encontro com a turbina gerando a energia mecânica em forma de um torque mecânico em seu eixo.

Em laboratório é comum fazer uso de um motor CC acoplado a um gerador para representar o processo de geração de energia por meio de uma máquina primária (turbina hidráulica), neste caso representada pelo motor CC. Porém, o motor CC em sua dinâmica comum de funcionamento não oferece o comportamento de uma turbina hidráulica.

Então, visando à emulação do torque mecânico no eixo da turbina hidráulica, ou seja, que o motor CC tenha sua dinâmica semelhante a da turbina hidráulica, este trabalho propõe uma técnica de emulação desse torque mecânico, por meio de um motor CC, fazendo o controle de potência aplicado a sua armadura.

Na figura 1.1 é mostrado um motor CC, que já faz parte do Laboratório de Conversão de Energia da UFPA – Campus Tucuruí e na figura 1.2 apresenta o mesmo motor CC da figura 1.1 acoplado a um gerador síncrono que também é posse do referido laboratório do Campus Tucuruí. Estes poderão ser, em trabalhos futuros, as plantas reais para a materialização das ideias aqui apresentadas.



Figura 1.1 – Motor de Corrente Contínua do Laboratório de Conversão de Energia da UFPA

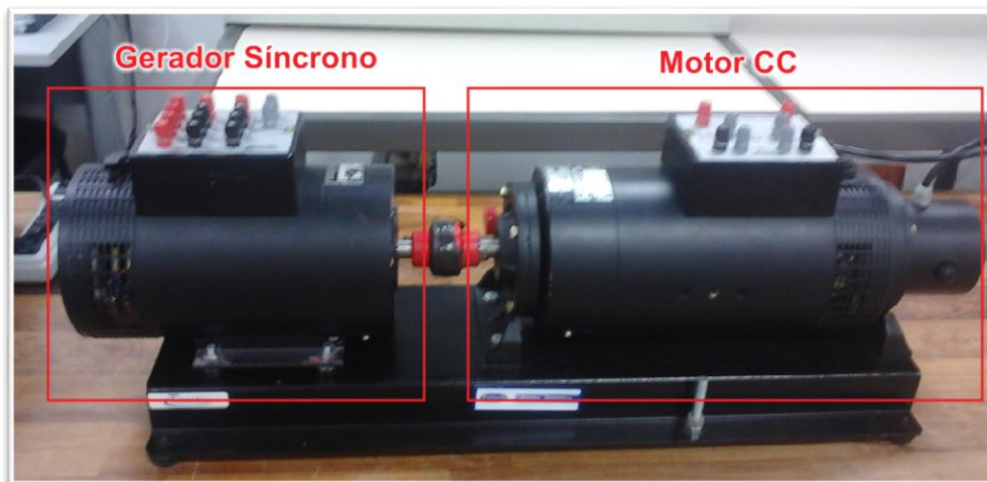


Figura 1.2–Gerador Síncrono e Motor de Corrente Contínua do Laboratório de Conversão de Energia da UFPA

1.2. Emulação da Turbina Hidráulica

Uma turbina hidráulica quando está em funcionamento pelo contato do fluxo de água em suas pás, apresenta um torque mecânico em seu eixo. A dinâmica desse torque, ou seja, o comportamento do mesmo é definido pelas variáveis que envolvem o processo, tal como a abertura do distribuidor.

Semelhantemente, um motor CC em operação, que se dá pela alimentação de sua armadura com a tensão adequada, apresenta um torque mecânico em seu eixo. Assim como o torque da turbina, o torque do motor CC tem seu comportamento definido por variáveis que envolvem sua planta, como a tensão na armadura.

Então, fazendo o controle de potência entregue a armadura do motor CC, faz-se o controle do torque mecânico no eixo do mesmo. Sendo assim, pode-se especular que um motor CC, devidamente controlado, possa reproduzir a dinâmica do torque mecânico de uma turbina hidráulica.

Para efetuar esse controle de potência, destaca-se a estrutura canônica RST em alocação polinomial. Trata-se de uma estratégia de controle digital e sua estrutura tem se mostrado eficiente neste tipo de controle, pois oferece pelos dois graus de liberdade, regulação e rastreamento, (LANDAU, 2006).

Por tudo, demonstra-se o modelamento matemático do Motor CC, da Turbina Hidráulica e a construção de dois Controladores Digitais RST; um será responsável por fazer o controle de potência entregue a armadura do Motor CC e o outro será responsável pelo controle de velocidade do motor CC. Este último representa o

regulador de velocidade de uma turbina hidráulica, recebendo a referência de velocidade e definindo a abertura do distribuidor. Ao primeiro controlador, será entregue um sinal de referência gerado pela função de transferência da turbina hidráulica (sinal de potência mecânica). O controlador por sua vez aplica a tensão necessária na armadura do motor CC fazendo este seguir o sinal de referência, comportando-se como uma turbina hidráulica.

Com isso, deseja-se demonstrar que um Motor CC pode representar adequadamente o comportamento dinâmico de uma Turbina Hidráulica. Assim, em etapas futuras, pode-se instrumentar uma bancada didática que se utilize dessa aplicação. Conforme já foi destacado na seção 1.1 a possibilidade do motor CC e do gerador síncrono das figuras 1.1 e 1.2, respectivamente, fazerem parte dessa bancada didática. Desse modo, dando aos graduandos uma ferramenta que pode lhes aproximar mais da realidade prática dos conceitos vistos teoricamente na graduação.

1.3. Objetivos

Esse trabalho visa apresentar, em simulação computacional no software MATLAB 2010, a emulação da dinâmica de uma turbina hidráulica por um motor CC, fazendo o controle de potência entregue a armadura deste.

Para isso, apresenta-se a modelagem do servoposicionador simplificado. Este é responsável por receber o comando do regulador de velocidade e atuar sobre as pás do distribuidor abrindo-as ou fechando-as. Então, a função de transferência do servoposicionador recebe a referência de velocidade e entrega para turbina hidráulica a abertura do distribuidor.

Assim, demonstra-se a modelagem matemática de uma turbina hidráulica do tipo Francis em pu e, obtém-se a função de transferência que rege a dinâmica da mesma. Esta função de transferência recebe o sinal do servoposicionador e gera o sinal de referência de potência que deve ser emulado pelo motor CC.

O motor CC também é demonstrado matematicamente onde se obtém sua função de transferência em seus parâmetros convencionais e em pu. Este último é necessário, pois, a função de transferência da turbina hidráulica encontra-se em pu. Com isso, projeta-se o controlador digital em RST para que receba o sinal de

referência gerado pela função de transferência da turbina e atue sobre a função de transferência do motor CC fazendo este emular a turbina.

Projeta-se ainda outro controlador digital em RST que será responsável por receber a referência de velocidade e comparar com a velocidade do eixo do motor CC e assim controlar o servoposicionador para manter a velocidade de referência. Este controlador, portanto é o regulador de velocidade da turbina hidráulica.

1.4. Revisão Bibliográfica

Entre outros assuntos abordados, a regulação de velocidade de máquinas primárias em usinas hidrelétricas é discutida, no contexto da UHE de Tucuruí, no Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D): Implementação de um Estabilizador de Sistema de Potência Piloto, com capacidade de Adaptação, em Gerador da Etapa 1ª da UHE de Tucuruí, como continuidade de Projeto P&D do Ciclo 2000-2001. Neste P&D apresenta-se a modelagem do regulador de velocidade e faz-se uma análise no regulador de velocidade do tipo isócrono em condições de estatismo permanente e estatismo transitório, assim como o ajuste desse controlador. (JÚNIOR, WALTER BARRA, et al, 2010)

Ainda no que diz respeito ao regulador de velocidade, Kundur (1994) apresenta uma análise minuciosa desde sua modelagem e comportamento até a identificação de parâmetros como estatismo permanente (permanent droop) e estatismo transitório (transient droop) assim com suas influências ganho e fase no domínio da frequência. Neste ponto, a análise de estatismo foge ao escopo deste trabalho, visto que essa abordagem está no estágio de sincronismo das máquinas ao sistema de modo a equilibrar a distribuição da demanda de carga entre as unidades geradoras. A análise continua e se aprofunda em considerações como posição máxima e posição mínima do distribuidor (maximum gate position limit, minimum gate position limit), taxa máxima de abertura e taxa mínima de abertura do distribuidor (maximum gate opening rate, maximum gate closing rate), etc.

Ogata (2003) permite um entendimento analítico e matemático em sistemas hidráulicos. Nessa compreensão abordam-se servossistemas hidráulicos e construção de controlador hidráulico integral e proporcional. Elevando a compreensão do movimento dos êmbolos e do carretel (atuação do servossistema) e com isso, a leitura das variáveis de entrada, saída e realimentação.

Para execução do controle, examinou-se o controlador digital em estrutura RST, que é amplamente explorado por Landau (2006) onde se observa uma estrutura de controle com dois graus de liberdade, regulação e rastreamento. Permitindo uma sintonia fina independente do sinal de referência e do sinal de realimentação. Oferecendo, com isso, a possibilidade da imposição de características desejadas com mais liberdade.

Quanto ao controle do motor CC, Macedo (2012), desenvolve o projeto de controladores digitais para o controle de velocidade de um motor de corrente contínua, onde são confrontados os desempenhos de um controlador PI frente a um controlador RST. O motor CC em questão é o apresentado na figura 1.1, portanto o motor CC do Laboratório de Conversão de Energia da UFPA – Campus Universitário de Tucuruí.

No que tange a estratégia matemática para o controle de potência do motor CC de modo que este emule a potência mecânica da turbina hidráulica, consultou-se (NASCIMENTO FILHO, 2011) em sua investigação de estratégias de controle digital para regulação de velocidade e emulação da dinâmica de turbinas hidráulicas, com implementação e testes experimentais em uma micromáquina de 10KVA do Laboratório de Controle de Sistemas de Potência (LACSPOT – FEE – ITEC – UFPA).

1.5. Apresentação do TCC

Distribuído em 6 capítulos, esse trabalho de conclusão de curso inicia-se apresentando uma análise das motivações e viabilidade para emulação da turbina hidráulica por um motor CC. Então se desenvolve a modelagem matemática consolidando a viabilidade da emulação da turbina hidráulica por meio de um controle digital por alocação polinomial. Finalmente, apresentam-se os resultados simulados que ratifica a proposição matemática.

No Capítulo 1, apresenta-se a contextualização, onde se analisa a importância do modelo em escala reduzida. Seguido pela análise superficial do funcionamento da turbina hidráulica. Então se têm os objetivos gerais e específicos e a revisão bibliográfica conveniente ao tema discutido.

No Capítulo 2, é apresentada a turbina hidráulica do tipo Francis em suas partes constituintes e funcionamento. Seguida pela definição do sistema de acionamento hidráulico, chamado de servoposicionador. Uma descrição das partes constituinte e do funcionamento da máquina síncrona também é feita. Encerrando-se com uma descrição geral de um UGH destacando suas principais partes e funcionamento.

No Capítulo 3, é feita a modelagem matemática do motor CC em parâmetros convencionais e em pu. E também é apresentado o modelo matemático da turbina hidráulica do tipo Francis e sua função de transferência linear e não linear em pu. Neste ponto, demonstra-se a estratégia matemática e considerações físicas da planta para o controle de potência do motor CC.

No Capítulo 4, desenvolve-se a estratégia de controle digital com alocação polinomial em estrutura RST. Onde se apresenta a fundamentação teórica para o controlador em alocação polinomial, assim como na estrutura RST.

No Capítulo 5, projetam-se os dois controladores. O controlador de potência sobre a armadura do motor CC e o regulador de velocidade da turbina hidráulica. Então são apresentados os resultados dos controladores imediatamente projetados e suas análises.

No Capítulo 6, as conclusões do trabalho são expostas e são feitas considerações, além de sugestões para trabalhos futuros.

Listam-se ainda todas as referências bibliográficas consultadas para a composição desse trabalho em seção específica.

Finalmente, seguem os apêndices com o algoritmo para geração dos polinômios R, S e T para controle de potência e regulação de velocidade da turbina, assim como os diagramas de bloco em MATLAB 2010 – SIMULINK das plantas simuladas.

2. UNIDADE HIDROGERADORA

2.1. Turbina

As turbinas hidráulicas são projetadas especificamente para transformar a energia cinética proveniente de um fluxo de água em energia mecânica na forma de torque mecânico, (KUNDUR, 1994).

Quando, devidamente acoplada a um gerador, é um meio para o aproveitamento da energia hidráulica para geração de energia elétrica. Com eficiência que pode chegar a 90% (ANEEL, 2005), as turbinas hidráulicas são atualmente as formas mais eficientes de conversão de energia primária em energia secundária.

Sua classificação é de acordo com o processo de conversão de energia hidráulica em energia mecânica como turbinas de ação ou impulso e turbinas de reação ou propulsão. As turbinas de ação transformam energia cinética, escoamento através do rotor, em energia mecânica à pressão constante, normalmente a pressão atmosférica, nessa categoria entra a turbina Pelton. Ao passo que as turbinas de reação têm a pressão da água variando desde a entrada da tomada d'água até a saída da turbina, neste caso tem-se a turbina Francis.

Apresentam-se uma grande variedade de formas e tamanhos de turbinas hidráulicas. O modelo mais utilizado é o Francis, uma vez que se adapta tanto aos locais com baixa queda quanto aos locais de alta queda. Como trabalha totalmente submerso, seu eixo pode ser horizontal ou vertical (RAMAGE, 1996).

O tipo Francis, trabalha com velocidades de rotação entre 55 rpm e 450 rpm de acordo com a queda hidráulica que pode variar entre 600 m e 25 m, (MACINTYRE, 1983). No caso de velocidades mais baixas, pode-se usar um multiplicador de velocidade, a fim de se reduzirem os custos dos geradores. É este tipo de turbina, Francis, que está modelada e emulada neste trabalho.

As turbinas do tipo Francis, recebem seu nome em homenagem ao engenheiro inglês James Bicheno Francis (1812–1892), que as idealizou em meados do século XIX. Atualmente esse tipo de turbina atinge seus melhores valores de rendimento para quedas que variam 10 a 200 metros, sendo uma das principais utilizadas em hidrelétricas Brasileiras, (HIDALGO, 2010)

A constituição de uma turbina dar-se basicamente por cinco partes: caixa espiral, pré-distribuidor, distribuidor, rotor e eixo, tubo de sucção. Segue uma breve descrição de cada parte com sua figura:

1. Caixa Espiral

É uma tubulação de forma toroidal, conforme figura 2.1, que envolve a região do rotor. Esta parte fica integrada à estrutura civil da usina, não sendo possível ser removida ou modificada. O objetivo é distribuir a água igualmente na entrada da turbina.

É fabricada com chapas de aço carbono soldada em segmentos. A caixa espiral conecta-se ao conduto forçado na seção de entrada, ao pré-distribuidor na seção de saída.

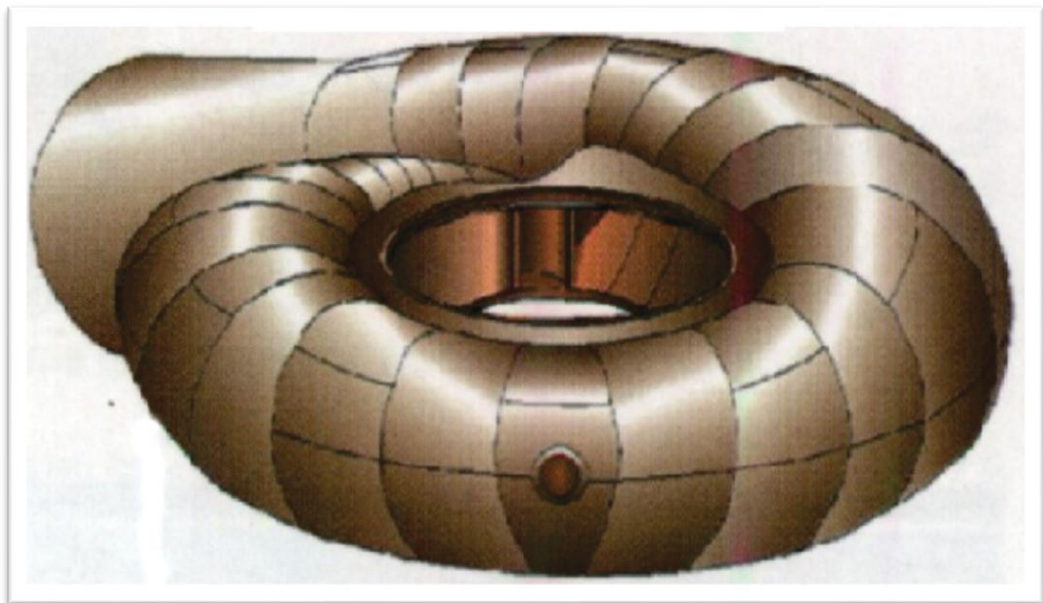


Figura 2.1–Caixa Espiral de Uma Turbina Francis (www.itaipu.gov.br)

2. Pré-distribuidor

A finalidade do pré-distribuidor, figura 2.2, é direcionar a água para a entrada do distribuidor. É composta de dois anéis superiores, entre os quais são montados um conjunto de 18 a 24 palhetas fixas, com perfil hidrodinâmico de baixo arrasto, para não gerar perda de carga e não provocar turbulência no escoamento. É uma parte sem movimento, soldada à caixa espiral e fabricada com chapas ou placas de aço carbono.

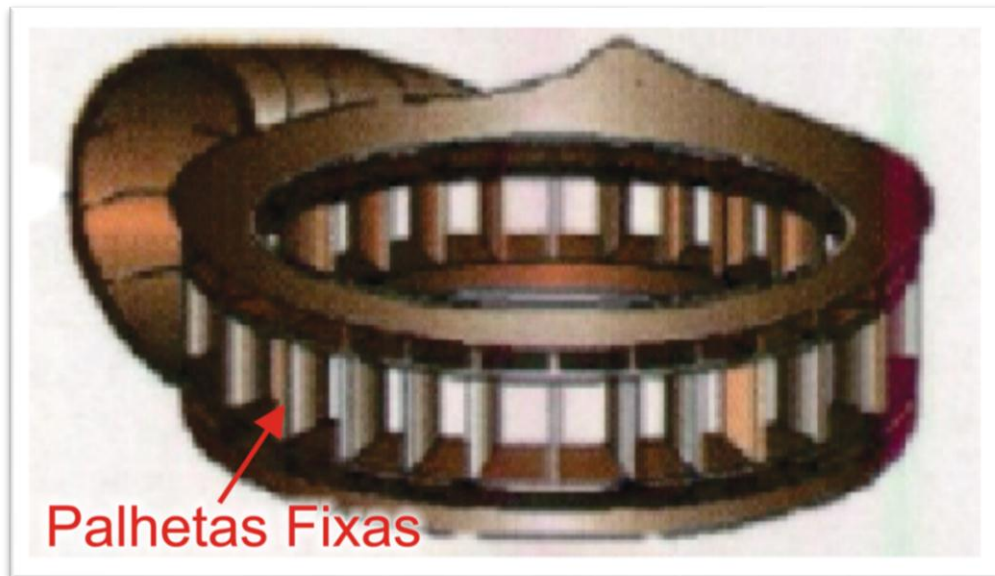


Figura 2.2 – Pré-distribuidor de uma Turbina Francis, adaptado de (www.itaipu.gov.br.)

3. Distribuidor

O distribuidor, ilustrado na figura 2.4, é composto de uma série de 18 a 24 palhetas móveis, acionadas por um mecanismo hidráulico montado na tampa da turbina (sem contato com a água). Todas as palhetas têm o seu movimento conjugado, isto é, todas se movem ao mesmo tempo e de maneira igual.

O acionamento é feito tipicamente por um ou dois pistões hidráulicos, figura 2.3, que operam numa faixa de pressão de 20 bar nas mais antigas, até 140 bar nos modelos mais novos, no caso da UHE Tucuruí o valor de operação é de 60 bar.

O distribuidor controla a potência mecânica da turbina, pois regula vazão da água. É um sistema que pode ser operado manualmente ou em modo automático, tornando o controle da turbina praticamente isento de interferência do operador.

É no distribuidor que reside o principal controle sobre a turbina hidráulica, portanto, onde se faz o controle de velocidade e consequentemente de potência mecânica da mesma.



Figura 2.3–Pistões Hidráulicos de uma Turbina Francis, adaptado de (www.itaipu.gov.br.)

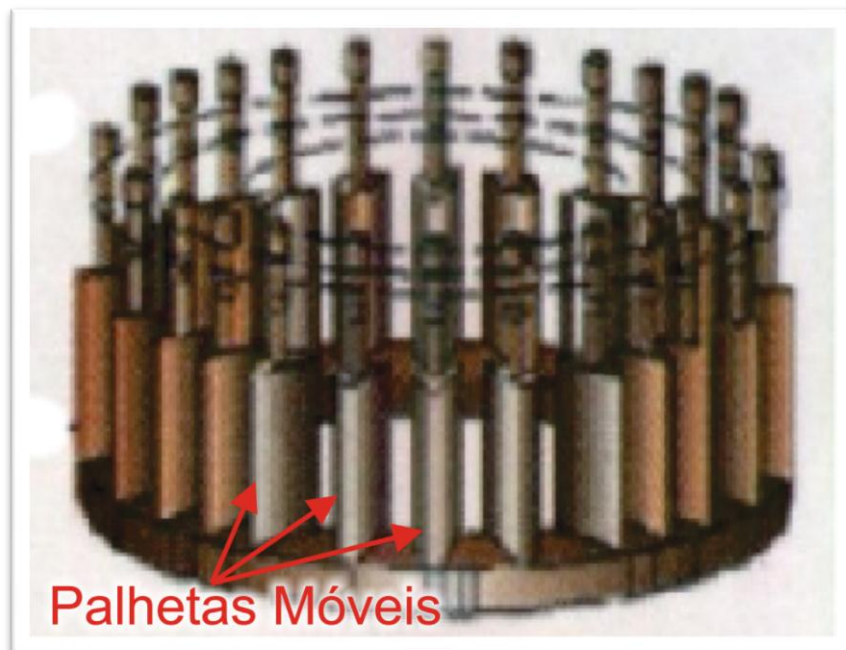


Figura 2.4–Distribuidor de uma Turbina Francis, adaptado de (www.itaipu.gov.br.)

4. Rotor e Eixo

A turbina Francis, vista na figura 2.5, é o elemento central da máquina primária, o qual é responsável por transformar a energia cinética da água em energia mecânica de rotação. É constituído por pás fixas que possuem determinada curvatura cuja função é mudar a direção do fluxo da água maximizando as transformações de energia. Sua rotação e torque desenvolvidos são transmitidos ao Gerador Síncrono, o qual converte a energia mecânica da turbina em energia elétrica, (PAES e DE NEGRI, 2002).

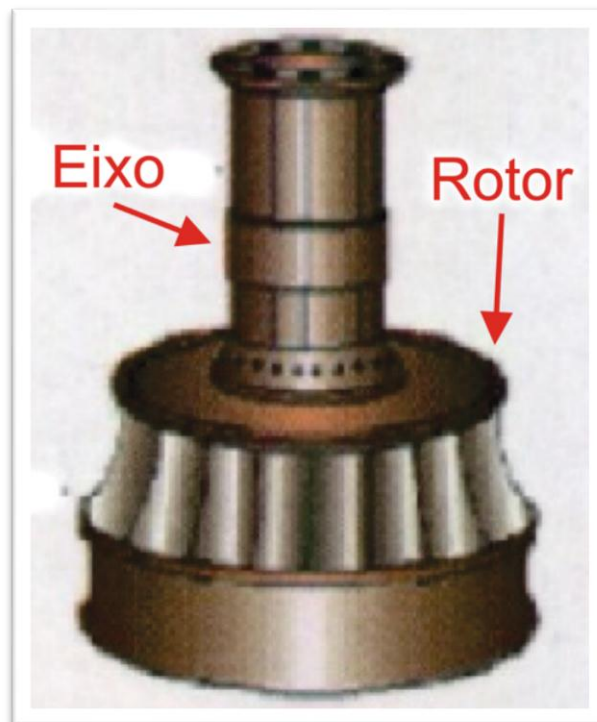


Figura 2.5 – Rotor e Eixo de uma Turbina Francis, adaptado de (www.itaipu.gov.br.)

5. Tubo de Sucção

Duto de saída da água, apresentado na figura 2.6, geralmente com diâmetro final maior que o inicial, desacelera o fluxo da água após esta ter passado pela turbina, devolvendo-a ao rio, parte jusante da casa de força.



Figura 2.6 – Tubo de Sucção de uma Turbina Francis (www.itaipu.gov.br.)

A figura 2.7 apresenta as cinco partes montadas de uma turbina hidráulica do tipo Francis com indicações nas partes citadas.

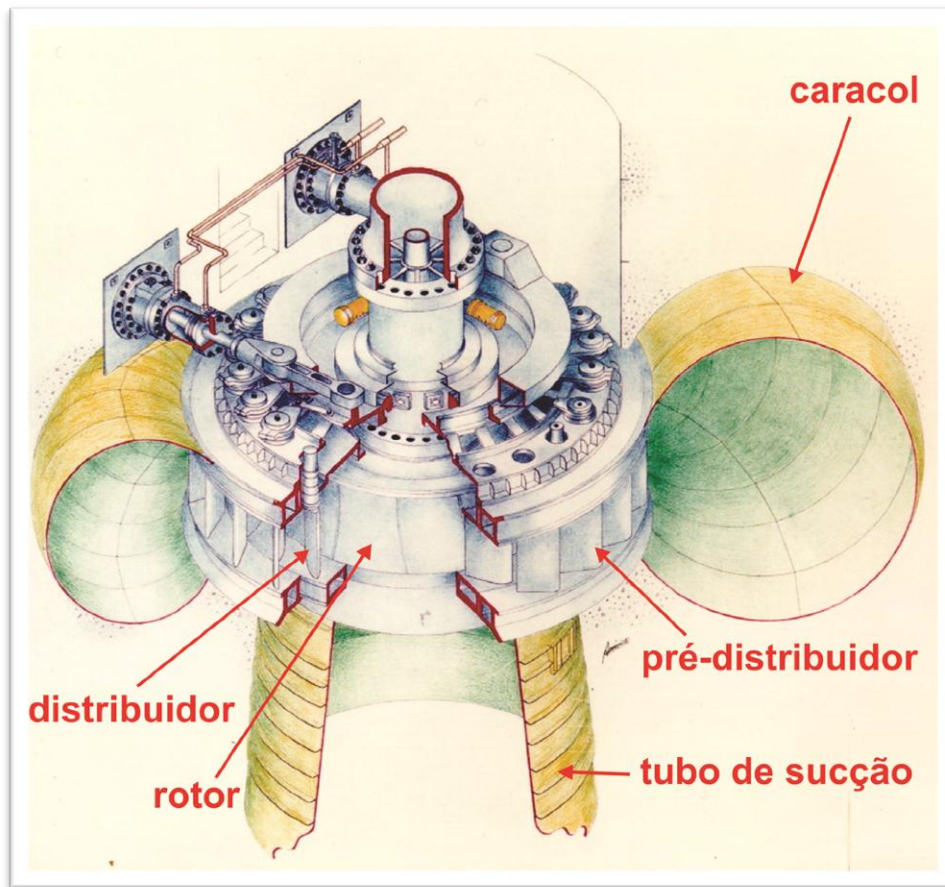


Figura 2.7–Turbina Hidráulica Francis com sistema mecânico e hidráulico adaptada de www.itaipu.gov.br.

2.2. Sistema de Acionamento Hidráulico – Servoposicionador

O sistema de acionamento hidráulico é responsável por receber o sinal de controle do regulador de velocidade e atuar sobre as pás do distribuidor modificando o ângulo de entrada da água na turbina, com isso modificando a potência mecânica desenvolvida pela turbina hidráulica.

A composição desse sistema, que se chama servoposicionador, figura 2.8, se dá basicamente por uma válvula eletro-hidráulica, uma válvula distribuidora e um servo-motor. Essa composição é responsável por comandar a posição das pás do distribuidor, que podem ser vistas na figura 2.4. Esse comando, sinal de controle, é enviado pelo regulador de velocidade e aplicado, após condicionamento desse sinal, na válvula piloto que movimenta seu êmbolo acionando o servo-motor de controle que também movimenta seu êmbolo acionando a válvula distribuidora que

finalmente aciona o servo motor principal. Então o servo motor principal atua sobre os pistões, apresentados na figura 2.3, do anel de regulação mudando o ângulo de abertura, de modo conjugado, das pás do distribuidor, assim mudando a potência mecânica gerada pela turbina hidráulica, (HIDALGO, 2010) e (SANTOS 2006).

Divide-se o sistema de acionamento hidráulico do servo-motor principal em dois estágios chamados estágio simples e estágio duplo. O estágio simples é utilizado em pequenas centrais hidrelétricas e se configura por uma válvula piloto acionando diretamente o servo-motor. Quanto ao estágio duplo, é utilizado para grandes centrais hidrelétricas e se configura com uma válvula piloto acionando uma válvula distribuidora que finalmente aciona o servo-motor. A válvula distribuidora tem a finalidade de amplificar a potência da válvula piloto para acionamento do servo-motor. Desse modo, o sinal de tensão aplicado à válvula piloto pode ter sua magnitude diminuída, o que é desejável economicamente, (SANTOS, 2006).

A figura 2.8 apresenta um esquema de acionamento hidráulico, ou seja um servoposicionador, onde são destacadas algumas partes citadas.

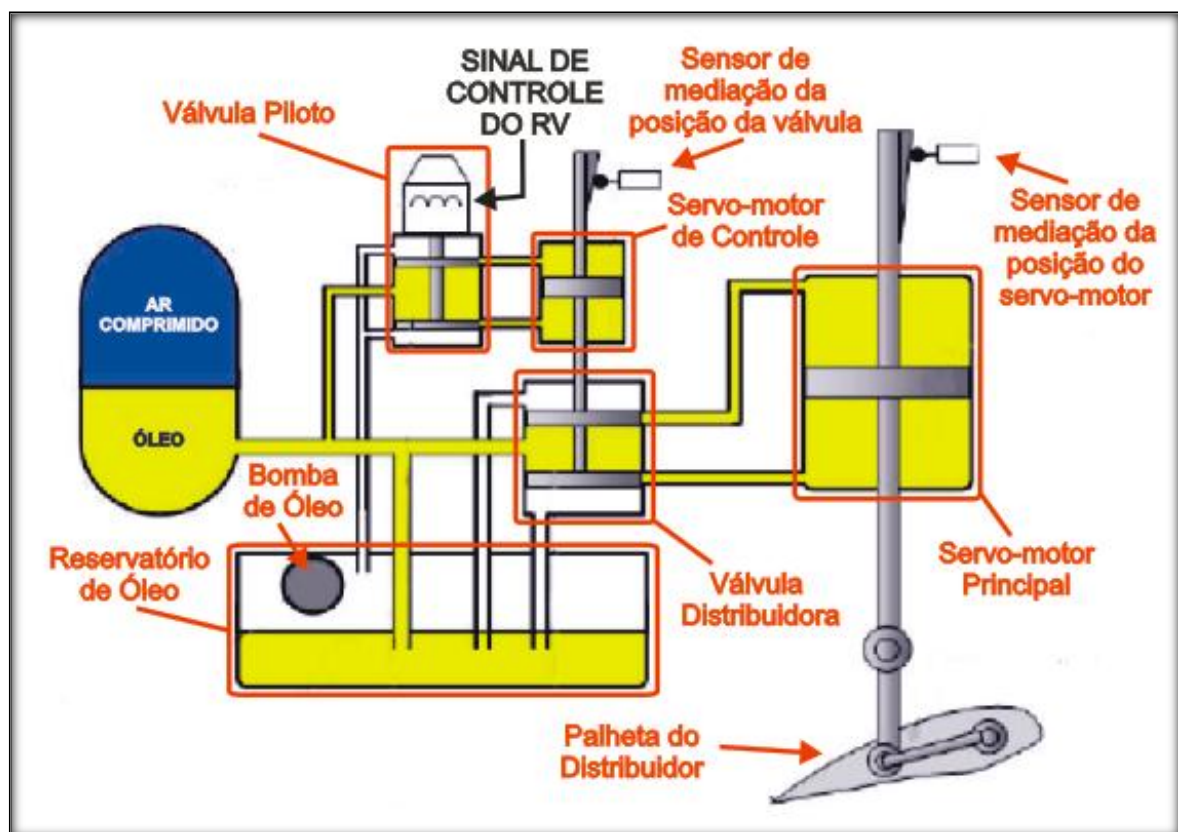


Figura 2.8 – Esquema de um Sistema Hidráulico de Atuação, adaptado de Eletronorte, UHE Tucuruí.

As figuras 2.9, 2.10 e 2.11 apresentam, respectivamente a Válvula Piloto, a Válvula Distribuidora e um Servo-motor Principal da UHE de Tucuruí.



Figura 2.9-Válvula Piloto, Eletronorte – UHE de Tucuruí



Figura 2.10-Válvula Distribuidora, Eletronorte – UHE de Tucuruí



Figura 2.11–Servo-Motor Principal, Eletronorte – UHE de Tucuruí

2.3. Máquina Síncrona

A máquina síncrona situa-se entre as máquinas elétricas rotativas mais importantes. O gerador síncrono faz parte da família das máquinas síncronas ocupando grande lugar de destaque entre elas, sendo uma das mais comuns. Trata-se de uma máquina que opera com velocidade constante e proporcional a frequência da rede, sendo a responsável pela maior parte da energia elétrica produzida no mundo, (BAZANELLA, 1993).

O gerador síncrono possui uma construção que o permite atuar como motor síncrono. Portanto, é capaz de converter energia mecânica em energia elétrica, quando opera como gerador e energia elétrica em energia mecânica quando opera como motor síncrono, (FITZGERALD e KINGSLEY, 2006), (DEL TORO, 1999).

O nome síncrono refere-se ao modo de operação de máquina, está opera com velocidade de rotação constante sincronizada com a frequência da tensão elétrica alternada que é aplicada aos seus terminais, ou seja, devido o sincronismo no movimento de rotação do rotor com o campo eletromagnético girante do estator dar-se o nome síncrono,(FITZGERALD e KINGSLEY, 2006).

2.3.1. Constituição Básica

Rotor

O rotor constitui a parte girante do gerador síncrono e é nele que é montado o enrolamento indutor que será percorrido por uma corrente contínua que é responsável pela formação do campo magnético. Em outras palavras, pode-se dizer que o rotor é um eletroímã.

Sua construção é feita em material ferromagnético, normalmente chapas laminadas justapostas. Os rotores, ainda quanto seus aspectos construtivos, podem ser de dois tipos básicos: rotores de pólos salientes e rotores de pólos lisos.

Rotores de Pólos Salientes são utilizados para baixa velocidade de rotação, o que reduz a força centrífuga sobre os pólos. Isso porque normalmente possui elevado número de pólos e um grande diâmetro ($>1.10\text{ m}$), embora possua um pequeno comprimento se comparado com o rotor de pólos lisos. Seu enrolamento de campo é alojado no espaço interpolar.

Rotores de Pólos Lisos são aptos, pela sua robustez, a trabalharem em altas rotações, tais como 1800 a 3600 rpm, isso se dá pelo seu diâmetro ($<1.10\text{ m}$) menor que os rotores de pólos salientes. Muito utilizados em turbo alternadores onde o número de pólos são 2 ou 4. Quanto ao enrolamento de campo, fica distribuído em ranhuras ao longo da periferia que normalmente preenchem parte do rotor.

Estator

Sua constituição se dá de chapas laminadas dotadas de ranhuras axiais onde é alojado o enrolamento do estator. Essas chapas são feitas de matérias que possuem características de alta permeabilidade magnética, que proporciona um caminho de baixa relutância para o fluxo magnético. Assim diminuindo o fluxo disperso e concentrando o campo no entreferro. O propósito na utilização de chapas laminadas é a diminuição das perdas por correntes parasitas, também conhecidas como correntes de Foucault, que no caso de uma construção em peça maciça estaria presente e aumentaria as perdas.

A figura 2.12 mostra um rotor e um estator de um gerador síncrono de 111,11 MVA, 90 rpm e tensão terminal de 13,8 kV instalados pelo Projeto Hidrelétrico Colíder - Brasil.

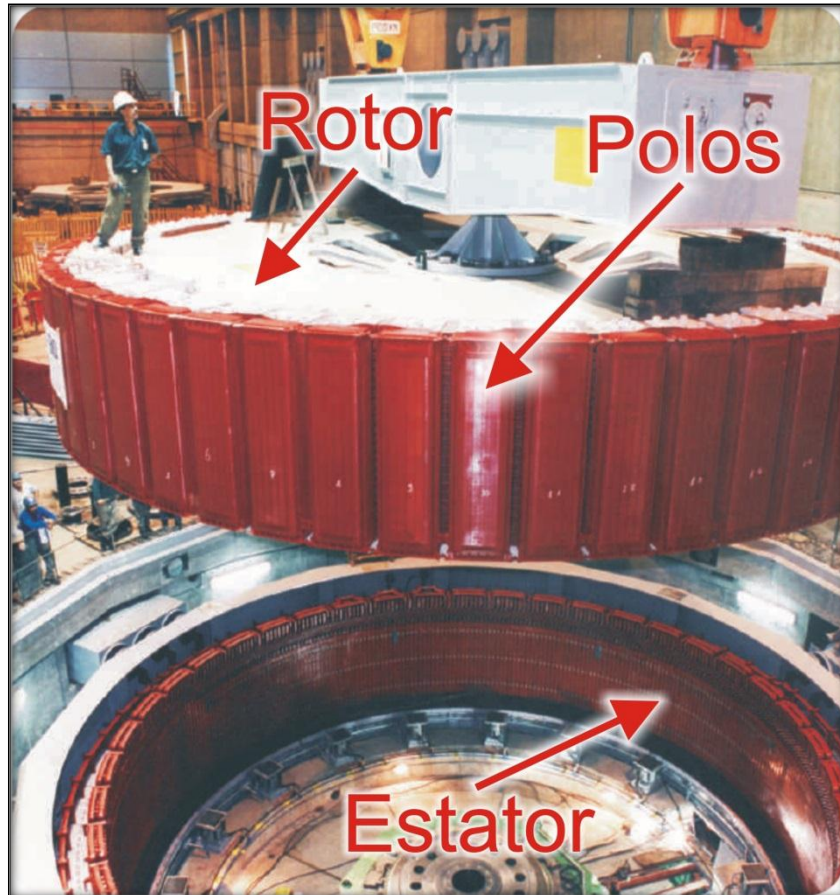


Figura 2.12 – Rotor e Estator, adaptado de www.impsa.com

2.3.2. Princípio de Funcionamento

Máquina Síncrona como Gerador Síncrono

Quando a máquina síncrona está operando como gerador síncrono, o seu eixo apresenta um torque mecânico. Esse torque mecânico é proveniente de uma máquina primária, por exemplo, uma turbina hidráulica ou uma turbina a vapor entre outras. O torque mecânico faz o eixo da máquina síncrona girar, girando portanto o rotor da mesma. Os pólos da máquina que estão no rotor da mesma giram igualmente. Os enrolamentos dos pólos estão energizados com corrente contínua por meio de um sistema de excitação. Com isso, eles apresentam um campo magnético girante.

Então, pela lei de Faraday, tem-se a intensidade do campo magnético variando com o tempo no estator, logo tem uma tensão induzida nos terminais da máquina. Uma vez que o gerador estiver conectado a uma carga, haverá circulação de corrente elétrica.

Máquina Síncrona como Motor Síncrono

Para a máquina síncrona operar com motor síncrono deve ser alimentada com tensões alternadas trifásicas nos terminais do estator e os enrolamentos de campo do rotor devem ser alimentados, por meio de um sistema de excitação, com tensão contínua.

A tensão trifásica alternada que alimenta o estator gera um campo magnético alternado e variante no tempo, chamado também de campo girante, devido à disposição espacial dos enrolamentos que faz com que o campo magnético gire entorno da circunferência do estator. Ao passo que o rotor apresenta um campo magnético constante no tempo. A interação entre esses campos promove o alinhamento dos pólos de sinal oposto. O que ocasiona o surgimento de um binário de forças no rotor, portanto um torque que busca alinhar os pólos dos campos. Contudo, devido à característica girante do campo do estator, esse torque faz o rotor girar para manter o alinhamento desses pólos, assim surgindo um torque mecânico no eixo do rotor.

2.4. Descrição Geral da UGH

As usinas hidrelétricas são grandes complexos arquitetônicos formados por cinco partes principais que são: reservatório, sistema de captação de água, casa de força, subestação elevadora e canal de fuga.

O reservatório, também chamado de represa ou lago artificial, é formado pelo represamento das águas de um rio, por meio da construção de uma barragem. Uma das partes mais visíveis de uma hidrelétrica é o vertedouro. Ele serve para controlar o nível da água do reservatório, evitando transbordamentos.

O sistema de captação, consiste no armazenamento da água no reservatório, sendo conduzida, sob grande pressão através de canais ou túneis, também chamados de aquedutos ou conduto forçado, chegando ao caracol que é uma estrutura radial com a finalidade de aproveitar o máximo da energia potencial

transformando-a em energia mecânica. Após o caracol têm-se o pré-distribuidor que são pás fixas e o distribuidor que são pás móveis, ambas com o propósito de direcionar a água para a turbina. A turbina é formada por pás montadas em torno de um eixo. A pressão da água gira as pás e provoca um movimento circular do eixo, acionando o gerador. O gerador, localizado acima das turbinas, é composto por um eletroímã fixo e um fio bobinado no rotor, que gira com o eixo. Ao girar entre os pólos do eletroímã, os elétrons dentro do fio sofrem uma força devida ao campo magnético e se deslocam dentro do fio bobinado, produzindo corrente elétrica, (KUNDUR, 1994) e (PAES e DE NEGRI, 2002).

Depois de gerada, a energia é conduzida através de cabos ou barras condutoras nos terminais do gerador até a subestação. Nela, transformadores elevam sua tensão (voltagem). Isso é essencial para que a energia possa ser transportada a grandes distâncias. Esse transporte é realizado pelas linhas de transmissão, que são sustentadas por grandes torres, conduzindo a energia gerada até a cidade e os locais onde será consumida.

Depois de passar pela casa de força, a água utilizada para movimentar as turbinas é devolvida ao leito natural do rio através do tubo de sucção devidamente dimensionado para que o fluxo da água (energia cinética) seja compatível com o fluxo do rio, maximizando a eficiência da turbina. Nisso consiste o canal de fuga.

As usinas hidrelétricas no Brasil produzem cerca 75% dos 100 mil megawatts (MW), os 25% restantes são oriundos de fontes térmicas, (ATLAS DA ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL, 2008).

O Brasil é o 2º colocado entre os países que possui a maior participação da hidroeletricidade na participação total de energia elétrica, sendo de 83,2% a parte proveniente da hidroeletricidade. O 1º lugar é a Noruega com 98,5% de participação hidrelétrica, (ATLAS DA ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL, 2008).

Além disso, o Brasil possui o maior potencial hidrelétrico mundial, um total de 260 mil MW, (ATLAS DA ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL, 2008).

As usinas hidrelétricas são uma fonte de energia limpa, mas sua construção gera impactos ambientais. A formação do lago artificial alaga vastas áreas,

destruindo a vegetação, matando animais e obrigando os moradores da área alagada a procurar outro lugar para viver.

Embora esses impactos possam ser minimizados com a criação de projetos para preservação da fauna e flora, e ainda remanejamento dos moradores para habitações adequadas, eles sempre existirão em alguma escala, sendo o ideal buscar sempre mitigar ao máximo todos os impactos.

A figura 2.13 apresenta uma UHE em corte longitudinal com indicações nas partes supracitadas.

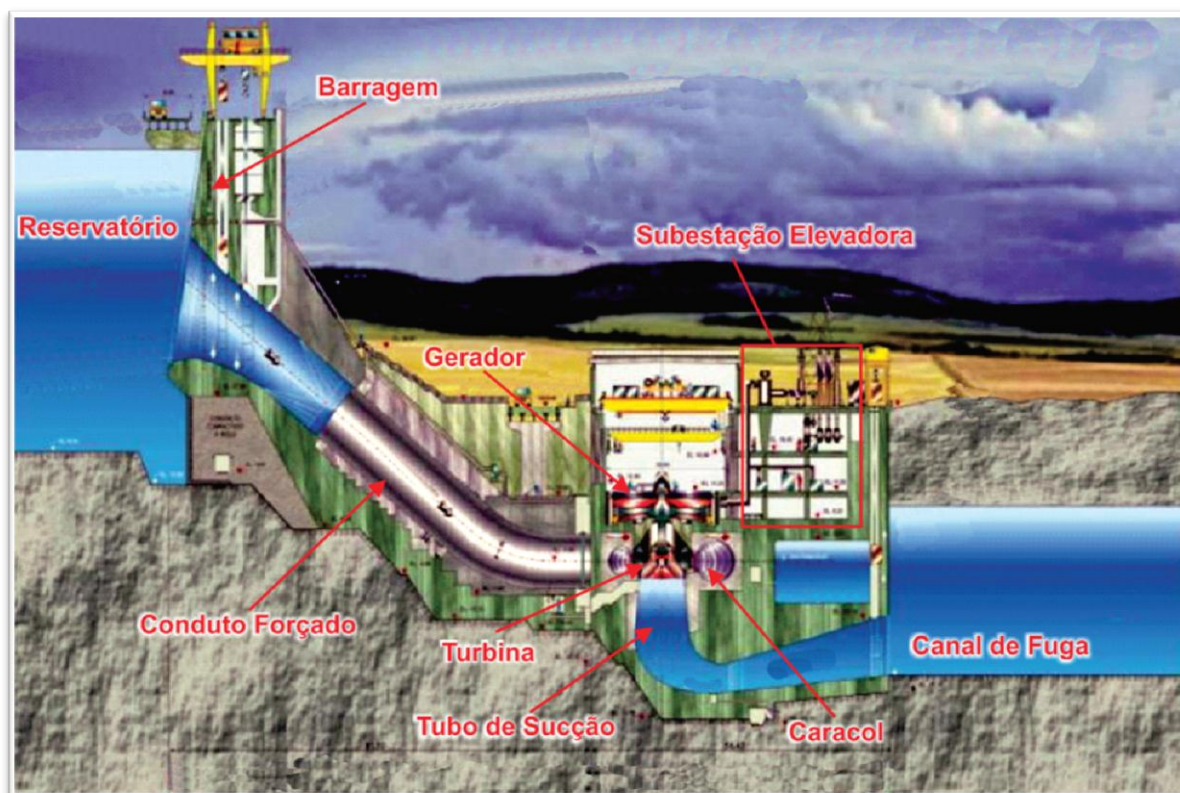


Figura 2.13 – UHE em corte longitudinal, adaptado de Eletrobrás-Eletronorte Tucuruí

As dimensões de uma UHE variam em diversos aspectos, mas cada uma, desde a menor a maior, pode ser vista como um grande complexo arquitetônico e tecnológico. Requerendo grandes investimentos em manutenção e modernização. Principalmente na proteção e controle.

Essas modernizações, antes de serem implementadas devem ser exaustivamente testadas. E isso não se dá no complexo, visto os riscos iminentes de

um problema em um equipamento não completamente confiável por estar em fase de testes.

Por isso, a importância das simulações computacionais e dos modelos em escala reduzida. Com eles é possível desenvolver novas tecnologias e testá-las quantas vezes forem necessárias, submetendo-os a todos os testes, até que se tenha segurança para implementá-la em uma UHE real.

3. EMULAÇÃO DA TURBINA HIDRÁULICA POR MOTOR CC

Neste capítulo apresenta-se a fundamentação matemática e conceitual para atender a proposta de emulação da turbina hidráulica por um motor CC fazendo seu controle por um controlador digital RST.

A figura 3.1 mostra o diagrama de blocos que representa a estratégia completa de controle para emulação da turbina por um motor CC. Nela encontra-se representado o servoposicionador, a turbina hidráulica e o motor CC que serão modelados matematicamente neste capítulo. Encontram-se ainda dois controladores, onde o controlador que recebe o sinal de referência de velocidade e o regulador de velocidade da turbina hidráulica, e o controlador que recebe a referência de potência é o controlador de potência do motor CC, ambos serão projetados com a técnica apresentada no capítulo 4 e seus projetos encontram-se no capítulo 5.

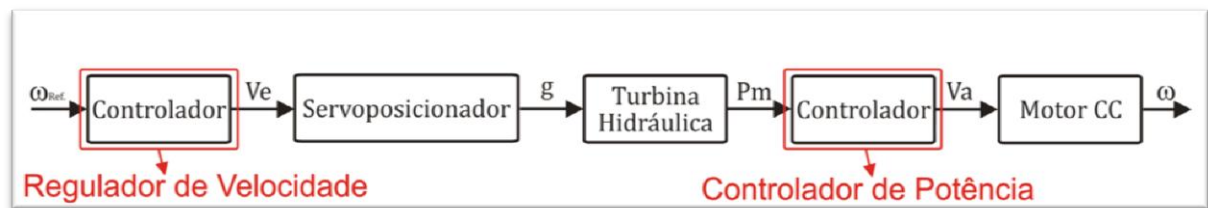


Figura 3.1–Diagrama de Blocos Completo da Estratégia de Controle

3.1. Motor CC

O motor CC converte energia elétrica em mecânica e nada mais é do que um gerador com o fluxo de potência invertido (DEL TORO, 1999). Nessa conversão de energia elétrica em mecânica tem-se um torque mecânico no eixo do motor CC, sendo esse torque mecânico devidamente controlado, faz-se o motor CC emular o torque mecânico de uma turbina hidráulica em seu eixo. Assim o motor CC emula a dinâmica da turbina hidráulica.

Ainda tratando-se do motor CC, uma afirmação pertinente ao nosso estudo diz que *“um motor é um componente eletromecânico que fornece um deslocamento de saída para uma tensão de entrada, isto é, uma saída mecânica gerada por uma entrada elétrica.”* (NISE, 2009). Nesse caso, tem-se que a saída do motor CC é diretamente proporcional a tensão de entrada. Então ao controlar a tensão de entrada no motor CC, controla-se a saída mecânica do mesmo.

Quanto à controlabilidade do motor CC, sabe-se que este possui uma relativa facilidade para o controle de velocidade e isso em uma faixa expressiva de valores e com precisão. Assim, tem se tornado frequente o uso do mesmo em diversas aplicações com essas exigências (DEL TORO, 1999), (FITZGERALD, 2006).

Diz-se ainda que *“devido a recursos tais como torque elevado, possibilidade de controle de velocidade sobre uma ampla faixa de valores, portabilidade, características velocidade-torque bem comportada e adaptabilidade a vários tipos de métodos de controle, os motores CC ainda são usados largamente em numerosas aplicações de controle.”* (DORF e BISHOP, 1998).

Com isso, pode-se destacar a cerca do motor CC, primeiro a facilidade de controle; segundo, a conversão de energia elétrica em mecânica. Sendo assim, o motor CC mostra-se um bom candidato para emulação da turbina hidráulica. Pois, a partir do controle de potência entregue ao motor, pode-se fazer com que este siga um sinal de referência desejado, sendo este sinal de referência o sinal gerado pela função de transferência da turbina hidráulica, gerando assim um torque mecânico no eixo do motor CC, semelhante ao torque mecânico da turbina hidráulica.

Visto a viabilidade do uso do motor CC, apresentam-se as partes constituintes do mesmo, onde se encontram **rotor (armadura), anel comutador ou anel coletor, estator (campo ou excitação) e escovas**, que podem ser vista na figura 3.2.

Quanto a seu funcionamento, deve-se inicialmente produzir um fluxo magnético estatórico alimentando as bobinas estatóricas com corrente contínua. Então, surge o campo magnético fazendo do estator um eletroímã com polaridade fixa.

O rotor, por sua vez, alimentando com corrente contínua por suas escovas, comutador e bobinas passa a produzir pólos magnéticos.

Os pólos magnéticos do estator e do rotor se atraem buscando alinhamento. Como o rotor é uma peça móvel, exerce um deslocamento em direção ao alinhamento dos pólos. Então novas bobinas são alimentadas alterando a condição de equilíbrio dos pólos o que faz com que o rotor busque novamente o alinhamento. Deste modo, as bobinas são alimentadas gerando sempre a necessidade de alinhamento entre os pólos magnéticos, o que faz com que o rotor continue girando.

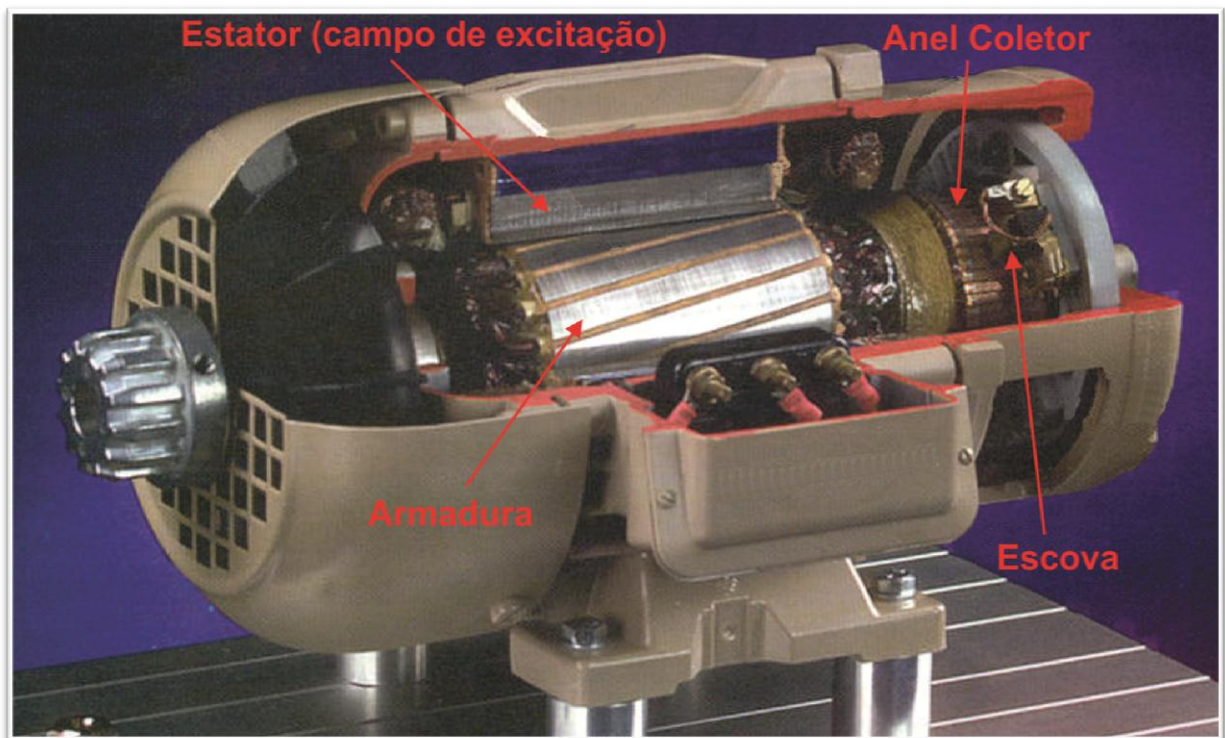


Figura 3.2 - Motor CC e Principais Partes Constituintes, adaptado de (www.tuveras.com)

3.1.1. Modelagem do Motor CC

Esta seção destina-se a modelagem matemática do motor CC. Esta modelagem “*será deduzida por meio de uma aproximação linear do motor real, e os efeitos de segunda ordem, como histerese e queda de tensão nas escovas, serão desprezados.*” (DORF E BISHOP, 1998).

Dentre os métodos de controle para o motor CC, encontra-se: ajuste do fluxo do polo, resistência de armadura externa e tensão terminal, que pode ser no campo ou na armadura do motor CC. Para este estudo, usou-se o controle por tensão terminal na armadura do motor CC. Isso porque “*este esquema é o mais desejável do ponto de vista de flexibilidade e de rendimento operacional elevado.*” (DEL TORO, 1999). Assim sendo, mantém-se a tensão terminal de campo, V_f , constante, veja figura 3.3.

A Figura 3.3 apresenta o diagrama esquemático do Motor CC simplificado, dando ênfase nas seguintes partes: Enrolamento da Armadura (R_a – Resistência da Armadura e L_a – Indutância da Armadura), Enrolamento de Campo (R_f – Resistência de Campo, L_f – Indutância de Campo), Atrito Viscoso (B) e Momento de Inércia (J).

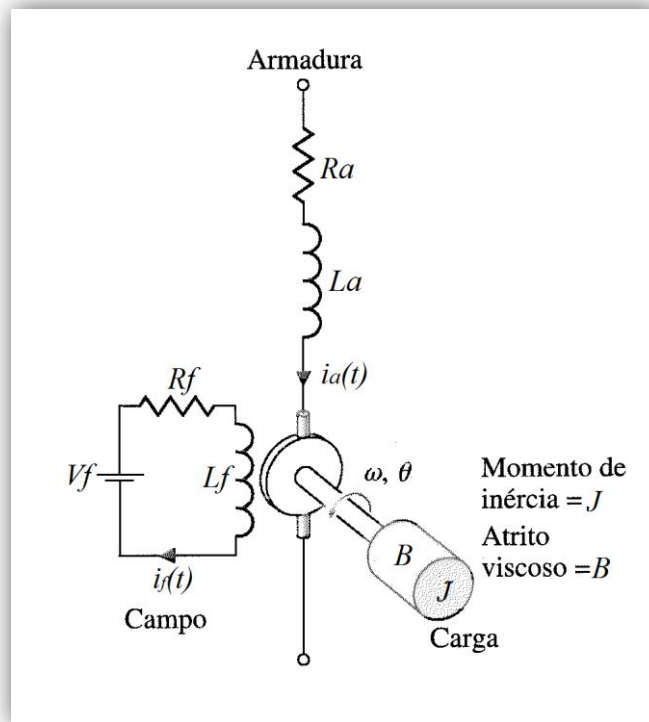


Figura 3.3 - Diagrama Esquemático do Motor CC, adaptado de DORF e BISHOP (2001)

Para obtenção da equação que descreve a dinâmica elétrica do motor CC representado na Figura 3.3, aplica-se a Lei das Tensões de Kirchhoff que resulta na Equação 3.1. Onde $V_a(t)$ é a Tensão Aplicada a Armadura do motor CC e $e_a(t)$ é a Força Contraeletromotriz.

$$V_a(t) = R_a \times i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_a(t) \quad 3.1$$

Aplicando a Transformada de Laplace na Equação 3.1, tem-se a Equação 3.2.

$$\mathcal{L}\{V_a(t)\} = V_a(s) = (R_a + L_a s)I_a(s) + E_a(s) \quad 3.2$$

Rearranjando para montagem do Diagrama de Blocos temos a Equação 3.3.

$$\frac{I_a(s)}{V_a(s) - E_a(s)} = \frac{1}{R_a + L_a s} \quad 3.3$$

A dinâmica mecânica é obtida por meio da Segunda Lei de Newton aplicada as massas girantes, donde se obtêm a Equação 3.4.

$$J\dot{\omega}(t) = T_m - B\omega - T_l \quad 3.4$$

Aplicando a Transformada de Laplace na Equação 3.4 e rearranjando, temos a Equação 3.5.

$$\mathcal{L}\{j\dot{\omega}(t)\} = (Js + B)\Omega(s) = T_m(s) - T_l(s) \quad 3.5$$

O Torque Acelerante (T_a) resulta da diferença do Torque Mecânico (T_m) com o Torque Elétrico (T_l), assim temos (equação 3.6):

$$T_a(s) = T_m(s) - T_l(s) \quad 3.6$$

Substituindo a Equação 3.6 na Equação 3.5 e rearranjando para montagem do Diagrama de Blocos temos a Equação 3.7.

$$\frac{\Omega(s)}{T_a(s)} = \frac{1}{Js+B} \quad 3.7$$

As dinâmicas, elétrica e mecânica, do motor CC com excitação independente e constante tem seu acoplamento representado pelas equações 3.8 e 3.9, de acordo com (FITZGERALD, KINGSLAY JR e UMANS, 2006). Onde K_t é a Constante de Torque e K_v é a Constante de Força Contraeletromotriz.

$$T_m(s) = K_t \times I_a(s) \quad 3.8$$

$$E_a(s) = K_v \times \Omega(s) \quad 3.9$$

De posse das equações 3.3, 3.7, 3.8 e 3.9 monta-se o Diagrama de Blocos, Figura 3.4, que apresenta as dinâmicas elétrica e mecânica e ainda seu acoplamento. Com isso, apresenta a dinâmica do motor CC.

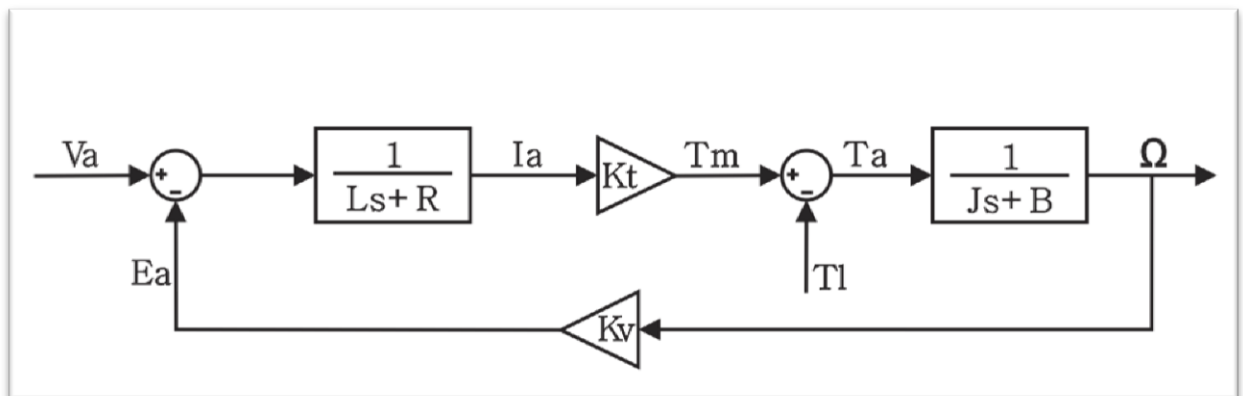


Figura 3.4 – Diagrama de Blocos da Dinâmica do Motor CC

Os dados apresentados na Tabela 1 são retirados de Nascimento (2011) e são referentes à micromáquina de 10k VA do Laboratório de Controle de Sistemas de Potência (LACSPOT) da UFPA - Belém.

Tabela 1 – Dados de Placa do Motor CC

Dados de Placa do Motor CC		
Parâmetro	Notação	Valor
Momento de Inércia	J	4,89k gm ²
Potência Mecânica Nominal	P_{m_n}	9k W
Velocidade Angular Nominal	ω_n	125,6637 rad/s
Corrente Nominal de Armadura	i_{a_n}	27,5 A
Tensão Nominal de Armadura	v_{a_n}	400 V
Corrente Nominal de Campo	i_{f_n}	1,5 A
Tensão Nominal de Campo	V_{f_n}	300 V

Fazendo uso dos dados da tabela 1, calculam-se os parâmetros apresentados no equacionamento do motor CC, que está demonstrado em diagrama de bloco na figura 3.4. A seguir apresentam-se os cálculos dos parâmetros.

Para obtenção da Potência Elétrica Nominal, P_{e_n} , faz-se o produto entre a tensão de armadura nominal, v_{a_n} , e a corrente de armadura nominal, i_{a_n} , que são encontrados na tabela 1. Resultando em,

$$P_{e_n} = v_{a_n} \times i_{a_n} = 400 \text{ V} \times 27,5 \text{ A} = 11 \text{ kW}$$

O Rendimento do Motor é a razão entre a potencia mecânica nominal, P_{m_n} , tabela 1, e a potencia elétrica nominal, P_{e_n} , sendo,

$$\eta = \frac{P_{m_n}}{P_{e_n}} = \frac{9 \text{ kW}}{11 \text{ kW}} = 9/11 = 81,81\%$$

O Torque Mecânico Nominal no eixo do motor CC é encontrado pela razão entre potencia mecânica nominal, P_{m_n} , e a velocidade angular nominal, ω_n , encontrada nos dados de placa do motor CC e apresentados na tabela 1. A equação apresenta-se como,

$$T_{m_n} = \frac{P_{m_n}}{\omega_n} = \frac{9k\ W}{125,6637\ rad/s} = 71,61972789\ Nm$$

A Constante de Torque do Motor, K_T é dada pela razão entre o torque mecânico nominal, T_{m_n} , e a corrente de armadura nominal, i_{a_n} , sendo expressa como

$$K_T = \frac{T_{m_n}}{i_{a_n}} = \frac{71,61972789\ Nm}{27,5\ A} = 2,604353741\ \frac{Nm}{A}$$

Quanto a Constate de Força Contra Eletromotriz, K_V , tem seu valor igual a constante de torque do motor, K_T , mas com unidade $V/rad/s$, assim,

$$K_V = K_T = 2,604353741\ \frac{V}{rad/s}$$

A Força Contra Eletromotriz Nominal, e_{a_n} , é o produto da constante de velocidade, K_V , com a velocidade angular nominal, ω_n . Deste modo, tem-se

$$e_{a_n} = K_V \times \omega_n = 2,604353741\ \frac{V}{rad/s} \times 125,6637 = 327,27\ V$$

A Resistência do Enrolamento da Armadura, R , é a razão entre a diferença da tensão de armadura nominal, v_{a_n} , e a força contra eletromotriz nominal, e_{a_n} , com a corrente de armadura nominal, expressa como

$$R = \frac{v_{a_n} - e_{a_n}}{i_{a_n}} = \frac{400\ V - 327,27\ V}{27,5\ A} = 2,644727273\ \Omega$$

Para obtenção do Amortecimento do Motor pelo Atrito Viscoso (B), toma-se a equação 3.4 e considera o motor operando a vazio na velocidade nominal e em regime permanente, donde se obtém:

$$T_{m_{nl}} = B \times \omega_n \tag{3.10}$$

Entenda-se o subscrito “nl” como *no load*, ou seja, operando a vazio e sem carga.

Então substituindo a equação 3.8 na equação 3.10, e isolando o Atrito Viscoso (B), tem-se:

$$K_T \times i_{a_{nl}} = B \times \omega_n \therefore B = \frac{K_T \times i_{a_{nl}}}{\omega_n} = \frac{2,60435374 \frac{Nm}{A} \times 1,68 A}{125,6637 rad/s} = 0,0348250458 \frac{Nm}{rad/s}$$

A corrente $i_{a_{nl}} = 1,68 A$, foi obtida por medição conforme Nascimento Filho (2011) na micromáquina de 10k VA do Laboratório de Controle de Sistemas de Potência (LACSPOT) da UFPA - Belém.

Assim, a tabela 2 apresenta os parâmetros do Motor CC, reitera-se que esses parâmetros referem-se à micromáquina de 10k VA, (NASCIMENTO FILHO, 2011).

Tabela 2 – Parâmetros Calculados do Motor CC

Parâmetros do Motor CC		
Parâmetro	Símbolo	Valor
Constante de Torque	K_T	2,60435374 Nm/A
Constante de Força Contraeletromotriz	K_v	2,60435374 V/rad/s
Momento de Inércia	J	4,89 kgm ²
Constante de Amortecimento	B	0,0348250458 Nm/rad/s
Resistência de Armadura	R	2,644727 Ω
Indutância de Armadura	L	0,0282m H

3.1.2. Modelagem do Motor CC em PU

A modelagem em PU torna a análise mais simples, direta e compreensível. Além disso, para emulação da turbina hidráulica pelo motor CC, os parâmetros em PU são necessários para facilitar a interação da função de transferência da turbina hidráulica com a função de transferência do motor CC.

Para a modelagem em PU, tomam-se como grandezas bases, as grandezas nominais da máquina ou suas derivadas. Para identificar essas grandezas base e em PU, utiliza-se o subscrito (_b) e o sobrescrito ([~]) respectivamente.

Para modelar a dinâmica mecânica do motor CC, devemos considerar a Constante de Inércia conforme (KUNDUR, 1994) como:

$$H = \frac{\text{Energia Cinética na Velocidade Nominal}}{\text{Potência Base}} \quad 3.11$$

Que resulta em:

$$H = \frac{\frac{1}{2}J\omega_{mo}^2}{S_b} \quad 3.12$$

Onde ω_{mo}^2 é a velocidade mecânica nominal da turbina.

Tomando ω_{mo} como ω_b e isolando o momento de inércia (J), tem-se:

$$J = \frac{2HS_b}{\omega_b^2} \quad 3.13$$

Finalmente, para modelagem mecânica do motor CC substitui-se a Equação 3.13 na equação 3.4, obtendo:

$$\frac{2HS_b}{\omega_b^2} \dot{\omega}(t) = Tm - B\omega - Tl \quad 3.14$$

Dividindo-se a Equação 3.14 por $\frac{S_b}{\omega_b}$ e escrevendo $\dot{\omega}(t)$ como $\frac{d}{dt}(\omega(t))$ obtém-se:

$$2H \frac{d}{dt} \left(\frac{\omega(t)}{\omega_b} \right) = \frac{Tm - B\omega - Tl}{\frac{S_b}{\omega_b}} = \frac{Tm}{T_b} - \frac{B\omega}{B_b\omega_b} - \frac{Tl}{T_b} \quad 3.15$$

Tomando o Torque Base como $T_b = k_t \times i_b = B_b \times \omega_b$ podemos reescrever a Equação 3.14 como

$$2H \frac{d}{dt}(\bar{\omega}) = \bar{T}m - \bar{B}\bar{\omega} - \bar{T}l \quad 3.16$$

Assim temos a modelagem mecânica do motor CC em PU expressa na Equação 3.16.

Aplicando a Transformada de Laplace e rearranjando a Equação 3.16 para montagem do Diagrama de Blocos temos

$$\frac{\bar{\Omega}(s)}{\bar{T}a(s)} = \frac{1}{2\bar{H}s + \bar{B}} \quad 3.17$$

Para obtenção da dinâmica elétrica do motor CC considere

$$P_{eb} = P_{db} + P_d = \frac{P_b}{\eta} \quad 3.18$$

Onde P_{db} é a Potência Dissipada Base e P_b é Potência Mecânica Base. Então se divide a Equação 3.18 por P_{eb} obtendo

$$1 = \frac{P_{db}}{P_{eb}} + \eta \Rightarrow P_{db} = (1 - \eta)P_{eb} \quad 3.19$$

Tomando $P_{db} = R \times i_b^2$ e dividindo pela corrente base (i_b) resulta em:

$$R \times i_b = \frac{P_{db}}{i_b} \quad 3.20$$

Substituindo a Equação 3.20 na Equação 3.19, tem-se:

$$R \times i_b = \frac{(1-\eta)P_{eb}}{i_b} = \frac{(1-\eta)v_b I_b}{i_b} = (1 - \eta)v_b \quad 3.21$$

Tomando a Equação 3.18 e substituindo nela a Equação 3.21:

$$R \times i_b = \frac{(1-\eta)P_b}{\eta i_b} = \frac{(1-\eta)T_b \omega_b}{\eta i_b} = \frac{(1-\eta)K_T i_b \omega_b}{\eta i_b} = \frac{(1-\eta)K_T \omega_b}{\eta} \quad 3.22$$

Então se divide a Equação 3.1 por $R i_b$ resultando em:

$$\left(\frac{L}{R}\right) \frac{d}{dt} \left(\frac{i_a}{i_b}\right) = \frac{v_a}{R i_b} - \frac{i_a}{i_b} - \frac{K_v \omega}{R i_b} \quad 3.23$$

Agora substituímos as Equações 3.21 e 3.22 na Equação 3.23

$$\left(\frac{L}{R}\right) \frac{d}{dt} \left(\frac{i_a}{i_b}\right) = \frac{v_a}{(1-\eta)v_b} - \frac{i_a}{i_b} - \frac{\eta K_v \omega}{(1-\eta)K_T \omega_b} \quad 3.24$$

Finalmente temos a Equação 3.25 que descreve a dinâmica elétrica do motor CC.

$$\left(\frac{L}{R}\right) \frac{d}{dt} \bar{i}_a = \left(\frac{1}{1-\eta}\right) \bar{v}_a - \bar{i}_a - \left(\frac{1}{1-\eta}\right) \bar{\omega} \quad 3.25$$

Aplicando a Transformada de Laplace e rearranjando a Equação 3.25 para montagem do Diagrama de Blocos temos:

$$\frac{\bar{T}_m}{\bar{v}_a - \eta \bar{\omega}(s)} = \frac{\left(\frac{1}{1-\eta}\right)}{\frac{L}{R}s + 1} \quad 3.26$$

Partindo para a mudança do acoplamento entre as partes elétricas e mecânicas, tomamos a Equação 3.8 e divide-se por T_b , onde temos:

$$\frac{T_m(s)}{T_b} = \frac{K_t i_a(s)}{T_b} = \frac{K_T i_a(s)}{K_T i_b} \Rightarrow \bar{T}_m = \bar{i}_a \quad 3.27$$

De posse das equações 3.17 e 3.26 monta-se o Diagrama de Blocos, figura 3.5, que apresenta as dinâmicas elétrica e mecânica e ainda seu acoplamento em PU. Com isso, apresenta a dinâmica do motor CC em PU.

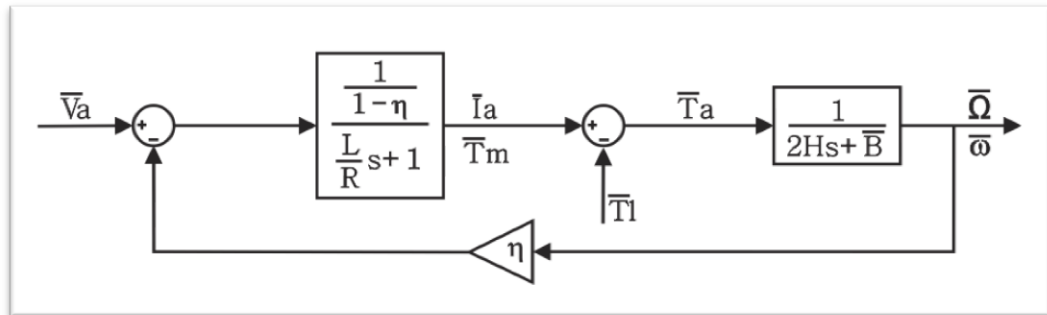


Figura 3.5 – Diagrama de Blocos da Dinâmica do Motor CC em PU

A tabela 3 apresenta os parâmetros do motor CC em PU referentes à micromáquina de 10k VA, (NASCIMENTO, 2011).

Tabela 3 – Parâmetros do Modelo Matemático em PU do Motor CC

Parâmetros do Modelo Matemático em PU do Motor CC		
Parâmetro	Símbolo	Valor
Rendimento do Motor	η	$9/11 = 81,81\%$
Constante de Inércia	H	$4,29 \text{ s}$
Constante de Amortecimento em PU	\bar{B}	$0,06111 \text{ pu}$
Indutância de Armadura	L	$0,0282 \text{ H}$
Resistência de Armadura	R	$2,644727 \Omega$

3.2. Modelagem da Turbina Hidráulica

Por muito tempo, conforme KUNDUR (1994), a representação da turbina hidráulica em estudos de estabilidade do sistema foi representada pela função de transferência linear apresentada na equação 3.28.

$$\frac{\Delta \bar{P}_m}{\Delta \bar{G}} = \frac{1 - T_w s}{1 + \frac{1}{2} T_w s} \quad 3.28$$

Onde:

$\Delta \bar{P}_m$ é a variação da potência mecânica no eixo da turbina hidráulica;

$\Delta \bar{G}$ é variação da posição do distribuidor;

T_w é tempo de partida da água.

Essa função de transferência, no entanto, representa a dinâmica da turbina para pequenas variações em torno de um ponto de operação. Vale ressaltar que a dedução da equação 3.28 considera que, segundo KUNDUR (1994):

- O conduto forçado é inelástico;
- A água é incompressível;
- A velocidade da água varia proporcionalmente com a abertura do distribuidor e com a raiz quadrada da queda d'água;

$$U = K_u \times G \times \sqrt{H'}$$

Onde:

U é a velocidade da água no conduto;

K_u é a constante de proporcionalidade;

G é a posição do distribuidor;

H' é a queda hidráulica no distribuidor.

- A potência mecânica desenvolvida pela turbina é proporcional ao produto da queda pelo volume do fluxo d'água.

Porém, esse modelo quando utilizado para estudos envolvendo grandes variações de frequência apresenta comportamento irregular, tornando-se inadequado para os estudos. Então, segue um modelo não-linear que atende ao comportamento adequado em grandes frequências, sendo útil para simulações de grandes sinais no domínio do tempo, KUNDUR, (1994). Este modelo não-linear citado será apresentado conforme KUNDUR, (1994).

Considerando a água e as paredes do conduto forçado incompressíveis, o conjunto de equações 3.29 apresenta o modelo não-linear da turbina hidráulica para estudos de estabilidade em grandes sinais.

$$\left. \begin{aligned}
 \bar{G} &= A_t \times \bar{g} \\
 \bar{H} &= \left(\frac{\bar{U}}{\bar{G}} \right)^2 \\
 \bar{U} &= \frac{1}{T_{ws}} (\bar{H}_o - \bar{H}) \\
 \bar{P}_m &= \bar{H} (\bar{U} - \bar{U}_{NL}) \\
 \bar{T}_m &= \bar{P}_r \frac{\bar{P}_m}{\bar{\omega}}
 \end{aligned} \right\} \quad 3.29$$

Onde:

\bar{g} é a abertura de fato do distribuidor;

\bar{G} é a abertura ideal do distribuidor;

\bar{U} é a velocidade da água na turbina;

\bar{U}_{NL} é a velocidade da água com a turbina rodando sem carga;

\bar{H} é a queda hidráulica medida do nível da turbina até o nível do lago;

\bar{H}_o é a queda hidráulica inicial;

\bar{P}_m é a potência mecânica desenvolvida pela turbina;

$\bar{\omega}$ é a velocidade do conjunto turbina-gerador;

\bar{T}_m é o torque mecânico desenvolvido pela turbina;

A_t é o ganho da turbina hidráulica;

T_w é o tempo de partida da água e

\bar{P}_r é uma mudança de base, a qual é dada pela equação seguinte:

$$\bar{P}_r = \frac{\text{Potência nominal da Turbina}}{\text{Potência base do sistema}}$$

De posse do conjunto de equações 3.28 apresenta-se na figura 3.6 o diagrama de blocos do modelo não-linear da turbina hidráulica.

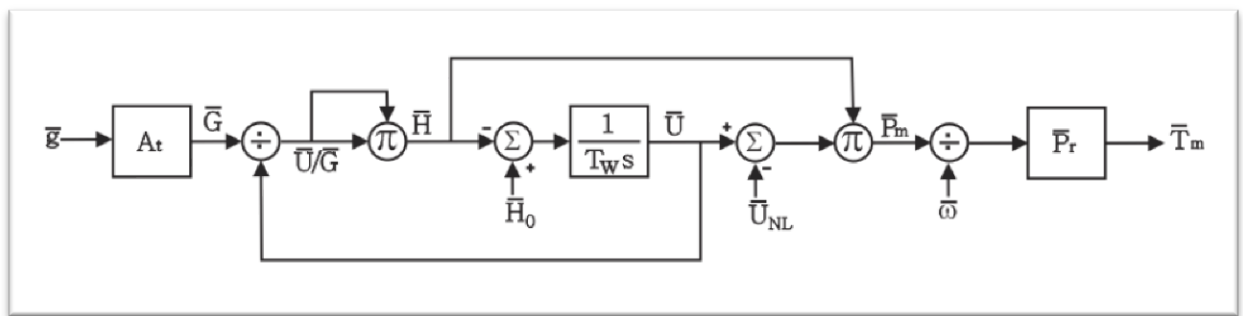


Figura 3.6 – Digrama de Blocos do Modelo Não-linear da Turbina Hidráulica, KUNDUR (1994)

3.3. Modelagem do Servoposicionador

A função de transferência que caracteriza o conjunto válvula e servo-motor é dada pela equação 3.30, (KUNDUR, 1994) e (OGATA, 2003).

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K}{s} \quad 3.30$$

Em que:

$Y(s)$ é o deslocamento do êmbolo do servo-motor;

$X(s)$ é o deslocamento do carretel da válvula e

K é o ganho do conjunto válvula e servo-motor.

Considerando o esquema hidráulico de atuação apresentado na figura 2.8, servoposicionador, tem-se a válvula piloto e o servo-motor principal, além do estágio intermediário composto pelo servo-motor de controle e válvula distribuidora. Com isso, modela-se, de modo simplificado, o servoposicionador da figura 2.8 pelo diagrama de blocos da figura 3.7, (PAOLO, 2009).

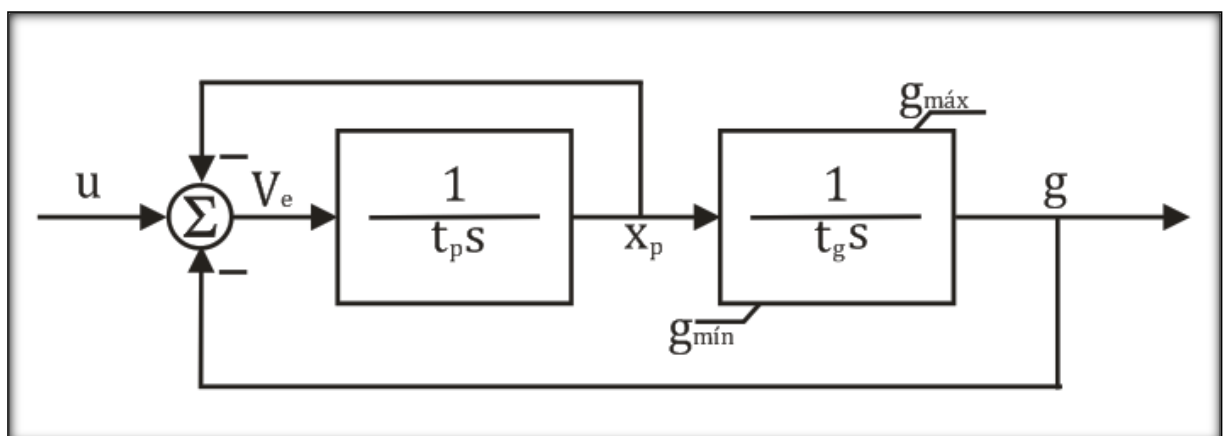


Figura 3.7 – Digrama de Blocos Simplificado do Servoposicionador, adaptado de (PAOLO, 2009)

Na figura 3.7:

u é o sinal de controle do regulador de velocidade;

x_p é a posição da válvula distribuidor em pu;

g é a posição do servo-motor em pu;

V_e é a tensão aplicada na armadura do motor linear acionado pela válvula piloto;

t_p é a constante de tempo resultante para o servo-motor piloto e válvula piloto;

t_g é a constante de tempo resultante para o servo-motor principal e válvula distribuidora;

$g_{m\acute{a}x}$ é o deslocamento máximo do servo-motor e

$g_{m\acute{i}n}$ é o deslocamento mínimo do servo-motor.

Ainda é possível mais uma simplificação, quando $t_p \ll t_g$ o servoposicionador da figura 3.7 pode ser modelado pela função de transferência dada na equação 3.31, (STRAH, B, KULJACA, O e VUKIC, Z. 2005).

$$\frac{X_1(s)}{U(s)} = \frac{1}{t_g s + 1} \quad 3.31$$

3.4. Controle de Potência Mecânica do Motor CC

A partir da potência entregue ao motor CC tem-se uma potência mecânica de saída em seu eixo. Ao fazer o controle dessa potência entregue ao motor CC pode-se controlar a potência mecânica. Assim, com a função de transferência da turbina hidráulica entrega-se o sinal de referência, potência mecânica, para o controlador. Este por sua vez atua sobre a armadura do motor CC fazendo-o seguir o sinal de referência e entregando a potência mecânica equivalente a de referência. Deste modo o motor CC emula, em seu eixo, a potência mecânica do eixo de uma turbina hidráulica.

Para isso, apresenta-se uma análise dos efeitos causados no motor CC quando este simula a turbina hidráulica. Está análise segue conforme NASCIMENTO (2011).

A figura 3.8 apresenta o diagrama de bloco do motor CC com um controlador, recebendo o sinal de referência \bar{P}_m^* proveniente do diagrama de blocos da turbina hidráulica.

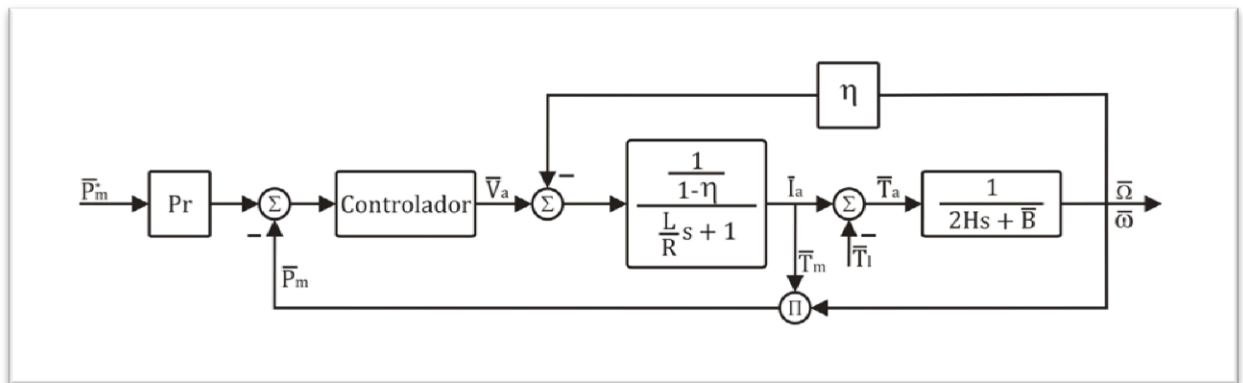


Figura 3.8 – Digrama de Blocos do Motor CC com Controlador

Ao analisar a planta, figura 3.8, em regime permanente, observando as constantes de tempo da parte elétrica $\left(\frac{L}{R}\right)$ e da parte mecânica $\left(\frac{2H}{B}\right)$, sabe-se que a dinâmica da parte mecânica entra em regime muito mais lentamente que a dinâmica da parte elétrica. Com isso, temos que $\frac{L}{R} \ll \frac{2H}{B}$, então a velocidade angular no eixo do motor ($\bar{\omega}$) varia muito lentamente se comparada com a dinâmica elétrica do motor CC. Assim, pode-se considerar essa velocidade angular ($\bar{\omega}$) aproximadamente constante. Por tanto, o diagrama de blocos da figura 3.8 pode ser simplificado com as considerações supra, tornando-se o diagrama mostrado na figura 3.9, (NASCIMENTO, 2011)

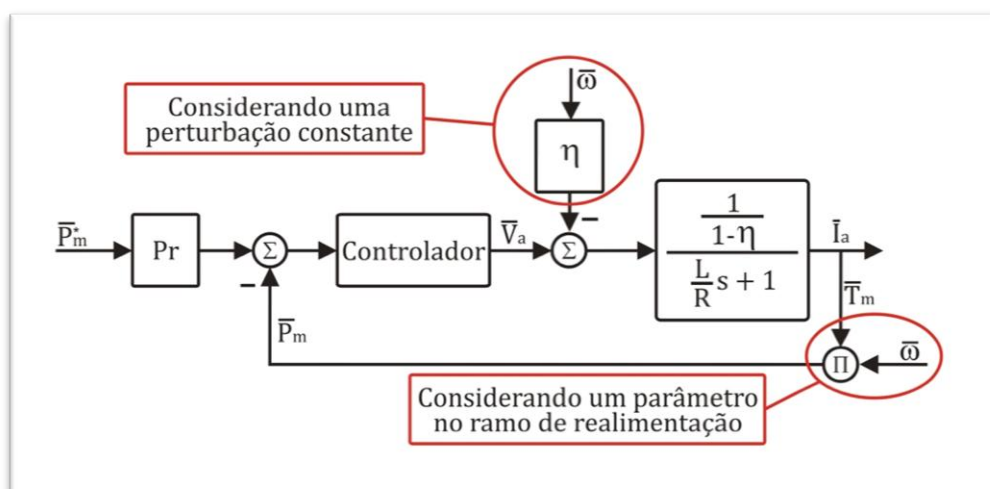


Figura 3.9 – Digrama de Blocos do Motor CC com Controlador PI e considerando a velocidade $\bar{\omega}$ constante.

A partir das considerações acerca da velocidade $\bar{\omega}$, apresentadas em destaque na figura 3.9, toma-se a ação da força contraeletromotriz ($\eta\bar{\omega}$) como uma perturbação e a velocidade ($\bar{\omega}$) no ramo de realimentação como um parâmetro que varia muito lentamente e com pequenos desvios. Assim, a figura 3.10 apresenta o diagrama de blocos com as considerações supracitadas. Este diagrama, figura 3.10, será utilizado para análise dos efeitos causados no motor CC e assim projeto do sistema de controle do motor CC.

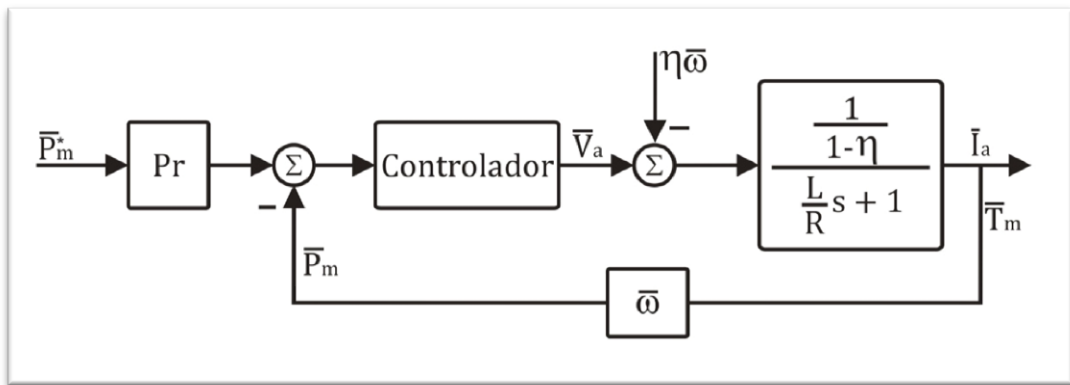


Figura 3.10 – Digrama de Blocos utilizados para análise e projeto de sistema de controle de potência para o motor CC

Para análise dos efeitos do sinal de referência \bar{P}_m^* e da perturbação $\eta\bar{\omega}$ sobre o sinal de saída do sistema de controle, aplica-se o teorema da superposição no diagrama de blocos da figura 3.10, assim:

$$\bar{T}_m = \bar{T}_{m_1}|_{\eta\bar{\omega}=0} + \bar{T}_{m_2}|_{\bar{P}_m^*=0} \quad 3.32$$

Nota-se, na equação 3.32, que o torque mecânico desenvolvido pelo motor CC é decomposto em duas parcelas, sendo a primeira (\bar{T}_{m_1}) o efeito do sinal de potência de referência (\bar{P}_m^*) e a segunda (\bar{T}_{m_2}) o efeito da ação da força contraeletromotriz ($\eta\bar{\omega}$) do motor CC.

Para análise da primeira parcela \bar{T}_{m_1} , quando $\eta\bar{\omega} = 0$, tem-se:

$$\bar{T}_{m_1} = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{\left(\frac{as+b}{s}\right) \left[\frac{1/(1-\eta)}{\frac{L}{R}s+1}\right]}{1 + \bar{\omega} \left(\frac{as+b}{s}\right) \left[\frac{1/(1-\eta)}{\frac{L}{R}s+1}\right]} \frac{\bar{P}_m^* P_r}{s} = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{\frac{as+b}{1-\eta}}{s \left(\frac{L}{R}s+1\right) + \frac{\bar{\omega}}{1-\eta}(as+b)} \bar{P}_m^* P_r \quad 3.33$$

Quando o sistema, figura 3.10, entra em regime, a equação 3.33 torna-se:

$$\frac{\bar{T}_{m_1}}{\bar{P}_m^* P_r} = \frac{\frac{b}{1-\eta}}{\frac{\bar{\omega}}{1-\eta}} = \frac{1}{\bar{\omega}} \therefore \bar{T}_{m_1} = P_r \frac{\bar{P}_m^*}{\bar{\omega}} \quad 3.34$$

Analisando, então, a segunda parcela \bar{T}_{m_2} , quando $\bar{P}_m^* = 0$, tem-se:

$$\bar{T}_{m_2} = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{\left[\frac{1/(1-\eta)}{\frac{L}{R}s+1} \right]}{1+\bar{\omega} \left(\frac{as+b}{s} \right) \left[\frac{1/(1-\eta)}{\frac{L}{R}s+1} \right]} \frac{(-\eta\bar{\omega})}{s} = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{\frac{s}{1-\eta}(-\eta\bar{\omega})}{s \left(\frac{L}{R}s+1 \right) + \frac{\bar{\omega}}{1-\eta}(as+b)} \quad 3.35$$

Considerando, novamente o sistema em regime, a equação 3.35 torna-se:

$$\bar{T}_{m_2} = 0 \quad 3.36$$

Aqui observamos que o controlador rejeita a ação da força contraeletromotriz que age como perturbação no sistema de controle de potência do motor CC.

Essa conclusão é ratificada por OGATA (2003) quando apresenta uma análise de resposta a troque de perturbação com controle proporcional. Para está análise é usado o sistema em diagrama de blocos apresentado na figura 3.11.

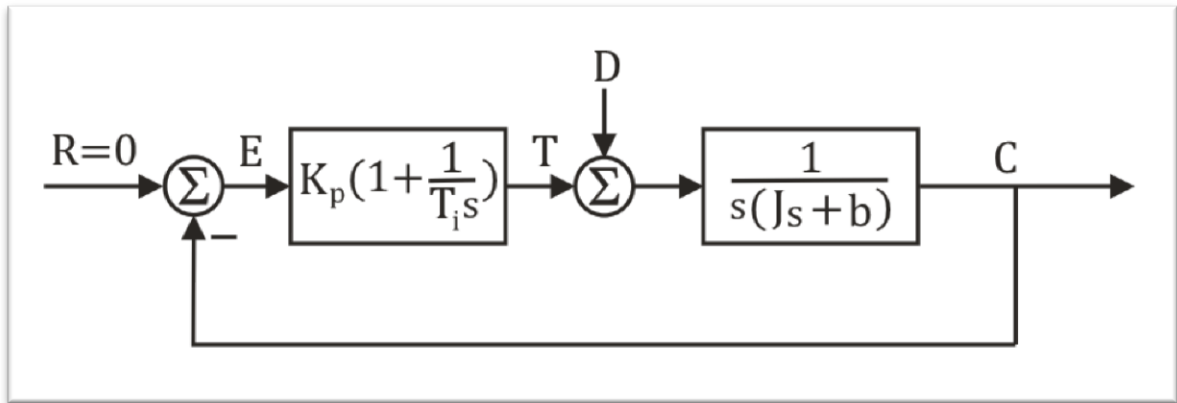


Figura 3.11 – Controle proporcional-integral de uma carga constituída de inércia e atrito viscoso, adaptado de OGATA (2003)

Nesse diagrama de blocos, figura 3.11, R é o sinal de referência, E é o erro dado pela diferença entre o sinal de referência (R) e o sinal de saída C . T é o sinal de controle e D a perturbação.

Assim, a função de transferência do sistema da figura 3.11 é

$$\frac{C(s)}{D(s)} = \frac{s}{Js^3 + bs^2 + K_p s + \frac{K_p}{T_i}}$$

Fazendo $R(s) = 0$ temos que

$$E(s) = R(s) - C(s) \therefore E(s) = -C(s)$$

Assim, a função de transferência pode ser reescrita como

$$\frac{E(s)}{D(s)} = -\frac{s}{Js^3 + bs^2 + K_p s + \frac{K_p}{T_i}}$$

Considerando o sistema estável, isolando o erro $E(s)$ e admitindo uma perturbação P_d temos

$$E(s) = -\frac{1}{Js^3 + bs^2 + K_p s + \frac{K_p}{T_i}} \times \frac{1}{s}$$

Onde aplicando o Teorema do Valor Final encontramos

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s E(s)$$

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{-s}{Js^3 + bs^2 + K_p s + \frac{K_p}{T_i}} \times \frac{1}{s}$$

$$e_{ss} = 0$$

Observe que o controlador proporcional-integral fornece um sinal de controle capaz de anular o efeito da perturbação.

Portanto, observa-se que a rejeição da força contraeletromotriz ($\eta \bar{\omega}$) observada na equação 3.36 quando se considera $\bar{P}_m^* = 0$ na figura 3.10 é esperada diante dos cálculos imediatamente apresentados.

Então, de posse das equações 3.32, 3.34 e 3.36, temos:

$$\bar{T}_m = \bar{T}_{m_1} + \bar{T}_{m_2} \rightarrow \bar{T}_m = P_r \frac{P_m^*}{\bar{\omega}} \quad 3.37$$

Onde se conclui que quando a parte elétrica do motor CC entra em regime permanente, a dinâmica em malha fechada do sistema de controle, figura 3.5, reduz-se ao sistema ilustrado na figura 3.12, que ocorre devido às partes elétricas do motor CC entrar em regime bem mais rápido que suas partes mecânicas.

Note ainda que a equação 3.37 completa o sistema de equação 3.29 que descreve a dinâmica da turbina hidráulica.

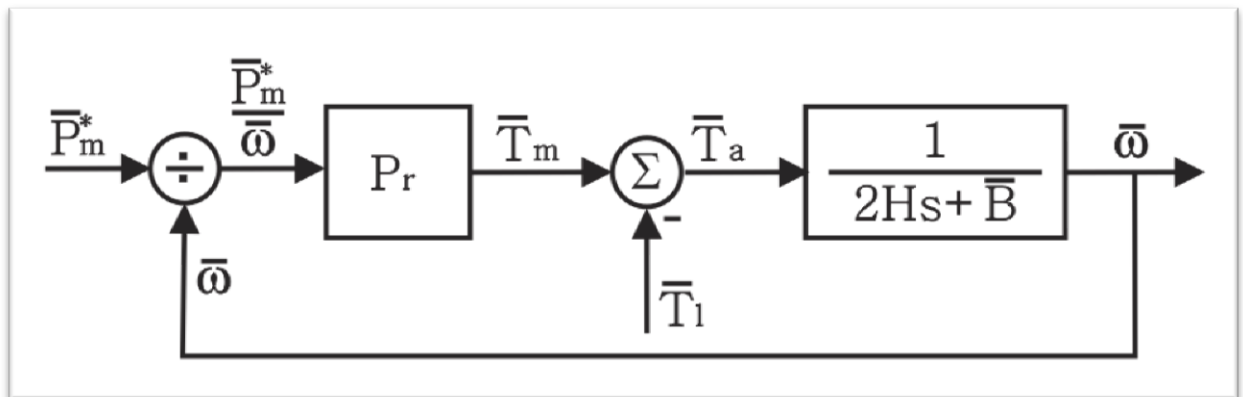


Figura 3.12 – Dinâmica das massas girantes do conjunto motor e gerador quando o sistema de controle de potência entra em regime permanente

Isso mostra que o motor CC pode emular o torque de uma turbina quando controlada a potência elétrica entregue a sua armadura.

4. ESTRATÉGIA DE CONTROLE DIGITAL PARA EMULAÇÃO DA TURBINA HIDRÁULICA POR MOTOR CC

Os avanços tecnológicos em controle digital se deram em praticamente todos os segmentos da vida moderna, com destaque ao controle de processos industriais. Assim o controle analógico vem sendo substituído pelo digital que apresenta maior capacidade de solucionar os complexos processos e atender as suas especificações que cada vez mais exigem maior flexibilidade. Entre as vantagens do controle digital encontra-se: vasta gama de escolhas entre as estratégias de controle, o uso de algoritmos cada vez mais complexos e eficientes e técnicas ajustáveis para sistemas com atraso de transporte.

Diante desses avanços e suas vantagens, esta seção apresenta o controle digital por alocação polinomial de pólos em uma estrutura RST. Inicialmente apresenta-se a fundamentação genérica para construção de um controlador RST. Em seguida aplica-se essa fundamentação ao nosso estudo, construindo um controlador RST para o motor CC em questão.

4.1. Estrutura Canônica RST

A estrutura RST viabiliza, por meio do posicionamento dos pólos de malha fechada, uma análise da robustez e do desempenho dinâmico do sistema considerando as especificações de desempenho do projeto. E ainda o projeto de controladores tanto para sistemas do tipo SISO (single input and single output, entrada simples e saída simples) quanto para sistemas MIMO (multiple inputs and multiple outputs, entradas múltiplas e saídas múltiplas).

Regulation, Sensitivity e Tracking ou Regulação, Sensibilidade e Rastreamento, respectivamente, essa é a origem da sigla RST que faz referência aos polinômios em Z do controlador. Sendo T (tracking) o termo que processa o sinal de referência, S (sensitivity) o termo que processa o sinal de controle e R (regulation) o termo que processa o sinal de erro. A figura 4.1 ilustra a estrutura RST, note que esta estrutura permite o projeto de controladores com dois graus de liberdade (regulação e rastreamento). Isto fica claro ao observar que o sinal da variável a ser controlada e o sinal de referência podem ser tratados de forma independentes. Assim, é possível atingir o comportamento desejado de rastreamento (mudança de referência) e o comportamento de regulação desejado

(rejeição a perturbações) de modo independente entre eles. (LANDAU e ZITO, 2006) (ASTRÖN e WITTENMARK, 1997).

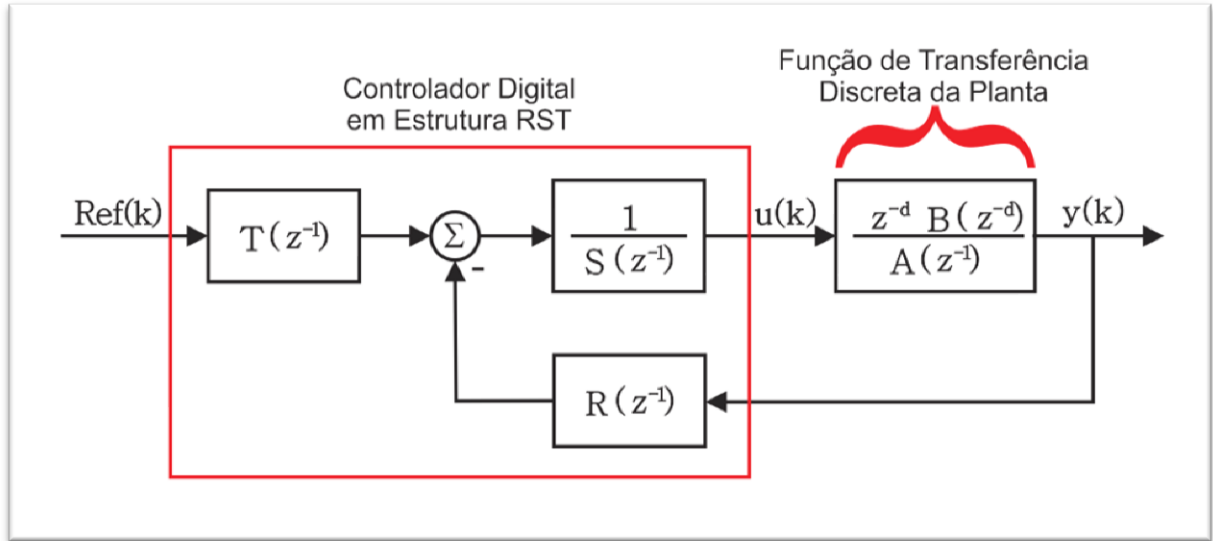


Figura 4.1 – Diagrama de Blocos do Sistema Discretizado com Controlador RST

A figura 4.1 apresenta o controlador digital em estrutura RST e a planta discretizada. Desse diagrama, apresentam-se as seguintes definições, conforme (LANDAU e ZITO, 2006) (ASTRÖN e WITTENMARK, 1997).

A função de transferência discreta da planta apresenta-se de acordo com a equação 4.1,

$$H(z^{-1}) = \frac{z^{-d}B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \quad 4.1$$

O expoente d representa o atraso medido em períodos de amostragem. Os polinômios $A(z^{-1})$ e $B(z^{-1})$ de grau n_A e n_B , respectivamente, devem obedecer as seguintes formas canônicas:

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{n_A} z^{-n_A} \quad 4.2$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_{n_B} z^{-n_B} \quad 4.3$$

O controlador digital RST tem a seguinte função de transferência (equação 4.4) deduzida do diagrama de blocos da figura 4.1:

$$U(z^{-1}) = \frac{T(z^{-1})}{S(z^{-1})} Ref(z^{-1}) - \frac{R(z^{-1})}{S(z^{-1})} Y(z^{-1}) \quad 4.4$$

Os polinômios $R(z^{-1})$ e $S(z^{-1})$ de grau n_R e n_S , respectivamente, devem obedecer as seguintes formas canônicas:

$$R(z^{-1}) = r_0 + r_1 z^{-1} + r_2 z^{-2} + \dots + r_{n_R} z^{-n_R} \quad 4.5$$

$$S(z^{-1}) = 1 + s_1 z^{-1} + s_2 z^{-2} + \dots + s_{n_S} z^{-n_S} \quad 4.6$$

Para que a escolha do polinômio $T(z^{-1})$ seja feita de modo a não acrescentar zeros ao sistema de controle em malha fechada, a escolha deve ser feita conforme equação 4.7, (LANDAU e ZITO, 2006).

$$T(z^{-1}) = R(1) \quad 4.7$$

Novamente analisando o diagrama de blocos da figura 4.1 e fazendo uma inspeção na sua malha direta, encontra-se a função de transferência de malha aberta (equação 4.8).

$$H_{ma}(z^{-1}) = \frac{T(z^{-1}) z^{-d} B(z^{-1})}{S(z^{-1}) A(z^{-1})} \quad 4.8$$

Em nova inspeção no diagrama de blocos da figura 4.1, agora considerando a realimentação, por tanto a participação do polinômio $R(z^{-1})$, apresenta-se a função de transferência de malha fechada (equação 4.9).

$$H_{mf}(z^{-1}) = \frac{z^{-d} B(z^{-1}) T(z^{-1})}{A(z^{-1}) S(z^{-1}) + z^{-d} B(z^{-1}) R(z^{-1})} \quad 4.9$$

A equação 4.8 pode ser escrita como:

$$H_{mf}(z^{-1}) = \frac{z^{-d} B(z^{-1}) T(z^{-1})}{P(z^{-1})} \quad 4.10$$

Onde $P(z^{-1})$ é a equação característica cujas raízes são os pólos de malha fechada do sistema. Esse polinômio, de grau n_P , e é também a equação de Bezout que pode ser escrita da seguinte forma:

$$P(z^{-1}) = 1 + p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2} + \dots + p_{n_P} z^{-n_P} \quad 4.11$$

Fazendo a decomposição do polinômio $P(z^{-1})$ em outros dois polinômios, temos $P_D(z^{-1})$ e $P_F(z^{-1})$, de graus n_D e n_F , respectivamente. As raízes de $P_D(z^{-1})$

são os pólos dominantes e as raízes de $P_F(z^{-1})$ são os pólos auxiliares, e são δ_i e α_j respectivamente, esses polinômios têm a seguinte forma canônica:

$$P_D(z^{-1}) = (1 - \delta_1 z^{-1})(1 - \delta_2 z^{-1}) \quad 4.12$$

$$P_F(z^{-1}) = (1 - \alpha_1 z^{-1})(1 - \alpha_2 z^{-1}) \dots (1 - \alpha_{n_F} z^{-1}) \quad 4.13$$

Nesse caso, tem-se:

$$n_F = n_P - n_D = n_P - 2 \quad 4.14$$

4.2. Projeto do Controlador por Alocação Polinomial de Pólos

No controle por alocação polinomial projetam-se controladores digitais com estrutura RST. Estes controladores são eficientes em sistemas estáveis ou instáveis, de fase mínima ou não mínima. Quanto à ordem da planta e o atraso de tempo, não há restrições. Porém, a única restrição a ser considerada é que o numerador e o denominador da função de transferência da planta não devem ter fatores primos em comum, em outras palavras, não devem ser co-primos (LANDAU e ZITO, 2006).

A obtenção dos parâmetros RST, portanto a construção do controlador, dar-se pela solução da equação de Bezout, equação 4.15,

$$P(z^{-1}) = 1 + p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2} + \dots + p_{n_P} z^{-n_P} \quad 4.15$$

Que, quando colocada na forma matricial, tem a forma apresentada na equação 4.16,

$$\mathbf{p} = \mathbf{M}\mathbf{x} \quad 4.16$$

Os elementos do vetor \mathbf{x} , apresenta os parâmetros $R(z^{-1})$ e $S(z^{-1})$ do controlador, como segue na equação 4.17:

$$\mathbf{x} = [1 \ s_1 \ s_2 \ \dots \ s_{n_S} \ r_1 \ r_2 \ \dots \ r_{n_R}]^T \quad 4.17$$

O vetor \mathbf{p} apresenta a seguinte forma vista na equação 4.18:

$$\mathbf{p} = [1 \ p_1 \ p_2 \ \dots \ p_{n_P} \ 0 \ 0 \ \dots \ 0]^T \quad 4.18$$

Os subscritos n_S, n_R e n_P , vistos nas equações 4.17 e 4.18, referem-se ao grau de seus respectivos polinômios. Quanto aos vetores x e p , ambos tem o numero de elementos definido pela seguinte regra:

$$\text{número de elementos} = n_A + n_B + d \quad 4.19$$

Para que a equação 4.16 seja solucionada e os parâmetros $R(z^{-1})$, $S(z^{-1})$ e $T(z^{-1})$ sejam encontrados, os polinômios $R(z^{-1})$, $S(z^{-1})$ e $P(z^{-1})$ devem atender os seguintes requisitos quanto aos seus graus:

$$n_R = n_A - 1 \quad 4.20$$

$$n_S = n_B + d - 1 \quad 4.21$$

$$n_P \leq n_A + n_B + d - 1 \quad 4.22$$

Com o propósito de anular o erro em regime permanente, acrescenta-se um integrador na malha direta do sistema. Sabendo que o polinômio $T(z^{-1})$, presente na malha direta do sistema, será escolhido conforme equação 4.7, acrescenta-se o integrador no polinômio $S(z^{-1})$, que resultará na equação 4.23, onde o sobrescrito m define o número de integradores.

$$S'(z^{-1}) = (1 - z^{-1})^m (1 + s_1 z^{-1} + s_2 z^{-2} + \dots + s_{n_S} z^{-n_S}) \quad 4.23$$

Tomando a equação 4.9, 4.11, 4.23 e considerando $m = 1$, podemos definir $P(z^{-1})$, como:

$$P(z^{-1}) = A(z^{-1})(1 - z^{-1})S'(z^{-1}) + B(z^{-1})R(z^{-1}) \quad 4.24$$

Conforme (LANDAU, 2006) aplica-se o tratamento polinomial e obtêm-se $P(z^{-1})$ da seguinte forma:

$$P(z^{-1}) = (1 + p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2})(1 + \alpha_1 z^{-1})(1 + \alpha_2 z^{-2}) \quad 4.25$$

Aqui temos os coeficientes p_1 e p_2 que são obtidos a partir das especificações de desempenho desejadas, caracterizadas por um coeficiente de amortecimento ξ e uma frequência natural ω_n que podem ser obtidos pelas equações 4.26 e 4.27 respectivamente, (LANDAU. 2006) e (NISE 2009).

$$\xi = \frac{-\ln M_{ss}}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2 M_{ss}}} \quad 4.26$$

$$\omega_n = \frac{3}{\xi t_s} \quad 4.27$$

Onde M_{ss} refere-se ao máximo valor sobre sinal e t_s ao tempo de subida. Então se calcula $s_{1,2}$, que são os pólos de malha fechada no plano S, com a equação 4.28 (NISE, 2009).

$$s_{1,2} = -\xi \omega_n \pm j \omega_n^2 \sqrt{1 - \xi^2} \quad 4.28$$

Finalmente, usando a transformação da equação 4.29, temos $\delta_{1,2}$, que são os pólos de malha fechada no plano Z atendendo as os requisitos de desempenho.

$$\delta_{1,2} = e^{s_{1,2} T_s} \quad 4.29$$

T_s refere-se ao período de amostragem e pode ser calculado com a equação 4.30, (LANDAU, 2006).

$$T_s \gtrsim \frac{2\pi}{25\omega_n(1-2\xi^2) + \sqrt{4\xi^4 - 4\xi^2 + 2}} \quad 4.30$$

Os coeficientes α_1 e α_2 , na equação 4.25, são os pólos auxiliares que devem ser escolhidos dentro do círculo unitário e sobre o eixo real $Re(z)$ com uma frequência maior que $\omega_n/2\pi$, isso para garantir uma resposta rápida e robustez do controlador. É necessário ainda que $-\alpha_1$ e $-\alpha_2$ sejam escolhidos menores que a parte real de $-\delta_1$ e $-\delta_2$. De modo objetivo, a escolha obedece ao seguinte intervalo $-0,05 \leq \alpha_1, \alpha_2 \leq -0,5$, (LANDAU, 2006), a figura 4.2 apresenta graficamente os conceitos supracitados.

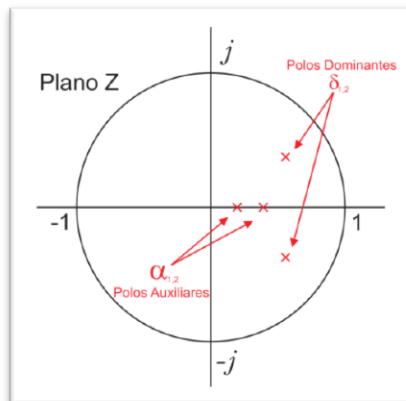


Figura 4.2 – Plano Z com pólos auxiliares e pólos dominantes destacados

5. PROJETO DOS CONTROLADORES

Neste capítulo desenvolve-se o projeto dos controladores digitais por alocação polinomial em estrutura canônica R, S e T, de acordo com o exposto no capítulo 4.

5.1. Projeto do Controlador de Potência do Motor CC

Conforme definido na seção 3.3 utiliza-se o modelo em pu do enrolamento de armadura, figura 3.5, no projeto do controlador com alocação polinomial em estrutura RST. Este controlador será responsável pelo rastreamento do sinal de referência gerado pela função de transferência da turbina hidráulica e atuação sobre a armadura do motor CC, fazendo-o emular o sinal de referência.

A estratégia para construção do controlador baseia-se em um controlador PI que será projetado de acordo com a seção 4.2.

A equação 3.26 apresenta a função de transferência do enrolamento da armadura em pu, vista na figura 3.5 como a dinâmica elétrica do motor CC. A equação 5.1 mostra a equação 3.26 com os parâmetros substituídos da tabela 3.

$$H_e = \frac{\bar{T}_m}{\bar{V}_a} = \frac{\left(\frac{1}{1-\eta}\right)}{\left(\frac{L}{R}\right)s + 1} = \frac{5,5}{0,01066s + 1} \quad 5.1$$

Tomando como requisitos desejados para o sistema controlado os valores apresentados na tabela 4. Os requisitos sobressinal máximo e tempo de acomodação foram escolhidos a partir de uma análise da dinâmica elétrica respondendo em malha aberta, destes foram calculados os demais requisitos. Ainda na tabela 4, apresenta-se o período de amostragem para discretização do sistema, que pode ser calculado conforme equação 4.30 e foi escolhido próximo ao valor obtido no cálculo.

$$T_s \gtrsim \frac{2\pi}{25 \times 128,2539(1 - 2 \times 0,7797^2) + \sqrt{4 \times 0,7797^4 - 4 \times 0,7797^2 + 2}} = 1,8m \text{ s}$$

Tabela 4 – Requisitos Desejados para o Sistema Controlado e Parâmetros para Discretização (Dinâmica Elétrica)

Requisitos Desejados para o Sistema Controlado		
Requisito	Símbolo	Valor
Sobressinal Máximo	M_{ss}	2 %
Amortecimento (resultante de M_{ss})	ξ	0,7797
Frequência Natural (Resultante de $\xi = 0,779$)	ω_n	128,2539 rad/s
Tempo de Acomodação	t_s	30m s
Período de Amostragem ($T_s \approx 1,8m s$)	T_s	2m s

Então se calcula os pólos desejados com a equação 4.28, onde encontramos

$$s_{1,2} = -\xi\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\xi^2} = -100 \pm j80,306 \quad 5.2$$

Mapeando os pólos desejados que estão em S para o plano Z com a equação 4.29, temos:

$$\delta_{1,2} = e^{s_{1,2}T_s} = 0,8082 \pm j0,1309 \quad 5.3$$

Ao discretizar a planta H_e utilizando o método do ZOH e com o período de amostragem apresentado na tabela 4, tem-se:

$$H_e(z^{-1}) = \frac{z^{-d}B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{1,149z^{-1}}{1-0,791z^{-1}} \quad 5.4$$

Monta-se o polinômio p , conforme equação 4.18, com os coeficientes que resultam nas raízes desejadas, equações 5.3 e 5.4.

$$p = [1 \quad -1,6164 \quad 0,6703] \quad 5.5$$

Finalmente calculam-se os parâmetros RST, que neste caso de um controlador PI dar-se, de modo simplificado como (LANDAU, 2006):

$$r_0 = \frac{p_1 - a_1 + 1}{b_1} = 0,2260 \quad 5.6$$

$$r_1 = \frac{p_2 + a_1}{b_1} = -0,1687 \quad 5.7$$

$$R(z^{-1}) = [r_0 \quad r_1] = [0,2260 \quad -0,1687] \quad 5.8$$

$$S'(z^{-1}) = [1 - z^{-1}] = [1 \quad -1] \quad 5.9$$

$$T(z^{-1}) = r_0 + r_1 = 0,0573 \quad 5.10$$

Os parâmetros do controlador digital RST estão apresentados na tabela 5. Observe no apêndice A.4 o algoritmo em MATLAB 2010 que gera esse controlador.

Tabela 5 – Parâmetros do Controlador Digital RST

Parâmetros do Controlador Digital RST		
Parâmetro	Símbolo	Valor
Regulação (Regulation)	r_0	0,2260
Regulação (Regulation)	r_1	-0,1687
Sensibilidade (Sensitivity)	s_1	-1
Rastreamento (Tracking)	$T = R(1)$	0,0573

5.2. Resultados do Controlador de Potência do Motor CC

A figura 5.1 apresenta o diagrama de blocos do controlador de potência RST na armadura do motor CC com o bloco que caracteriza a parte elétrica do mesmo. Observe que o controlador de potência recebe um sinal de referência de potência, \bar{P}_m^* , gerado pelo modelo da turbina hidráulica. Quanto à velocidade $\bar{\omega}$ que realimenta o controlador no polinômio $R(z^{-1})$ e no rendimento η , trata-se da velocidade proveniente do eixo do motor CC.

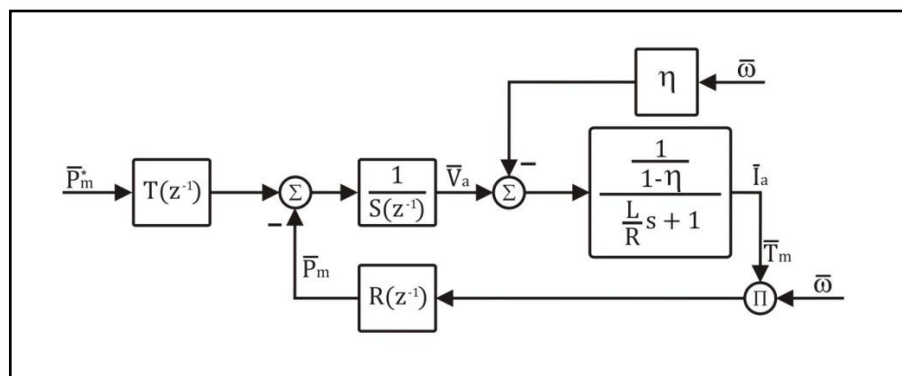


Figura 5.1 – Diagrama de Blocos do Controlador de Potência RST e Parte Elétrica do Motor CC

A figura 5.2 mostra o controlador de potência na armadura respondendo a uma entrada degrau de 1 pu na referência de potência no instante 0.1 segundos, e um degrau de -0.5 pu no instante 0.2 segundos. Para esta simulação a velocidade $\bar{\omega}$ foi feita constante em 1 pu durante toda a simulação.

Observe que tanto no caso do degrau positivo de 1 pu como no caso do degrau negativo de 0.5 pu o controlador respondeu efetivamente fazendo com que a potência gerada pelo motor CC (sinal roxo tracejado) seguisse a potência de referência (sinal azul). Como a velocidade foi feita constante, o controlador de potência atua no primeiro momento, degrau positivo, elevando a tensão da armadura do motor CC, que por sua vez eleva o torque mecânico (sinal verde, com espessura diferenciada para facilitar visualização) até que a referência seja alcançada. Então, no momento do degrau negativo, o controlador atua diminuindo a tensão na armadura do motor CC e assim diminuindo o torque mecânico até que a nova referência seja alcançada.

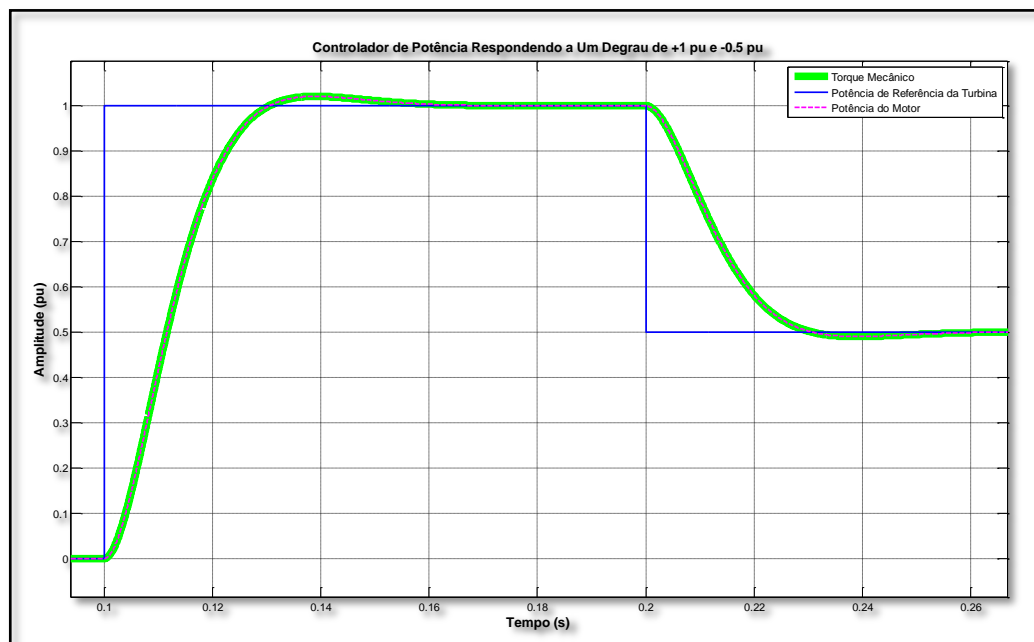


Figura 5.2 – Resposta do Controlador de Potência a um Degrau de +1 pu e -0.5 pu

Mostra-se, com essa análise, que o controlador de potência atende aos requisitos de projeto em sua atuação específica sobre a dinâmica elétrica do motor CC.

5.3. Projeto do Controlador dos Modos Mecânicos (Regulador de Velocidade)

Conforme já foi considerado na seção 3.4, a dinâmica elétrica do motor CC é muito mais rápida que a dinâmica mecânica do mesmo. Isso também ocorre se considerarmos as dinâmicas do servoposicionador e da turbina hidráulica (dinâmicas mecânicas). Com isso, a função de transferência que se utiliza para projetar o

regulador de velocidade é composta pela dinâmica mecânica do servoposicionador (equação 3.31), da turbina hidráulica (equação 3.28) e da massa mecânica do motor CC (equação 3.17). A combinação dessas três funções resulta na equação 5.11, que modela a dinâmica mecânica do sistema servoposicionador, turbina hidráulica e motor CC.

$$H_m(s) = \frac{\left(\frac{-1}{t_g}\right)\left(s - \frac{1}{t_w}\right)}{\left(s + \frac{1}{t_g}\right)\left(s + \frac{2}{t_w}\right)\left(s + \frac{\bar{B}}{2H}\right)} = \frac{-1,54 s + 1}{18,5 s^3 + 30,76 s^2 + 8,798 s + 0,06111} \quad 5.11$$

A tabela 6 exibe os valores dos parâmetros utilizados para o cálculo da equação 5.11, que após substituição dos valores da tabela 6, resulta na equação 5.12.

Tabela 6 – Parâmetros dos Modos Mecânicos (Servoposicionador, Turbina e Motor CC)

Parâmetros dos Modos Mecânicos		
Modo Mecânico	Símbolo	Valor
Servoposicionador ¹	t_g	2,8 s
	t_p	0,016 s
Turbina Hidráulica ¹	t_w	1,54 s
Motor CC ²	\bar{B}	0,06111 pu
	H	4,29 s

$$H_m(s) = \frac{-1,54 s + 1}{18,5 s^3 + 30,76 s^2 + 8,798 s + 0,06111} \quad 5.12$$

Os requisitos desejados para o sistema controlado estão apresentados na tabela 7. Os requisitos de sobressinal máximo e tempo de acomodação foram escolhidos a partir de uma análise da resposta dos modos mecânicos em malha aberta, destes calcula-se os demais.

Nessa mesma tabela 7, o período de amostragem para discretização do sistema, que pode ser calculado conforme equação 4.30 e foi escolhido próximo ao valor obtido no cálculo a seguir.

¹ Extraídos de Kundur (1994) e Paolo (2009).

² Extraídos de Nascimento (2011) conforme tabela 3 deste.

$$T_s \approx \frac{2\pi}{25 \times 0,1873(1 - 1,5 \times 0,8007^2) + \sqrt{4 \times 0,8007^4 - 4 \times 0,8007^2 + 2}} = 1,2611 \text{ s}$$

Tabela 7 – Requisitos Desejados para o Sistema Controlado e Parâmetros para Discretização (Modos Mecânicos)

Requisitos Desejados para o Sistema Controlado		
Requisito	Símbolo	Valor
Sobressinal Máximo	M_{ss}	1,5 %
Amortecimento (resultante de M_{ss})	ξ	0,8007
Frequência Natural (Resultante de $\xi = 0,8$)	ω_n	0,1873 rad/s
Tempo de Acomodação	t_s	20 s
Período de Amostragem ($T_s \approx 1,2611 \text{ s}$)	T_s	1,2 s

Então se calcula os pólos desejados com a equação 4.28, onde encontramos

$$s_{1,2} = -\xi\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\xi^2} = -0,15 \pm j0,1122 \quad 5.13$$

Mapeando os pólos desejados que estão em S para o plano Z com a equação 4.29, temos:

$$\delta_{1,2} = e^{s_{1,2}T_s} = 0,8277 \pm j0,1121 \quad 5.14$$

Como pólos auxiliares escolhem-se, obedecendo às considerações de Landau (2006) na seção 4.2, os valores:

$$[0,4 \quad 0,45 \quad 0,2 \quad 0,1]$$

De posse dos pólos dominantes, equação 5.14, e dos pólos auxiliares, monta-se o polinômio p , conforme equação 4.18, com os coeficientes que resultam nas raízes desejadas.

$$p = [1 \quad -2,8054 \quad 3,0564 \quad -1,6265 \quad 0,4386 \quad -0,0555 \quad 0,0025] \quad 5.15$$

Ao discretizar a planta H_e com o período de amostragem apresentado na tabela 4, tem-se:

$$H_e(z^{-1}) = \frac{z^{-d}B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{-0,02261 z^{-1} + 0,04055 z^{-2} + 0,02039 z^{-3}}{1 - 2,8534 z^{-1} + 2,8451 z^{-2} - 1,1276 z^{-3} + 0,1359 z^{-4}} \quad 5.16$$

Donde se monta a matriz de Silvester conforme equação 4.31 que resulta em:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_1 & 1 & 1 & b_1 & 0 & 0 & 0 \\ a_2 & a_1 & 1 & b_2 & b_1 & 0 & 0 \\ a_3 & a_2 & a_1 & b_3 & b_2 & b_1 & 0 \\ a_4 & a_3 & a_2 & 0 & b_3 & b_2 & b_1 \\ 0 & a_4 & a_3 & 0 & 0 & b_3 & b_2 \\ 0 & 0 & a_4 & 0 & 0 & 0 & b_3 \end{bmatrix} = \dots$$

$$\dots M = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2,8534 & 1 & 1 & -0,0226 & 0 & 0 & 0 \\ 2,8451 & -2,8534 & 1 & 0,0406 & -0,0226 & 0 & 0 \\ -1,1276 & 2,8451 & -2,8534 & 0,0204 & 0,0406 & -0,0226 & 0 \\ 0,1359 & -1,1276 & 2,8451 & 0 & 0,0204 & 0,0406 & -0,0226 \\ 0 & 0,1359 & -1,1276 & 0 & 0 & 0,0204 & 0,0406 \\ 0 & 0 & 0,1359 & 0 & 0 & 0 & 0,0204 \end{bmatrix} \quad 5.17$$

Finalmente calculam-se os parâmetros RST de acordo com a equação 4.32 (LANDAU, 2006), resultando em:

$$x = [1 \quad 0,2618 \quad 0,1962 \quad 9,4564 \quad -16,7491 \quad 8,7395 \quad -1,1849] \quad 5.18$$

$$R(z^{-1}) = [r_0 \ r_1 \ r_2 \ r_3] = [9,4564 \quad -16,7491 \quad 8,7395 \quad -1,1849] \quad 5.19$$

$$S'(z^{-1}) = [1 \ 0,2618 \ 0,1962 \ 9,4564] * [1 - 1] = [-0,7382 \ -0,0656 \ -0,1962] \quad 5.20$$

$$T(z^{-1}) = r_0 + r_1 + r_2 + r_3 = 9,4564 - 16,7491 + 8,7395 - 1,1849 = 0,2620 \quad 5.21$$

Note na equação 5.20 a imposição do integrador $1 - z^{-1}$, com o propósito de obter erro nulo em regime permanente, conforme Landau (2006).

Os parâmetros do controlador digital RST para os modos mecânicos estão apresentados na tabela 8. Observe no apêndice A.3 o algoritmo em MATLAB 2010 que gera esse controlador.

Tabela 8 – Parâmetros do Controlador Digital RST

Parâmetros do Controlador Digital RST		
Parâmetro	Símbolo	Valor
Regulação (Regulation)	$[r_0 \ r_1 \ r_2 \ r_3]$	$[9,4564 \quad -16,7491 \quad 8,7395 \quad -1,1849]$
Sensibilidade (Sensitivity)	$[s_1 \ s_2 \ s_3]$	$[-0,7382 \ -0,0656 \ -0,1962]$
Rastreamento (Tracking)	$T = R(1)$	0,2620

5.4. Resultados do Controlador dos Modos Mecânicos (Regulador de Velocidade)

A figura 5.3 apresenta o diagrama de blocos do controlador dos modos mecânicos, regulador de velocidade, com o bloco que representa os modos mecânicos do servoposicionador simplificado, conforme equação 3.31, da turbina hidráulica linear, como na equação 3.28, e a dinâmica mecânica do motor CC, de acordo com a equação 3.17. Note que na entrada do polinômio $T(z^{-1})$ encontra-se a referência de velocidade.

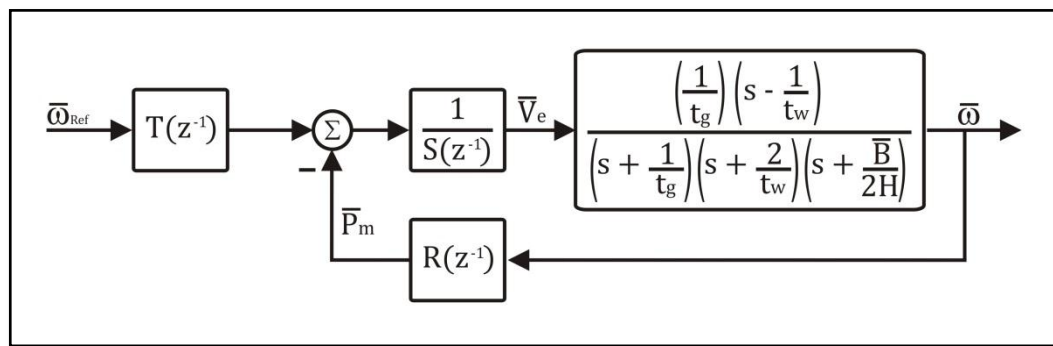


Figura 5.3 – Diagrama de Blocos do Regulador de Velocidade com Modos Mecânicos Simplificados/Linearizados

Na figura 5.4, encontra-se a resposta do regulador de velocidade apresentado na figura 5.3. A referência de velocidade, sinal vermelho, sobre duas mudanças de patamar, sendo a primeira no instante 100 segundos e equivalente a uma redução de velocidade de 0.2 pu quando, até então, a máquina operava com velocidade nominal de 1 pu. Neste momento o regulador atua (sinal verde) aplicando um sinal de tensão na válvula piloto fazendo o distribuidor fechar até que o valor do novo patamar de velocidade (sinal azul) de 0.8 pu seja alcançado pela velocidade do motor CC. A segunda mudança de patamar ocorre no instante 160 segundos quando é exigido um aumento na velocidade de 0.1 pu. Então o regulador atua abrindo o distribuidor e elevando a velocidade da máquina até o novo patamar de velocidade de 0.9 pu. Em ambas as mudanças de referência de velocidade o regulador atuou atendendo os requisitos de projeto da tabela 7.

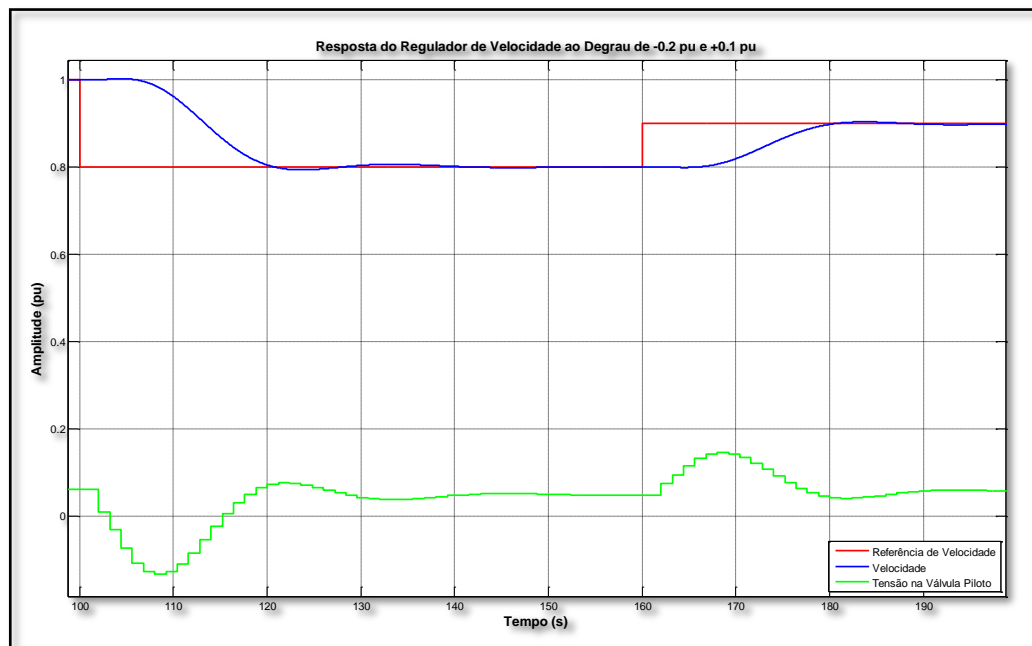


Figura 5.4 – Resposta do Regulador de Velocidade ao Degrau de -0.2 pu e +0.1 pu

Assim apresenta-se, na figura 5.4 e nas considerações relacionadas à mesma, que o regulador de velocidade projetado na seção 5.3 atende os requisitos de projeto da tabela 7. Ressalta-se que este controlador projetado para os modos mecânicos simplificados ou linearizados é, na seção 5.5, aplicado as plantas não simplificado e não linearizadas. Onde veremos que também atua satisfatoriamente.

5.5. Resultados

A seguir apresentam-se os resultados simulados onde os controladores, regulador de velocidade e controlador de potência do motor CC, são submetidos a variações de referência. Então são apresentadas as curvas da dinâmica da tensão aplicada na válvula piloto (sinal de controle do regulador de velocidade), posição da válvula distribuidora, abertura do distribuidor, tensão aplicada à armadura do motor CC (sinal de controle do controlador de potência do motor CC), torque mecânico, velocidade do motor CC emulando a máquina primária e as potências, referência gerada pelo modelo da turbina não linear e do motor CC, todos normalizadas em pu.

Essas curvas apresentam a eficácia dos controladores projetados pelo método da alocação polinomial em estrutura canônica RST, ao passo que consolida a viabilidade da emulação da turbina hidráulica por um motor CC.

O apêndice B e seus subordinados apresenta o diagrama de blocos com a emulação completa da turbina hidráulica por um motor CC, assim como cada subsistema detalhado.

5.3.1. Resposta do Regulador de Velocidade ao Degrau

A figura 5.1.1 apresenta a resposta do regulador de velocidade a uma resposta degrau positiva de 0.2 pu, no instante 150 segundos, na referência de velocidade quando a máquina estava operando com 80% de sua velocidade nominal. Posteriormente, no instante 200 segundos, um novo degrau, agora negativo, de 0.1 pu é aplicado. Para os dois casos de mudança de referência de velocidade, a performance do controlador, regulador de velocidade (linha na cor azul), se encontra na faixa dos requisitos de projeto apresentados na tabela 6 da seção 5.2. A resposta superamortecida é desejável para oferecer mais segurança, pois como não ocorre um overshoot perceptível, os riscos de sobre pressão no caracol e conduto forçado são quase extinguidos, KUNDUR, (1994).

Destaca-se ainda, que o regulador de velocidade atuante nesta resposta da figura 5.1.1, é o regulador de velocidade projetado na seção 5.3.3 e testado na seção 5.3.4. Lembre-se que este controlador foi projetado para os modos mecânicos simplificados ou linearizados. No caso do servoposicionador, sua planta foi simplificada, conforme equação 3.31, quanto à turbina hidráulica, foi utilizado seu modelo linear, de acordo com a equação 3.28, para o motor CC foi considerado apenas sua dinâmica mecânica, como apresentado na equação 3.17.

Contudo, nesta simulação da figura 5.1.1 ele atua sobre as plantas não simplificadas e não linearizadas. No servoposicionador foi utilizado o modelo exibido na figura 3.7, na turbina hidráulica o modelo não linear apresentado na figura 3.6 e no motor CC o modelo visto na figura 3.8. E ainda assim, o controlador atende a faixa de requisitos do projeto, mostrado na tabela 7, de maneira satisfatória.

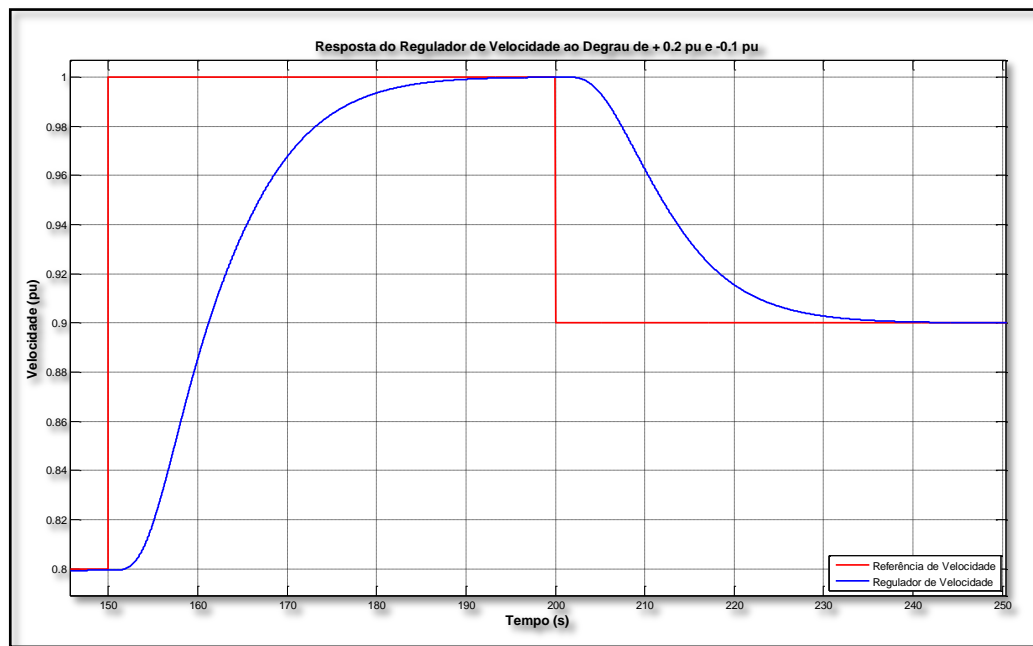


Figura 5.1.1 – Resposta do Regulador de Velocidade a um Degrau de +0.1 pu na Referência de Velocidade

5.3.2. Tomada de Carga e Rejeição de Carga

A tomada de carga refere-se ao aumento da geração de potência ativa para atender uma demanda de carga, normalmente essas tomadas de cargas são solicitadas pelo ONS, enquanto a rejeição de carga refere-se a uma queda brusca de carga, que pode ser ocasionada pela abertura de uma linha.

Para os dois casos é necessário que o regulador de velocidade atue mantendo a velocidade da máquina primária em sua velocidade nominal para preservar a qualidade, e com isso atendendo as exigências do ONS.

A figura 5.1.2 simula uma tomada de carga e uma rejeição de carga. Nela é possível acompanhar a velocidade da máquina primária (simulada pelo motor CC) e as potências geradas pelo modelo da turbina hidráulica e do motor CC. No instante 150 segundos, quando a máquina está gerando um pouco mais que 0.55 pu de potência, ocorre uma tomada de carga de 0.1 pu onde se observa uma queda na velocidade da máquina (linha preta). Neste momento o distribuidor abre para restabelecer a velocidade e aumentar a geração. A velocidade é restabelecida e um novo patamar de potência é alcançado, sendo um pouco maior que 0.65 pu. Então no instante 210 segundos têm-se uma rejeição de carga de 0.1 pu, onde se observa

o distribuidor fechando para reduzir a velocidade da máquina primária e estabelece o novo patamar de potência.

Note ainda que o sinal azul é gerado pelo modelo matemático da turbina hidráulica não linear do tipo Francis e o sinal vermelho é o gerado pelo modelo do motor CC em pu. Neste ponto comprova-se finalmente a viabilidade da emulação da turbina hidráulica pelo motor CC, visto que sinal de potência do motor CC (vermelho) se sobrepõe ao sinal de potência da turbina hidráulica (azul).

Por tudo, é possível fazer o controle de potência de um motor CC, aplicado a sua armadura, de modo que este emule o sinal de potência entregue por um modelo matemático de turbina hidráulica do tipo Francis.

Observando os sinais de potências, da turbina hidráulica e do motor CC, nota-se a dinâmica irregular frente a uma entrada degrau, característica de sistemas de fase não mínima, como é o caso da dinâmica da turbina hidráulica. Mais este ponto consolida a eficácia da emulação e o desempenho do controle por alocação polinomial em RST.

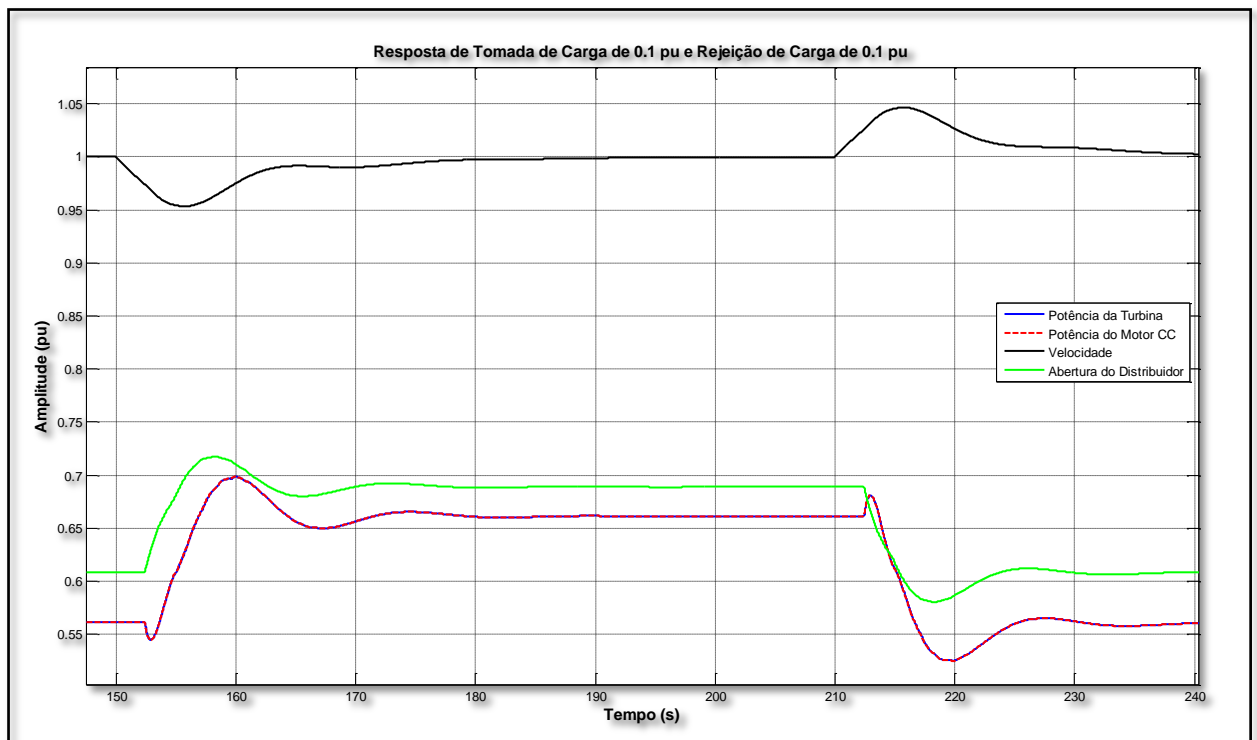


Figura 5.1.2 – Resposta de Tomada de Carga de 0.1 pu e Rejeição de Carga de 0.1 pu

5.3.3. Resposta do Regulador de Velocidade e Servoposicionador

A figura 5.1.3 apresenta a resposta da simulação para uma tomada de carga de 0.2 pu e uma rejeição de 0.2 pu. Observe a atuação do controlador RST dos modos mecânicos, regulador de velocidade (sinal verde), no momento em que ocorre a tomada de carga de 0.2 pu, 150 segundos, aumentando a tensão na válvula piloto. Com isso, deslocando a válvula distribuidora (sinal azul claro) e permitindo o fluxo do óleo no sentido de mover os servomotores e abrir o distribuidor (sinal vermelho). Observe que a posição da válvula (sinal azul claro) após o distribuidor atingir a abertura necessária para manter a velocidade da máquina (sinal preto) e atender a demanda de carga (sinais azul e roxo) retorna a posição zero, ou seja, sem fluxo de óleo. Então ocorre a rejeição de carga de 0.2 pu, 210 segundos, causando a elevação da velocidade da máquina e uma queda na demanda de potência. Assim, o regulador atua sobre a válvula piloto que move a válvula distribuidora no sentido de fechar o distribuidor e reduzir a velocidade da máquina e atender a nova demanda de potência.

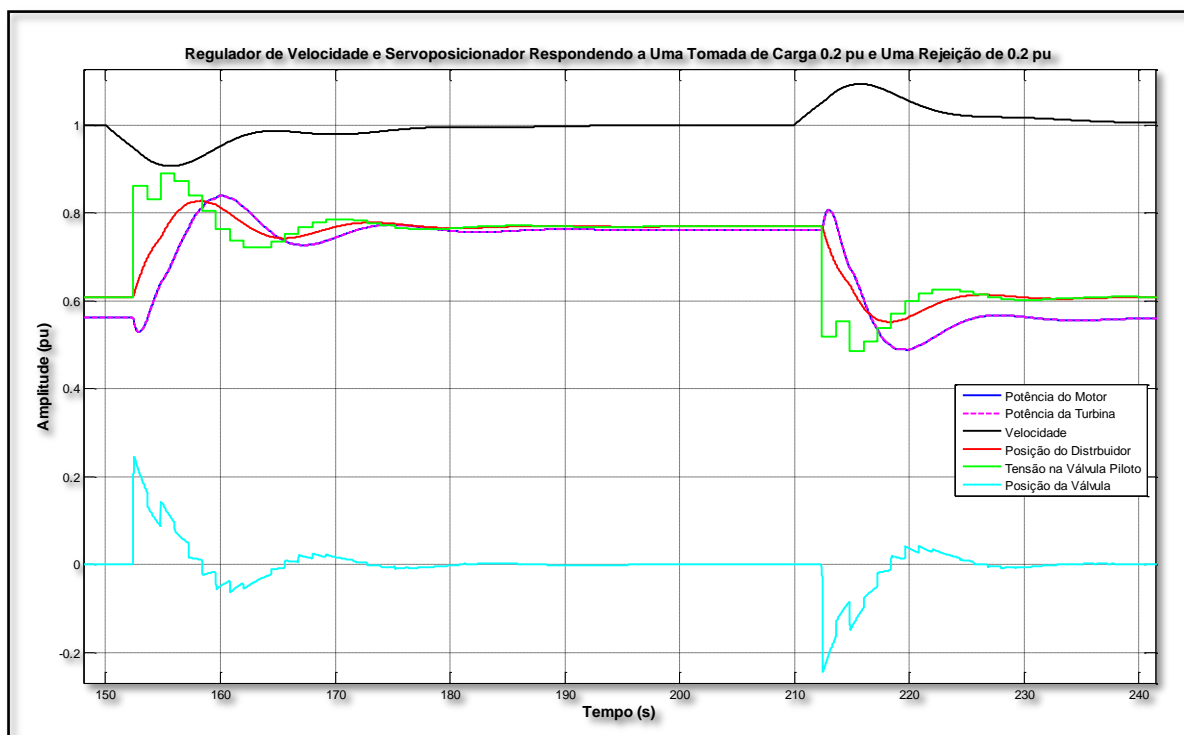


Figura 5.1.3 – Regulador de Velocidade e Servoposicionador Respondendo a Uma Tomada de Carga de 0.2 pu e Uma Rejeição de Carga de 0.2 pu

5.3.4. Resposta do Controlador de Tensão na Armadura do Motor CC

Para o mesmo caso da seção 5.3.4, ou seja, uma tomada de carga de 0.2 pu e uma rejeição de 0.2 pu, analisa-se agora a resposta do controlador de tensão na armadura do motor CC (sinal verde).

O controlador digital RST de tensão na armadura do motor CC recebe o sinal de referência de potência gerador pelo modelo não linear da turbina hidráulica do tipo Francis e atua sobre a armadura do motor CC para que este siga o sinal de referência.

Veja na figura 5.1.4, no instante 150 segundos, que ocorre uma tomada de carga de 0.2 pu. Isso faz com que o regulador de velocidade atue sobre o servoposicionador abrindo o distribuidor e retomando a velocidade nominal da máquina primária (sinal preto) e atendendo a demanda de carga. Com isso, o modelo da turbina gera um novo sinal de potência (referência de potência – sinal roxo) para o controlador de tensão. Este, por sua vez, eleva a tensão na armadura do motor CC elevando seu torque mecânico (sinal amarelo) e assim elevando a potência gerada pelo motor CC (sinal azul), fazendo com que esta acompanhe a potência de referência gerada pelo modelo da turbina (sinal roxo) se sobrepondo exatamente a esta, assim emulando a potência de referência.

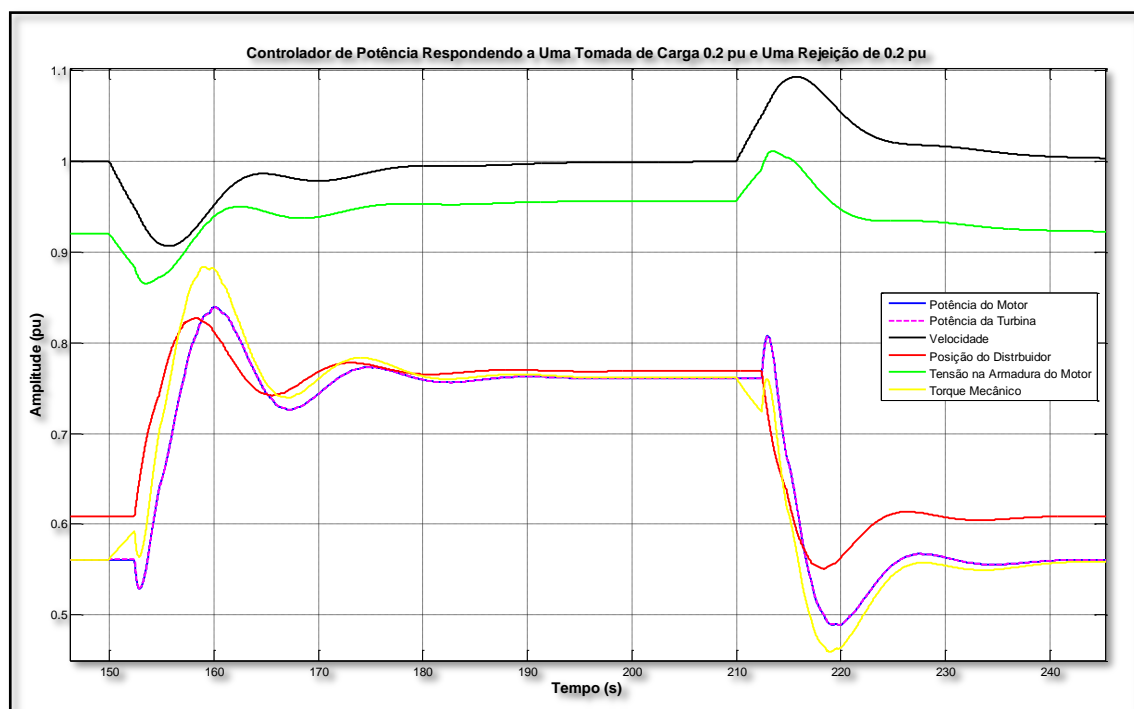


Figura 5.1.4 – Controlador de Potência Respondendo a Uma Tomada de Carga de 0.2 pu e Uma Rejeição de Carga de 0.2 pu

Note ainda, que o torque mecânico (sinal amarelo) e a potência do motor CC se sobrepõem perfeitamente em regime. Isso se dá devido à potência do motor CC em pu ser proveniente do produto do torque mecânico do motor CC em pu com a velocidade do motor em pu. Por tanto, quando a velocidade nominal da máquina entra em regime (1 pu), a potência do motor CC passa a ser o torque mecânico multiplicado por 1 (um) pu.

6. CONCLUSÃO

De posse de toda fundamentação conceitual e matemática apresentadas na seção 3.1 e 3.2 para o motor CC, na seção 3.2 para a turbina hidráulica, na seção 3.3 para o servoposicionador e na seção 3.4 para o controle de potência do motor CC e ainda dos resultados apresentados na seção 5.3, afirma-se que a estratégia de emulação de uma turbina hidráulica do tipo Francis pelo controle digital em estrutura RST aplicado na armadura do motor CC é confirmada em todos os resultados de simulação apresentados.

Pode-se considerar que toda modelagem da turbina hidráulica, linear para o projeto do regulador de velocidade e não linear para as simulações no Matlab 2010 – SIMULINK, veja apêndice B, assim como a modelagem do motor CC em parâmetros comuns e em pu com considerações de constante de tempo elétrica e mecânica, conforme seção 3.4, se deram adequadamente. Sendo que a modelagem da turbina hidráulica, linear e não linear, já é histórica e praticamente consagrada, conforme Kundur, 1994.

Quanto à estratégia de controle digital por alocação polinomial em estrutura canônica RST. Destaca-se a liberdade na imposição de características desejadas, como é o caso do integrador para zerar o erro em regime e ainda dos pólos auxiliares escolhidos para não interferir significativamente nos pólos dominantes.

Outro aspecto que merece destaque é a facilidade no projeto e independência no tratamento do sinal de referência e do sinal de realimentação, que proporcionam características de regulação e rastreamento.

No controlador dos modos mecânicos, regulador de velocidade, o rastreamento acontece no sinal de referência de velocidade, ao passo que a regulação ocorre na realimentação de velocidade do eixo do motor CC.

Quanto ao controlador de tensão na armadura do motor CC, o rastreamento ocorre no sinal de referência de potência gerado pelo modelo da turbina e a regulação ocorre no sinal de realimentação de velocidade multiplicado pelo torque mecânico.

A eficácia desse controlador chama atenção, pois na seção 5.2 onde se projeta o controlador dos modos mecânicos, regulador de velocidade, é utilizada a

planta simplificada do servoposicionador, conforme equação 3.31, e o modelo linear da turbina hidráulica, conforme equação 3.28. Porém, a simulação em Matlab 2010 – SIMULINK, utiliza o modelo do servoposicionador mostrado na figura 3.7 e o modelo da turbina hidráulica não linear apresentado na figura 3.6, conforme apêndice B. Ainda assim, o regulador de velocidade, embora projetado para plantas simplificadas respondeu dentro dos requisitos de projeto quando atuando sobre as plantas não simplificadas, conforme foi visto nos resultados apresentados na seção 5.3.

Por tudo, toda a fundamentação teórica\conceitual levantada para atender a proposta deste trabalho, confirma-se com os resultados apresentados nos gráficos da figura 5.1.2, onde se observa o motor CC emulando a característica de fase não mínima da turbina hidráulica, tendo o sinal de potência do motor CC exatamente sobreposto ao sinal de potência gerado pelo modelo da turbina não linear. Essa sobreposição pode ser observada também nas figuras 5.1.3 e 5.1.4. Em todos os casos, afirma-se que a estratégia de emulação da turbina hidráulica pelo controle de potência em RST na armadura do motor CC é aplicável.

6.1. Proposta para Trabalhos Futuros

- Incluir no regulador de velocidade as características de estatismo permanente e estatismo transitório assim como de carga frequência. Permitindo, com isso uma aproximação mais real do comportamento da máquina frente a um trabalho conjugado com outras máquinas.
- Incluir na emulação da turbina hidráulica as condições de partida da máquina, sendo a partida bang-bang, também conhecida como partida 1 e 2, uma boa opção. Visto sua comprovada eficiência prática, como é o caso da UHE de Tucuruí.
- Desenvolver o estudo de outros tipos de controladores com estratégias avançadas de controle robusto e adaptativo, sendo que o RST possui ambas as características ainda não exploradas neste trabalho. Então submeter o sistema a testes mais severos e condições não modeladas.
- Aplicar a emulação de outras turbinas, por exemplo térmicas, eólicas, etc. Utilizando o mesmo princípio de controle de tensão em um motor CC.
- Desenvolver um protótipo para implementação da emulação da turbina pelo motor controlado pela alocação polinomial em estrutura canônica RST.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANEEL, AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Atlas de Energia Elétrica do Brasil*. 2ª. ed. Brasília: ANEL, 2008.
- ASTRÖN, K. J., e B. WITTENMARK. *Computer Controlled Systems-Theory and Design*. 3ª. ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1997.
- BAZANELLA, A. S. *Controle Auto-Ajustável de Sistemas de Potência*. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 1993.
- DEL TORO, Vincent. *Fundamentos de Máquinas Elétricas*. Tradução de Onofre de Andrade Martins. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editroa S.A., 1994.
- DORF, R. C., BISHOP, R. H. *Sistemas de Control Modernos*. Tradução de Bernardo Severo da Silva Filho. 8ª. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editroa S.A., 2001.
- FITZGERALD, A. E., C. KINGSLAY JR., e S. D. UMANS. *Máquinas Elétricas: Com Introdução à Eletrônica de Potência*. Tradução de Anatólio Laschuk. 6ª. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- HIDALGO, E. M. P. *Modelo para Diagnose de Falhas em Regulador de Velocidade de Turbina Hidráulica*. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010.
- JÚNIOR, WALTER BARRA, CARLOS TAVARES DA COSTA JÚNIOR, e FABRÍCIO GONZALES NOGUEIRA. *Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D): Implementação de um Estabilizador de Sistema de Potência Piloto, com capacidade de Adaptação, em Gerador da Etapa da 1 UHE de Tucuruí, como continuidade de Projeto P&D do Ciclo 2000-2001*. Belém: Universidade Federal do Pará - UFPA & Regional de Produção de Tucuruí - CTC, 2010.
- KUNDUR, P. *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill, 1994.
- LANDAU, I. D., e G. ZITO. *Digital Control Systems: Design, Identification and Implementation*. Germany: Springer, 2006.
- MACEDO, GLÁUCIA ALVES. *PROJETO DE CONTROLADORES DIGITAIS PARA CONTROLE DE VELOCIDADE DE UM MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA*. Tucuruí: Universidade Federal do Pará, 2012.
- MACINTYRE, A. J. *Máquinas Motrizes Hidráulicas*. Guanabara Dois, 1983.
- NASCIMENTO FILHO, P. S. *INVESTIGAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DIGITAL PARA REGULAÇÃO DE VELOCIDADE E EMULAÇÃO DA DINÂMICA DE*

TURBINA HIDRÁULICAS, COM IMPLEMENTAÇÃO E TESTES EXPERIMENTAIS EM UMA MICROMÁQUINA DE 10KVA. Belém: Universidade Federal do Pará, 2011.

NISE, NORMAN S. *Engenha de Sistemas de Controle. Traduzido por Fernando Ribeiro da Silva. 5ª. ed.* Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editroa S.A., 2009.

OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno. Tradução de Paulo Alvaro Maya. 4ª. ed.* São Paulo: Prentice Hall, 2003.

PAES, F. H. S., e V. J. DE NEGRI. *Capacitação Industrial para Construção de Sistemas Hidráulicos de Controladores de Turbinas - Modelagem para Automação de Pequenas Centrais Hidrelétricas, PROJETO PADCT/REIVAX.* Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina - Centro Tecnológico., 2002.

PAOLO, I. F. DI. *Aplicações de Técnicas de Padrões de Projeto Orientados a Objetos na Construção de Framework para Modelagem e Simulação Dinâmicas de Unidades Geradoras.* Belém: Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará, 2009.

RAMAGE, J., e G. BOYLE. *Hydroelectricity; Renewable Energy: Power for a Sustainable Future.* Oxford: Oxford University Press, 1996.

SANTOS, E. Z. A. DOS. *Simulador em Tempo Real para Testes de Reguladores de Velocidades de Turbinas Hidráulicas.* São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

STRAH, B, O KULJACA, e Z VUKIC. *Speed and Active Power Control of Hidro Turbine Unit.* IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005.

APÊNDICE

A. Algoritmos em Matlab

A.1. Rotina Projeto_Completo

Essa rotina executa as rotinas de Parâmetros, onde os parâmetros do servoposicionador, turbina hidráulica não linear e motor CC são carregados.

Também executa a rotina **RST_Mec**, onde são calculados os polinômios R, S e T do controlador dos modos mecânicos, regulador de velocidade.

Então executa a rotina **RST_Armadura**, aqui são calculados os polinômios R, S e T do controlador de tensão na armadura do motor CC.

Finalmente, executa a rotina **Projeto_Graficos**, onde os gráficos apresentados na seção 5.3 são plotados. Neste caso, é necessário executar o diagrama de blocos **Emulação_Completa**, pois aí os dados são exportados para o workspace do Matlab e podem ser plotados pela referida rotina gráfica.

```
%% UFPA - Universidade Federal do Pará
%% Campus Universitário de Tucuruí
%% Faculdade de Engenharia Elétrica
%% Prof. M.Sc. Raphael Barros Teixeira
%% Aluno João Ferreira da Silva Filho
%% Rotina Principal
clear all
clc

Parametros
% Carregar todos os parâmetros do servoposicionador (tg e tp), da turbina
% hidráulica (Tw, Unl e At) e do motor CC (Ra, L, n, J, H e B1).

RST_Mec
% Calcula os polinômios R, S e T que controlam o modos mecânicos do
% servoposicionador, turbina hidráulica e motor CC.

RST_Armadura
% Calcula os polinômios R, S e T que controlam a tensão aplicada a
% armadura do motor CC.

Projeto_Grafico
% Carrega os vetores de tempo e de dados exportados do SIMULINK e plota as
% curvas.
```

A.2. Carregamento dos Parâmetros

Essa rotina carrega todos os parâmetros, servoposicionador, turbina hidráulica não linear e motor CC. E ainda carrega os períodos de amostragem mecânicos e elétricos e o período de reconstrução do sinal quando este passa de digital para contínuo. Esses períodos são fundamentais para o diagrama de blocos

Emulação_Completa, pois eles definem a configuração dos blocos de discretização e dos demais blocos, fazendo eles funcionarem harmonicamente.

```

%% UFPA - Universidade Federal do Pará
%% Campus Universitário de Tucuruí
%% Faculdade de Engenharia Elétrica
%% Prof. M.Sc. Raphael Barros Teixeira
%% Aluno João Ferreira da Silva Filho
%% Determinação dos Parâmetros do Motor da Turbina e do Servoposicionador
clear all
clc
%% Parâmetros do Servoposicionador
tp = 0.016; % Constante de tempo resultante para o
servomotor piloto, válvula piloto e o controlador proporcional K1
tg = 2.8; % Constante de tempo resultante para o
servomotor principal, válvula distribuidor e o controlador proporcional K2

%% Parâmetros da Turbina Hidráulica do Tipo Francis
% Parâmetros Construtivos
Tw = 1.54; % Tempo de Partida da Turbina Hidráulica
At = 1.25; % Ganho da Turbina
H0 = 1; % Queda Hidráulica Inicial
Unl = 0.2; % Velocidade da água com a turbina
rodando sem carga
% Condição Operacional
Pm0 = 0.8; % Potência Inicial
H0 = 1; % Queda Hidráulica Inicial
% Cálculo das Condições Iniciais
U = (Pm0/H0)+Unl; % Velocidade da Água sem Carga
G = U/sqrt(H0); % Abertura Ideal do Distribuidor
g = G/At; % Abertura Real do Distribuidor

%% Parâmetros do Motor CC em PU
Ra = 2.6446; % Resistência da Armadura
L = 0.0282; % Indutância do Enrolamento de Armadura
n = 9/11; % Rendimento
J = 4.89; % Momento de Inércia
H = 4.29; % Constante de Inércia
B1 = 0.06111; % Constante de Amortecimento em pu

%% Períodos de Amostragem
%Equação para obtenção do período de amostragem
%Ts = 2*pi / (25 * wn * sqrt((1-2*psi^2) + sqrt(4*psi^2 - 4*psi^2 + 2)))
Tsm = 1.2; % Período de Amostragem dos Modos
Mecânicos escolhido baseado no Ts calculado
Tse = 2e-3; % Período de Amostragem da Parte Elétrica
escolhido baseado no Ts calculado
Tp = Tse/10; % Período de Amostragem Discreto
(Reconstrução dos Sinal) escolhido para ser o menor período de amostragem

```

A.3. Rotina RST_Mec (Regulador e Velocidade)

Essa rotina impõem os requisitos de projeto e calcula os parâmetros RST conforme seção 4.2 do controlador dos modos mecânicos, regulador de velocidade.

```
%% UFPA - Universidade Federal do Pará
%% Campus Universitário de Tucuruí
%% Faculdade de Engenharia Elétrica
%% Prof. M.Sc. Raphael Barros Teixeira
%% Aluno João Ferreira da Silva Filho
%% Controlador RST para os Modos Mecânicos (Servoposicionador, Turbina
Hidráulica e Motor CC)
%% Regulador de Velocidade
% Funções de Transferência
Se = tf([1],[tg 1]); % Função do Servoposicionador Simplificado
(tp << tg)
Th = tf([-Tw 1],[0.5*Tw 1]); % Função da Turbina Hidráulica Linear
Mcc = tf([1],[2*H B1]); % Função da Motor CC (Parte Mecânica)
F = (Se*Th*Mcc); % Função da Malha Direta dos Modos
Mecânicos

% Especificações de Desempenho
SP = 1.5/100; % Escolha do Sobrevalor Percentual
qsi = -log(SP)/sqrt(pi^2 + (log(SP)*log(SP))); % Cálculo do qsi para um
determinado Sobrevalor Percentual
SP = exp(-(qsi*pi)/(sqrt(1-qsi^2)))*100; % Calcula do Sobrevalor Percentual
%qsi = 0.8; % Amortecimento Natural (qsi escolhido
baseado no qsi calculado)
ts = 20; % Tempo de acomodação
wn=3/(qsi*ts); % Frequência Natural

% Pólos de MF Desejados no Plano S
s1 = -qsi*wn+j*wn*(1-qsi^2)^0.5;
s2 = -qsi*wn-j*wn*(1-qsi^2)^0.5;

% Pólos Dominantes no Plano Z
z1 = exp(s1 * Tsm);
z2 = exp(s2 * Tsm);

% Função de Transferência Discreta
Hz = c2d(F,Tsm); % Discretização da planta
[B,A,Ts]=tfdata(Hz,'v'); % Recolhe Informações da Função de
Transferência nos Vetores B e A
Hzw = filt(B,A,Tsm); % Coloca na Forma z-1

% Acréscimo do Integrador
Hs=[1 -1]; % Polinômio Auxiliar que Armazena o Integrador
(1 - z-1)
Hr=1; % Polinômio Auxiliar (sem inclusão de
características)
Al=conv(A,Hs); % Inclusão do Integrador Hs
Bl=conv(B,Hr); % Inclusão do Polinômio Auxiliar (sem inclusão
de características)

% Construção do polinômio p
Pd = poly([z1 z2]); % Polinômio com raízes z1 e z2 (pólos
dominantes)
Pa = poly([0.4 0.45 0.2 0.1]); % Polinômio com raízes 0.4, 0.45, 0.2 e
0.1 (pólos auxiliares)
```

```

P = conv(Pd,Pa); % Obtenção do vetor P que armazena os
coeficientes que resultam nas raízes Pd e Pa
p = P'; % Transposto de p

% Matriz M (Matriz de Silvester), considerando d = 0 (sem atraso)
M = [Al(1) 0 0 Bl(1) 0 0 0;
     Al(2) Al(1) 0 Bl(2) Bl(1) 0 0;
     Al(3) Al(2) Al(1) Bl(3) Bl(2) Bl(1) 0;
     Al(4) Al(3) Al(2) Bl(4) Bl(3) Bl(2) Bl(1);
     Al(5) Al(4) Al(3) 0 Bl(4) Bl(3) Bl(2);
     0 Al(5) Al(4) 0 0 Bl(4) Bl(3);
     0 0 Al(5) 0 0 0 Bl(4)];

% Cálculo dos Polinômios RST
x = inv(M)*p; % Cálculo do vetor x possuidor dos
parâmetros RST

% Parâmetros RST
display('Parâmetros R, S e T para controle dos modos mecânicos do
Servoposicionador, da Turbina Hidráulica e da Motor CC')
R = [x(4) x(5) x(6) x(7)] % Obtenção dos parâmetros R
S = conv([x(1) x(2) x(3)],Hs) % Cálculo dos parâmetro S com imposição de
um integrador (1-z-1)
T = [x(4)+x(5)+x(6)+x(7)] % Cálculo dos parâmetro T por meio da soma
de r0 , r1 , r2 e r3

```

A.4. Rotina RST_Armadura

Essa rotina impõem os requisitos de projeto e calcula os parâmetros RST conforme seção 4.2 do controlador de tensão na armadura do motor CC.

```

%% UFPA - Universidade Federal do Pará
%% Campus Universitário de Tucuruí
%% Faculdade de Engenharia Elétrica
%% Prof. M.Sc. Raphael Barros Teixeira
%% Controlador RST para Controle de Potência na Armadura do Motor CC

% Definição da Função de Transferência
num = [1/(1-n)];
den = [(L/Ra) 1];
Hs = tf(num,den);

% Especificações de desempenho
SP = 2/100; % Escolha do Sobrevalor Percentual
qsi = -log(SP)/sqrt(pi^2 + (log(SP)*log(SP))); % Cálculo do qsi para um
determinado Sobrevalor Percentual
SP = exp(-(qsi*pi)/(sqrt(1-qsi^2)))*100; % Cálculo do Sobrevalor
Percentual
%qsi = 0.8; % Amortecimento Natural (qsi escolhido
baseado no qsi calculado)
ts = 0.03; % Tempo de Acomodação
wn = 3/(ts*qsi); % Frequência Natural

% Pólos desejados e Polinômio característico
s = -qsi*wn+j*wn*(1-qsi^2)^0.5; % Pólos Desejados em S
z = exp(s*Tse); % Pólos Desejados no Plano Z
pd = [z conj(z)]; % Pólos Desejados em Z

```



```

P = poly(pd); % Cria um polinômio com os coeficientes
que resultam nos pólos desejados (pd)

% Parâmetros da Planta Discretizada
Hz = c2d(Hs,Tse); % Discretização da Planta Hs
[B,A]=tfdata(Hz,'v'); % Recolhe Informação da Função de Transferência Hz
nos vetores B e A
Hzw = filt(B,A,Tse); % Coloca na Forma z-1

% Organização Didática dos Parâmetros
p1 = P(2);
p2 = P(3);
a1 = A(2);
b1 = B(2);

% Cálculo dos Parâmetros R do Controlador
r0 = (p1-a1+1)/b1;
r1 = (p2+a1)/b1;

% Polinômios RST
display('Parâmetros R, S e T para controle de Potência na Armadura do Motor
CC')
R1 = [r0 r1] % Obtenção do polinômio R
S1 = [1 -1] % Obtenção do polinômio S com imposição de um
integrador (1 - z-1)
T1 = sum(R1) % Obtenção do polinômio T

```

A.5. Rotina Resultados_Grafico

Essa rotina extrai os dados exportados do SIMULINK e plota os gráficos exibidos na seção 5.3.

```

%% UFPA - Universidade Federal do Pará
%% Campus Universitário de Tucuruí
%% Faculdade de Engenharia Elétrica
%% Prof. M.Sc. Raphael Barros Teixeira
%% Aluno João Ferreira da Silva Filho
%% Rotina Para Geração dos Gráficos
%% Obtenção dos Dados Exportados do SIMULINK

% Obtenção dos Vetores de Tempo
t1 = DataPotencia(:,1);
t2 = DataVelocidade(:,1);
t3 = DataDistribuidor(:,1);
t4 = DataArmadura(:,1);
t5 = DataPValvula(:,1);
t6 = DataTValvula(:,1);
t7 = DataTorque(:,1);
t8 = DataRefVelocidade(:,1);

% Obtenção dos Vetores de Dados
Pturb = DataPotencia(:,2);
Pmot = DataPotencia(:,3);
Velocidade = DataVelocidade(:,2);
Distribuidor = DataDistribuidor(:,2);
Armadura = DataArmadura(:,2);
TV = DataTValvula(:,2);

```

```

PV = DataPValvula(:,2);
Torque = DataTorque(:,2);
RefVelocidade = DataRefVelocidade(:,2);

%% Plota a Resposta ao Degrau na Referência de Velocidade para as Plantas
Lineares

plot(t8,RefVelocidade,'r','linewidth',1.5);
hold on
plot(t2,Velocidade,'b','linewidth',1.5);
plot(t6,TV,'g','linewidth',1.5);
hold off
legend('Referência de Velocidade','Velocidade','Tensão na Válvula
Piloto',4);
title('Resposta do Regulador de Velocidade ao Degrau de -0.2 pu e +0.1
pu','fontsize',12,'fontweight','b');
xlabel('Tempo (s)','fontsize',12,'fontweight','b');
ylabel('Amplitude (pu)','fontsize',12,'fontweight','b');
grid;

%% Plota a Resposta ao Degrau na Referência de Velocidade de +0.2 pu e -0.1
pu

plot(t8,RefVelocidade,'r','linewidth',1.5);
hold on
plot(t2,Velocidade,'b','linewidth',1.5);
hold off
legend('Referência de Velocidade','Regulador de Velocidade',4);
title('Resposta do Regulador de Velocidade ao Degrau de + 0.2 pu e -0.1
pu','fontsize',12,'fontweight','b');
xlabel('Tempo (s)','fontsize',12,'fontweight','b');
ylabel('Velocidade (pu)','fontsize',12,'fontweight','b');
grid;

%% Plota a Resposta ao Degrau na Referência de Velocidade

plot(t8,RefVelocidade,'r','linewidth',1.5);
hold on
plot(t2,Velocidade,'b','linewidth',1.5);
hold off
legend('Referência de Velocidade','Regulador de Velocidade',4);
title('Resposta do Regulador de Velocidade ao Degrau de + 0.1
pu','fontsize',12,'fontweight','b');
xlabel('Tempo (s)','fontsize',12,'fontweight','b');
ylabel('Velocidade (pu)','fontsize',12,'fontweight','b');
grid;

%% Plota a Resposta a Uma Tomada de Carga de 0.1 pu e Uma Rejeição de Carga
de 0.1 pu

plot(t1,Pturb,'b','linewidth',1.5);
hold on;
plot(t1,Pmot,'r--','linewidth',1.5);
plot(t2,Velocidade,'black','linewidth',1.5);
plot(t3,Distribuidor,'g','linewidth',1.5);
hold off
legend('Potência da Turbina','Potência do Motor CC','Velocidade','Abertura
do Distribuidor',4);
title('Resposta de Tomada de Carga de 0.1 pu e Rejeição de Carga de 0.1
pu','fontsize',12,'fontweight','b');

```

```

xlabel('Tempo (s)', 'fontsize', 12, 'fontweight', 'b');
ylabel('Amplitude (pu)', 'fontsize', 12, 'fontweight', 'b');
grid;

%% Plota Uma Tomada de Carga e Rejeição de Carga de 0.2 pu
%% Ênfase no Regulador de Velocidade e Servoposicionador
plot(t1, Pmot, 'linewidth', 1.5);
hold on;
plot(t1, Pturb, '--m', 'linewidth', 1.5);
plot(t2, Velocidade, 'black', 'linewidth', 1.5);
plot(t3, Distribuidor, 'r', 'linewidth', 1.5);
plot(t6, TV, 'g', 'linewidth', 1.5);
plot(t5, PV, 'c', 'linewidth', 1.5);
legend('Potência do Motor', 'Potência da Turbina', 'Velocidade', 'Posição do
Distrbuidor', 'Tensão na Válvula Piloto', 'Posição da Válvula');
hold off;
title('Regulador de Velocidade e Servoposicionador Respondendo a Uma Tomada
de Carga 0.2 pu e Uma Rejeição de 0.2 pu', 'fontsize', 12, 'fontweight', 'b');
xlabel('Tempo (s)', 'fontsize', 12, 'fontweight', 'b');
ylabel('Amplitude (pu)', 'fontsize', 12, 'fontweight', 'b');
grid;

%% Plota Uma Tomada de Carga e Rejeição de Carga de 0.2 pu
%% Ênfase na Emulação da Turbina pelo Motor CC

plot(t1, Pmot, 'linewidth', 1.5);
hold on;
plot(t1, Pturb, '--m', 'linewidth', 1.5);
plot(t2, Velocidade, 'black', 'linewidth', 1.5);
plot(t3, Distribuidor, 'r', 'linewidth', 1.5);
plot(t4, Armadura, 'g', 'linewidth', 1.5);
plot(t7, Torque, 'y', 'linewidth', 1.5);
legend('Potência do Motor', 'Potência da Turbina', 'Velocidade', 'Posição do
Distrbuidor', 'Tensão na Armadura do Motor', 'Torque Mecânico');
hold off;
title('Controlador de Potência Respondendo a Uma Tomada de Carga 0.2 pu e
Uma Rejeição de 0.2 pu', 'fontsize', 12, 'fontweight', 'b');
xlabel('Tempo (s)', 'fontsize', 12, 'fontweight', 'b');
ylabel('Amplitude (pu)', 'fontsize', 12, 'fontweight', 'b');
grid;

%% Plotagem de Todos os Sinais
plot(t1, Pmot, 'linewidth', 1.5);
hold on;
plot(t1, Pturb, '--m', 'linewidth', 1.5);
plot(t2, Velocidade, 'black', 'linewidth', 1.5);
plot(t3, Distribuidor, 'r', 'linewidth', 1.5);
plot(t4, Armadura, 'b--', 'linewidth', 1.5);
plot(t5, PV, 'r--', 'linewidth', 1.5);
plot(t6, TV, '-.c', 'linewidth', 1.5);
plot(t7, Torque, '--black', 'linewidth', 1.5);
plot(t8, RefVelocidade, 'y', 'linewidth', 1.5);
legend('Potência do Motor', 'Potência da Turbina', 'Velocidade', 'Posição do
Distrbuidor', 'Tensão na Armadura do Motor', 'Posição da Válvula', 'Tensão na
Válvula Piloto', 'Torque', 'Referência de Velocidade');
hold off;
title('Sinais Respondendo a Uma Tomada de Carga 0.2 pu e Uma Rejeição de
0.2 pu', 'fontsize', 12, 'fontweight', 'b');
xlabel('Tempo (s)', 'fontsize', 12, 'fontweight', 'b');

```

```
ylabel('Amplitude (pu)', 'fontsize', 12, 'fontweight', 'b');
grid;
```

B. Diagrama de Blocos

A figura B.1 apresenta o diagrama de blocos da emulação completa. A seguir serão apresentados os subsistemas. As cores representam os períodos de amostragem conforme a tabela 9.

Tabela 9 – Períodos de Amostragem da Emulação Completa

Parâmetros dos Modos Mecânicos		
Cor	Descrição	Valor
	Contínuo	0
	Período para reconstrução do sinal discretizado (T_p)	0.0002 s
	Período da parte elétrica do motor CC (T_{se})	0.002 S
	Período da para os modos mecânicos (T_{sm})	1.2 S
	Blocos híbridos onde ocorrem a conversão	-

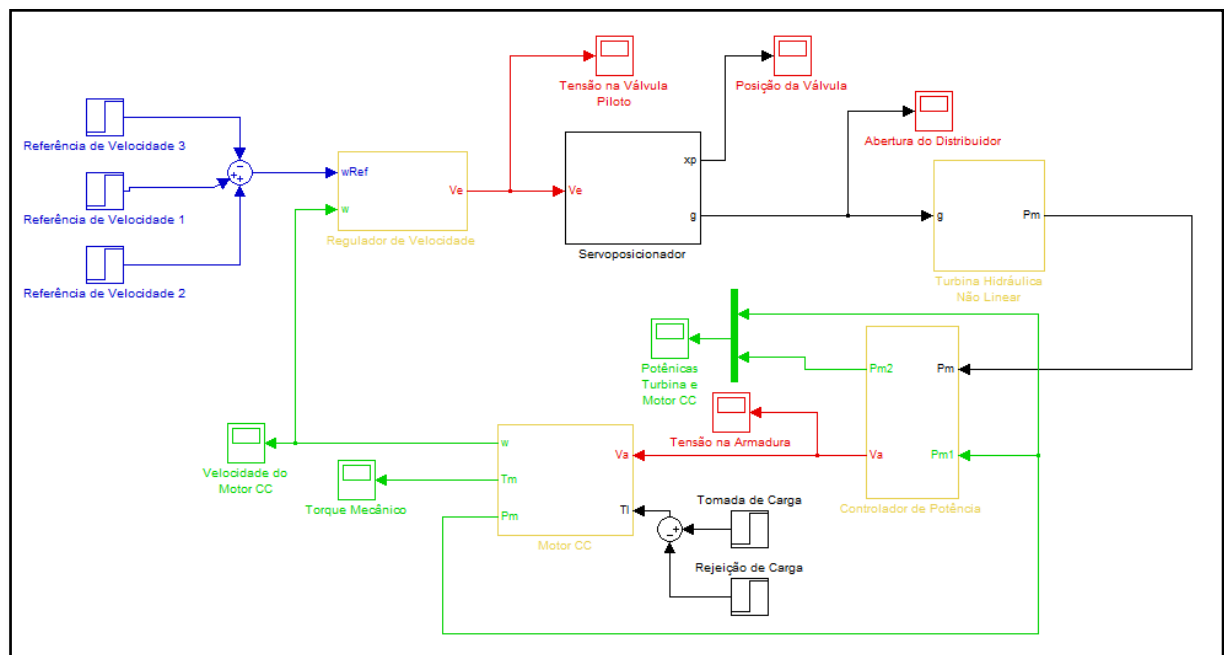


Figura B.1 – Diagrama de Blocos da Emulação Completa

B.1. Subsistema do Regulador de Velocidade

A figura B.2 mostra o diagrama de blocos do controlador digital RST, regulador de velocidade.

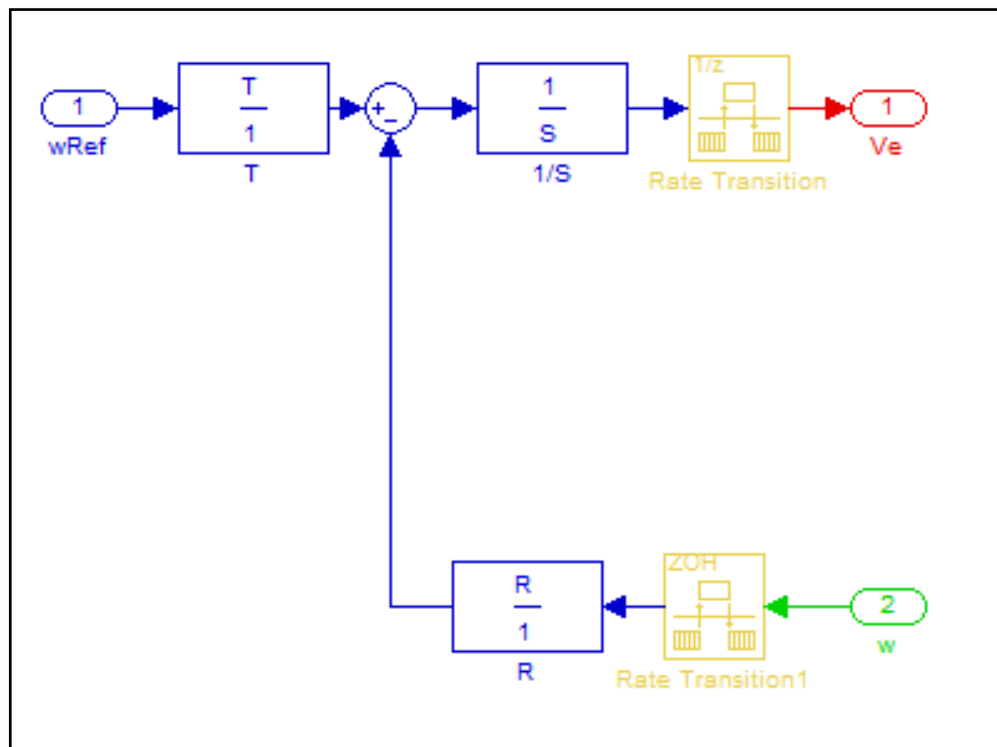


Figura B.2 – Subsistema do Regulador de Velocidade

B.2. Subsistema do Servoposicionador

A figura B.3 destaca o diagrama de blocos do servoposicionador apresentado na figura 3.7.

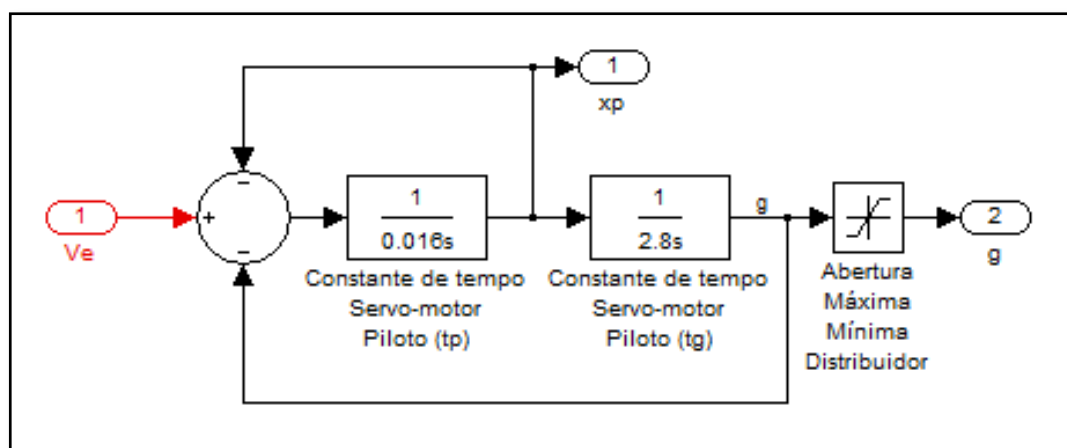


Figura B.3 – Subsistema do Servoposicionador

B.3. Subsistema da Turbina Hidráulica Não Linear

A figura B.4 mostra o diagrama de blocos da turbina hidráulica não linear do tipo Francis, apresentada na figura 3.6.

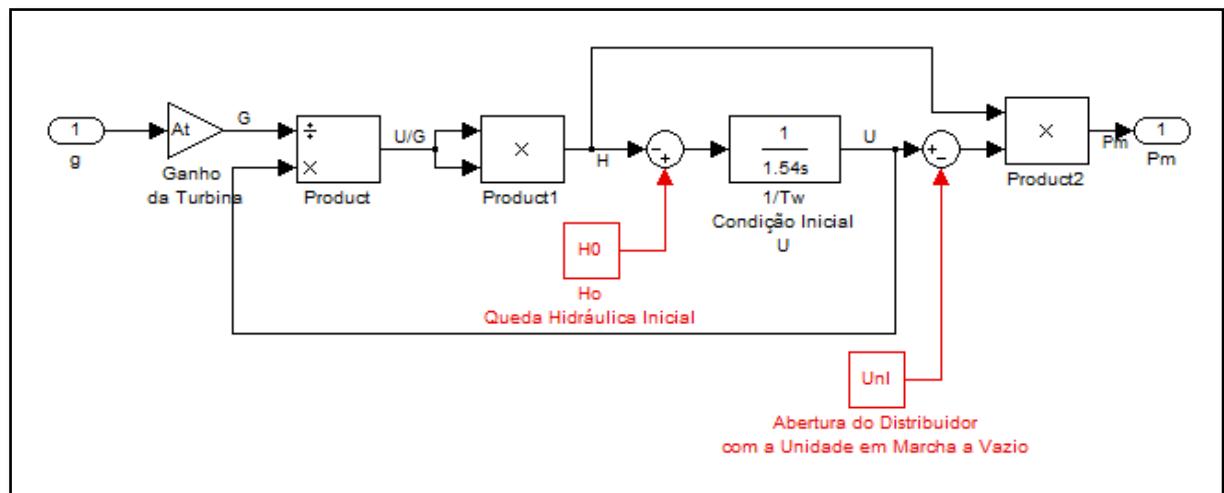


Figura B.4 – Subsistema da Turbina Hidráulica não Linear Francis

B.4. Subsistema do Controlador de Potência na Armadura do Motor CC

A figura B.5 apresenta o diagrama de blocos do controlador de potência na armadura do motor CC.

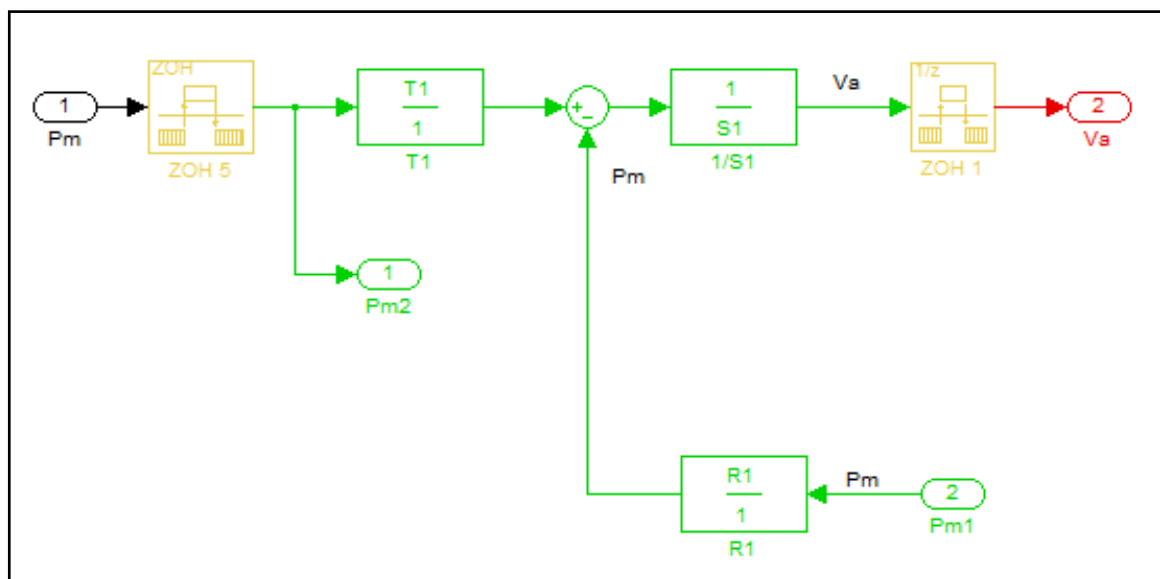


Figura B.5 – Subsistema do Controlador de Potência na Armadura do Motor CC

B.5. Subsistema do Motor CC

A figura B.6 mostra o diagrama de blocos do motor CC em pu, conforme apresentado na figura 3.5.

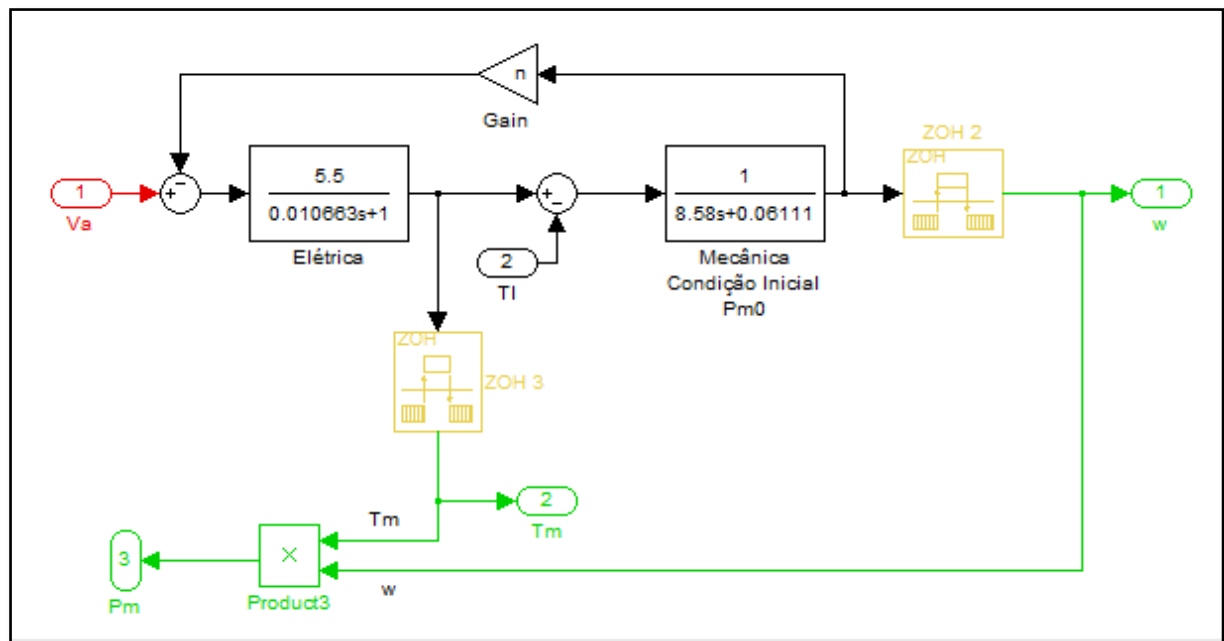


Figura B.6 – Subsistema do Motor CC em pu

B.6. Diagrama de Blocos do Controlador de Potência

A figura B.7 mostra o diagrama de blocos do controlador de potência na armadura do motor CC com a dinâmica elétrica do mesmo. Neste diagrama considera-se a velocidade constante.

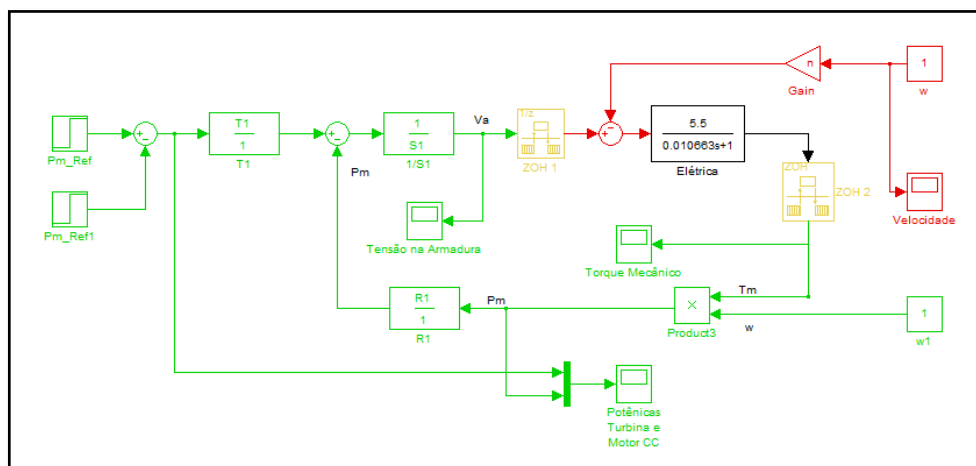


Figura B.7 – Diagrama de Bloco do Controlador de Potência na Armadura do Motor CC com Dinâmica Elétrica do Motor CC

B.7. Diagrama de Blocos do Regulador de Velocidade com Modos Mecânicos Simplificados ou Linearizados

Na figura B.8 encontra-se o diagrama de blocos do regulador de velocidade com os modos mecânicos, servoposicionador simplificado, turbina hidráulica linear e dinâmica mecânica do motor CC.

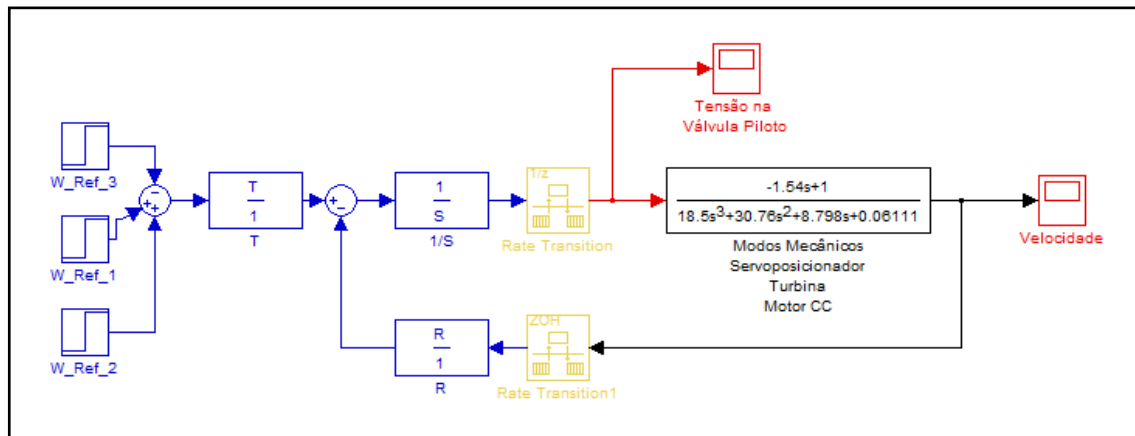


Figura B.8 – Diagrama de Bloco do Regulador de Velocidade com os Modos Mecânicos simplificados ou linearizados

C. Todos os Sinais

A figura B.9 exibe todos os sinais, conforme legenda na figura, respondendo a uma tomada de carga de 0.2 pu e uma rejeição de 0.2 pu. Esse comportamento já foi analisado na seção 5.3 de modo separado.

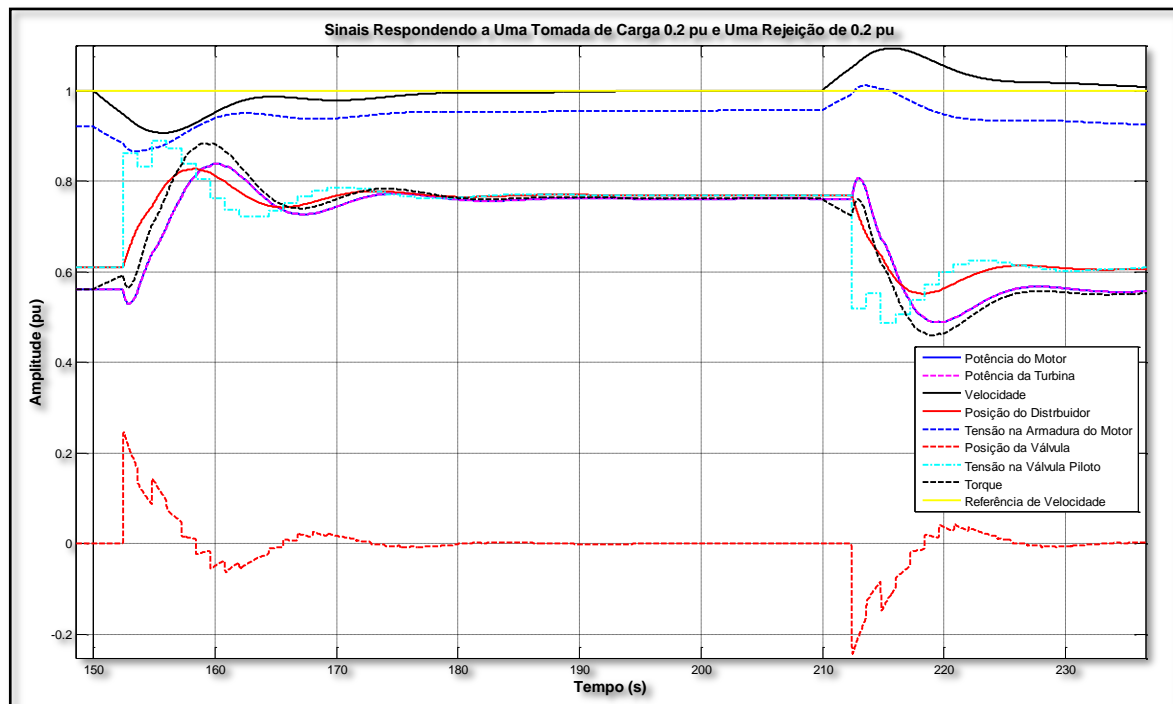


Figura B.9 – Todos os Sinais Respondendo a Uma Tomada de Carga de 0.2 pu e Uma Rejeição de Carga de 0.2 pu

D. Diagrama de Blocos da Emulação Completa sem Subsistemas

A Figura B.10 apresenta o diagrama de blocos completo da emulação da turbina hidráulica pelo motor CC.

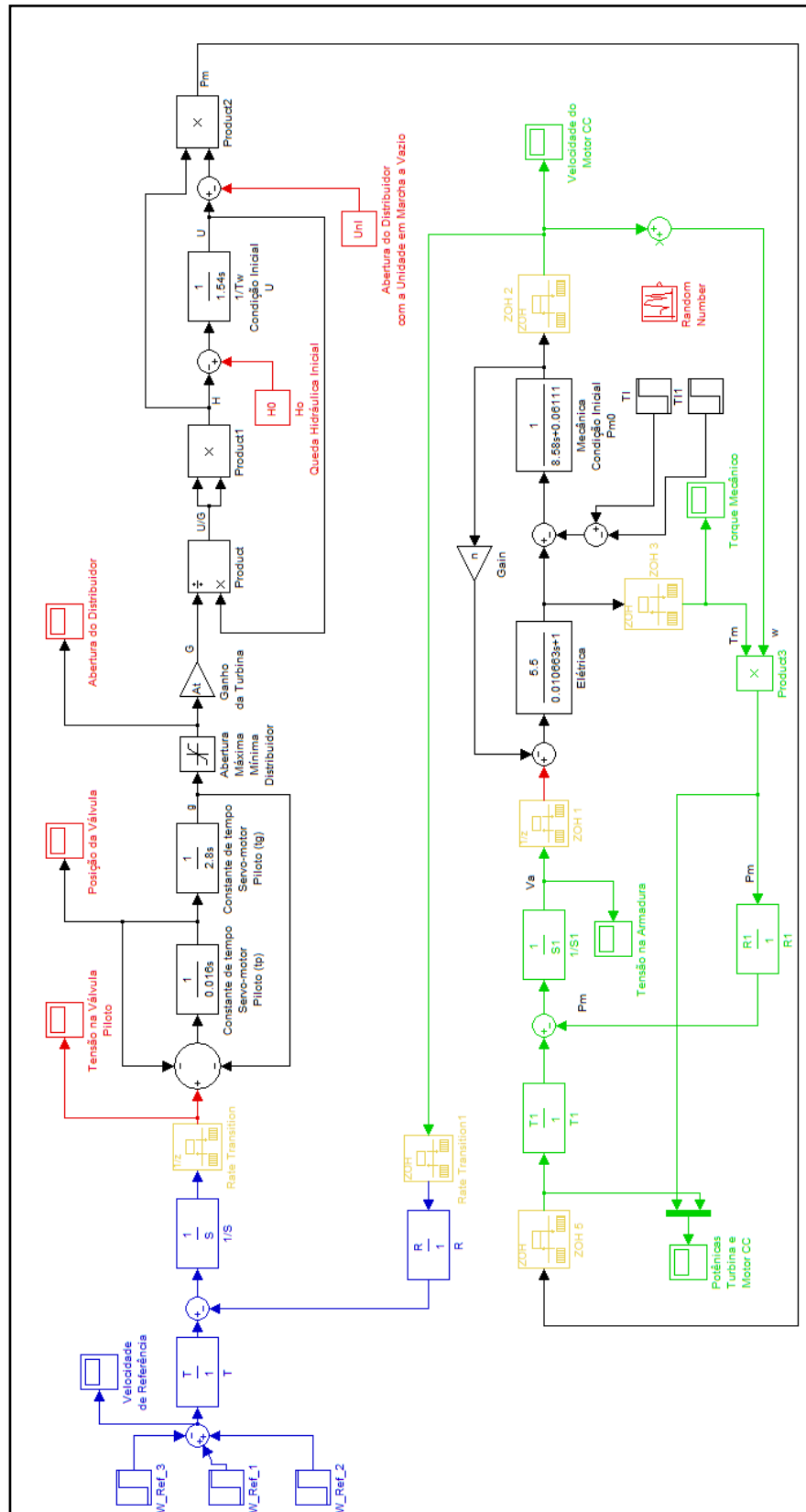


Figura B.10 – Diagrama de Blocos da Emulação Completa sem Subsistemas