

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LUIS DAVID GONÇALVES ARAGON

**ANÁLISE DE UM REGULADOR DE VELOCIDADE DIGITAL PARA A USINA  
HIDROELÉTRICA DE CURUÁ-UNA**

DM 01/2011

Belém  
2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LUIS DAVID GONÇALVES ARAGON

**ANÁLISE DE UM REGULADOR DE VELOCIDADE DIGITAL PARA A USINA  
HIDROELÉTRICA DE CURUÁ-UNA**

Dissertação submetida à Banca Examinadora aprovada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da UFPA, para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Tavares da Costa Jr.

Belém  
2011

**AUTOR:** LUIS DAVID GONÇALVES ARAGON

**ANÁLISE DE UM REGULADOR DE VELOCIDADE DIGITAL PARA A USINA  
HIDROELÉTRICA DE CURUÁ-UNA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA  
APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO  
DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMAS DE ENERGIA.

APROVADA EM: \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA:**

---

Prof. Dr. Carlos Tavares da Costa Jr.  
Orientador - UFPA

---

Prof. Dr. Andre Mauricio Damasceno Ferreira  
Membro da Banca Examinadora - IFPA

---

Prof. Dr. Walter Barra Júnior  
Membro da Banca Examinadora - UFPA

---

Prof. Phd. Jorge Roberto Brito de Souza  
Membro da Banca Examinadora - UFPA

---

Prof. Dr. Marcus Vinicius Alves Nunes  
Coordenador do Programa de PPGEE/ITEC/UFPA

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus, que sempre ilumina nosso caminho, concebendo inspiração e força em todos os momentos da vida.

Minha família, pelo constante apoio e amor durante toda a vida. Ao meu pai, pelo orgulho e crença em meu potencial, à minha mãe, por seu companheirismo e gentileza, e à minha irmã pela fraternidade única e compreensiva.

Sou eternamente grato à minha namorada, Mônica, pela constante compreensão, carinho e apoio.

Agradecimentos especiais aos que ajudaram na elaboração do trabalho. mestre Fabrício, pelo grande apoio e participação, e professor Tavares, pela paciência e motivação.

Não deixando de agradecer aos demais doutores do grupo, professores Barreiros e Barra, sempre dispostos a ajudar.

Aos amigos Marcos, Tiago, Tainara, Rafael, Paulo e Anderson que me acompanharam durante o curso, com empolgação e incentivo.

À Capes e ao PPGEE pela concessão de uma bolsa de mestrado.

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 USINA HIDROELÉTRICA DE CURUÁ-UNA .....	2
1.2 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO .....	4
1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
1.4 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA .....	6
1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	7
<b>CAPITULO 2 – MODELAGEM DA GERAÇÃO HIDROELÉTRICA.....</b>	<b>8</b>
2.1 INTRODUÇÃO .....	8
2.2 GERADOR – MÁQUINAS SÍNCRONAS.....	9
2.3 TURBINA HIDRÁULICA KAPLAN .....	12
2.4 FLUXO DE POTÊNCIA .....	15
2.5 TRANSMISSÃO – BARRA INFINITA.....	15
2.6 REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO (RAT) .....	17
2.7 RV COM QUEDA DE VELOCIDADE COM QUEDA NO TRANSITÓRIO .....	18
2.7.1 Ajuste do Regulador com Queda no Transitório.....	19
2.7.2 Projeto do combinador.....	20
2.8 CONDIÇÕES INICIAS .....	22
2.9 CONCLUSÃO .....	25
<b>CAPÍTULO 3 – CONTROLADORES DIGITAIS .....</b>	<b>26</b>
3.1 INTRODUÇÃO .....	26
3.2 MODELAGEM DE SISTEMAS NO DOMÍNIO DISCRETO.....	27
3.2.1 Discretização .....	27
3.2.2 Modelo Discreto .....	29
3.2.3 Transformada Z .....	30
3.2.4 Fração de atraso .....	31
3.2.5 Quantização .....	31
3.3 CONTROLADOR PID DISCRETIZADO.....	32
3.4 ESTRUTURA CANÔNICA RST.....	33
3.4.1 Controlador RST por estratégia indireta.....	34
3.4.2 Controlador RST por estratégia direta.....	37
3.4.3 Parâmetros conhecidos de S .....	40
3.4.4 Polos auxiliares.....	42

3.5 CONCLUSÃO .....	42
<b>CAPITULO 4 – SIMULADOR DA USINA HIDROELÉTRICA DE CURUÁ-UNA ....</b>	<b>43</b>
4.1 INTRODUÇÃO .....	43
4.2 O SIMULADOR .....	43
4.3 PARÂMETROS E MODELAGEM DO GERADOR SÍNCRONO .....	45
4.4 PARÂMETROS E MODELAGEM DA TURBINA .....	46
4.6 REGULADOR DE VELOCIDADE (RV) .....	48
4.7 REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO.....	52
4.8 CONCLUSÃO .....	52
<b>CAPITULO 5 – PROPOSTA E ANÁLISE.....</b>	<b>53</b>
5.1 INTRODUÇÃO .....	53
5.2 REGULADOR DE VELOCIDADE ANALÓGICO .....	53
5.3 REGULADOR DE VELOCIDADE DIGITAL INDIRETO RST.....	57
5.4 REGULADOR DE VELOCIDADE DIGITAL DIRETO RST .....	61
5.5 COMPARAÇÃO DOS CONTROLADORES NO SIMULADOR DA USINA DE CURUÁ-UNA .....	65
5.5.1 Simulações com usina isolada .....	66
5.5.1.1 Redução de carga – usina isolada .....	66
5.5.1.2 Aumento de carga – usina isolada .....	68
5.5.2 Simulações com usina em ilhamento.....	70
5.5.2.1 Redução de geração – usina em ilhamento isolada .....	70
5.5.2.2 Grande redução de geração – usina em ilhamento .....	72
5.5.2.3 Aumento da geração – usina em ilhamento.....	74
5.5.2.4 Grande aumento da geração – usina em ilhamento .....	76
5.5.2.5 Redução de geração com diferentes níveis do reservatório– usina em ilhamento .....	78
5.5.3 CONCLUSÃO .....	80
<b>CAPÍTULO 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>82</b>
6.1 CONCLUSÃO .....	82
6.2 DIFICULDADES.....	83
6.3 TRABALHOS FUTUROS.....	84
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>85</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>88</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1- Localização da UHE de Curuá-Una.....	2
Figura 1.2- Planta esquemática da UHE de Curuá-Una.....	3
Figura 2.1- Eixos coordenados síncrono.....	10
Figura 2.2- Esquema de uma turbina Kaplan.....	12
Figura 2.3- Gráfico comparativo do rendimento da turbina Kaplan com a turbina de hélices fixas.....	12
Figura 2.4- Diagrama de blocos de um modelo não linear para a turbina de uma hidroelétrica .....	13
Figura 2.5- Diagrama de blocos de um modelo para a turbina Kaplan.....	13
Figura 2.6- Máquina ligada a um SEP através de uma linha de transmissão.....	16
Figura 2.7- Modelo $\pi$ para a linha de transmissão e transformadores.....	16
Figura 2.8- Diagrama do regulador automático de tensão (RAT).....	17
Figura 2.9- Diagrama do comportamento de um regulador com queda de velocidade.....	18
Figura 2.10- Diagrama de blocos de um RV para a turbina Kaplan.....	19
Figura 2.11- Diagrama de blocos do combinador proposto.....	21
Figura 2.12- Dinâmica do bloco <i>Rend.</i> .....	21
Figura 2.13- Dinâmica do bloco <i>Comp.</i> .....	22
Figura 3.1- Diagrama de controlador digital.....	26
Figura 3.2- Plano S e plano Z.....	31
Figura 3.3- Esquemático de uma planta com controlador RST.....	33
Figura 3.4- Diagrama de blocos do controlador digital proposto RST.....	35
Figura 3.5- Diagrama do controlador.....	38
Figura 3.6- Sistema controlado com perturbação $d$ .....	40
Figura 3.7- Gráfico relacionando posição de $s'$ e ganho da perturbação.....	41
Figura 4.1- Interface do programa de simulação da UHE de Curuá-Una.....	44
Figura 4.2- Diagrama de fluxo do simulador da UHE de Curuá-Una.....	44
Figura 4.3- Programa de simulação da UHE de Curuá-Una.....	45
Figura 4.4- Relação entre abertura do distribuidor e angulação das pás com a vazão na turbina. .....	47
Figura 4.5- Relação entre abertura do distribuidor e angulação das pás com a eficiência da turbina.....	48

Figura 4.6- Relação entre abertura do distribuidor e angulação das pás com a eficiência da turbina.....	48
Figura 4.7- Diagrama de blocos para simulação do Regulador de velocidade da UHE Curuá-Una .....	49
Figura 4.8- Dinâmica do <i>combinador</i> presente com regulador de velocidade.....	50
Figura 4.9- Diagrama de blocos do combinador proposto. ....	50
Figura 4.10- Dinâmica do bloco <i>Rend.</i> utilizado no simulador.....	51
Figura 4.11- Dinâmica do bloco <i>Comp.</i> utilizado no simulador .....	51
Figura 4.12- Diagrama de blocos para simulação do Regulador de tensão (RAT).....	52
Figura 5.1- Diagrama de blocos do projeto contínuo .....	53
Figura 5.2- Diagrama de blocos do RV contínuo projetado.....	54
Figura 5.3- Diagrama de Bode do sistema com o RV calculado.....	55
Figura 5.4- Simulador utilizado no projeto. ....	56
Figura 5.5- Velocidade de rotação do gerador com RV contínuo.....	56
Figura 5.6- Sinal de referência de posição do RV contínuo.....	57
Figura 5.7- Diagrama de blocos de controlador RST digital por estratégia indireta projetado	57
Figura 5.8- Controlador digital RST indireto.....	59
Figura 5.9- Velocidade de rotação do gerador dos RV propostos.....	60
Figura 5.10- Sinal de referência de posição dos RV propostos.....	60
Figura 5.11- Diagrama de blocos de controlador RST digital por estratégia direta.....	61
Figura 5.12- Gráfico relacionando posição de $s'$ e ganho da perturbação .....	63
Figura 5.13- Controlador digital RST direto. ....	63
Figura 5.14- Velocidade da turbina com os três RV projetados.....	64
Figura 5.15- - Sinal de referência de posição dos três RV propostos .....	64
Figura 5.16- Diagrama de fluxo do simulador da UHE de Curuá-Una.....	65
Figura 5.17- Velocidade de rotação do gerador – redução de carga. ....	66
Figura 5.18- Potência mecânica gerada na turbina Kaplan – redução de carga.....	67
Figura 5.19- Sinais de referência do RV; à direita a referência de posição do distribuidor e à esquerda a angulação das hélices – redução de carga .....	67
Figura 5.20- Velocidade de rotação do gerador – aumento de carga. ....	68
Figura 5.21- Potência mecânica gerada na turbina Kaplan – aumento de carga.....	69
Figura 5.22- Sinais de referência do RV; à direita a referência de posição do distribuidor e à esquerda a angulação das hélices – aumento de carga .....	69
Figura 5.23- Velocidade de rotação do gerador – redução de geração.....	71



Figura 5.24- Potência mecânica gerada na turbina Kaplan – redução de geração .....	71
Figura 5.25- Sinais de referência do RV; à direita a referência de posição do distribuidor e à esquerda a angulação das hélices – redução de geração.....	72
Figura 5.26- Velocidade de rotação do gerador – g. redução de geração.....	73
Figura 5.27- Potência mecânica gerada na turbina Kaplan – g. redução de geração .....	73
Figura 5.28- Sinais de referência do RV; à direita a referência de posição do distribuidor e à esquerda a angulação das hélices – g. redução de geração.....	74
Figura 5.29- Velocidade de rotação do gerador – aumento da geração .....	75
Figura 5.30- Potência mecânica gerada na turbina Kaplan – aumento da geração .....	75
Figura 5.31- Sinais de referência do RV; à direita a referência de posição do distribuidor e à esquerda a angulação das hélices – aumento de geração.....	76
Figura 5.32- Velocidade de rotação do gerador – g. aumento da geração .....	77
Figura 5.33- Potência mecânica gerada na turbina Kaplan – g. aumento da geração .....	77
Figura 5.34- Sinais de referência do RV; à direita a referência de posição do distribuidor e à esquerda a angulação das hélices – g. aumento da geração.....	78
Figura 5.35- Velocidade de rotação para três níveis do reservatório controlado por um RV contínuo .....	79
Figura 5.36- Velocidade de rotação para três níveis do reservatório controlado por um RV digital indireto .....	79
Figura 5.37- Velocidade de rotação para três níveis do reservatório controlado por um RV digital direto.....	80
Figura A.1- Relação do rendimento mecânico pela abertura do distribuidor e angulação das hélices com a altura do nível do reservatório em 0,7 pu. ....	88
Figura A.2- Relação do rendimento mecânico pela abertura do distribuidor e angulação das hélices com a altura do nível do reservatório em 0,775 pu. ....	89
Figura A.3- Relação do rendimento mecânico pela abertura do distribuidor e angulação das hélices com a altura do nível do reservatório em 0,85 pu. ....	89
Figura A.4- Relação do rendimento mecânico pela abertura do distribuidor e angulação das hélices com a altura do nível do reservatório em 0,925 pu. ....	90
Figura A.5- Relação do rendimento mecânico pela abertura do distribuidor e angulação das hélices com a altura do nível do reservatório em 1 pu. ....	90
Figura A.6- Dinâmica compensada e não compensada para uma altura de 0.7 pu. ....	91
Figura A.7- Dinâmica compensada e não compensada para uma altura de 0.775 pu. ....	91
Figura A.8- Dinâmica compensada e não compensada para uma altura de 0.85 pu. ....	92

Figura A.9- Dinâmica compensada e não compensada para uma altura de 0.925 pu. ....	92
Figura A.10- Dinâmica compensada e não compensada para uma altura de 1 pu. ....	93

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1- Características de Curúa-Una.....	4
Tabela 4.1- Gerador síncrono de Curuá-Una.....	45
Tabela 4.2- Turbina de Curuá-Una.....	47
Tabela 4.3- RV de Curúa-Una.....	49
Tabela 5.1- RV digital RST indireto .....	58
Tabela 5.2- RV digital RST direto .....	61
Tabela 6.1- Comparação dos controladores digitais propostos.....	82

## LISTA DE ACRÔNIMOS E SÍMBOLOS

UHE	- usina hidrelétrica
PA	- estado do Pará
ESP	- estabilizador de sistemas de potência
A/D	- analógico-digital
D/A	- digital-analogico
$D$	- Coeficiente de amortecimento
RAT	- regulador automático de tensão
RV	- regulador automático de velocidade
CA	- corrente alternada
P	- potência ativa
Q	- potência reativa
SEP	- sistema Elétrico de Potência
$T_m$	- torque mecânico
$T_e$	- torque elétrico
$\omega$	- velocidade angular do rotor
$\omega_0$	- velocidade angular síncrona
$f_0$	- frequência síncrona
$H$	- constante de inércia
$\delta$	- ângulo do rotor
$V_q$	- tensão de eixo q
$V_d$	- tensão de eixo d
$E$	- tensão no rotor
$V_T$	- tensão terminal
$\theta$	- angulo de carga
$\beta$	- angulo da corrente
$R_a$	- resistência de armadura
$X_d$	- reatância síncrona de eixo d
$X_q''$	- reatância sub-transitória de eixo q
$I_q$	- corrente de eixo q

$I_d$	- corrente de eixo d;
$E'_q$	- tensão transitória de eixo q
$E''_q$	- tensão sub-transitória de eixo q
$E'_d$	- tensão transitória de eixo d
$E''_d$	- tensão sub-transitória de eixo d
$E_{fd}$	- tensão de campo
$T'_{d0}$	- constante de tempo transitória de eixo d, em circuito aberto
$T''_{d0}$	- constante de tempo sub-transitória de eixo d, em circuito aberto
$T''_{q0}$	- constante de tempo sub-transitória de eixo q, em circuito aberto
$X'_d$	- reatância transitória de eixo d
$X''_d$	- reatância sub-transitória de eixo d
$X_q$	- reatância síncrona de eixo q
$X'_q$	- reatância transitória de eixo q
$X''_q$	- reatância sub-transitória de eixo q
$g$	- posição do distribuidor
$ang$	- angulação das aletas
$E_f(g, ang)$	- eficiência da turbina
$V(g, ang)$	- vazão na turbina
$T_w$	- constante de tempo da aceleração da água no conduto
$H_{r0}$	- nível inicial do reservatório
$G_{nl}$	- abertura do distribuidor com a unidade a vazio
$P_m$	- potência mecânica
$H_r$	- nível do reservatório
$X_e$	- reatância equivalente da linha de transmissão em pu
$R_e$	- resistência equivalente da linha de transmissão em pu
$V_\infty$	- magnitude da tensão no barramento infinito em pu
$P_T$	- potência ativa

$Q_T$	- potência reativa
$a_v$	- constante experimental
$b_V$	- constante experimental
$Z_e$	- impedância de curto circuito
$Y_e$	- admitância de circuito aberto
$V_p$ e $V_s$	- terminais da linha
$R_t$	- característica de queda transitória
$T_r$	- tempo de reset
$T_1$	- constante do servomotor do distribuidor
$g'$	- valor da abertura do distribuidor em regime
$C(g', H)$	- função que representa o comportamento do combinador
$T_2$	- constante do servomotor fixada as pás da turbina
$H_{\max}$ , $g'_{\max}$ e $ang_{\max}$	- pontos de operação desejados para o máximo de rendimento.
$b_{Efi}$ e $c_{Efi}$	- os coeficientes da reta interpolada da função $Ef(g, ang)$ com o $ang$ fixo
$b_{Vi}$ e $b_{Vi}$	- os coeficientes da reta interpolada da função $V(g, ang)$ com o $ang$ fixo
$x_i$ e $y_i$	- os limites inferiores e superiores para os intervalo interpolados de $g$
$f_s$	- frequência com que o sinal é amostrado
$f_{\max}$	- máxima frequência do sinal
$T$	- período de amostragem
$\sum_{i=1}^{nA} a_i y(k-1)$	- somatório dos sinais amostrados de saída
$\sum_{i=1}^{nB} b_i u(k-d-i)$	- somatório dos sinais amostrado de entrada
$f_B^{MF}$	- frequência de banda da malha fechada do sistema
$\Delta d$	- fração de atraso
PID	- controlador proporcional integral derivativo
$T_i$	- ganho integral

$T_d$	- ganho derivativo
$d$	- atraso da planta
$q^{-d}$	- operador de atraso
$B$	- polinômios discreto dos zeros da planta
$A$	- polinômios discreto dos polos da planta
$R, S$ e $T$	- polinômios discretos do controlador
$B_m$ e $A_m$	- trajetória desejada
$P$	- polinômio característico
$P_c$	- polinômio escolhido

## RESUMO

Analisa uma proposta de um controlador digital para o regulador de velocidade da Usina Hidroelétrica de Curuá-Una, utilizando duas estratégias de projeto, a estratégia indireta com o projeto do controlador sendo feito no plano contínuo e depois discretizado e a estratégia direta, em que o controlador é projetado inteiramente no plano discreto. O conhecimento gerado no simulador é de grande importância, pois é uma das grandes ferramentas para avaliar o comportamento dos controladores digitais propostos, em ambiente seguro. O estudo dos controladores também permite uma substituição de equipamentos antigos, com produção descontinuada, por equipamentos novos que permitem a confecção de controladores modernos, digitais e inteligentes, que proporcionam uma substituição de técnicas antigas de controle por estratégias avançadas de controle, maximizando o rendimento do sistema em condições adversas de operação. O trabalho levanta as diferenças, vantagens e desvantagens de cada controlador, com o objetivo de auxiliar na escolha do controlador mais adequado para projetos de controladores avançados: tipo um controle adaptativo, controle *fuzzy* ou controle neural. As dificuldades de projeto e os resultados das simulações foram os principais indicadores na avaliação dos dois RV digitais projetados. De uma forma geral o RV digital direto apresentou melhor desempenho, estabilidade e menor esforço computacional, entretanto, o RV digital indireto mostrou desempenho similar, menor degradação devido às não linearidades e ao menor esforço de projeto.

**Palavras Chave:** Regulador de Velocidade. Controlador RTS. Turbina Kaplan. UHE de Curuá-Una.



## ABSTRACT

This paper makes an analyze of a digital controller for the speed control in a hydroelectric factory of Curuá-Una. It's used two design strategies, one that uses the indirect approach where the controller design is still done on the continues plane and then discretized and direct strategy , where the controller is designed entirely in the discrete plane. The knowledge generated using simulated tests is of great importance because it is one of the major tools to evaluate the performance of digital controllers in a secure environment. The study also contribute with the replacement of old equipment ( with a discontinued production) for digitalized equipment that allow the implementation of modern controllers, this way providing the replacement of classic continues controllers for advanced modern digital controllers, maximizing the efficiency of the system under adverse operation conditions. The work raises the differences, advantages and disadvantages of each controller, in order to assist in choosing the most suitable driver for the design of advanced controllers: adaptive control, *fuzzy* control or neural control. The difficulties of design and simulation results were the main indicators in assessments of the two digital speed regulator (SR) projected. In overall the SR Direct Digital had the best performance, stability and less effort, however, SR indirect digital performance showed similar, less degradation due to nonlinearities and less design effort.

**Keywords:** Speed regulator. RST controller. Kaplan turbine. UHE of Curuá-Una.

## CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

As grandes usinas elétricas têm regulação própria. Isto é, a capacidade do sistema alcançar um novo ponto de equilíbrio, em resposta a uma variação instantânea de potência, mesmo com seus reguladores desligados. Entretanto a relação carga-frequência faria o sistema operar em níveis inaceitáveis. Por isso, para melhor garantir os níveis de operação de uma usina, faz-se uso de mecanismos de regulação de velocidade automáticos, denominadas de reguladores de velocidade (RV).

No ramo da engenharia elétrica é comum relacionar as variações da frequência de rotação do gerador com as variações da potência ativa do sistema. Isto indica uma forte relação entre as grandezas potência ativas e frequência (KUNDUR, 1994). Isto pode ser explicado pelos próprios eventos que provocam o fenômeno. Imagine um sistema em equilíbrio que consiste de uma máquina geradora, uma linha de transmissão e uma carga, onde a máquina geradora está suprindo a carga e as duas estão interligadas pela linha de transmissão. Caso ocorra uma súbita variação na potência ativa (a carga aumenta rapidamente) a geração fica menor que a carga, porém a mesma continua a ser suprida pelo gerador sem diminuição. Isto ocorre porque o gerador transforma parte da energia cinética de sua massa girante em energia elétrica. Logo, isto provoca uma queda na velocidade de rotação do gerador (queda de frequência), que se não suprida pela ação de algum regulador, pode levar o sistema a operar em valores inaceitáveis. A ação de tal regulador seria de aumentar e/ou diminuir a geração de tal modo a diminuir a variação de frequência.

A Usina Hidroelétrica de Curuá-Una (UHE de Curuá-Una) utiliza estratégias de controle para a regulação de velocidade (RV) que são bastante antigas, consideradas clássicas para resolução do problema (KUNDUR, 1994). Estes métodos apresentam um bom desempenho para determinado ponto de operação (geração interligada). Entretanto, o sistema é não-linear, de fase não mínima e com vários pontos de operação bem distintos. Por isso, é aconselhado o uso de métodos de controle não-linear, tais como: controle robusto (JIANG, 1995), controle adaptativo (FINDLAY et al., 1980), lógica neural (GUO; YANG; BAO, 2008) e controle *fuzzy* (DJUKANOVIĆ et al., 1997) para melhorar o aproveitamento do sistema.

O primeiro desafio para se aplicar um controle mais sofisticado numa planta é a instalação de um processador de dados na malha de controle. Para isto, é necessário aplicar a teoria de controle digital no sistema e projetar um controlador digital que possa

ter seus parâmetros facilmente modificados, aproveitando a estrutura existente na planta.

Este trabalho estuda uma proposta de um controlador digital para o regulador de velocidade da Usina Hidroelétrica de Curuá-Una, utilizando duas estratégias de projeto, a estratégia indireta, onde o projeto do controlador é feito no plano contínuo e depois discretizado; e a estratégia direta, em que o controlador é projetado inteiramente no plano discreto. O conhecimento gerado em ambiente de simulação computacional é de grande importância, pois é uma das grandes ferramentas para avaliar o comportamento dos controladores digitais propostos, em ambiente seguro.

### 1.1 USINA HIDROELÉTRICA DE CURUÁ-UNA

O complexo de aproveitamento hidroelétrico de Curuá-Una situa-se a 70 km ao sul da cidade de Santarém, no rio Curuá-Una, afluente da margem direita do rio Amazonas. A palavra Curuá-Una tem sua origem no Tupi-Guarani e significa “Rio Escuro” (Curuá: rio e Una: escuro). A UHE Curuá-Una dista cerca de 850 km, em linha reta a oeste, da capital do Estado (Figura 1.1).



Figura 1.1- Localização da UHE de Curuá-Una

Fonte Ligocki ( 2003)

O projeto inicial da UHE de Curuá-Una, na década de 1960, tinha por objetivo abastecer de energia elétrica o município de Santarém e região de Aveiro. O projeto da

usina previa uma capacidade instalada de 40MW, produzida por 4 turbinas que seriam instaladas em etapas, de acordo com o aumento da demanda. No entanto, ocorreu um crescimento populacional da região maior do que o esperado, aumentando a demanda por energia elétrica. Este aumento populacional foi devido à descoberta de metais preciosos na região, fato que atraiu muitas pessoas em busca de trabalho. Atualmente, Curuá-Una possui 3 turbinas com 9,5MW de potência útil. Dessa forma, a UHE de Curuá-Una não é responsável pelo abastecimento total da região, sendo necessário suprir a deficiência energética nos momentos de pico de consumo. A demanda extra de energia é garantida pelo sistema interligado de Tucuruí (tramo Oeste).

A represa de Curuá-Una ocupa um trecho do vale que se estende em direção ao sul por 80 km.

O projeto da usina consta de casa de força, com canal adutor e canal de fuga, vertedouro, barragem de terra e uma subestação (Figura 1.2).

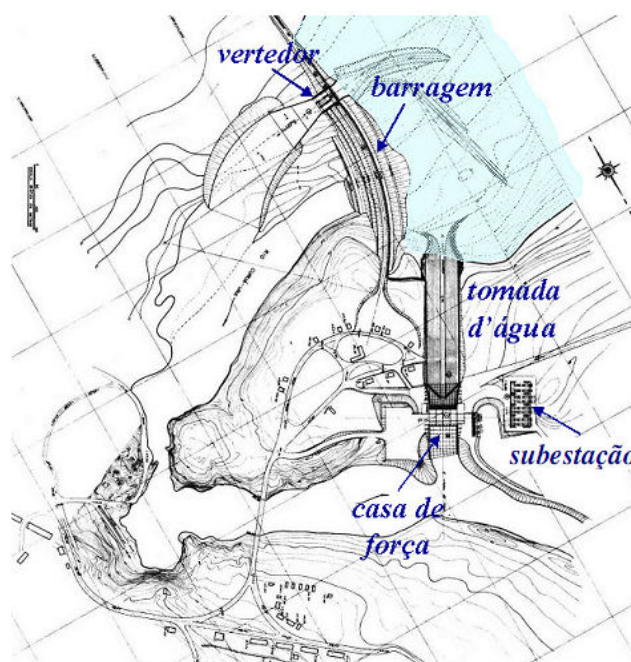


Figura 1.2- Planta esquemática da UHE de Curuá-Una

Fonte: Ligocki (2003)

A concepção do projeto de Curuá-Una constituiu um desafio à engenharia nacional pelo fato de ser a primeira obra de barragem, no Brasil, construída sobre terreno arenoso. Esta peculiaridade confere à Curuá-Una características diferentes das outras obras do gênero, tendo sido necessárias soluções inéditas de projeto e cuidados

especiais na construção. Grande parte das informações apresentadas neste capítulo foi extraída de Ligocki (2003) e Sare (2003).

As características gerais da obra estão descritas na Tabela 1.1.

Tabela 1.1- Características de Curuá-Una

Reservatório	
Área	78km <sup>2</sup>
Capacidade do reservatório	472 m x 106 m <sup>2</sup>
Área de drenagem	153 x 103km <sup>2</sup>
Vazão mínima	45m <sup>3</sup> /s
Vazão máxima	640m <sup>3</sup> /s

Barragem	
Tipo	zonada com núcleo central impermeável.
Comprimento	600m
Altura máxima	28m
Largura da crista	10m

Tomada d'Água e Casa de Força	
Comprimento	64m
Estrutura	concreto armado, na margem esquerda do rio
Tomadas d'água	03, com grades de proteção e stop-log.
Potência	30 MW
Turbinas	Kaplan

Fonte: Ligocki (2003) e Sare (2003).

## 1.2 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

A realização bem sucedida da geração de energia elétrica está relacionada com a possibilidade de fornecer de modo ininterrupto energia elétrica de qualidade. Para tal, é necessário que tanto a tensão quanto a frequência elétrica estejam sempre reguladas, sofrendo apenas pequenos desvios durante o fornecimento. Tal ação é necessária, pois muitos equipamentos e máquinas tanto comerciais quanto industriais precisam de uma

alimentação adequada, para não ocorrer mau funcionamento. Essa capacidade do sistema de geração de se manter dentro dos padrões é obtida por meio de controladores reguladores automáticos de tensão (RAT) e reguladores de velocidade (RV), dentre outros.

O estudo para aperfeiçoar os controladores de um sistema elétrico de potência é fundamental para possibilitar melhorar o rendimento e prevenir falhas nas diversas condições de operação de um sistema de geração. Deste modo, permitindo uma geração ininterrupta de energia, mesmo com perturbações não esperadas. O estudo dos controladores também permite uma substituição de equipamentos antigos, com produção descontinuada, por equipamentos novos que permitem a confecção de controladores modernos, digitais e inteligentes, que proporcionam uma substituição de técnicas antigas de controle por estratégias avançadas de controle, maximizando o rendimento do sistema em condições adversas de operação.

Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de dois controladores digitais para a Usina Hidroelétrica de Curuá-Una. Esta usina é composta de três máquinas de 10 MW, totalizando 30 MW de potência instalada, sendo responsável pelo abastecimento de energia elétrica do município de Santarém e arredores.

### 1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em Brezovec, Kuzle e Tomisa (2006) é apresentado um modelo generalizado para a turbina tipo Kaplan. O modelo proposto consiste em utilizar o modelo “clássico” não linear para turbinas hídricas mostrado na literatura (KUNDUR, 1993) e adaptá-la para o caso de turbinas Kaplan. A aproximação consiste em adicionar duas dinâmicas ao modelo, uma representando a vazão e a outra a eficiência na turbina, sendo ambas relacionadas com a abertura do distribuidor e da angulação das hélices.

Em Paolo (2009) é apresentada uma modelagem e um simulador para um sistema de potência, no caso a hidroelétrica de Tucuruí. Este trabalho apresenta as técnicas e os modelos utilizados para modelar e programar em linguagem C++ um simulador para um Sistema Elétrico de Potência (SEP) e mostram o simulador desenvolvido por Sena (2006).

Em Landau e Zito (2006) são mostradas várias técnicas de projeto de controladores digitais. Esse livro é focado em técnicas de projeto para controladores

digitais numa forma canônica denominada RST. Também são apresentadas técnicas de identificação e modelagem discretas.

Em Santos (2006) é mostrado um simulador para testes de reguladores de velocidade (RV). O trabalho apresenta várias técnicas e modelos de uma usina hidroelétrica, focando nos modelos mecânicos hídricos com o objetivo da simulação e teste de reguladores de velocidade projetados para o controle das turbinas hidráulicas.

Em Aragon e Costa Jr. (2010) é proposto um controlador digital para o controle da turbina hidráulica da hidroelétrica de Tucuruí. O regulador de velocidade proposto utiliza a teoria de controle digital e usa a estrutura do modelo canônico RST. O controlador foi testado em um simulador do SEP da UHE de Tucuruí, apresentando bons resultados.

Não existem muitos trabalhos generalizados sobre a confecção de controladores digitais para turbinas hidráulicas. Isto porque os projetos de controladores de reguladores de velocidade, normalmente, são feitos através de técnicas clássicas que deixam os RVs simples e robustos.

A dificuldade de se projetar controladores modernos para os RV são agravados pela não generalização de modelos utilizados para representar a dinâmica hidráulica da turbina Kaplan. Isso faz que a proposta e as técnicas em diversos artigos sejam restritas para determinada usina hidroelétrica ou turbina.

#### 1.4 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Os RV das turbinas de uma hidroelétrica são responsáveis pelo controle da velocidade de rotação nas turbinas hídricas. Conseqüentemente, o RV controla a frequência elétrica das grandezas CA do gerador elétrico. Deste modo, uma falha que provoque uma queda significativa da frequência de operação pode provocar a parada de toda uma usina elétrica, isto porque, a baixa frequência provoca mal funcionamento nos atuadores elétricos (motores elétricos, reles, circuitos) e nas linhas de transmissão. Logo, trata-se de um elemento crítico na geração elétrica, uma vez que vários equipamentos dependem da frequência de alimentação. Por estes motivos os RV costumam ter projetos simples e de alta robustez, tendo pouca preocupação com a regulação ou rendimento ótimo do sistema primário.

O primeiro desafio para se aplicar um controle mais sofisticado numa planta, seria a instalação de um processador digital na malha de controle. Para isto é necessário

aplicar a teoria de controle digital no sistema e projetar um controlador digital que possa ter seus parâmetros facilmente modificados via software, que aproveite a estrutura existente na planta.

Este trabalho apresenta uma proposta de um controlador digital para o regulador de velocidade da Usina Hidroelétrica de Curuá-Una, utilizando alocação de polos e zeros com rastreamento e regulação independentes. O conhecimento gerado no simulador é de grande importância, pois é uma das grandes ferramentas para avaliar o comportamento de um controlador digital proposto, em ambiente seguro.

## 1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho foi organizado em seis capítulos, iniciando com a base conceitual necessária, seguida das ferramentas de trabalho desenvolvidas, depois são apresentados os resultados e sua análise das simulações.

O Capítulo 1 apresenta uma introdução à proposta da dissertação, a motivação que a provoca, o desenvolvimento do trabalho, a formulação do problema e as principais referências bibliográficas utilizadas.

O Capítulo 2 busca dar uma visão geral da modelagem de um Sistema Elétrico de Potência (SEP), visando focar os componentes dos elementos presentes na Hidroelétrica de Curuá-Una.

O Capítulo 3 engloba a teoria e as técnicas de projeto de controladores digitais, focando em controladores digitais tipo RST.

O Capítulo 4 mostra a implementação e os parâmetros do simulador da SEP da Hidroelétrica de Curuá-Una.

O Capítulo 5 mostra a simulação de três controladores para o regulador de velocidade, sendo um deles contínuo tipo avanço-atraso de fase e os outros dois controladores discretos tipo RST.

O Capítulo 6 apresenta a conclusão do trabalho, fazendo as devidas considerações e apresentando sugestões para trabalhos futuros.



## CAPÍTULO 2 – MODELAGEM DA GERAÇÃO HIDROELÉTRICA

### 2.1 INTRODUÇÃO

Em qualquer problema de projeto de controle é necessário o estudo do funcionamento e comportamento da planta a ser controlada. Deste modo, a planta é representada em um modelo matemático o qual é usado como referência no projeto. Logo, é de grande importância o estudo e entendimento da planta e do modelo obtido para garantir o bom desempenho do sistema controlado e para propor melhorias com a aplicação de novas técnicas de controle e avanços tecnológicos.

Este capítulo tem como objetivo descrever a modelagem usada de um sistema elétrico de potência que represente uma usina hidroelétrica. A modelagem proposta consiste de vários modelos interligados, sendo que cada modelo representa o comportamento de uma máquina ou conjunto de equipamentos específicos.

No decorrer do capítulo foram utilizadas duas linguagens de modelagem:

- Linguagem matemática: expressando modelos através de conjuntos de equações matemáticas, sendo usadas as representações no espaço de estados e em funções de transferência.
- Diagrama de blocos: representação gráfica que permite representar as relações entre cada elemento de um sistema dinâmico (OGATA, 2003).

Uma vez que o modelo utilizado da usina hidroelétrica é representado por um mosaico de modelos, os modelos aqui apresentados tratam do gerador, dos seus controladores e atuadores, da carga e da linha de transmissão, separadamente.

Em sistemas elétricos de potência é comum a representação normalizada das variáveis trabalhadas usando a notação de “por unidade”. As razões são diversas, tais como: simplificação computacional dos cálculos, eliminação das unidades de medida, condicionamento de valores das variáveis, entre outras. A Equação 2.1 é utilizada para a normalização.

$$\text{Valor por unidade}(pu) = \frac{\text{Valor total}}{\text{Valor base}} \quad (2.1)$$

## 2.2 GERADOR – MÁQUINAS SÍNCRONAS

As máquinas de geração em uma hidroelétrica são classificadas como máquinas síncronas. De acordo com Fitzgerald, Kingsley e Stephen (2006), estes tipos de máquinas CA possuem uma relação proporcional da velocidade de giro do rotor com a frequência de corrente elétrica gerada, em regime permanente. Por esse motivo são normalmente utilizados como geradores. Uma vez controlada a velocidade de rotação do gerador é possível controlar a frequência da tensão elétrica gerada.

Existem várias formas e modelos para representar a máquina síncrona, entretanto, a mais adequada para o estudo de estabilidade dinâmica é através da forma em espaço de estados representado por um conjunto de equações não-lineares diferenciais e algébricas. Baseado em Arrillaga, Watson e Neville (2001), o modelo utilizado é dividido em duas partes, uma representa a dinâmica mecânica, e a outra, o comportamento eletromagnético da máquina.

As equações mecânicas do modelo, também chamadas de equação de balanço, são:

$$\begin{cases} \dot{\omega} = \frac{1}{2H} [T_m - T_e - D(\omega - \omega_0)] \\ \dot{\delta} = \omega - \omega_0 \end{cases} \quad (2.2)$$

Sendo:

- $\omega$  a velocidade angular do rotor da máquina;
- $\omega_0$  a velocidade angular síncrona ( $\omega_0 = 2\pi f_0$ );
- $f_0$  a frequência síncrona (no Brasil vale 60 Hz);
- $H$  a constante de inércia;
- $T_m$  o torque mecânico;
- $T_e$  o torque elétrico (em PU, equivalente a potência elétrica);
- $D$  o coeficiente de amortecimento;
- $\delta$  o ângulo do rotor.

Para o modelo elétrico foi escolhido o Modelo 4 definido por Arrillaga, Watson e Neville (2001), por considerar os efeitos transitórios e subtransitórios do sistema. Outra característica do Modelo 4 é que as saídas da máquina são representadas em dois eixos girantes, chamados de eixo  $d$  e  $q$ . As Equações 2.3 elétricas são apresentadas em

Arrillaga, Watson e Neville (2001). A Figura 2.1 mostra as grandezas da máquina nos eixos  $d$  e  $q$ .

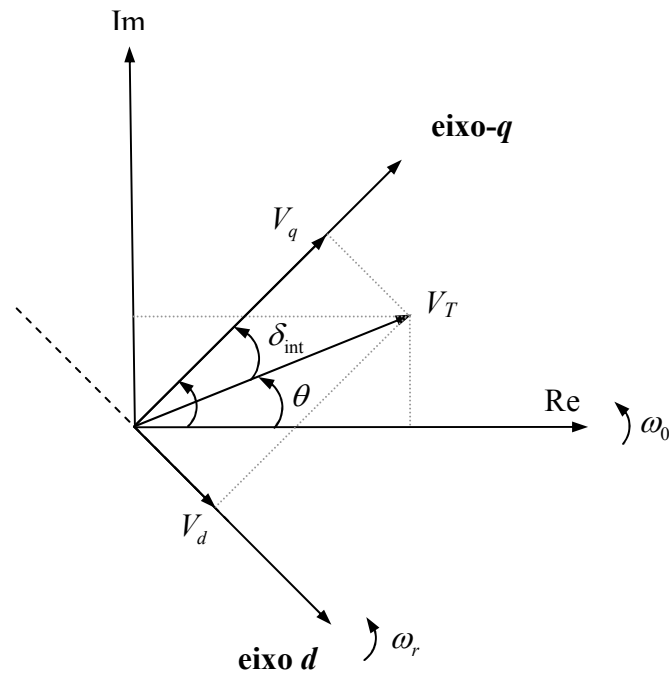


Figura 2.1- Eixos coordenados síncrono.

Onde

$E$  tensão no rotor;

$V_T$  tensão terminal;

$V_q$  a tensão de eixo q;

$V_d$  a tensão de eixo d;

$\theta$  ângulo de tensão terminal;

$\delta_{int}$  ângulo do rotor, ângulo formado pelo fasor da tensão interna do gerador e o fasor da tensão de referência no barramento infinito.

$$\left\{ \begin{array}{l} E_d'' - V_d = R_d I_d - X_q'' I_q \\ E_q'' - V_q = R_q I_q - X_d'' I_d \\ \frac{dE_q'}{dt} = \frac{1}{T_{d0}'} [E_{fd} + (X_d - X_d') I_d - E_q'] \\ \frac{dE_q''}{dt} = \frac{1}{T_{d0}''} [E_q' + (X_d' - X_d'') I_d - E_q''] \\ \frac{dE_d''}{dt} = \frac{1}{T_{q0}''} [E_d' - (X_q' - X_q'') I_q - E_d''] \end{array} \right. \quad (2.3)$$

Sendo

- $I_q$  a corrente de eixo q;
- $I_d$  a corrente de eixo d;
- $E_q'$  a tensão transitória de eixo q;
- $E_q''$  a tensão sub-transitória de eixo q;
- $E_d'$  a tensão transitória de eixo d;
- $E_d''$  a tensão sub-transitória de eixo d;
- $E_{fd}$  a tensão de campo;
- $X_d$  a reatância síncrona de eixo d.
- $T_{d0}'$  a constante de tempo transitória de eixo d, em circuito aberto;
- $T_{d0}''$  a constante de tempo sub-transitória de eixo d, em circuito aberto;
- $T_{q0}''$  a constante de tempo sub-transitória de eixo q, em circuito aberto;
- $X_d'$  a reatância transitória de eixo d;
- $X_d''$  a reatância sub-transitória de eixo d;
- $X_q$  a reatância síncrona de eixo q;
- $X_q'$  a reatância transitória de eixo q;
- $X_q''$  a reatância sub-transitória de eixo q.

### 2.3 TURBINA HIDRÁULICA KAPLAN

A turbina Kaplan tem a forma de hélice e possui aletas moveis o que proporciona um melhor ajuste da turbina de acordo com a vazão fornecida pela queda. Usinas que apresentam quedas pequenas (inferior a 50 metros) utilizam este tipo de turbina, pois a vazão apresenta uma larga banda de variação (SIMONE, 2000). A Figura 2.2 mostra o esquema de uma turbina Kaplan.

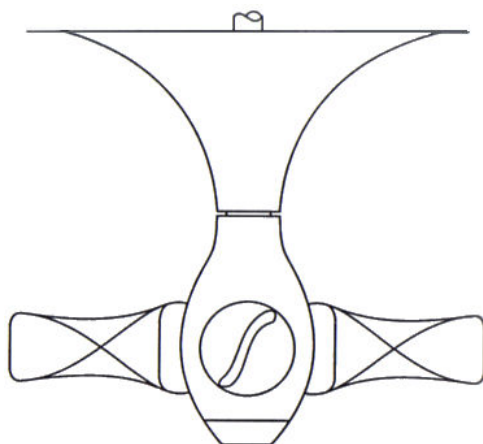


Figura 2.2- Esquema de uma turbina Kaplan

Fonte: Simone (2000)

A Figura 2.3 mostra um gráfico comparativo do rendimento de uma turbina do tipo Kaplan e uma de hélice fixa. Nota-se que, para vazões próximas de 70% do valor nominal é obtido o máximo desempenho de uma turbina Kaplan.

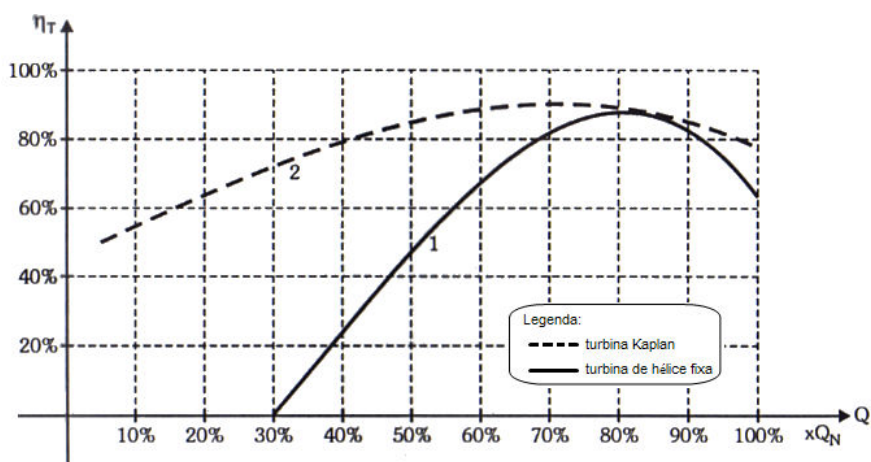


Figura 2.3- Gráfico comparativo do rendimento da turbina Kaplan com a turbina de hélices fixas

Fonte: Simone (2000)

Existem diversas formas de se modelar o comportamento da turbina Kaplan. Entretanto, muitas delas são específicas para determinada usina ou apresentam elementos de difícil identificação, impossibilitando uma generalização para aplicações de controle. Por este motivo foi escolhido o modelo sugerido por Brezovec, Kuzle e Tomisa (2006), visto que é possível aproximar o modelo real de uma planta por uma sequência de modelos linearizados para cada segmento. O modelo proposto utiliza uma sequência de modelos não-lineares para modelar o comportamento de uma turbina Kaplan. A modelagem é feita adicionando dois elementos no modelo não-linear mostrado na Figura 2.4 (KUNDUR, 1994). A Figura 2.5 mostra o diagrama do modelo proposto.

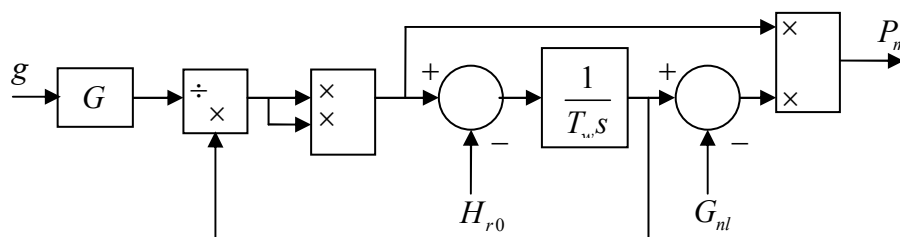


Figura 2.4- Diagrama de blocos de um modelo não linear para a turbina de uma hidroelétrica

Fonte: Adaptado de Kundur (1994)

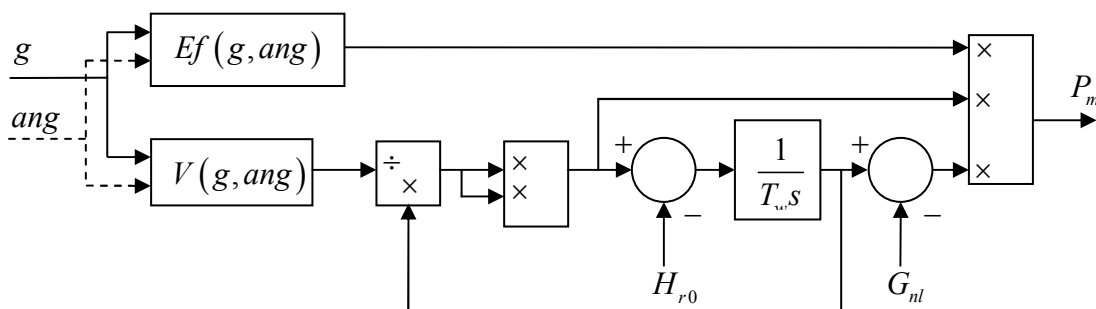


Figura 2.5- Diagrama de blocos de um modelo para a turbina Kaplan

Fonte: Adaptado de Dobrijevic e Jankovic (1999)

Sendo;

$g$  a posição do distribuidor;

$ang$  a angulação das aletas;

$Ef(g, ang)$  a eficiência da turbina;

$V(g, ang)$  a vazão na turbina;

$T_w$	a constante de tempo da aceleração da água no conduto;
$H_{r,0}$	o nível inicial do reservatório;
$G_{nl}$	a abertura do distribuidor com a unidade a vazio;
$P_m$	a potência mecânica.

Os blocos  $V(g, ang)$  e  $Ef(g, ang)$  são curvas que representam a vazão e a eficiência da turbina, respectivamente. Tanto a vazão quanto a eficiência numa turbina Kaplan são relacionadas com a abertura e a angulação das pás. Entretanto, ambas as funções em  $V(g, ang)$  e  $Ef(g, ang)$  são obtidas através da interpolação de valores obtidos experimentalmente. As Equações 2.4 e 2.5 são utilizadas com valores experimentais.

Sabe-se que a vazão em uma turbina Kaplan está relacionada com a abertura do distribuidor. Entretanto, esta relação não é linear e também depende da angulação das pás. A Equação 2.4 (BREZOVEC; KUZLE; TOMISA, 2006) mostra a relação da abertura do distribuidor com a vazão na turbina, quando as pás estão fixas em determinado ângulo.

$$V(g) = a_v \cdot g^{b_v} \quad (2.4)$$

Sendo,  $a_v$  e  $b_v$  constantes obtidas experimentalmente, para determinada angulação das pás.

Uma vez obtida uma curva para  $V(g)$  é possível calcular a eficiência da turbina para determinados pontos. A Equação 2.5 pode ser utilizada para obter a eficiência da turbina.

$$E(g) = \frac{P_m}{H_r [V(g)H_r - G_{nl}]} \quad (2.5)$$

, onde  $H_r$  é o nível do reservatório.

Através de interpolação das curvas  $V(g)$  e  $E(g)$  em diferentes angulações das pás é possível obter as funções aproximadas  $V(g, ang)$  e  $Ef(g, ang)$ .

## 2.4 FLUXO DE POTÊNCIA

O estudo do fluxo de potência foge do escopo deste trabalho. Entretanto, é necessário para a obtenção dos pontos de operação e das condições iniciais de uma usina hidroelétrica.

Para a resolução do problema pode-se utilizar várias técnicas, tais como: Gauss, Newton e Newton-Raphson (ARRILLAGA; WATSON; NEVILLE, 2001). Porém, não importando a técnica utilizada, pode-se classificar as barras de acordo com as grandezas: potência ativa, potência reativa, tensão elétrica e ângulo do fasor da tensão em (KUNDUR, 1994):

- Barras de geração: Barras onde estão conectadas os geradores. Nelas são especificadas a potência ativa e magnitude da tensão elétrica. O fluxo de carga nessas barras converge para encontrar os valores da potência reativa e ângulo do fasor da tensão.
- Barras de carga; barras onde são ligadas a carga do sistema e onde são especificados os valores de potência ativa e reativa consumida. Nela o fluxo converge para encontrar o valor da magnitude e ângulo do fasor da tensão elétrica.
- Barra de referência: é a barra onde é especificada a magnitude e ângulo do fasor da tensão. O fluxo converge para encontrar os valores de potência ativa e reativa. Normalmente, esta barra representa um barramento infinito, que consome qualquer excedente de potência gerada pela usina.

## 2.5 TRANSMISSÃO – BARRA INFINITA

Nesta seção verifica-se o desempenho de pequenos sinais, de uma máquina ligada a um sistema de grande porte através de linhas de transmissão. O diagrama unifilar do sistema é mostrado na Figura 2.6.



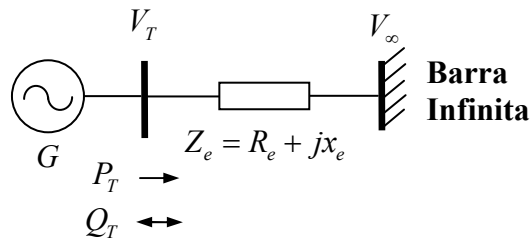


Figura 2.6- Máquina ligada a um SEP através de uma linha de transmissão

Onde:

- $X_e$  reatância equivalente da linha de transmissão em pu;
- $R_e$  resistência equivalente da linha de transmissão em pu;
- $V_\infty$  magnitude da tensão no barramento infinito em pu;
- $P_T$  potência ativa;
- $Q_T$  potência reativa.

Embora um SEP seja um sistema dinâmico altamente não-linear, várias condições para a estabilidade do sistema podem ser avaliadas, linearizando as equações não lineares do sistema em torno de um ponto de equilíbrio.

As linhas de transmissão e os transformadores têm representações unifilares. Nesse contexto, as linhas de transmissão são modeladas da mesma forma, com o chamado modelo  $\pi$  ou  $\pi$ -equivalente (ARRILLAGA; WATSON; NEVILLE, 2001), como mostra a Figura 2.7.

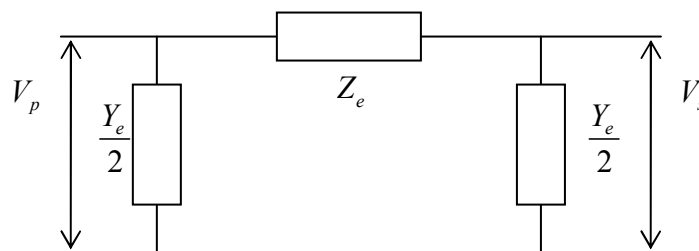


Figura 2.7- Modelo  $\pi$  para a linha de transmissão e transformadores

Fonte: Adaptado de Kundur (1994)

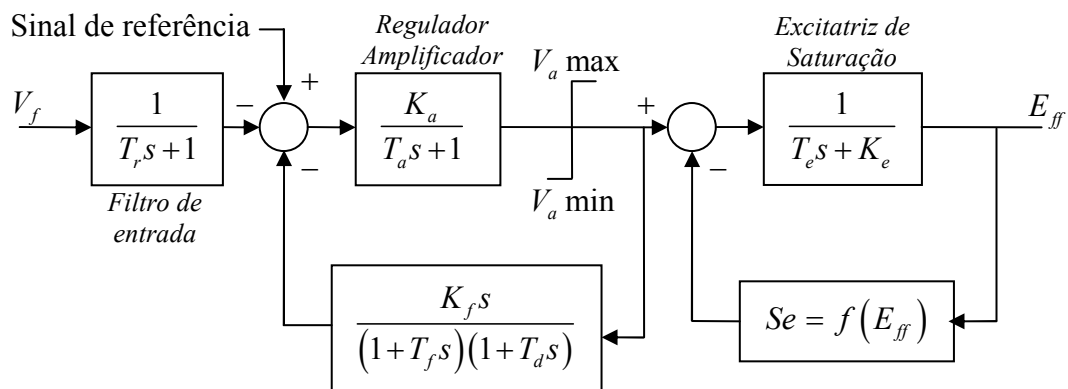
Onde,

- $Z_e$  é a impedância de curto circuito;
- $Y_e$  é a admitância de circuito aberto;

$V_p$  e  $V_s$  são os terminais da linha.

## 2.6 REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO (RAT)

O RAT é um controlador responsável pela regulação da tensão terminal ( $V_t$ ) fornecida pelo gerador. Ele atua no enrolamento de campo  $E_f$ , mantendo  $V_t$  regulado em um certo nível de referência. Existem vários modelos de RAT, entretanto, aqui será usado o modelo sugerido por Arrillaga, Watson e Neville (2001), mostrado na Figura 2.8.



**Figura 2.8- Diagrama do regulador automático de tensão (RAT)**

Fonte: Adaptado de Arrillaga, Watson e Neville ( 2001)

Como é mostrado na Figura 2.8, o RAT é constituído de: um filtro passa-alta, da dinâmica do controlador, e de um bloco atuador para a tensão do campo  $E_{ff}$ . Os valores  $K_a$ ,  $K_f$ ,  $T_a$ ,  $T_f$  e  $T_d$  são parâmetros da dinâmica do controlador, o valor de  $T_r$  proporcional a frequência de corte do filtro e,  $T_e$ ,  $K_e$  e  $f(E_{ff})$  constituem a dinâmica da excitatriz de saturação.

## 2.7 RV COM QUEDA DE VELOCIDADE COM QUEDA NO TRANSITÓRIO

Em geradores hídricos a utilização de reguladores simples não é suficiente para garantir a estabilidade do sistema. Isto é causado por uma característica peculiar da inércia da água, que cria uma força inicial contrária na turbina de geração quando há uma mudança na posição do distribuidor. Este fenômeno caracteriza o sistema como de fase não mínima. Logo, para garantir a estabilidade é necessária uma característica de queda de frequência adicional no transitório. Isto retarda a ação de regulação até um momento que a inércia da água tenha sido vencida. O resultado é um regulador que exhibe uma alta queda (baixo ganho) nas altas frequências e uma baixa queda (alto ganho) em regime. O diagrama na Figura 2.9 mostra um regulador com queda no transitório.

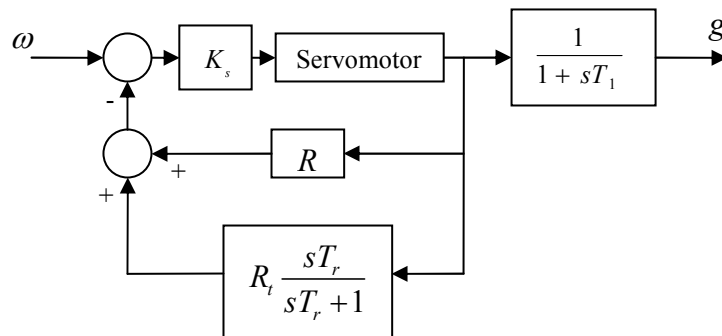


Figura 2.9- Diagrama do comportamento de um regulador com queda de velocidade

Fonte: Adaptado de Kundur (1994)

Considerando um  $K_s$  grande, o diagrama de blocos da Figura 2.9, pode ser escrito na função de transferência:

$$\frac{g}{\omega} = \frac{1}{R} \left( \frac{1 + T_r s}{1 + (R_t/R) T_r s} \right) \left( \frac{1}{1 + s T_1} \right). \quad (2.6)$$

Onde

$R_t$  é característica de queda transitória;

$T_r$  é o tempo de reset;

$T_1$  é a constante do servomotor do distribuidor.

Em turbinas do tipo Kaplan, os controladores de velocidade necessitam coordenar a angulação das pás para que o sistema tenha uma boa eficiência para as variações do nível do reservatório. Estes elementos são chamados de combinadores sendo, normalmente, um ganho variável entre a posição do distribuidor com o ângulo das pás. A Figura 2.10 mostra o diagrama de um RV com queda no transitório para uma turbina Kaplan.

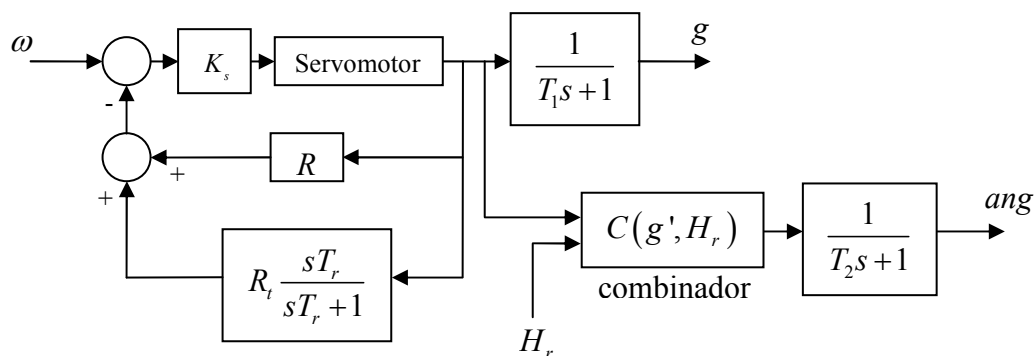


Figura 2.10- Diagrama de blocos de um RV para a turbina Kaplan

Fonte: Adaptado de Dobrijevic e Jankovic (1999)

Onde

$g'$  é o valor da abertura do distribuidor em regime.

$C(g', H_r)$  é a função que representa o comportamento do combinador.

$T_2$  é a constante do servomotor fixada as pás da turbina.

O combinador de uma turbina Kaplan normalmente é calibrado pela fabricante da turbina. Isto porque são necessários testes em escala reduzida para se obter uma dinâmica  $C(g', H_r)$  que tenha boa eficiência, para vários níveis do reservatório.

### 2.7.1 Ajuste do Regulador com Queda no Transitório

Quando se projeta um regulador com queda no transitório, há duas considerações a serem analisadas (KUNDUR, 1994):

- A estabilidade durante operação isolada ou condições de operação ilhada.
- Velocidade de resposta satisfatória para absorção ou rejeição de carga em operação síncrona normal (geração interligada).

Para operação do sistema sobre condições de sistema isolado, a escolha ótima para os parâmetros  $R_t$  e  $T_r$ , da Equação 2.7, está relacionados com o tempo de partida mecânico ( $T_M = 2H$ ) e, da água ( $T_w$ ), pelas Equações 2.7 e 2.8 mostradas em Kundur (1994):

$$R_t = [2,3 - (T_w - 1)0,15] \frac{T_w}{T_M} \quad (2.7)$$

$$T_r = [5 - (T_w - 1)0,5] T_w \quad (2.8)$$

Em adição, o ganho do servo ( $K_s$ ) tem de ser o maior possível.

Estes parâmetros asseguram um bom desempenho estável para carga cheia em um sistema isolado. Entretanto para se obter uma boa velocidade para absorção e rejeição de carga em um sistema interligado, é necessário que o tempo de reset ( $T_r$ ) seja menor que 1 s de preferência perto de 0,5 s (KUNDUR, 1994).

Os requerimentos conflitantes entre adequar o regulador para operar em geração isolada e geração interligada é problema complexo na engenharia elétrica. O mais comum é configurar o regulador para uma geração interligada e para uma faixa de carga para geração isolada.

### 2.7.2 Projeto do combinador

O ajuste do combinador normalmente é feita pela fabricante da turbina, uma vez que são necessários testes em escala reduzida, para a obtenção das curvas de rendimento da turbina. Entretanto caso o modelo da turbina esteja disponível é possível levantar um combinador através de vários testes de simulação.

O primeiro passo é estipular o objetivo do combinador. Neste caso é desejado que o combinador:

- obtenha o melhor rendimento de energia mecânica por fluxo de água e;
- compense as mudanças de ganho em regime permanente sofrido com a alteração do nível do reservatório.

Deste modo o modelo do combinador proposto é mostrado na Figura 2.11.

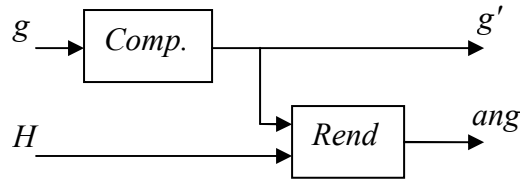


Figura 2.11- Diagrama de blocos do combinador proposto

O bloco *Rend.* da Figura 2.11 é responsável em obter o melhor rendimento da turbina e o *Comp.* em amenizar a não-linearidade em regime permanente da turbina.

Para obter a dinâmica do bloco *Rend.* é necessário fazer inúmeras simulações no modelo da turbina, alterando os pontos de operação: altura do reservatório ( $H$ ), abertura do distribuidor ( $g'$ ) e angulação das pás ( $ang$ ). Deste modo obtendo uma família de curvas onde são verificados o pontos de operação desejados. No caso, tem que o rendimento desejado é dado por:

$$rend. = \text{Max} \left( \frac{Pm}{V} \right) \rightarrow \begin{matrix} H_{\max} \\ g'_{\max} \\ ang_{\max} \end{matrix} \quad (2.9)$$

Onde,  $H_{\max}$ ,  $g'_{\max}$  e  $ang_{\max}$  são os pontos de operação desejados para a obtenção do máximo rendimento.

Com os pontos de operação obtidos é feita uma interpolação linear e a dinâmica do bloco pode ser representada em um gráfico de três dimensões, um exemplo é mostrado na Figura 2.12.

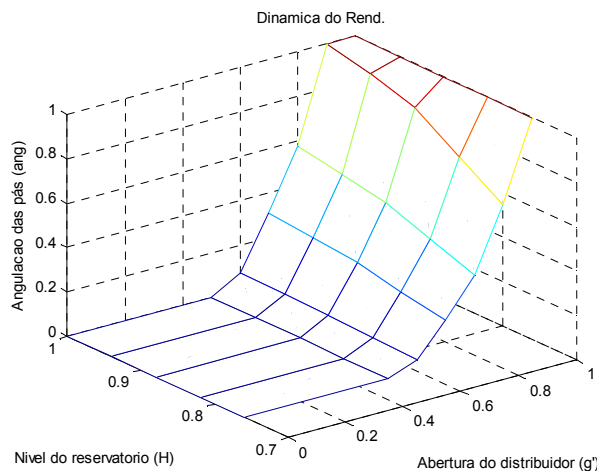
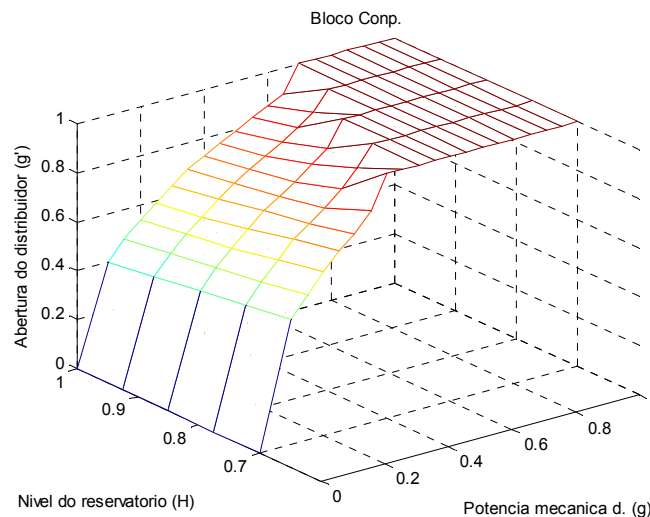


Figura 2.12- Dinâmica do bloco *Rend.*

De posse do bloco *Rend.* são feitas novas simulações com o modelo da turbina acoplado ao bloco *Rend.*, alterando a altura do reservatório ( $H$ ) e a potência mecânica desejada ( $g$ ). E é feita uma compensação para que:

$$g(s = 0) = Pm(s = 0) \quad (2.10)$$

A dinâmica obtida pode ser representada em um gráfico em 3 dimensões, um exemplo é mostra na Figura 2.13 e tem o objetivo de amenizar as não linearidades de regime permanente.



**Figura 2.13- Dinâmica do bloco *Comp.***

## 2.8 CONDIÇÕES INICIAS

É importante ressaltar que, utilizando o modelo proposto, simulações e aplicações são feitas com condições iniciais não nulas. Entretanto, é desejado que o modelo esteja representado em uma usina em funcionamento, suprindo uma determinada carga e/ou com um regime permanente diferente de zero. Deste modo, faz-se necessário o cálculo das condições iniciais para o modelo.

Para o cálculo das condições iniciais da máquina síncrona são utilizadas as variáveis potência ativa ( $P$ ), potência reativa ( $Q$ ) e ângulo de carga ( $\theta$ ) na barra de geração, calculadas pelo fluxo de carga. Deste modo, as condições iniciais são definidas conforme (ARRILLAGA; WATSON; NEVILLE, 2001) o conjunto de Equações 2.11.

$$\left\{ \begin{array}{l}
 S = P + jQ, V_t = V \angle \theta, I = \text{conj} \left( \frac{S}{V_t} \right), \varphi = \arg(S), \\
 I_r = |I| \cos(\varphi), I_x = |I| \sin(\varphi), \delta_{\text{int}} = a \tan \left( \frac{X_d I_r + R_a I_x}{V + R_a I_r - X_q I_x} \right), \\
 V_d = -V \sin(\delta_{\text{int}}), V_q = V \cos(\delta_{\text{int}}), \delta = \delta_{\text{int}} + \theta, \\
 I_d = -|I| \sin(\delta_{\text{int}} + \varphi), I_q = -|I| \cos(\delta_{\text{int}} + \varphi), \\
 E_d'' = V_d + X_q'' I_q + R_a I_d, E_q'' = V_q + X_d'' I_d + R_a I_q, \\
 E_q' = E_q'' - (X_d' - X_d'') I_d, E_{fp} = E_q' - (X_d - X_d') I_d, \\
 \omega = 1, P_e = P + R_a |I|^2, P_m = P_e, \\
 P_t = V_d I_d + V_q I_q, Q_t = -V_d I_d + V_q I_d, \\
 V_q = E_q'' - R_a I_q + X_d'' I_d, V_d = E_d'' - R_a I_d + X_q'' I_q, \\
 V_t = \sqrt{V_d^2 + V_q^2}, P_t = V_d I_d + V_q I_q, Q_t = -V_q I_d + V_d I_d, \\
 I_{fd} = \frac{E_q' - (X_d - X_d') I_d}{X_d - X_q}
 \end{array} \right. \quad (2.11)$$

Encontrar a condição inicial do modelo proposto para a turbina Kaplan é um processo difícil. A dificuldade de se encontrar as condições iniciais da posição das comportas ( $g$ ) e o ângulo das pás ( $ang$ ) que acarreta um problema de múltiplas soluções para um mesmo valor de potência mecânica gerada ( $P_m$ ). No caso da representação utilizada na seção 2.3, o problema é agravado pela necessidade de se inverter as funções  $E_f(g, ang)$  e  $V(g, ang)$  que são funções interpoladas. A Equação 2.12 mostra a relação da potência mecânica com a posição do distribuidor e do ângulo das pás representado no diagrama da Figura 2.5.

$$E_f(g, ang) V(g, ang) \sqrt{H_r} - E_f(g, ang) G_{nl} = \frac{P_m}{H_r} \quad (2.12)$$

Uma solução para o problema de múltiplas soluções é estipular um ângulo das pás ( $ang$ ) qualquer para encontrar uma relação entre a posição das comportas ( $g$ ) com a potência mecânica ( $P_m$ ). Para fazer uma inversão aproximada das funções interpoladas, considera-se  $E_f(g, ang)$  e  $V(g, ang)$  como funções contínuas



linearmente interpoladas. Deste modo, tanto  $Ef(g, ang)$  e  $V(g, ang)$  ficam no formato mostrado no conjunto de Equações 2.13.

$$\left\{ \begin{array}{l} Ef(g) = \begin{cases} b_{Ef1}g + c_{Ef1} & \rightarrow x_0 \leq g \leq x_1 \\ b_{Ef2}g + c_{Ef2} & \rightarrow x_1 \leq g \leq x_2 \\ \vdots & \\ b_{Efn}g + c_{Efn} & \rightarrow x_{n-1} \leq g \leq x_n \end{cases} \\ \\ V(g) = \begin{cases} b_{V1}g + c_{V1} & \rightarrow y_0 \leq g \leq y_1 \\ b_{V2}g + c_{V2} & \rightarrow y_1 < g \leq y_2 \\ \vdots & \\ b_{Vn}g + c_{Vn} & \rightarrow y_{n-1} < g \leq y_n \end{cases} \end{array} \right. \quad (2.13)$$

Sendo,

$b_{Efi}$  e  $c_{Efi}$  os coeficientes da reta interpolada da função  $Ef(g, ang)$  com o  $ang$  fixo;

$b_{Vi}$  e  $c_{Vi}$  os coeficientes da reta interpolada da função  $V(g, ang)$  com o  $ang$  fixo;

$x_i$  e  $y_i$  os limites inferiores e superiores para os intervalo interpolados de  $g$ .

Com as funções  $Ef(g, ang)$  e  $V(g, ang)$  no formato das Equações 2.11, torna-se possível realizar uma busca para encontrar o conjunto de coeficientes apropriados para calcular a posição do distribuidor ( $g$ ). Um modo de se fazer essa busca é utilizando a condição mostrada na Equação (2.14).

$$\left\{ \begin{array}{l} Ef(x_e)V(y_e)\sqrt{H_r} - Ef(x_e)G_{nl} \leq \frac{Pm}{H_r} \\ Ef(x_{e+1})V(y_{e+1})\sqrt{H_r} - Ef(x_{e+1})G_{nl} \geq \frac{Pm}{H_r} \end{array} \right. \rightarrow \begin{cases} x_e < g \leq x_{e+1} \\ y_e < g \leq y_{e+1} \end{cases} \quad (2.14)$$

Sendo,  $x_e$ ,  $x_{e+1}$ ,  $y_e$  e  $y_{e+1}$  os intervalos encontrados de  $g$  que satisfazem a condição.

Com os valores dos coeficientes apropriados é possível calcular o valor de  $g$ . A fórmula para calcular a posição do distribuidor pode ser obtida substituindo a Equação 2.12 em 2.13, e sabendo qual intervalo utilizar, a Equação fica:

$$g^2 + \frac{C_2}{C_1}g + \frac{C_3}{C_1} = 0 \quad (2.15)$$

Onde:

$$\begin{cases} C_1 = b_V b_{Ef} \sqrt{H_r} \\ C_2 = b_V c_{Ef} \sqrt{H_r} + b_{Ef} c_V \sqrt{H_r} - G_{nl} b_{Ef} \\ C_3 = c_V c_{Ef} \sqrt{H_r} - G_{nl} c_{Ef} - \frac{Pm}{H_r} \end{cases} \quad (2.16)$$

Com a Equação 2.15 é possível calcular um  $g$  para um determinado  $ang$ . Entretanto, os controladores de velocidade, acoplados em turbinas Kaplan, possuem um elemento usualmente chamado de combinador. Este elemento traça uma relação entre a abertura do distribuidor com a angulação das pás de acordo com a altura do reservatório. Deste modo, há a necessidade de se implementar uma rotina utilizando as Equações de 2.13 a 2.15 para convergir os valores de  $g$  e  $ang$  para a relação traçada pelo combinador.

## 2.9 CONCLUSÃO

O conteúdo apresentado neste capítulo tem como objetivo sintetizar o conhecimento necessário para a modelagem de um SEP, mais especificamente a Usina Hidroelétrica de Curuá-Una.

O próximo capítulo aborda a teoria utilizada para a confecção de controladores discretos.

## CAPÍTULO 3 – CONTROLADORES DIGITAIS

### 3.1 INTRODUÇÃO

A adaptação de computadores digitais ou microprocessadores no controle de processos físicos está sendo cada vez mais usada. Exemplo disso são os mecanismos servo eletromecânicos presentes em aviões, automóveis e refinarias de petróleo. O motivo são as inúmeras vantagens de se usar um controlador digital, tais como:

- a alta flexibilidade de um controlador digital. O algoritmo de controle de um controlador digital pode ser alterado via programação, logo não é preciso trocar o equipamento para pequenas ou grandes modificações na ação de controle.
- a adição de um processador digital na malha do sistema possibilita a implementação de técnicas avançadas de controle, tais como: controle robusto, lógica neural e controle *fuzzy*.
- a sua alta capacidade de emular sistemas contínuos permite a substituição de controladores contínuos (analógicos) não mais fabricados, por controladores equivalentes digitais.
- a redução do tempo de implementação do *hardware*. Uma vez que o hardware de um controlador digital serve para inúmeras tarefas, se economiza o tempo de projeto do *hardware*.

A estrutura típica de um sistema com controlador digital é mostrada no diagrama de blocos na Figura 3.1. Ela proporciona uma ideia geral dos elementos num controlador digital.

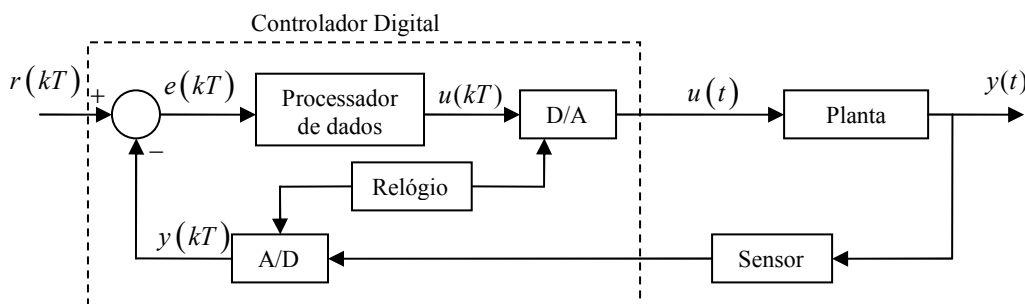


Figura 3.1- Diagrama de controlador digital

Fonte: Adaptado de Franklin, Powell e Emami-Naeini (1995)

Os elementos da Figura 3.1 são :

- A/D e D/A são conversores analógico-digital (A/D) e digital-analógico (D/A), respectivamente. Estes componentes, geralmente, são transdutores de tensão elétrica para palavra binária e vice versa.
- Relógio para controlar o tempo de amostragem com que os D/A e os D/A trabalham. Normalmente as lógicas programadas nos controladores digitais usam modelos discretos que dependem da frequência de amostragem, logo se trata de um elemento importante no bom funcionamento do controle digital.
- Sensores são transdutores que transformam uma grandeza física qualquer em tensão elétrica. Essencial para acoplar plantas reais que não possuem saída elétrica.
- Processador de dados é normalmente um microprocessador com alguma lógica de controle incorporada.

Neste capítulo serão apresentadas algumas considerações importantes para o bom funcionamento de um controlador digital, e uma técnica para se projetar um controlador digital na forma canônica RST.

## 3.2 MODELAGEM DE SISTEMAS NO DOMÍNIO DISCRETO

Os fenômenos e os sinais na natureza geralmente são analógicos. Entretanto, quando um sinal é tratado no meio digital é necessário que o mesmo esteja numa forma adequada para processamento pelo computador digital. Portanto, é necessário que a informação seja convertida para forma digital. Esta transformação é chamada de digitalização e consiste na discretização e na quantização da informação.

### 3.2.1 Discretização

Os computadores trabalham com amostras de informação. Logo para um computador ler uma curva contínua é necessário segmentá-la em vários pontos inter-

passados por um período constante. Deste modo, caso o período seja pequeno o suficiente é possível representá-la discretamente.

De acordo com o Teorema de Nyquist na Equação 3.1, para se reconstruir um sinal contínuo a partir de sua sequência amostrada, é necessária uma frequência de amostragem maior que duas vezes a máxima frequência do sinal amostrado.

$$f_s = 2f_{\max} \quad (3.1)$$

Onde:

$f_s$  é a frequência com que o sinal é amostrado (frequência de amostragem).

$f_{\max}$  é a máxima frequência do sinal.

Para a escolha da frequência de amostragem o Teorema de Nyquist (Equação 3.1) pode ser utilizada. Entretanto de acordo com Landau e Zito (2006), a Equação 3.2 deve ser obedecida para a escolha da frequência de amostragem de um sistema para fins de controle. Isto para garantir o bom funcionamento e desempenho do controlador quando o sistema estiver em malha fechada.

$$6f_B^{MF} \leq f_s \leq 25f_B^{MF} \quad (3.2)$$

Onde,  $f_B^{MF}$  é a frequência de banda da malha fechada do sistema.

Aplicando a Equação num sistema de primeira ordem, Equação 3.3, e um de segunda, Equação 3.4,

$$H(s) = \frac{G}{1+sT} \quad (3.3)$$

$$H(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega + \omega_n^2} \quad (3.4)$$

A Equação 3.5 é obtida para os sistemas de primeira e a Equação 3.6 para os de segunda ordem para a escolha do tempo de amostragem que são valores válidos para a maioria dos processos industriais.

$$\frac{T}{4} \leq T_s \leq T \quad (3.5)$$

$$0,25 \leq \omega_n T_s \leq 1,5 \quad ; \quad 0,7 \leq \zeta \leq 1 \quad (3.6)$$

Onde:

$\omega_n$  é a frequência natural;

$T_s$  é o tempo de amostragem ou intervalo de amostragem.

### 3.2.2 Modelo Discreto

Uma função de transferência continua nada mais é que uma relação do sinal de saída pelo sinal de entrada de um sistema. Então também é possível representar uma função de transferência por uma sequência de amostradas de saída e de entrada de uma planta.

De acordo com Landau e Zito (2006) uma forma geral de representar um modelo no tempo discreto é mostrada na Equação 3.7.

$$y(kT) = -\sum_{i=1}^{nA} a_i y(kt-1) + \sum_{i=1}^{nB} b_i u(kT-d-i) \quad (3.7)$$

Onde:

$d$  é o número de períodos de atraso puro do sistema;

$T$  é o período de amostragem;

$a_i$  é o coeficiente dos sinais amostrados de saída;

$b_i$  é o coeficiente dos sinais amostrado de entrada ;

O somatório pode ser reescrito para a Equação 3.8.

$$H(q^{-1}) = \frac{q^{-d} B(q^{-1})}{A(q^{-1})} \quad (3.8)$$

Onde:

$$\begin{cases} A(q^{-1}) = 1 + q^{-1}A^*(q^{-1}) \\ A^*(q^{-1}) = a_1 + a_2q^{-1} + \dots + a_nq^{-nA+1} \\ B(q^{-1}) = q^{-1}B^*(q^{-1}) \\ B^*(q^{-1}) = b_1 + b_2q^{-1} + \dots + b_nq^{-nB+1} \end{cases} \quad (3.9)$$

### 3.2.3 Transformada Z

Tanto a obtenção de um modelo discreto de um sistema contínuo, quanto a manipulação de equações discretas são complexas. Por isso uma das principais ferramentas para a manipulação de sistemas discretos é a função de transferência no plano Z. Do mesmo modo que o domínio da frequência (plano S) facilita trabalhar com plantas contínuas, o plano Z é o equivalente para sistemas discretos.

A transformada Z consiste em transformar uma equação no domínio da frequência (ou tempo) para o plano Z. Para isso, utiliza-se a Equação 3.10 em uma função de transferência no plano S, e obter-se uma função de transferência no plano Z. Na prática esse processo não é muito usado, sendo normalmente utilizadas tabelas presentes na literatura (NORMAN, 2009; OGATA, 2003; LANDAU; ZITO, 2006; FRANKLIN; POWELL; EMAMI-NAEINI, 1995), com as transformadas mais comuns.

$$z = e^{sT_s} \quad (3.10)$$

A Equação 3.11 facilita a conversão de uma planta contínua para um modelo discreto mostrado na Equação 3.3.

$$z^{-1} = q^{-1} \quad (3.11)$$

De acordo com a literatura (NORMAN, 2005; OGATA, 2003; LANDAU, 2006; FRANKLIN; POWELL; EMAMI-NAEINI, 1995) é possível mapear uma equivalência do plano S com o plano Z usando a Equação 3.10. A Figura 3.2 mostra os dois planos com as regiões equivalentes propriamente marcados.

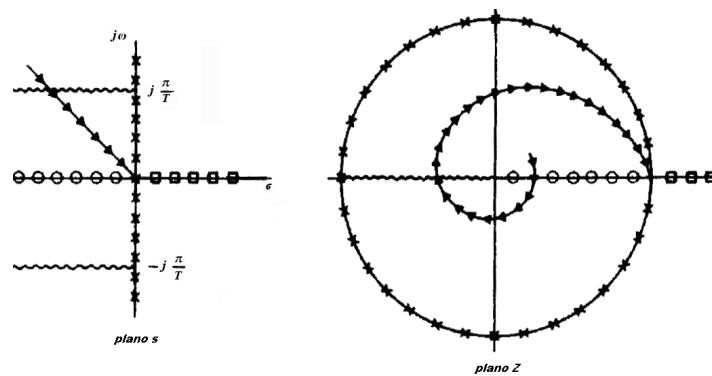


Figura 3.2- Plano S e plano Z

Fonte: Adaptado de Franklin, Powell e Emami-Naeini (1995)

### 3.2.4 Fração de atraso

Reações químicas, processos de transporte de fluido, ação de controle ou sensores podem provocar atrasos num sistema, o que pode provocar problemas no modelo discreto. De acordo com Landau e Zito (2006), quando o atraso não é múltiplo inteiro com o tempo de amostragem, a fração restante provoca o surgimento de zeros adicionais no modelo. Logo, sincronizar o atraso é importante, pois isso posiciona os zeros adicionais dentro do círculo unitário do plano Z, perto da origem.

Caso a Equação 3.12 (LANDAU; ZITO, 2006) seja obedecida, a posição dos zeros estarão dentro do círculo unitário.

$$0,75T_s \leq \Delta d \leq T_s \tag{3.12}$$

Onde,  $\Delta d$  é a fração de atraso.

### 3.2.5 Quantização

Os processadores manipulam as informações em palavras binárias. Logo o tamanho de cada informação é limitado ao tamanho da palavra. Comumente os conversores A/D e D/A trabalham com palavras de 12 a 16 bits. Portanto é possível no caso de uma palavra com 10 bits ( $2^{10}$ ) distribuir a grandeza em 1024 níveis, provocando um erro máximo aproximado de 0,01%. Normalmente o erro é desprezado e



tratado em conjunto com os ruídos do sistema. Contudo sempre haverá um pequeno erro, que é chamado de erro de quantização.

Por ser um fenômeno não linear, ele pode provocar comportamentos indesejados em plantas muito sensíveis a variações, um exemplo seriam os sistemas caóticos em geral.

### 3.3 CONTROLADOR PID DISCRETIZADO

Um modo simples de se projetar um controlador digital pode ser feito através da discretização de um controlador proporcional integral derivativo (PID) contínuo. A função de transferência, na Equação 3.13, mostra o modelo de um controlador com PID contínuo.

$$C(s) = \frac{u(s)}{e(s)} = K \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (3.13)$$

Onde:

- $K$  é o ganho proporcional;
- $T_i$  é o ganho integral;
- $T_d$  é o ganho derivativo.

Como é mostrado em (FRAKLING, 1997) a Equação 3.13 pode ser digitalizada, através do método de Euler, para se obter a Equação 3.14 de controlador PID discreto.

$$u(kT_s) = u(kT_s - 1) + K \left[ \left( 1 + \frac{T_s}{T_i} + \frac{T_d}{T_s} \right) e(kT_s) - \left( 1 + 2 \frac{T_d}{T_s} \right) e(kT_s - 1) + \frac{T_d}{T_s} e(kT_s - 2) \right] \quad (3.14)$$

Os controladores projetados através dessa técnica apresentam bons resultados desde que (FRAKLING, 1997):

- se tenha feito um bom projeto do controlador contínuo;
- seja utilizada uma frequência de amostragem de pelo menos 30 vezes maior que a frequência de banda do sistema.

### 3.4 ESTRUTURA CANÔNICA RST

A Figura 3.3 mostra o esquemático de um controlador RST. Este controlador possui a característica de ter dois graus de liberdade em sua construção. O que permite especificar o problema de rastreamento e de regulação separadamente.

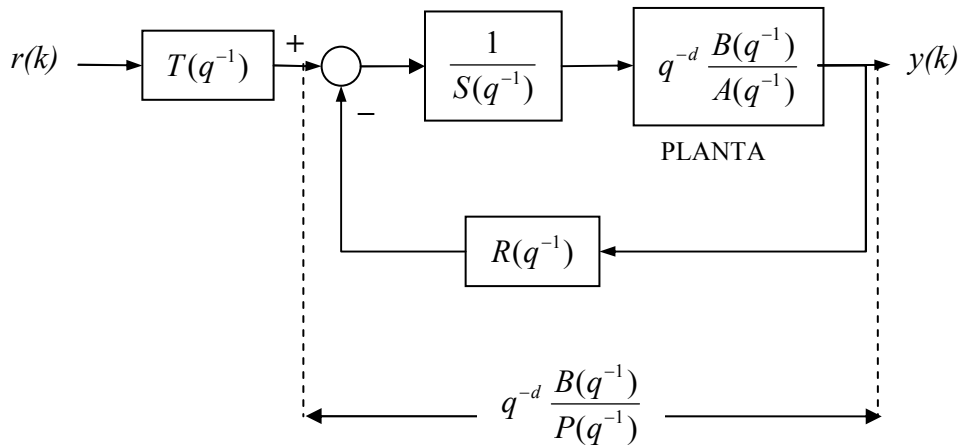


Figura 3.3- Esquemático de uma planta com controlador RST

Fonte: Adaptado de Landau e Zito (2006)

Onde:

$d$  é o atraso discreto da planta em múltiplos inteiro de intervalos de amostragem.

$q^{-d}$  é o operador de atraso;

$B, A$  são os polinômios discreto dos zeros e dos pólos da planta, respectivamente;

$R, S$  e  $T$  são os polinômios discretos do controlador.

De acordo com (LANDAU; ZITO, 2006), supondo um modelo de uma planta discretizada na Equação 3.15:

$$H(q^{-1}) = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} \quad (3.15)$$

pode-se obter uma função de transferência, na Equação 3.16, de um sistema em malha fechada controlado por um controlador RST.

$$H_{MF}(q^{-1}) = \frac{B(q^{-1})T(q^{-1})}{A(q^{-1})S(q^{-1}) + B(q^{-1})R(q^{-1})} = \frac{B(q^{-1})T(q^{-1})}{P(q^{-1})} \quad (3.16)$$

Onde:

$$P(q^{-1}) = A(q^{-1})S(q^{-1}) + B(q^{-1})R(q^{-1}) \quad (3.17)$$

A Equação 3.17 define a função característica do sistema em malha fechada. Note que a função  $T(q^{-1})$  introduz um grau de liberdade a mais no controlador.

O principal objetivo da construção de controlador RST é encontrar os polinômios  $R(q^{-1})$ ,  $S(q^{-1})$  e  $T(q^{-1})$  que obtenham o comportamento do sistema desejado em malha fechada. A seguir será mostrada uma das técnicas para se projetar um controlador RST.

### 3.4.1 Controlador RST por estratégia indireta

O controlador digital por estratégia indireta é um controlador digital que tem a sua dinâmica em malha fechada baseada em técnicas de discretização em um controlador contínuo, previamente projetado. Entretanto, sua confecção é feita com técnicas de controle discreto.

O objetivo é projetar um controlador digital versátil, que possa ser integrado em técnicas não-lineares de controle. Para este fim, foi utilizado um controlador digital RST, por ter dois graus de liberdade, possibilitando o controle da regulação e do rastreamento na planta, separadamente. A Figura 3.2 mostra a forma canônica de um controlador RST.

Este controlador oferece duas grandes vantagens, primeiro: a estratégia facilita a construção de controladores com comportamentos diferentes do já acoplado ao sistema. Segundo, adiciona um processador de dados na malha de controle, o que possibilita o aprimoramento do controlador com o uso de técnicas de controle avançadas, tais como: controle robusto, lógica neural e controle *fuzzy*.

Uma vez que o controlador digital proposto tem estratégia indireta, ele terá o mesmo comportamento do contínuo em que foi baseado. A estrutura do controlador proposto pode ser visto na Figura 3.4.

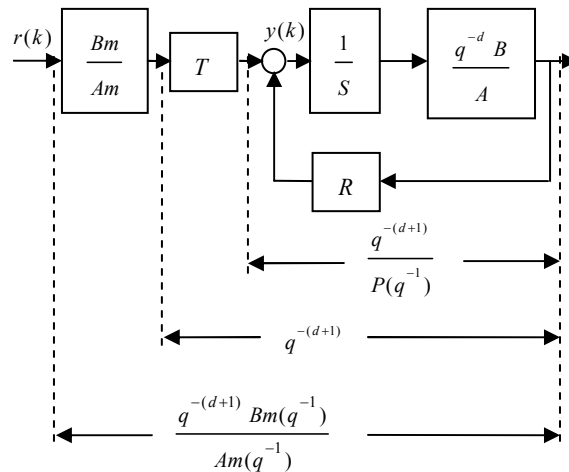


Figura 3.4- Diagrama de blocos do controlador digital proposto RST

Fonte: Adaptado de Landau e Zito (2006)

Onde,

$Bm$  é o polinômio discreto desejado para os zeros do sistema.

$Am$  é o polinômio desejado para os polos do sistema.

Na Figura 3.4 o comportamento observado pela entrada/saída do sistema é o controlador  $C_{rvd} = Bm/Am$ . Logo, encontrando os valores de  $d$ ,  $B$ ,  $A$ ,  $S$ ,  $R$  e  $T$  é possível especificar qualquer trajetória através de  $Bm$  e  $Am$ . Para o cálculo de  $S$  e  $R$  do controlador é necessário supor a Equação 3.18:

$$A(q^{-1})S'(q^{-1}) + q^{-(d+1)}R(q^{-1}) = P(q^{-1}) \quad (3.18)$$

Onde  $P(q^{-1})$  é um polinômio que especifica a dinâmica da regulação e  $S'(q^{-1})$  é definida por:

$$S(q^{-1}) = B^*(q^{-1})S'(q^{-1}). \quad (3.19)$$

Para resolver a Equação 3.18 é necessário resolver a seguinte operação matricial 3.20:

$$x = p M^{-1} \quad (3.20)$$

Onde:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ a_1 & 1 & & \\ a_2 & a_1 & \ddots & 0 \\ \vdots & & & 1 & 0 \\ a_d & \vdots & a_1 & 1 & 0 & \vdots \\ a_{d+1} & a_d & \ddots & a_1 & 1 & \ddots \\ a_{d+2} & a_{d+1} & & a_2 & 0 \\ \vdots & & & \vdots & & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & a_{nA} & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$\begin{cases} x^T = [1, s'_1, \dots, s'_d, r_0, r_1, \dots, r_{n-1}] \\ p^T = [1, p_1, p_2, \dots, p_{nA+1}, \dots, p_{nA+d}] \end{cases} \quad (3.22)$$

Logo, para utilizar a Equação matricial 3.21 é necessário estipular um polinômio  $P(q^{-1})$ . Para isso, foi escolhido um polinômio contínuo,  $P_c(s)$ , com as características desejadas, tais como: tempo de subida e sobre-sinal, sendo depois discretizado para encontrar  $P(q^{-1})$ . Entretanto, é necessário que  $P_c(s)$  cumpra algumas condições. No caso, foi escolhido um polinômio de segunda ordem no formato:

$$P_c(s) = s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2. \quad (3.23)$$

De acordo com Landau e Zito (2006) é necessário que o polinômio da Equação 3.23, cumpra as condições 3.24 e 3.25:

$$0,25 \leq \omega_n T_s \leq 1,5 \quad (3.24)$$

$$0.7 \leq \zeta \leq 1 \quad (3.25)$$

Com a posse de  $P(q^{-1})$ , o mesmo é substituído na Equação 3.18, e depois de aplicado na Equação 3.20 obtendo os valores de  $S$  e  $R$ , como é mostrado em Landau (2006) e na Figura 3.3 tem-se que:

$$T(q^{-1}) = P(q^{-1}) \quad (3.26)$$

Os polinômios  $Bm$  e  $Am$  representam o comportamento desejado do controlador. Logo, o modo mais simples de obtê-lo é discretizando o controlador contínuo previamente estipulado como mostrado na Equação 3.27.

$$\frac{Bm(z)}{Am(z)} = Z \left[ \frac{B_c(s)}{A_c(s)} \right] \xrightarrow{z^{-1}=q^{-1}} \frac{Bm(q^{-1})}{Am(q^{-1})} \quad (3.27)$$

Onde:

$B_c, A_c$  são os polinômios contínuos dos zeros e polos do controlador.

$Z[ ]$  é a transformada para o plano  $Z$ .

Note que não há uma relação entre os parâmetros  $Bm$  e  $Am$  da trajetória desejada com os parâmetros  $S, R$  e  $T$  do controlador. Isto acontece porque os parâmetros do controlador RST fazem um cancelamento de polos e zeros com a planta, deixando apenas a dinâmica da trajetória desejada. Entretanto, em testes o controlador tem bom desempenho quando o polinômio  $P(q^{-1})$  é mais rápido que a trajetória desejada.

### 3.4.2 Controlador RST por estratégia direta

Diferente de um controlador indireto, o projeto de um RV digital direto tem seu projeto é totalmente baseado em técnicas de controle discreto. A principal vantagem de um controlador direto sobre um indireto é o menor custo computacional, o que facilita a adição de técnicas avançadas de controle e de funcionalidades adicionais no processador da malha de controle.

O objetivo é criar um controlador digital, utilizando técnicas de controle discreto, que tenha um desempenho equivalente ou superior que o controlador contínuo equivalente. Com esse objetivo é utilizado um controlador RST por mapeamento de polos e zeros. A Figura 3.5 mostra o diagrama de blocos do controlador proposto.

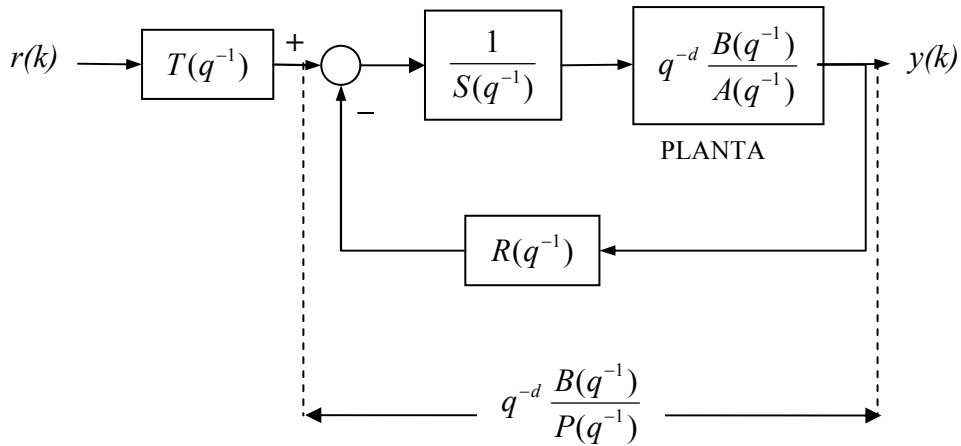


Figura 3.5- Diagrama do controlador

Fonte: Adaptado de Landau e Zito (2006)

Note que na Figura 3.5 o comportamento observado pela entrada/saída do sistema é a função de transferência na Equação 3.28. Logo, encontrando os valores de  $d$ ,  $B$ ,  $A$ ,  $S$ ,  $R$  e  $T$ , é possível especificar a posição dos polos do sistema em malha fechada.

$$G_{mf}(q^{-1}) = \frac{q^{-d} B(q^{-1}) T(q^{-1})}{P(q^{-1})} \quad (3.28)$$

Para o cálculo de  $S$  e  $R$  do controlador é necessário supor a Equação 3.29:

$$A'(q^{-1}) \bar{S}(q^{-1}) + q^{-(d+1)} R(q^{-1}) = P(q^{-1}) \quad (3.29)$$

Onde  $P(q^{-1})$  é um polinômio que especifica a dinâmica desejada,  $A'$  e  $\bar{S}$  são (3.30) e (3.31), respectivamente.

$$A'(q^{-1}) = A(q^{-1}) * Sc(q^{-1}) \quad (3.30)$$

$$S(q^{-1}) = Sc(q^{-1}) * \bar{S}(q^{-1}) \quad (3.31)$$

Onde,  $Sc$  é um polinômio conhecido do controlador.

Para resolver a Equação 3.29 é necessário resolver a seguinte operação matricial (Equação 3.32):

$$x = p M^{-1} \quad (3.32)$$

Onde:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ a'_1 & 1 & & \vdots & b_1 & 0 & & \vdots \\ a'_2 & a'_1 & \ddots & 0 & b_2 & b_1 & \ddots & \\ \vdots & a'_2 & & 1 & \vdots & b_2 & & 0 \\ a'_{nA} & \vdots & & a'_1 & b_{nB} & \vdots & & b_1 \\ 0 & a'_{nA} & \ddots & a'_2 & 0 & b_{nB} & \ddots & b_2 \\ \vdots & \ddots & & \vdots & \vdots & \ddots & & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & a'_{nA} & 0 & \dots & 0 & b_{nB} \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

$$\begin{cases} x^T = [1, \bar{s}_1, \dots, \bar{s}_d, r_0, r_1, \dots, r_{n-1}] \\ p^T = [1, p_1, p_2, \dots, p_{nA+1}, \dots, p_{nA+d}] \end{cases} \quad (3.34)$$

Logo para utilizar a Equação 3.33 é necessário estipular um polinômio  $P$ . Para isso, foi escolhido um polinômio contínuo,  $P_c$ , com as características desejadas, tais como: tempo de subida e sobre-sinal, sendo depois discretizado para encontrar  $P$ . No caso, foi escolhido um polinômio de segunda ordem no formato da Equação 3.23.

Com a posse dos valores de  $A$ ,  $B$ ,  $P$ , e de  $Sc$ , são substituídos nas Equações 3.29 e 3.30, e depois de aplicado na Equação 3.33 obtendo os valores de  $S$  e  $R$ . E como é mostrado em Landau e Zito (2006):

$$T(q^{-1}) = \frac{P(1)}{B(1)} \quad (3.35)$$



### 3.4.3 Parâmetros conhecidos de S

Com o objetivo de melhorar o desempenho do controlador ou controlar a dinâmica do sistema para perturbações, estipula-se alguns elementos do controlador RST. Para o caso específico de projeto de controladores reguladores de velocidade, foi estipulado que é necessário multiplicar a Equação 3.36 no polinômio  $\bar{S}$  (Equação 3.31).

$$Sc(q^{-1}) = q^{-1} - s' \quad (3.36)$$

A adição de  $Sc$  tem como objetivo garantir um erro de regime permanente satisfatório para perturbações do tipo degrau. Entretanto a escolha do valor de  $s'$  em  $Sc$  é um processo difícil, pois está relacionada com os elementos da malha interna. Isto é, elementos conhecidos como  $A(q^{-1})$  e  $B(q^{-1})$  e de elementos não conhecidos tais como  $S(q^{-1})$  e  $R(q^{-1})$ . A Figura 3.6 mostra o sistema controlado com uma perturbação, é feita uma análise do sistema com controlador em regime permanente.

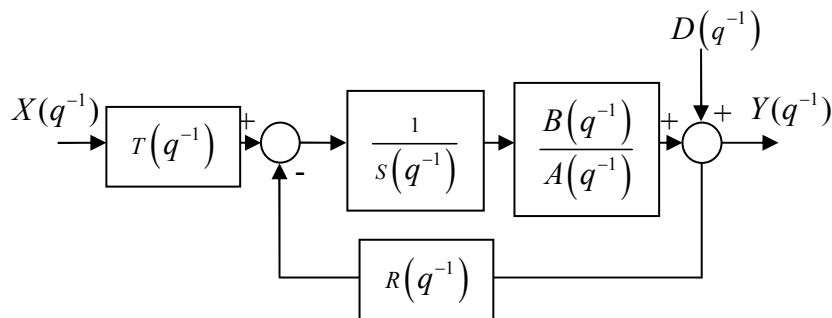


Figura 3.6- Sistema controlado com perturbação  $d$

Logo, aplicando o teorema do valor final no sistema da Figura 3.6, o ganho em regime para uma perturbação é (3.37):

$$\frac{Y(1)}{D(1)} = \text{ganho} = \frac{S(1)A(1)}{S(1)A(1) + R(1)B(1)} \quad (3.37)$$

Para o caso da planta normalizada ( $B(1)/A(1) = 1$ ) e  $est \ll 1$  a Equação (3.37) pode ser aproximada para:

$$\frac{1}{\text{ganho}} = \frac{R(1)}{S(1)} \quad (3.38)$$

A escolha ideal para  $s'$  seria a de um integrador, pois implica em uma posição fixa em  $S_c(q^{-1}) = q^{-1} - 1$  e apresenta erro nulo para perturbações tipo degrau. Entretanto, a adição de um integrador na malha de controle nem sempre pode ser utilizada. Em alguns casos como a regulação de velocidade em sistemas de geração, a adição de um integrador implica em problemas de estabilidade. Logo, uma boa escolha seria  $s' \approx 1$ , que acarreta em um erro pequeno e de ganho controlado, que possibilita aplicação em sistemas de geração.

Para definir um valor  $s' \approx 1$  e manter a equivalência da Equação 3.29, deste modo garantindo a característica de regulação desejada ( $P(q^{-1})$ ) para o sistema em malha fechada, é utilizar a Equação matricial (3.33) e calcular para um  $S_c(q^{-1})$  com  $s'$  variando de 0,8 até 1 e as Equações (3.37) e/ou (3.38) são utilizadas para encontrar um  $S_c(q^{-1})$  que tenha o ganho em regime permanente desejado para uma perturbação. Deste modo, o valor exato de  $s'$  pode ser obtido graficamente, ou por um método iterativo.

A Figura 3.7 mostra o gráfico que relaciona a posição de  $s'$  com o ganho em regime para a perturbação de um controlador de regulação de velocidade de uma turbina hídrica.

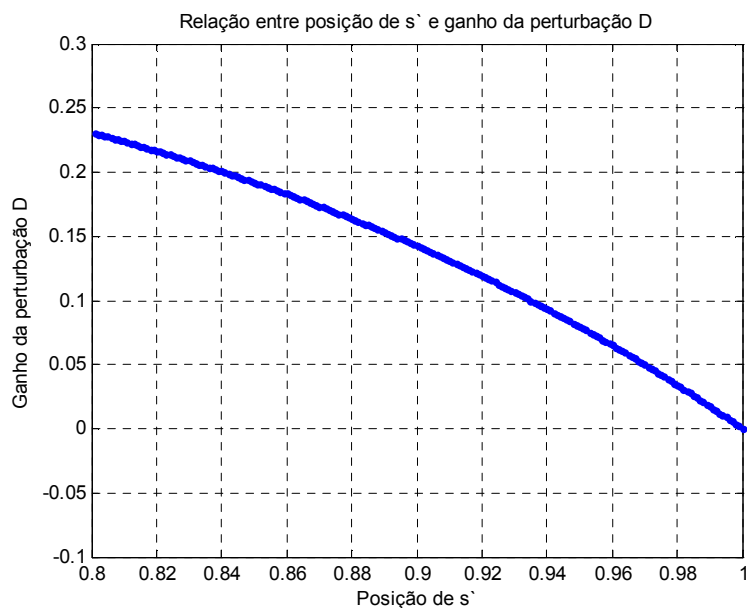


Figura 3.7- Gráfico relacionando posição de  $s'$  e ganho da perturbação

### 3.4.4 Polos auxiliares

O polinômio desejado (Equação 3.16) precisa satisfazer a Equação 3.17, isto é, o polinômio desejado precisa ter a mesma ordem de tem que  $A(q^{-1})S(q^{-1})$ . Caso não, são utilizados polos adicionais em  $P(q^{-1})$ , chamados de polos auxiliares, onde dependendo da posição dos polos auxiliares pode-se aumentar a robustez do sistema. De acordo com Landau e Zito (2006), uma boa escolha para a posição dos polos auxiliares é mostrada em 3.39 e 3.40.

$$p'(q^{-1}) = p(q^{-1})(q^{-1} - \alpha_1) \cdots (q^{-1} - \alpha_n) \quad (3.39)$$

$$-0,05 \leq \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n \leq -0.5 \quad (3.40)$$

Onde,  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$  são as posições dos polos auxiliares.

### 3.5 CONCLUSÃO

Este capítulo apresenta a teoria, técnicas e metodologias necessários para a confecção de um controlador discreto, especificamente, um controlador regulador de velocidade (RV) de uma UHE.

O capítulo seguinte mostra o simulador implementado e os dados e constantes utilizadas para modelar a UHE de Curuá-Una.

## **CAPITULO 4 – SIMULADOR DA USINA HIDROELÉTRICA DE CURUÁ-UNA**

### **4.1 INTRODUÇÃO**

Para a confecção de bons controladores, normalmente, são necessários vários testes. No caso da construção de controladores em uma usina hidroelétrica, a realização de testes pode comprometer o fornecimento de energia elétrica. Por este motivo foi implementado um programa para simular o comportamento da UHE de Curuá-Una, baseado em parâmetros reais, obtidos com análise de manuais dos equipamentos e de ensaios de campo. Com esse programa é possível simular o comportamento da usina em diversas situações, como por exemplo, adição de controladores modernos.

Neste capítulo será descrito o simulador implementado da Usina Hidroelétrica de Curuá-Una.

### **4.2 O SIMULADOR**

O programa para simulação da UHE de Curuá-Una foi implementado em ambiente Matlab através da ferramenta Simulink. O programa é constituído de várias modificações no simulador da UHE de Tucuruí<sup>1</sup>, este sendo documentado em Ferreira et al. (2003) e Gomes (2010). Tais modificações vão desde alterações nos parâmetros do sistema até reprogramação de modelos da turbina e do regulador de velocidade. A Figura 4.1 mostra a interface do programa usado para simular a UHE de Curuá-Una.

---

<sup>1</sup> O simulador foi desenvolvido pelo Prof. Dr. André Maurício Damasceno Ferreira, orientado pelo Prof. Dr. José Augusto Lima Barreiros (UFPA). O simulador foi desenvolvido em ambiente MATLAB/ Simulink, com suas funcionalidades. Posteriormente, o sistema foi adaptado pelo Msc. Fabrício Gonzalez Nogueira, orientado pelo Prof. Dr. Walter Barra Junior (UFPA), para representar a dinâmica da UHE de Tucuruí.

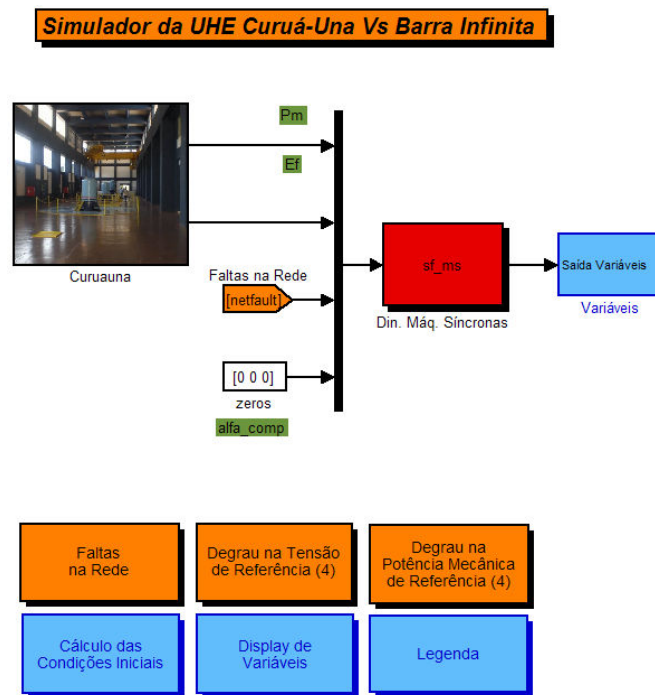


Figura 4.1- Interface do programa de simulação da UHE de Curuá-Una

O programa, ilustrado na Figura 4.1, é dividido em 2 partes, uma constitui a dinâmica da máquina síncrona e a outra o fluxo de carga. Nesta tela principal ainda é possível configurar contingências a serem testadas no sistema, tais como: curtos-circuitos e perda total ou parcial da linha de transmissão, diminuição ou aumento de carga, variações na referência de tensão do RAT e na referência de potência mecânica.

O programa simula a máquina 1 da UHE de Curuá-Una interconectada com uma malha de transmissão acoplada a duas cargas e a uma barra de geração infinita. Para melhor esclarecimento a Figura 4.2 mostra o esquemático do comportamento simulado.

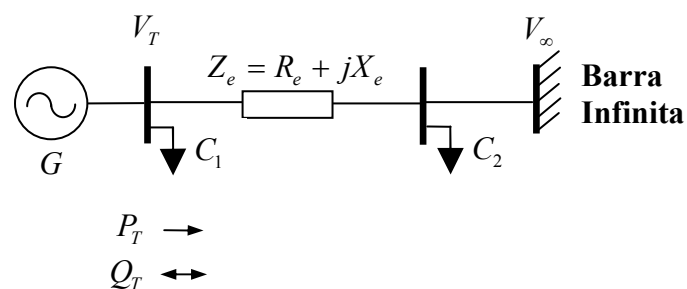


Figura 4.2- Diagrama de fluxo do simulador da UHE de Curuá-Una

Outra parte importante do programa é mostrada na Figura 4.3. Nela são mostrados elementos importantes, tais como a dinâmica da turbina, do regulador de

velocidade (RV), dos reguladores digitais projetados e do regulador automático de tensão (RAT).

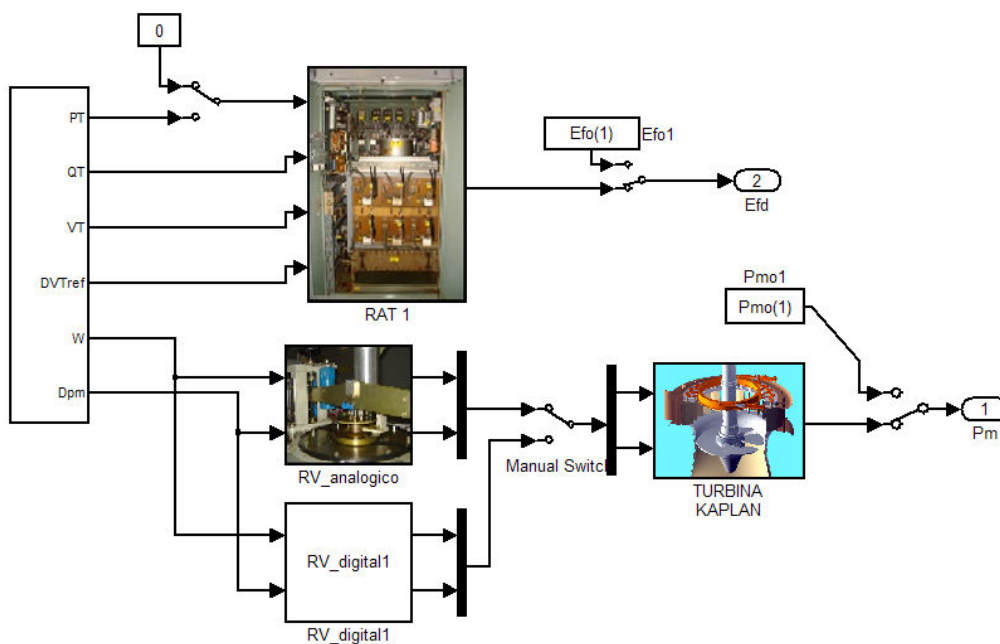


Figura 4.3- Programa de simulação da UHE de Curuá-Una

Note na Figura 4.3, que é possível realizar testes, mantendo-se potência mecânica e tensão de campo constantes para efeitos de estudos de sistemas sem controles.

#### 4.3 PARÂMETROS E MODELAGEM DO GERADOR SÍNCRONO

O modelo utilizado no programa é o Modelo 4 descrito por Arrillaga, Watson e Neville (2001), melhor explicado na Seção 2.2. Os parâmetros do motor foram levantados através de análises nos manuais do fabricante e relatórios de testes de campo (Ensaio no Sistema de regulação de Velocidade da UHE de Curuá-Una, 2009). A Tabela 4.1 mostra os parâmetros utilizados no programa.

Tabela 4.1- Gerador síncrono de Curuá-Una

Parâmetros (*normalizados com base de 10 MW)	Valores
Constante de inércia ( $H^*$ )	2,9 segundos
Resistência de armadura ( $R_a^*$ )	0,00661 pu

Reatância síncrona de eixo d ( $X_d^*$ )	1,1 pu
Reatância síncrona de eixo q ( $X_q^*$ )	0,71 pu
Constante de tempo transitória de eixo d, em circuito aberto ( $T'_{d0}$ )	3,5 segundos
Reatância transitória de eixo d ( $X'_d$ )	0,35 pu
Reatância transitória de eixo q ( $X'_q$ )	0,95 pu
Constante de auto-regulação ( $D$ )	0
Constante de tempo sub-transitória de eixo d, em circuito aberto ( $T''_{d0}$ )	0,02 segundos
Constante de tempo sub-transitória de eixo q, em circuito aberto ( $T''_{q0}$ )	0,02 segundos
Reatância sub-transitória de eixo d ( $X''_d$ )	0,29 pu
Reatância sub-transitória de eixo q ( $X''_q$ )	0,32 pu

#### 4.4 PARÂMETROS E MODELAGEM DA TURBINA

Para modelar a turbina do tipo Kaplan presente na UHE de Curuá-Una, foi utilizada uma variação da modelagem clássica (BREZOVEC; KUZLE; TOMISA, 2006), que é melhor explicada na seção 2.3. Parte dos parâmetros foram encontrados em manuais e testes de campo, entretanto, não foi possível obter a dinâmica da vazão e eficiência da turbina, em relação à abertura do distribuidor e ângulo das pás. Isso porque não foram encontrados tais dados nos manuais do fabricante, e a ausência de sensores de vazão não permite a modelagem experimental de tais dinâmicas. Outra forma de se obter os dados seria: calculando a dinâmica através de teoria dos fluidos, entretanto, tal tarefa é trabalhosa e difícil, o que foge do escopo deste trabalho (dependendo de dados físicos, tais como: formato da turbina e do duto forçado).

Logo, o simulador utiliza dados da dinâmica de vazão e eficiência de uma turbina similar, mostrado em Brezovec, Kuzle e Tomisa (2006). Deste modo, os parâmetros utilizados na turbina são mostrados na Tabela 4.2, e as Figuras 4.4 e 4.5 mostram os gráficos das dinâmicas da vazão e da eficiência, respectivamente.

Tabela 4.2- Turbina de Curuá-Una

Parâmetros	Valores
Constante de aceleração da água ( $T_w$ )	0,72 s
Abertura do distribuidor, a vazio ( $Gnl$ )	0,13 pu
Queda d'água ( $H_r$ )	28 m

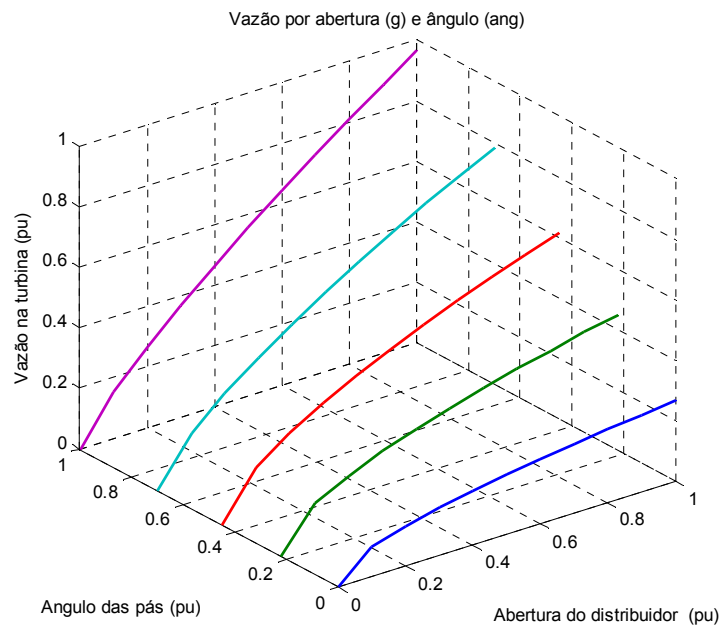
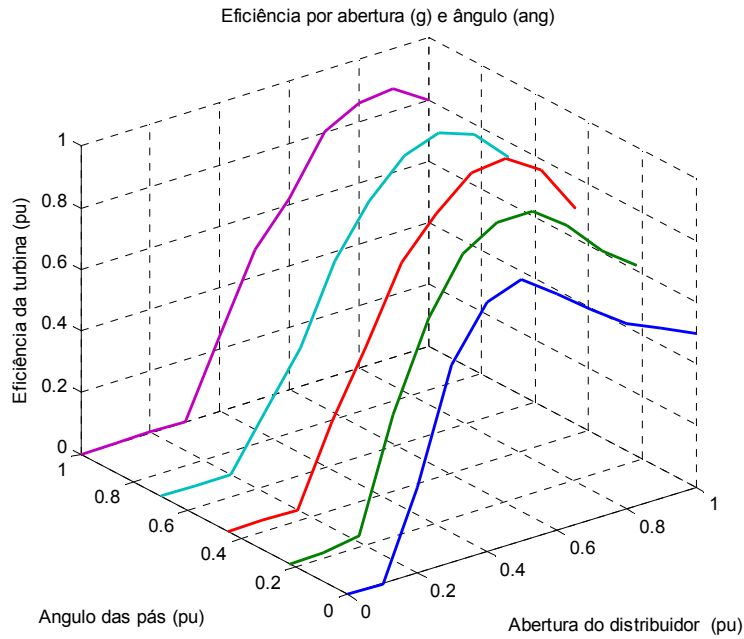


Figura 4.4- Relação entre abertura do distribuidor e angulação das pás com a vazão na turbina.

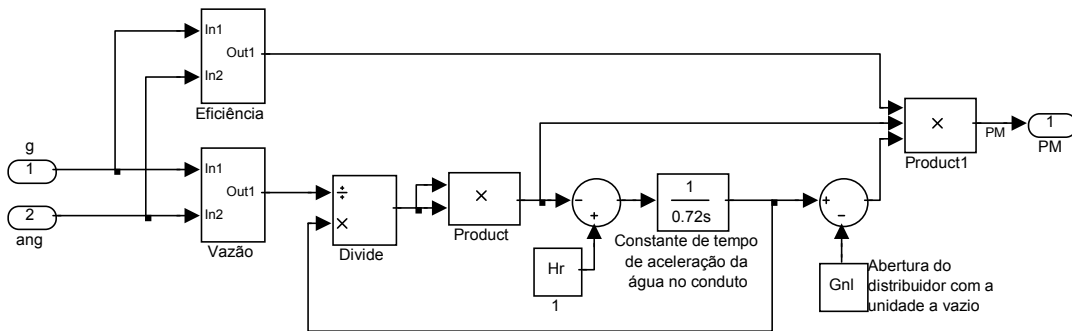
Fonte: Adaptado de Brezovec, Kuzle e Tomisa (2006)





**Figura 4.5-** Relação entre abertura do distribuidor e angulação das pás com a eficiência da turbina.  
**Fonte:** Adaptado de Brezovec, Kuzle e Tomisa (2006)

Na Figura 4.6 é mostrado o programa implementado, utilizando a teoria presente na seção 2.3 e os dados obtidos da turbina.



**Figura 4.6-** Relação entre abertura do distribuidor e angulação das pás com a eficiência da turbina

#### 4.6 REGULADOR DE VELOCIDADE (RV)

O modelo do regulador de velocidade da UHE de Curuá-Una foi implementado, como mostrado na Seção 2.7. Alguns dos parâmetros foram retirados de ensaios de campo. A Figura 4.7 mostra o controlador implementado.

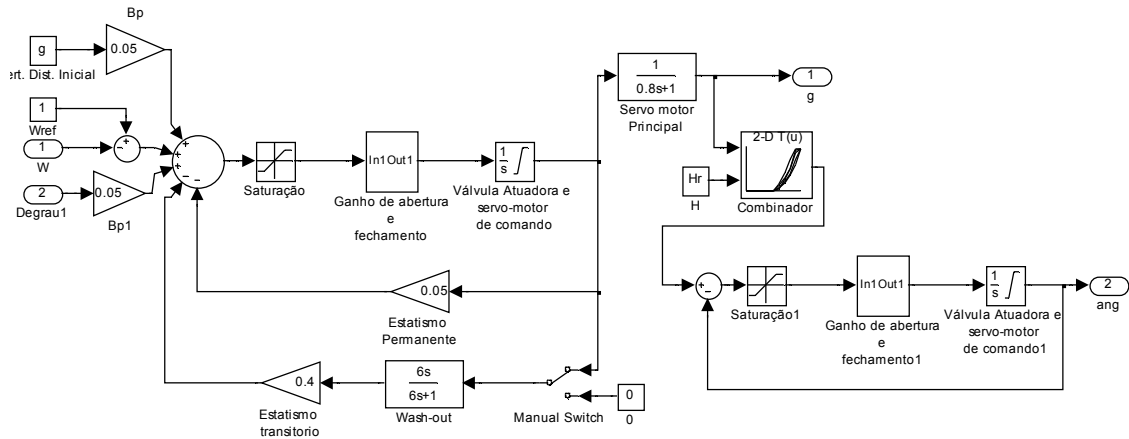
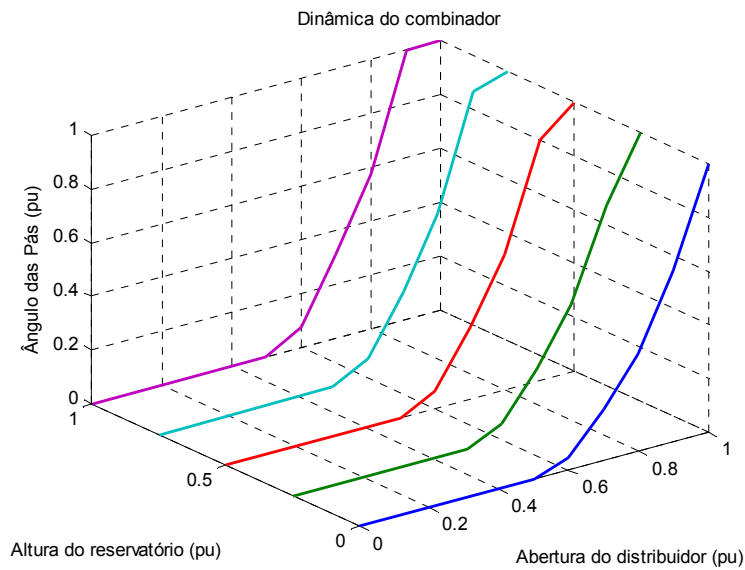


Figura 4.7- Diagrama de blocos para simulação do Regulator de velocidade da UHE Curuá-Una

Os parâmetros utilizados foram obtidos através de experimentos e testes de campo. Entretanto, não é possível utilizar todos os dados levantados. O comportamento do combinador do controlador foi levantado, porém, este elemento é calibrado, levando em conta as curvas de eficiência e vazão da turbina. Logo, não faz sentido utilizá-la para o modelo proposto na sessão anterior. Foi utilizado o combinador mostrado em (BREZOVEC; KUZLE; TOMISA , 2006), pois este foi instalado na turbina mostrada pelo mesmo. A Tabela 4.3 mostra os parâmetros do controlador, e a Figura 4.8 mostra o comportamento do combinador usado.

Tabela 4.3- RV de Curuá-Una

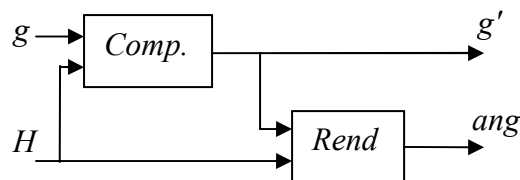
Parâmetros	Valores
$R_t$	4
$T_r$	6
$T_1$	0,8
$T_2$	-
Constante de tempo do servomotor 1	Abertura, 0,066 s Fechamento, 0,11 s
Constante de tempo do servomotor 2	Abertura, 0,35 s Fechamento, 0,12 s



**Figura 4.8- Dinâmica do *combinador* presente com regulador de velocidade**

**Fonte: Adaptado de Brezovec, Kuzle e Tomisa (2006)**

Entretanto, teste utilizando o combinador instalador da Figura 4.9 teve resultado insatisfatório, tanto de rendimento quanto de estabilidade. Por este motivo foi utilizado o método proposto na seção 2.7.2 para se projeta um combinador que possibilita testes dos RV digitais. A Figura 4.9 mostra o diagrama de bloco do modelo.



**Figura 4.9- Diagrama de blocos do combinador proposto**

As dinâmicas dos blocos *Rend.* e *Comp.* são mostrados nas Figuras 4.10 e 4.11, respectivamente.

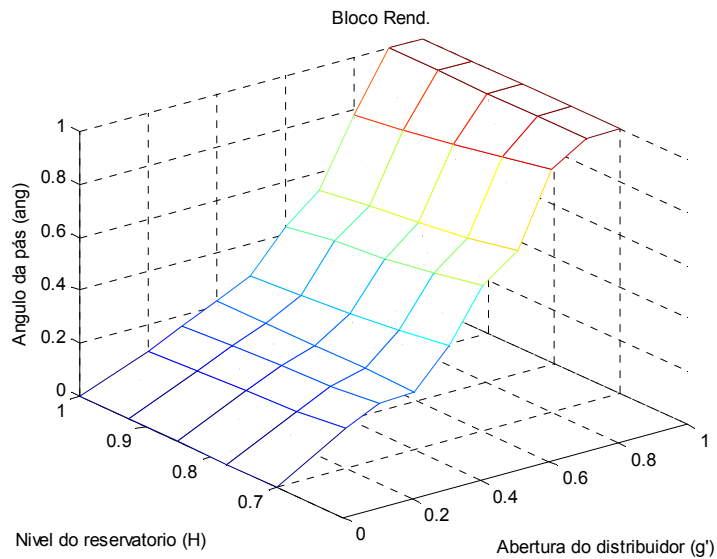


Figura 4.10- Dinâmica do bloco *Rend.* utilizado no simulador

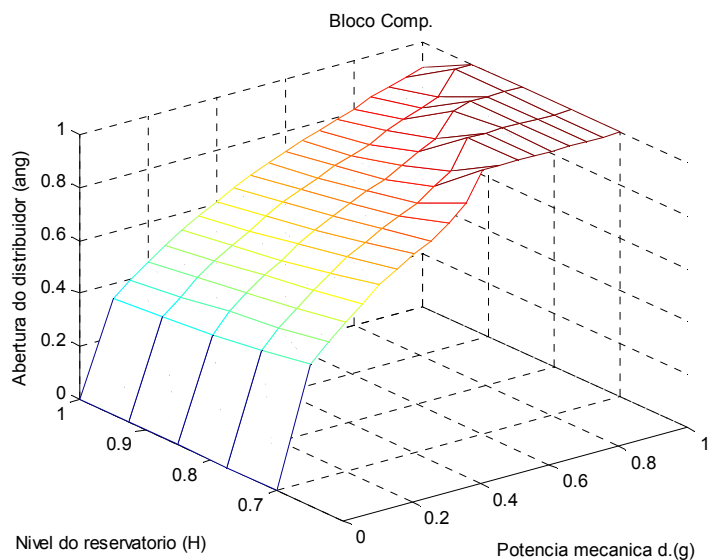


Figura 4.11- Dinâmica do bloco *Comp.* utilizado no simulador

Para a obtenção das dinâmicas mostradas nos gráficos das Figuras 2.10 e 2.11 são necessários vários ensaios na planta. Utilizando o método descrito na seção 2.72 nos gráficos presentes no Anexo I, foi obtida a dinâmica dos blocos *Rend.* e *Comp.*

#### 4.7 REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO

O modelo do regulador automático de tensão da UHE de Curuá-Una é mostrado na Figura 4.12. Percebem-se os valores ajustados segundo modelo disponibilizado pelo Operador Nacional de Sistemas (ONS). Os valores utilizado no RAT são fictícios e de pouca importância para a análise feita, pois nos experimentos de simulação realizados o mesmo permanece sempre desligado.

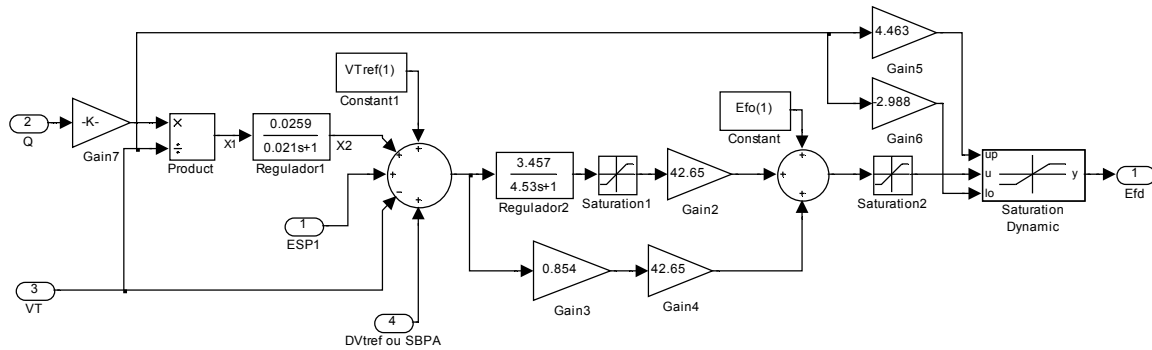


Figura 4.12- Diagrama de blocos para simulação do Regulador de tensão (RAT)

#### 4.8 CONCLUSÃO

O capítulo apresentou o simulador utilizado da UHE de Curuá-Una, mostrando a organização e o dados utilizados no programa.

No próximo capítulo é mostrado o projeto dos controladores e o resultado de simulação. Também é feita a análise dos dados obtidos.

## CAPITULO 5 – PROPOSTA E ANÁLISE

### 5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será apresentada a proposta e construção de três reguladores de velocidade (RV) para a UHE de Curuá-Una. Um dos controladores propostos é um RV tradicional, que tem a teoria de sua construção mostrada em Kundur, 1994. As outras duas propostas apresentam controladores digitais na forma RST, um com estratégia indireta de projeto e a outra com estratégia direta.

Os controladores são testados e comparados em modelos linearizados. Em um segundo momento os três controladores são testados no simulador da UHE de Curuá-Una e os resultados são comparados. O objetivo é verificar os pontos fortes e fracos de cada controlador.

### 5.2 REGULADOR DE VELOCIDADE ANALÓGICO

O regulador de velocidade (RV) é responsável pelo controle da velocidade de giro na turbinas hídricas. Conseqüentemente, o RV controla a frequência elétrica da energia gerada pelo gerador síncrono. Uma queda significativa da frequência de operação pode provocar a parada de toda uma usina elétrica, isto porque a baixa frequência provoca mal funcionamento nos atuadores elétricos (motores elétricos, relés, circuitos) e nas linhas de transmissão. Logo, trata-se de um elemento crítico na geração elétrica, uma vez que vários equipamentos dependem da frequência de alimentação.

O RV projetado nessa seção é o regulador de velocidade com queda no transitório, explicada na seção 2.7. A planta considerada para o projeto foi o modelo linearizado da turbinada em série com o modelo simplificado do gerador síncrono. A Figura 5.1, mostra o diagrama de blocos do projeto.

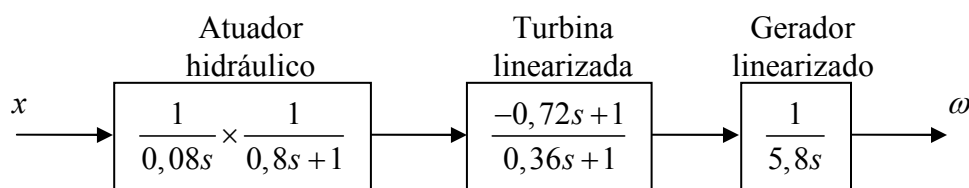


Figura 5.1- Diagrama de blocos do projeto contínuo

O diagrama de blocos do RV pode ser visto na Figura 5.2. Um modo simples de se calcular os parâmetros do controlador é utilizar a fórmula mostrada por Kundur (1994), explicada na seção 2.7.1. Trata-se, basicamente, de uma possível solução que obtém desempenho e estabilidade satisfatórios em duas condições diferentes, geração isolada e geração interligada (aqui, é considerado um desempenho satisfatório um controlador que obtenha uma margem de ganho maior que 6 dB).

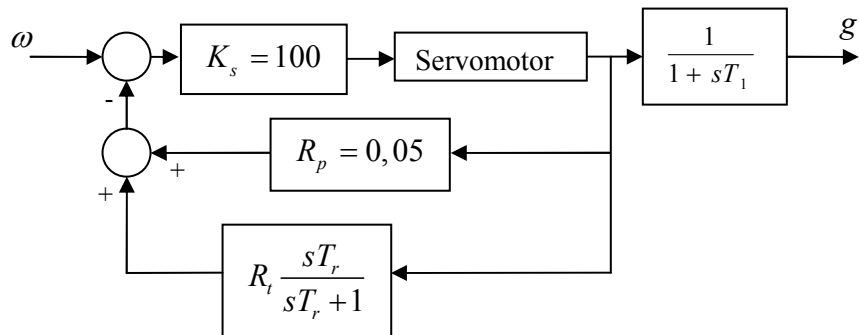


Figura 5.2- Diagrama de blocos do RV contínuo projetado

O cálculo dos parâmetros são mostrados em Kundur (1994).

$$\begin{cases} R_t = [2,3 - (T_w - 1)0,15] \frac{T_w}{T_M} \cong 2,9 \\ T_r = [5 - (T_w - 1)0,5] T_w \cong 3,7 \end{cases} \quad (5.1)$$

Considerando um  $K_s$  grande, a função de transferência do RV fica:

$$RVc(s) = \frac{g(s)}{\omega(s)} = \frac{1}{R} \left( \frac{1 + T_r s}{1 + (R_t/R) T_r s} \right) \left( \frac{1}{1 + s T_1} \right) = 20 \left( \frac{1 + 3,7s}{1 + 214,6s} \right) \left( \frac{1}{1 + 0,8s} \right) \quad (5.2)$$

Com um diagrama de Bode se verificou que o controlador  $RVc$  (Equação 5.2) apresenta um baixo desempenho, com margem de ganho e de fase de 1,9 dB e 7,84 graus, respectivamente. Logo, foi necessário aumentar em 50% os valores dos parâmetros  $R_t$  e  $T_r$  (Equação 5.1), para garantir uma margem de ganho de 6,53 dB e de fase de 25,6 graus. Os novos valores de  $R_t$ ,  $T_r$  e de  $RVc$  são mostrados na Equação

5.3, e o diagrama de bode do sistema com o RV convencional é ilustrado na Figura 5.3.

$$\left\{ \begin{aligned} RVc_m(s) &= \frac{g(s)}{\omega(s)} = \frac{1}{R} \left( \frac{1 + T_{rm}s}{1 + (R_m/R)T_r s} \right) \left( \frac{1}{1 + sT_1} \right) = 20 \left( \frac{1 + 5,55s}{1 + 482,85s} \right) \left( \frac{1}{1 + 0,8s} \right) \\ R_m &\cong 2,9 \times 1,5 = 4,35 \\ T_{rm} &\cong 3,7 \times 1,5 = 5,55 \end{aligned} \right. \quad (5.3)$$

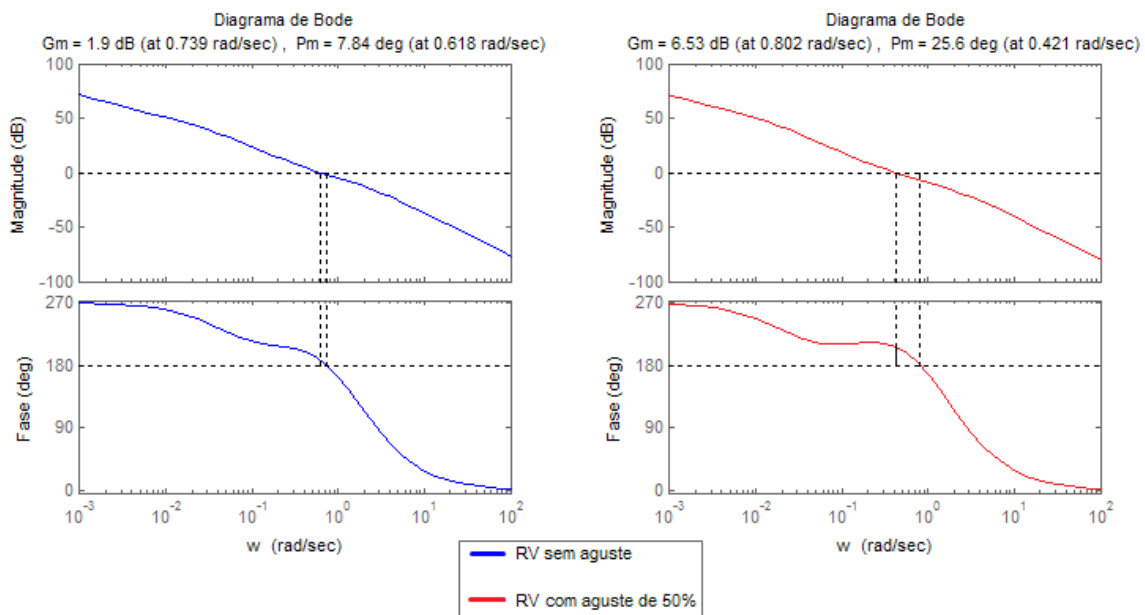


Figura 5.3- Diagrama de Bode do sistema com o RV calculado

Utilizando o programa Matlab, foi implementada uma simulação do sistema mostrada na Figura 5.1. A simulação tem como objetivo observar o desempenho do controlador num modelo linear e com geração isolada. A Figura 5.4 mostra o simulador.



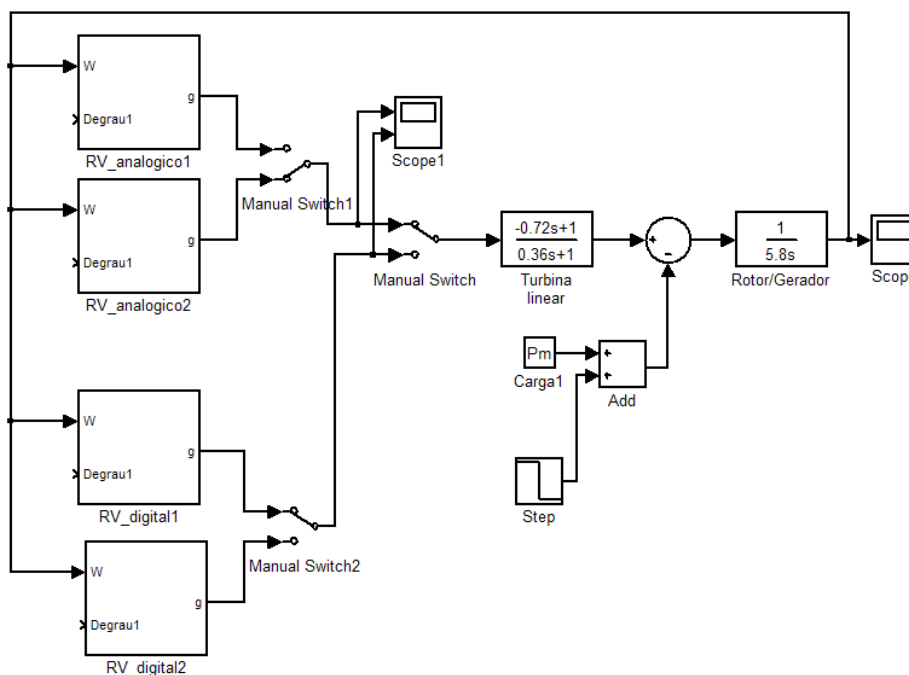


Figura 5.4- Simulador utilizado no projeto

A simulação dura 100 segundos, sendo que nos primeiros 20 segundos, o sistema está em regime com uma carga de 0,4 pu ( $P_m = 0,4$  pu). Após esse período, é aplicado um degrau negativo, reduzindo a carga para 0,2 pu ( $P_m = 0,2$  pu). As Figura 5.5 e 5.6 são os gráficos das respostas da saída do gerador e do controlador, respectivamente.

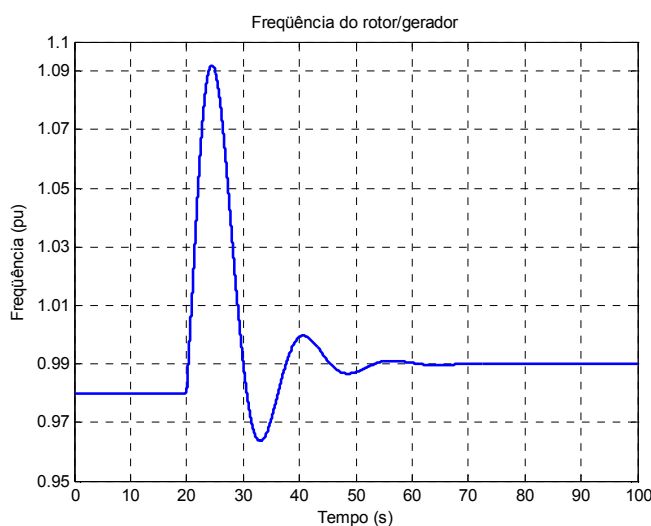


Figura 5.5- Velocidade de rotação do gerador com RV contínuo

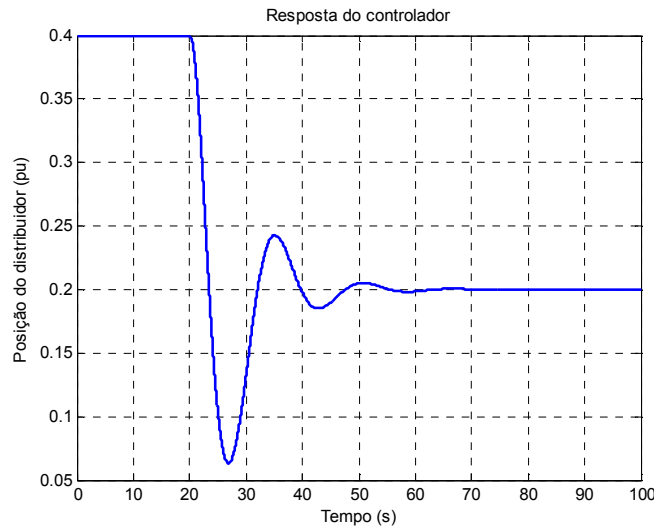


Figura 5.6- Sinal de referência de posição do RV contínuo

As Figuras 5.5 e 5.6 mostram que o controlador tem um desempenho adequado. O sistema fica estável e pouco oscilatório no transitório, que pode ser amortecido com o aumento de  $T_r$ , porém o custo seria deixar o sistema com uma resposta mais lenta.

### 5.3 REGULADOR DE VELOCIDADE DIGITAL INDIRETO RST

O RV projetado nesta seção utiliza como base o RV contínuo projetado na seção anterior. O projeto do RV digital utiliza um modelo RST, deste modo ele também utiliza técnicas de controladores digitais.

Através das técnicas descritas na seção 3.5 calcula-se os valores dos elementos  $R$ ,  $S$  e  $T$ , para promover uma alocação de polos e zeros com rastreamento e regulação independentes. A Figura 5.7 mostra o diagrama de blocos do controlador implementado e as constantes do controlador estão na Tabela 5.1.

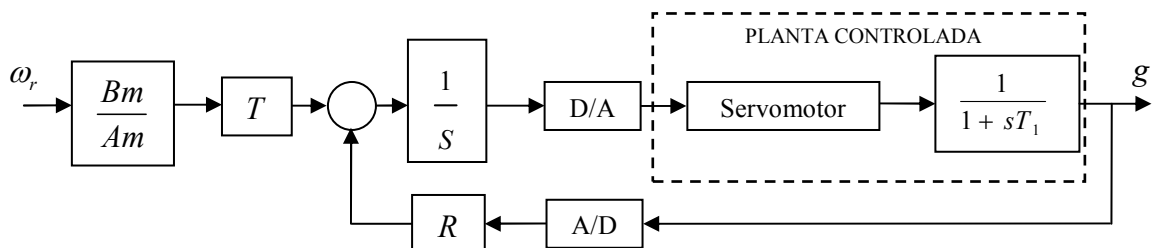


Figura 5.7- Diagrama de blocos de controlador RST digital por estratégia indireta projetado

Onde:

$d$  é o atraso da planta.

$q^{-d}$  é o operador de atraso.

$B, A$  são os polinômios discreto dos zeros e dos polos da planta, respectivamente.

$R, S$  e  $T$  são os polinômios discretos do controlador.

A/D e D/A são conversores analógico/digital e digital/analógico.

Tabela 5.1- RV digital RST indireto

Planta (linearizada)	$G_c = \frac{B_c(s)}{A_c(s)} = 0,08 \frac{1}{s} \xrightarrow{zoh} d \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} = \frac{0,08}{1-q^{-1}}$
Intervalo de amostragem	$T_a = 0,1 s$
Comportamento desejado	$\frac{Bm(q^{-1})}{Am(q^{-1})} = \frac{111,02 + 20q^{-1}}{48,41 + q^{-1}}$
Cálculo dos parâmetros R, S e T	$S(q^{-1}) = 0,008 - 0,007q^{-1}$ $R(q^{-1}) = 0,48 - 0,34q^{-1}$ $T(q^{-1}) = 1 - 1,42q^{-1} + 0,56q^{-2}$ <p>(Calcula-se as Equações 3.18 a 3.22 - no Capítulo 3):</p>
Polos e zeros conhecidos de R e S	$Sc(q^{-1}) = q^{-1} - 1$
Função característica em malha fechada	$P(q^{-1}) = 1 - 1,42q^{-1} + 0,56q^{-2}$
Polos auxiliares	$P_a(q^{-1}) = q^{-1} - 0,1$

O controlador foi implementado no *simulink*, utilizando o modelo mostrado na Figura 5.8 com os parâmetros da Tabela 5.1. A Figura 5.8 mostra o controlador programado.

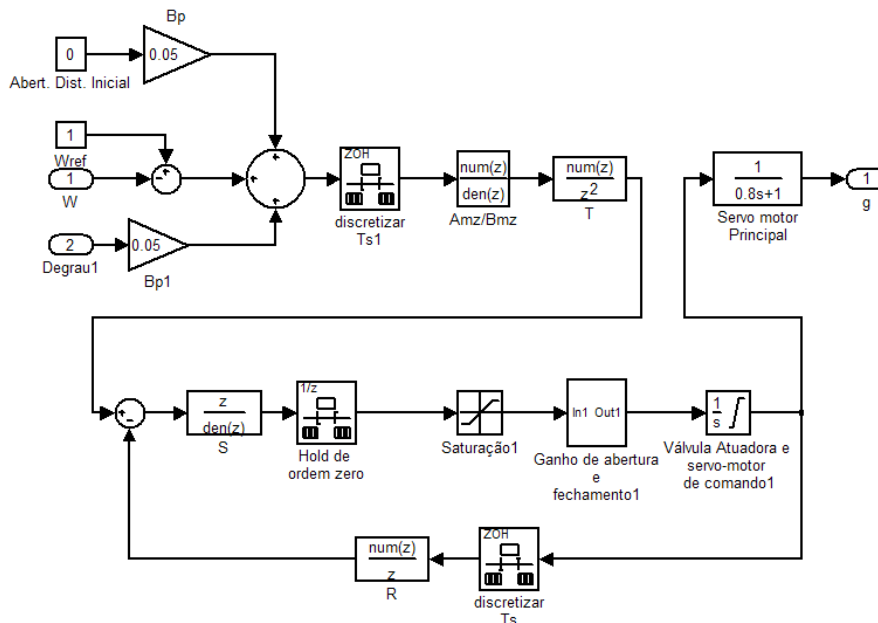


Figura 5.8- Controlador digital RST indireto

Utilizando o programa mostrado na Figura 5.4 o controlador foi simulado e comparado com o controlador contínuo projetado na seção 5.2. A simulação dura 100 segundos, sendo que nos primeiros 20 segundos, o sistema está em regime com uma carga de 0,4 pu ( $P_m = 0,4$  pu). Após esse período, é aplicado um degrau negativo, reduzindo a carga para 0,2 pu ( $P_m = 0,2$  pu). As Figuras 5.9 e 5.10 mostram os gráficos da saída do gerador e do controladores, respectivamente.

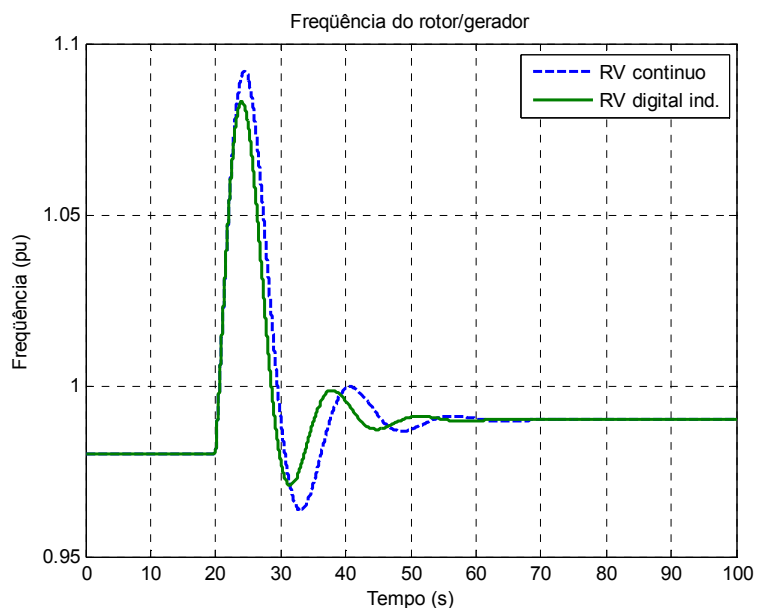


Figura 5.9- Velocidade de rotação do gerador dos RV propostos

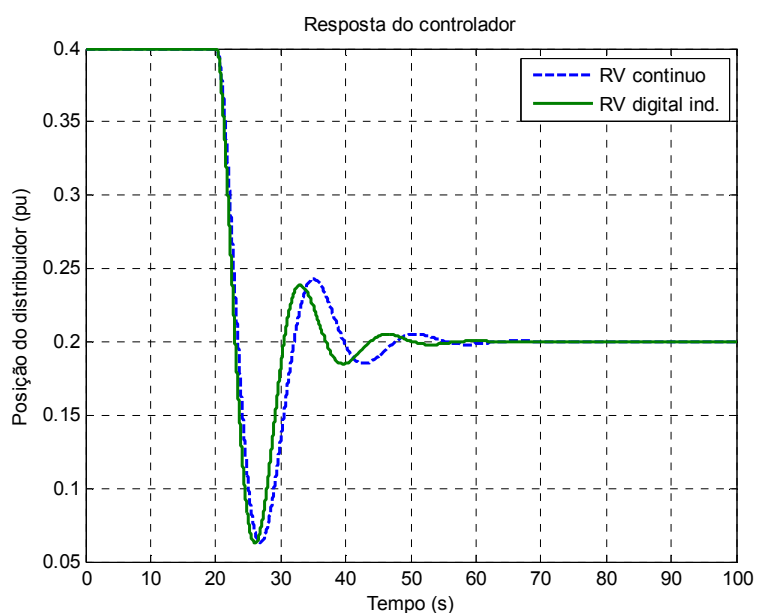


Figura 5.10- Sinal de referência de posição dos RV propostos

As Figuras 5.9 e 5.10 mostram que o controlador digital apresenta um comportamento mais amortecido que o contínuo. A explicação deve-se ao fato de que nenhum dos dois controladores, tanto o contínuo quanto o digital, representam a dinâmica de projeto das função de transferência (Equação 5.3) perfeitamente. Os dois utilizam aproximações, no caso do RV contínuo, quanto maior a constante  $K_s$ , mais fiel ele será aos parâmetros. No caso do RV discreto, quanto menor for o tempo de

amostragem, melhor será a aproximação. Logo, o resultado da simulação indica que o RV digital indireto é mais rápido que o RV contínuo mostrado. Assim, mesmo sem utilizar técnicas avançadas de controle, aplicando somente uma discretização do controlador contínuo num controlador discreto RST já se vê melhorias no desempenho do controlador.

#### 5.4 REGULADOR DE VELOCIDADE DIGITAL DIRETO RST

Diferente de um controlador indireto, um RV digital direto tem seu projeto baseado em técnicas de controle discreto. A proposta é criar um RV digital, utilizando técnicas de controle discreto, que tenha um desempenho equivalente ou superior que o controlador contínuo mostrado. Desta forma foram utilizadas as equações da seção 3.4.2 para o cálculo dos parâmetros do controlador. A Figura 5.11 mostra o diagrama de blocos do controlador e a Tabela 5.2 os parâmetros calculados.

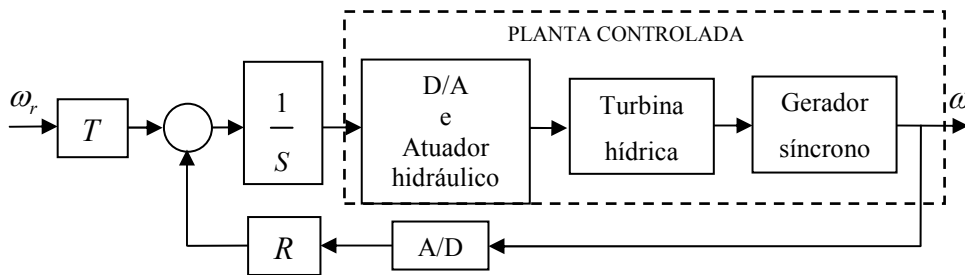


Figura 5.11- Diagrama de blocos de controlador RST digital por estratégia direta

Tabela 5.2- RV digital RST direto

Planta (linearizada)	$G_{ma} = \frac{B_{ma}(s)}{A_{ma}(s)} = \left( \frac{0,11}{s+0,11} \right) \left( \frac{1}{0,8s+1} \right) \left( \frac{-0,72s+1}{0,36s+1} \right) \left( \frac{1}{5,8s} \right)$ $= 0,048 \frac{-0,72s+1}{1s^4 + 4,11s^3 + 3,79s^2 + 0,28s}$ $\xrightarrow{zoh} d \frac{B}{A} = \frac{-0,00016q^{-1} - 0,00013q^{-2} + 0,0006q^{-3} + 0,0001q^{-4}}{1 - 2,977q^{-1} + 3,1887q^{-2} - 1,439q^{-3} + 0,228q^{-4}}$
Intervalo de amostragem	$T_a = 0,36 s$

<p>Cálculo dos parâmetros R, S e T</p>	$S(q^{-1}) = 1 - 1,9q^{-1} + 1,5q^{-2} - 0,62q^{-3} + 0,04q^{-4}$ $R(q^{-1}) = 223 - 675q^{-1} + 714,76q^{-2} - 319,73q^{-3} + 50,3q^{-4}$ $T(q^{-1}) = \frac{P(1)}{B(1)} = 0,0858$ <p>(Calcula-se as Equações 3.29 a 3.34 - no Capítulo 3):</p>
<p>R e S Conhecidos</p>	$Sc(q^{-1}) = q^{-1} - s' = q^{-1} - 0,993$ <p>(Análise do gráfico da Figura 5.13):</p>
<p>Função característica em malha fechada</p>	$P(q^{-1}) = 1 - 1,92q^{-1} + 0,92q^{-2}$
<p>Função característica em malha fechada com polos auxiliares</p>	$P_{ca}(q^{-1}) =$ $1 - 4,92q^{-1} + 10,44q^{-2} - 12,47q^{-3} + 9,2q^{-4} - 4,3q^{-5} + 1,24q^{-6} - 0,2q^{-7} + 0,014q^{-8}$ <p>(polos auxiliares posicionado em 0,5):</p>

O valor do intervalo é de, aproximadamente, metade do tempo do comportamento de fase não mínima do sistema. Este valor foi escolhido por apresentar bom desempenho e por ser um intervalo de amostragem relativamente grande.

Uma vez que  $Sc(q^{-1})$  não pode ser um integrador, por causar problemas de estabilidade em geração interligada, a escolha da posição do polo  $s'$  é analisada graficamente, com o método explicado na seção 3.4.3. O gráfico construído é mostrado na Figura 5.12.

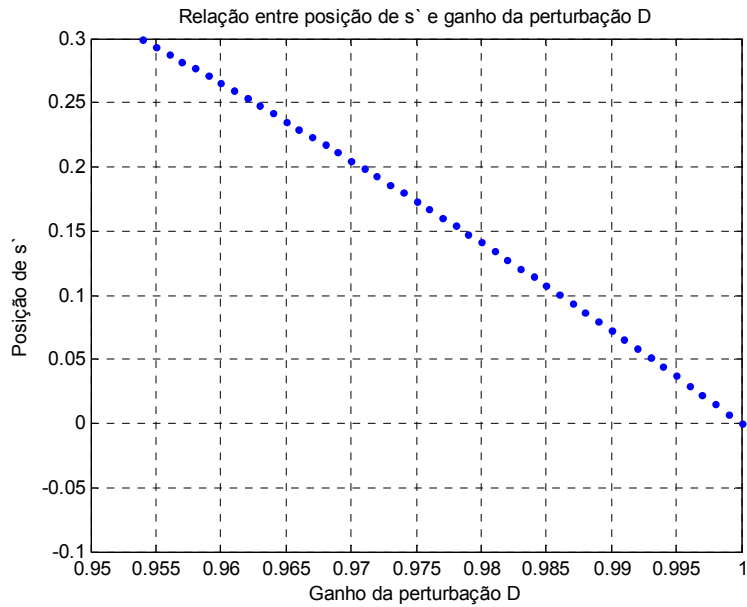


Figura 5.12- Gráfico relacionando posição de  $s'$  e ganho da perturbação

Com a análise do gráfico da Figura 5.12, verifica-se que a escolha para  $s'$  seria de 0,993 que proporciona um estatismo permanente de 0,05.

O controlador foi implementado no *simulink*, utilizando o modelo mostrado na Figura 5.12 com os parâmetros da Tabela 5.2. A Figura 5.13 mostra o controlador programado.

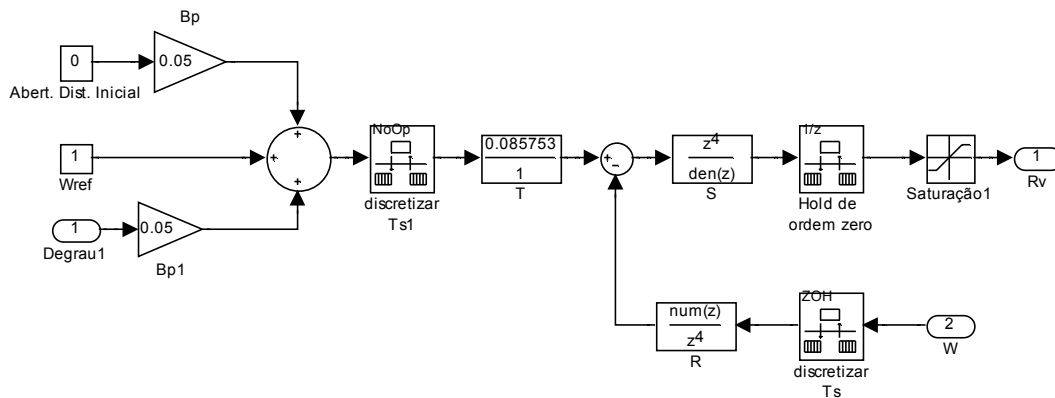
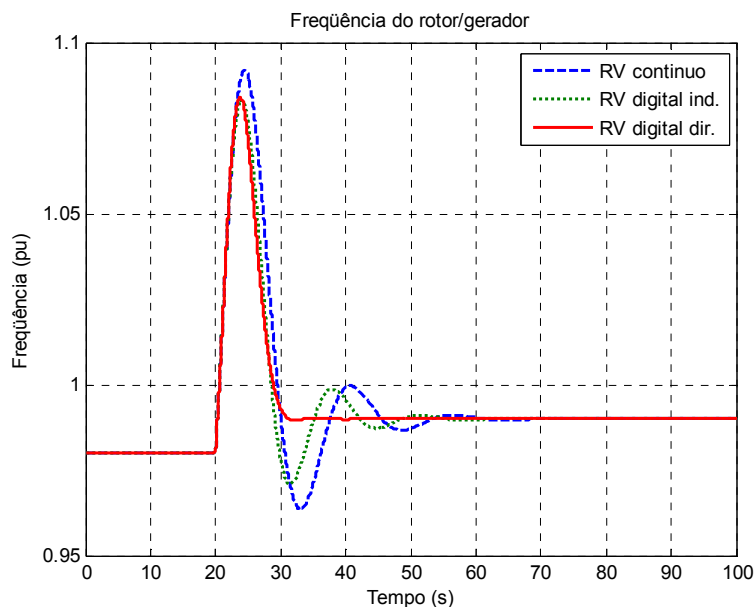


Figura 5.13- Controlador digital RST direto

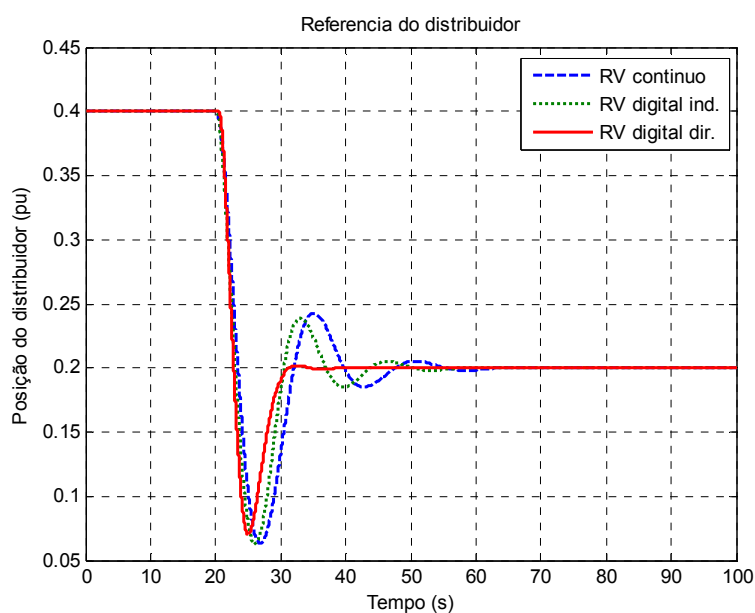
Utilizando o programa mostrado na Figura 5.4 o controlador foi simulado e comparado com o controlador contínuo (seção 5.2) e ao discreto indireto (seção 5.3). A simulação dura 100 segundos, sendo que nos primeiros 20 segundos, o sistema está em regime com uma carga de 0,4 pu ( $P_m = 0,4$  pu). Após esse período, é aplicado um



degrau negativo, reduzindo a carga para 0,2 pu ( $P_m = 0,2$  pu). A Figura 5.14 e 5.15 são os gráficos da resposta da saída do gerador e do controlador, respectivamente.



**Figura 5.14- Velocidade da turbina com os três RV projetados**



**Figura 5.15- - Sinal de referência de posição dos três RV propostos**

As Figuras 5.14 e 5.15 mostram gráficos utilizando um modelo de geração linear e com geração isolada, onde o RV digital direto apresenta um desempenho superior ao RV contínuo e digital indireto projetados. O controlador proveniente da técnica RST

com mapeamento de polos e zeros resulta em um controlador melhor amortecido, reduzindo o tempo de acomodação pela metade.

## 5.5 COMPARAÇÃO DOS CONTROLADORES NO SIMULADOR DA USINA DE CURUÁ-UNA

Com o programa de simulação da Usina de Curuá-Una, descrito no capítulo 4, os três controladores propostos são testados em condição de geração isolada e de ilhamento, com aumento e diminuição de carga. O objetivo é verificar o comportamento de cada controlador em várias condições de operação.

Foram feitas sete simulações sendo agrupadas em dois grupos; *usina isolada* e *usina em ilhamento*. Na seção 5.5.1 são mostradas duas simulações da Usina de Curuá-Una operando com geração isolada, suprindo apenas a carga local. Na seção 5.5.2 são mostradas cinco simulações da Usina de Curuá-Una sofrendo processo de ilhamento, isto é, o sistema inicialmente encontra-se com geração interligada, depois de alguns segundos o sistema sofre uma falha na transmissão e o sistema fica com geração isolada.

Como descrito no capítulo 4, o programa simula a máquina 1 da UHE de Curuá-Una interconectada com uma malha de transmissão acoplada a duas cargas e a uma barra de geração infinita. A Figura 5.16 mostra um diagrama do esquemático da dinâmica do simulador.

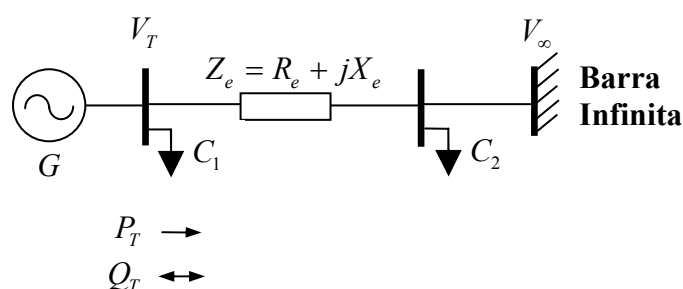


Figura 5.16- Diagrama de fluxo do simulador da UHE de Curuá-Una

### 5.5.1 Simulações com usina isolada

O simulador é configurado para operar com geração isolada e ter variações de carga. Para isso a linha de transmissão da Figura 4.4 ou 5.16 é aberta ( $Z_e$  real e  $R_e = \infty$ ) e a carga local ( $C_1$ ) é aumentada ou diminuída de acordo com o teste.

A simulação dura 100 segundos, sendo que nos primeiros 20 segundos, o sistema está em regime com uma carga de 0,4 pu ( $P_m = 0,4$  pu) e o nível do reservatório é de 1 pu. Após esse período, é aplicada uma variação na carga do sistema.

#### 5.5.1.1 Redução de carga – usina isolada

A carga local sofre uma redução de 0,2 pu. As Figuras 5.17, 5.18 e 5.19 mostram, respectivamente, a frequência elétrica da geração, a potência mecânica da turbina e a referência de posição do distribuidor e da angulação das hélices.

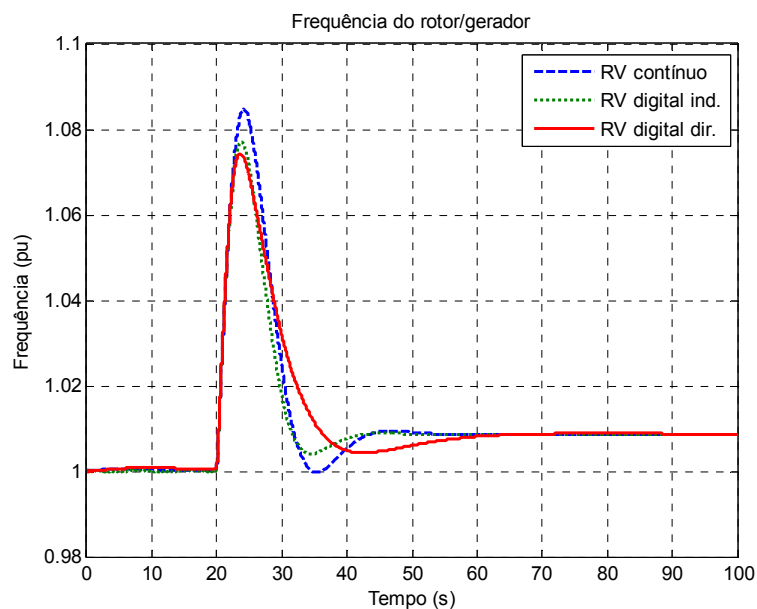
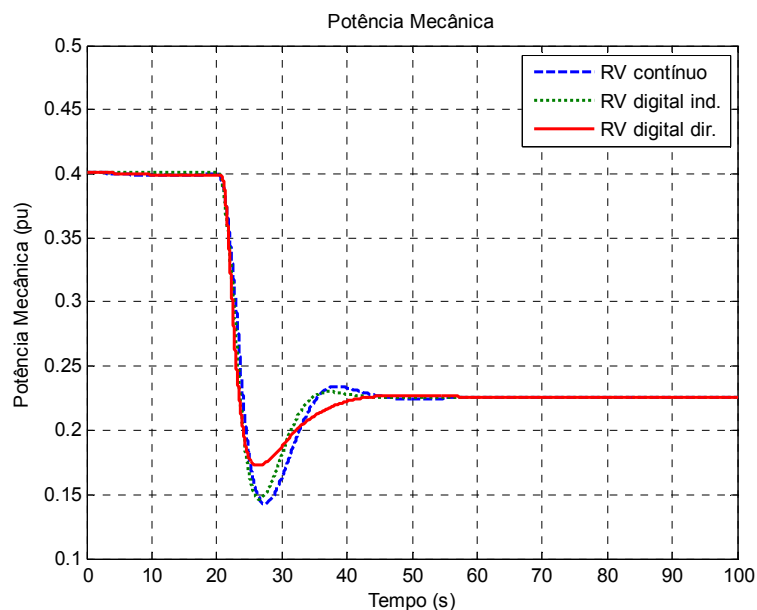
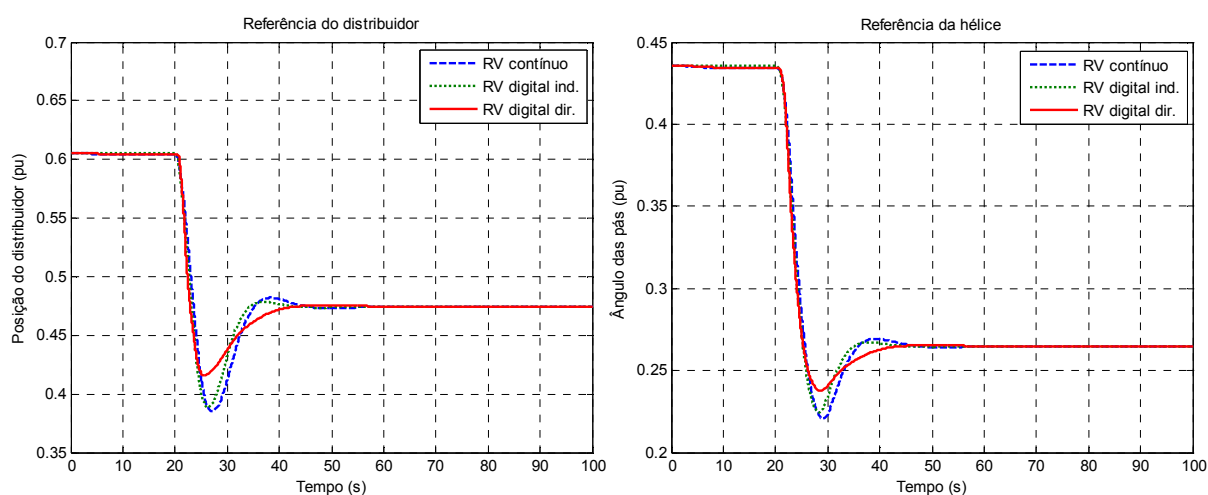


Figura 5.17- Velocidade de rotação do gerador – redução de carga



**Figura 5.18- Potência mecânica gerada na turbina Kaplan – redução de carga**



**Figura 5.19- Sinais de referência do RV; à direita a referência de posição do distribuidor e à esquerda a angulação das hélices – redução de carga**

É interessante ressaltar que os parâmetros da simulação são os mesmos das simulações das seções 5.2 a 5.4, isto é, o mesmo do modelo linearizado.

Com a análise do da Figura 5.17, verifica-se que o controlador mais rápido foi o RV digital indireto. Logo, comparando os Figuras 5.14 e 5.17 nota-se que o controlador RV digital direto teve seu rendimento mais degradado que os outros. Isto se deve ao fato do modelo do sistema utilizado para o projeto não ser igual à planta controlada. Conseqüentemente o controlador RV digital direto não consegue mapear corretamente os polos do sistema. A solução para esse problema não é simples, pois mesmo que se

utilizem técnicas de identificação e seja obtido um modelo mais fiel, as técnicas clássicas de controle utilizam modelos linearizados, logo um afastamento das condições de projeto poderiam degradar o desempenho igualmente. Uma solução seria utilizar técnicas avançadas de controle, como por exemplo, estratégia de controle adaptativo.

As Figuras 5.18 e 5.19 mostram que os dois controladores RV contínuo e RV digital indireto têm um grande esforço de controle. Para uma planta real que apresenta limitações físicas, um esforço de controle pequeno é desejado. Isto evita várias complicações, desde degradação do desempenho do controlador (saturações físicas como a posição do distribuidor e das hélices) como regiões de operação instáveis durante o transitório do sistema.

### 5.5.1.2 Aumento de carga – usina isolada

O sistema opera com uma carga de 0,2 pu. Depois a carga local sofre um aumento de 0,2 pu. As Figuras 5.20, 5.21 e 5.22 mostram, respectivamente, a frequência elétrica da geração, a potência mecânica da turbina e a referência de posição do distribuidor e da angulação das hélices.

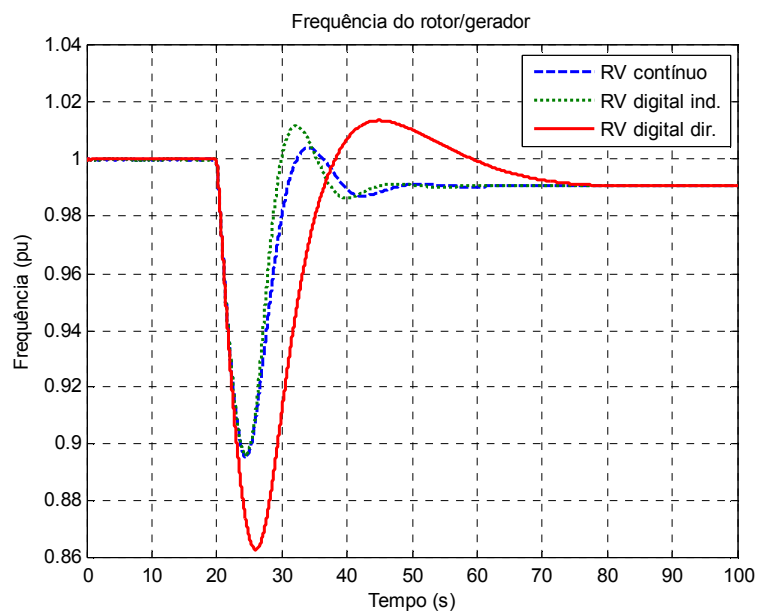
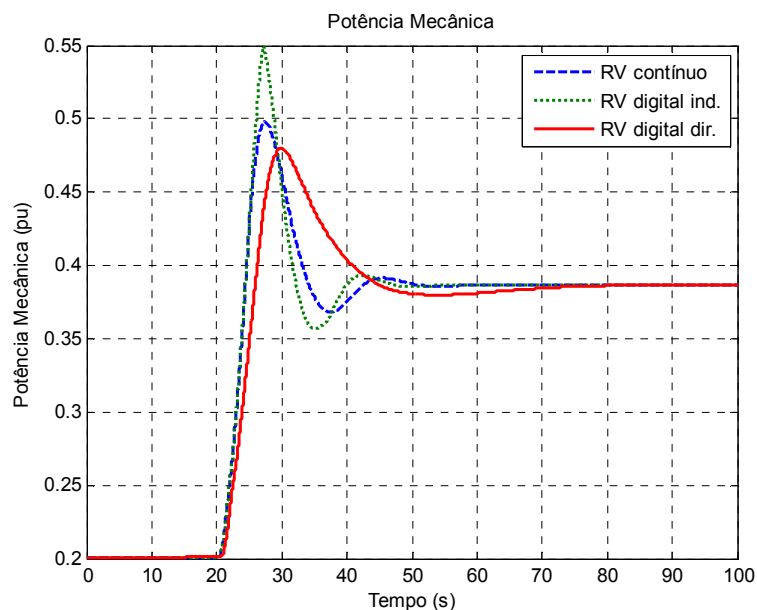
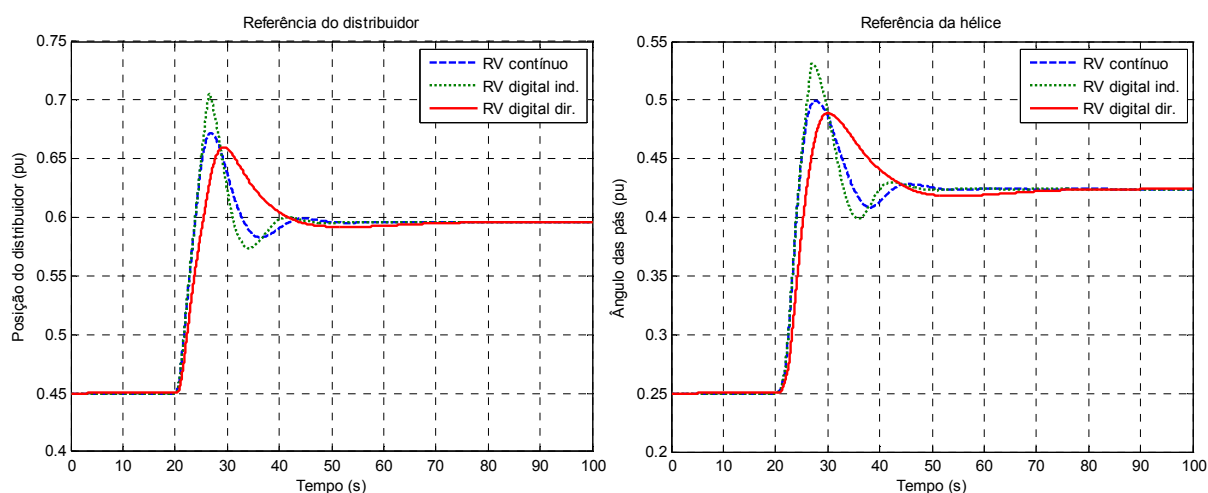


Figura 5.20- Velocidade de rotação do gerador – aumento de carga



**Figura 5.21- Potência mecânica gerada na turbina Kaplan – aumento de carga**



**Figura 5.22- Sinais de referência do RV; à direita a referência de posição do distribuidor e à esquerda a angulação das hélices – aumento de carga**

Com a análise da Figura 5.20, verifica-se que houve uma grande degradação do controlador RV digital direto, já os outros tiveram pouca alteração do desempenho. Outro fator interessante é o esforço de controle; observa-se no gráfico da Figura 5.22 que o esforço de controle do RV digital indireto foi mais alto que os demais. O esforço de controle do RV digital direto foi muito próximo do RV contínuo, mesmo tendo um desempenho mais lento.

Como mencionado no teste anterior, o deterioramento do RV digital direto é causado pela natureza não-linear da planta, que causa a mudança de parâmetros (ou até

mesmo do modelo) na modelagem utilizada para o projeto. Um exemplo para estas mudanças pode ser vista com uma análise dos modelos dos atuadores; tanto de abertura do distribuidor como o de rotação das pás da turbina (seção 4.6) tem constantes de tempo diferentes, quando o mesmo esta abrindo ou fechando.

### 5.5.2 Simulações com usina em ilhamento

O simulador é configurado para operar com geração interligada por uma linha de transmissão a um barramento infinito, suprindo uma carga local e uma carga externa. Em um determinado instante a linha de transmissão é interrompida ( $Z_e = \infty$  e real) e a usina tem a sua geração alterada para operar em geração isolada, tendo um aumento ou diminuição de sua geração de acordo com a demanda da carga local.

A simulação dura 100 segundos, sendo que nos primeiros 20 segundos, o sistema está em regime e com geração interligada ao barramento infinito, sendo a carga externa sempre fixa com o valor de 2 pu. Após esse período, é aplicada a abertura na linha de transmissão. A Figura 5.16 mostra o diagrama elétrico do sistema.

#### 5.5.2.1 Redução de geração – usina em ilhamento isolada

A carga local é fixada em 0.4 pu e a altura do reservatório em 1 pu. O gerador está suprindo a carga local e exportando 0.2 pu para o barramento infinito, totalizando uma geração de 0,6 pu. As Figuras 5.23, 5.24 e 5.25 mostram, respectivamente, a frequência elétrica da geração, a potência mecânica da turbina e a referência de posição do distribuidor e da angulação das hélices.

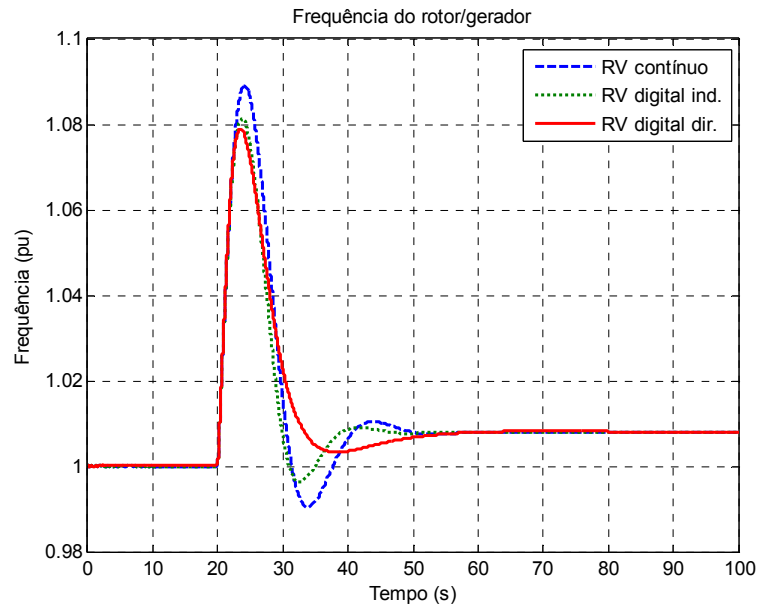


Figura 5.23- Velocidade de rotação do gerador – redução de geração

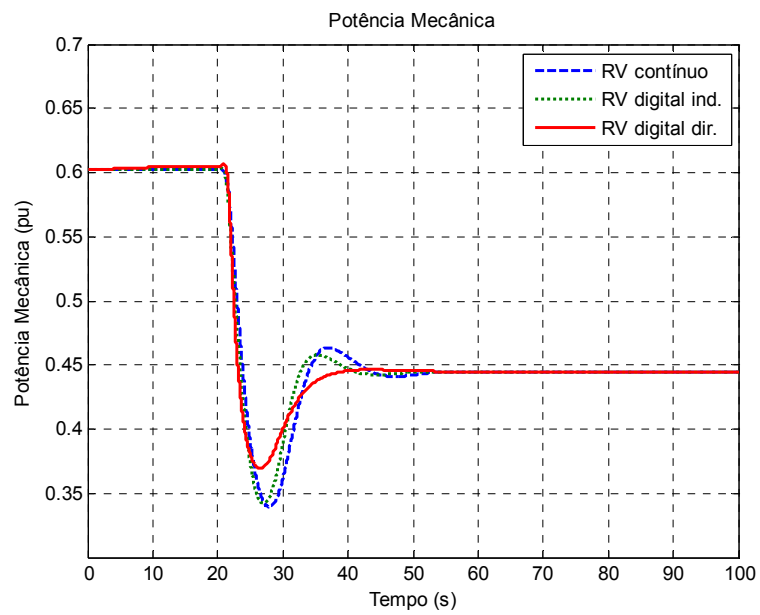
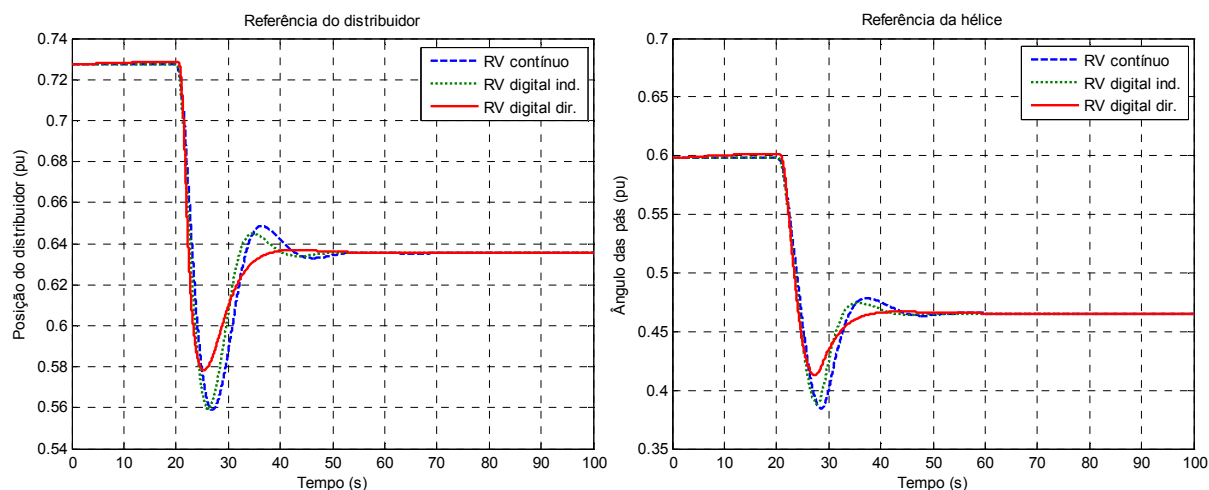


Figura 5.24- Potência mecânica gerada na turbina Kaplan – redução de geração





**Figura 5.25- Sinais de referência do RV; à direita a referência de posição do distribuidor e à esquerda a angulação das hélices – redução de geração**

A simulação aqui tem o objetivo de emular a usina operando em excedente de energia elétrica, sendo a operação interrompida por uma falha e a linha de transmissão é interrompida. É interessante observar que os gráficos nas Figuras 5.23, 5.24 e 5.25 são muito parecidas os da seção 5.5.1.1. Isto comprova que um ilhamento do sistema tem um comportamento parecido com uma alteração de carga com o sistema isolado.

A análise dos gráficos das Figuras 5.23, 5.24 e 5.25 comprova que para esta região de operação o RV digital direto apresenta-se mais rápido e tem o menor esforço de controle.

#### 5.5.2.2 Grande redução de geração – usina em ilhamento

A carga local é fixada em 0,4 pu e a altura do reservatório em 1 pu. O gerador está suprindo a carga local e exportando 0,4 pu para o barramento infinito, totalizando uma geração de 0,8 pu. As Figuras 5.26, 5.27 e 5.28 mostram, respectivamente, a frequência elétrica da geração, a potência mecânica da turbina e a referência de posição do distribuidor e da angulação das hélices.

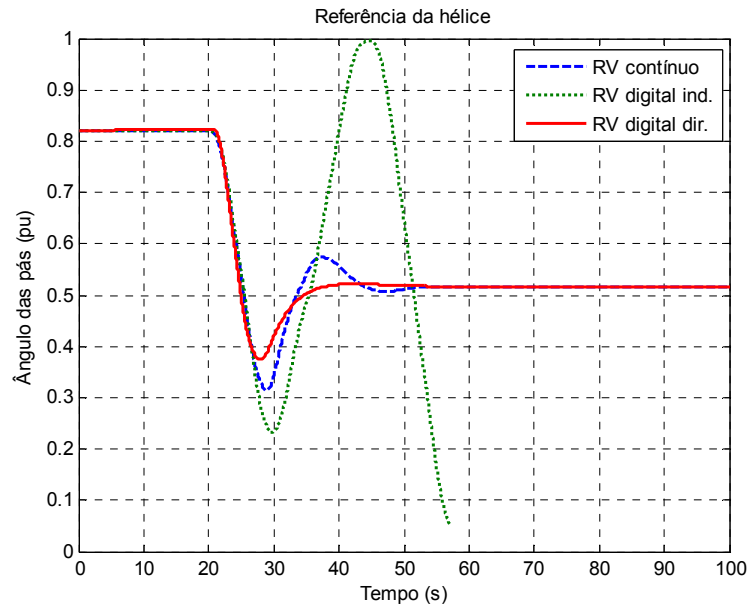


Figura 5.26- Velocidade de rotação do gerador – g. redução de geração

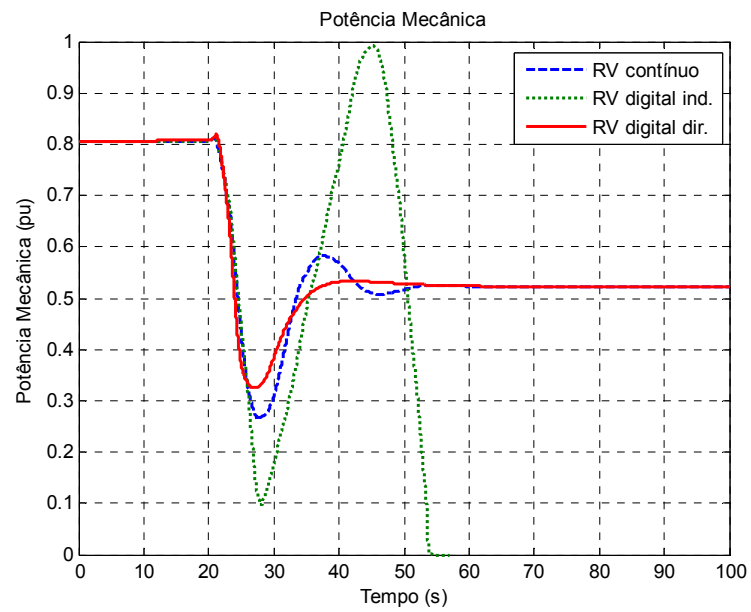
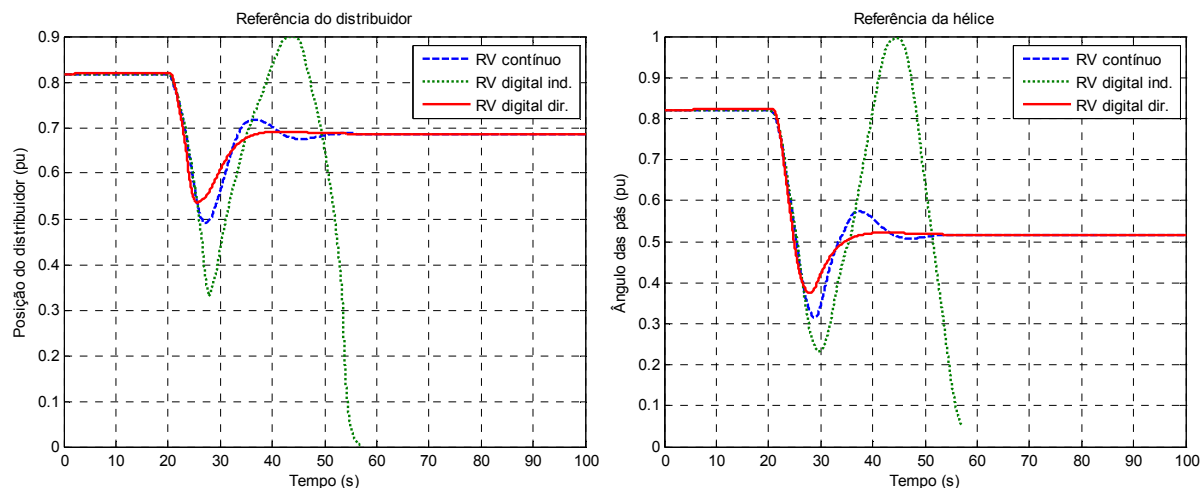


Figura 5.27- Potência mecânica gerada na turbina Kaplan – g. redução de geração



**Figura 5.28- Sinais de referência do RV; à direita a referência de posição do distribuidor e à esquerda a angulação das hélices – g. redução de geração**

Os gráficos desta seção mostram que o controlador mais veloz foi o RV digital direto, que também apresentou o menor esforço de controle. Outro fato importante é que o controlador RV digital indireto apresentou problemas de estabilidade.

Uma possível explicação para tal situação é o esforço de controle excessivo do controlador, presente na Figura 5.28, que fez com que a potência mecânica (Figura 5.27) alcançasse valores abaixo de 0,1 pu, que em teste apresentam-se como uma região de instabilidade.

### 5.5.2.3 Aumento da geração – usina em ilhamento

A carga local é fixada em 0,6 pu, a altura do reservatório em 1 pu e a geração é fixada em 0,4 pu, deste modo a usina está “importando” 0,2 pu do barramento infinito. As Figuras 5.29, 5.30 e 5.31 mostram, respectivamente, a frequência elétrica da geração, a potência mecânica da turbina e a referência de posição do distribuidor e da angulação das hélices.

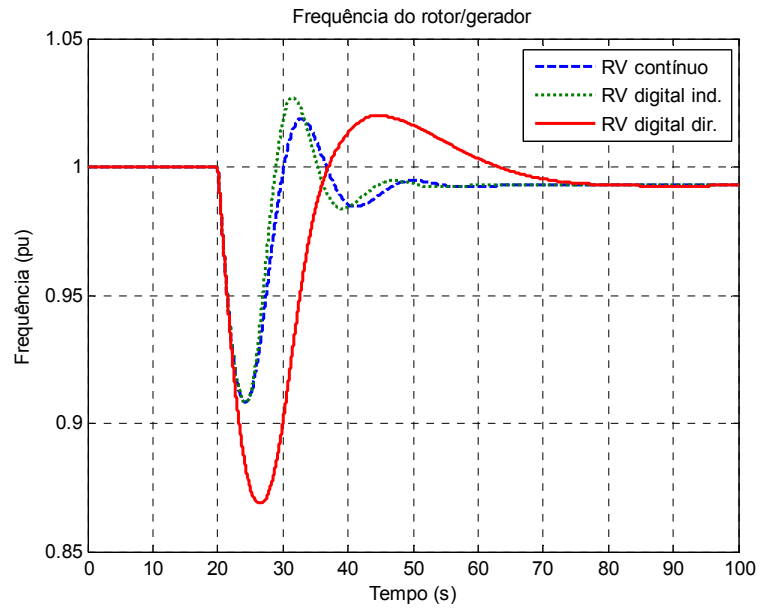


Figura 5.29- Velocidade de rotação do gerador – aumento da geração

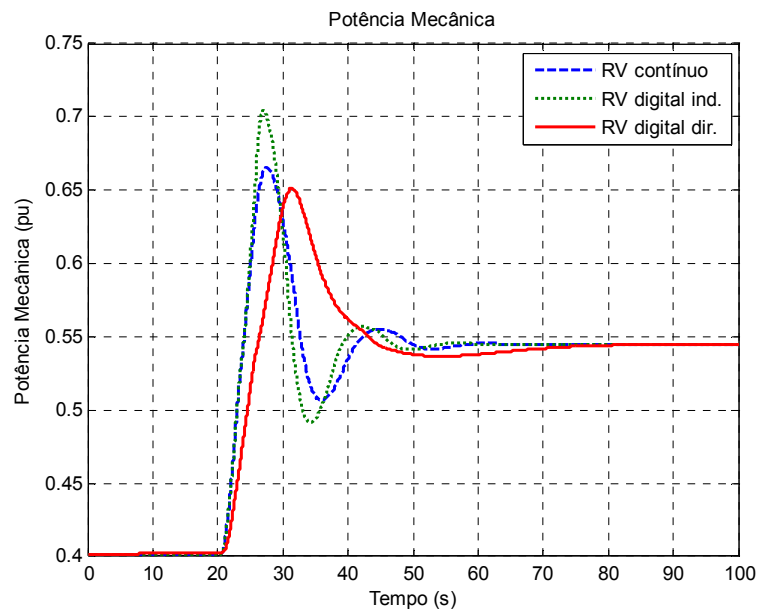
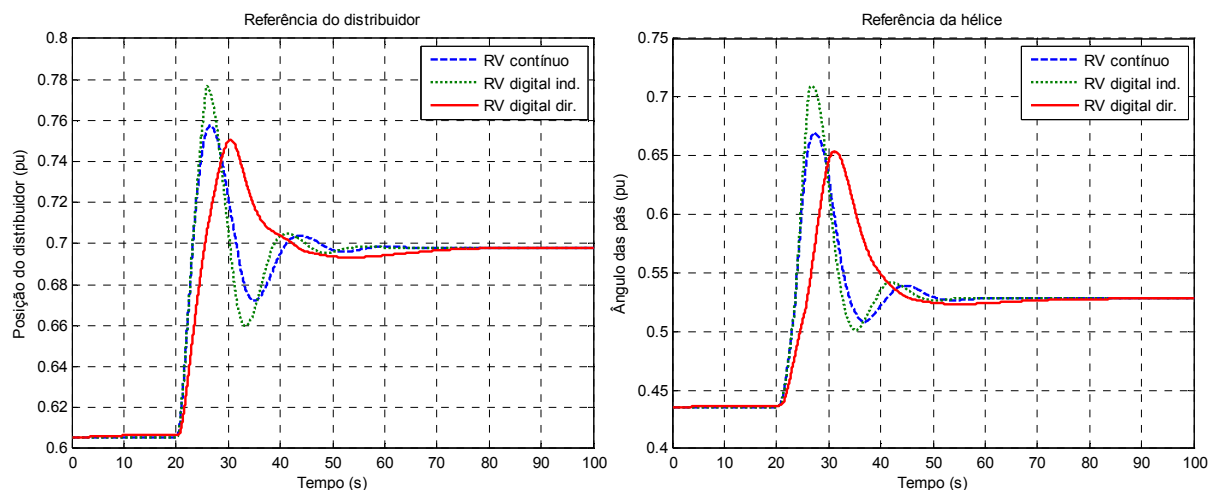


Figura 5.30- Potência mecânica gerada na turbina Kaplan – aumento da geração



**Figura 5.31- Sinais de referência do RV; à direita a referência de posição do distribuidor e à esquerda a angulação das hélices – aumento de geração**

As Figuras 5.29 e 5.30 mostram uma degradação maior do controlador RV digital direto em relação aos outros controladores, resultados parecidos com os mostrados na seção 5.5.1.2. Outro fator importante é o alto esforço de controle utilizado pelo controlador RV digital indireto, também presente nos testes da seção 5.5.1.2.

Deste modo, nenhum dos controladores digitais está propriamente adequado ao sistema nessas condições de operação. No caso do RV digital direto há uma grande perda de desempenho provocada pelas não linearidades do sistema e no caso do RV digital indireto uma perturbação maior poderia colocar o sistema em regiões de operação altamente não lineares (saturação) e conseqüentemente instabilizando o sistema.

#### 5.5.2.4 Grande aumento da geração – usina em ilhamento

A carga local é fixada em 0,8 pu, a altura do reservatório em 1 pu e a geração é programada para produzir 0,4 pu, deste modo a usina está “importando” 0,4 pu do barramento infinito. As Figuras 5.32, 5.33 e 5.34 mostram, respectivamente, a frequência elétrica da geração, a potência mecânica da turbina e a referência de posição do distribuidor e da angulação das hélices.

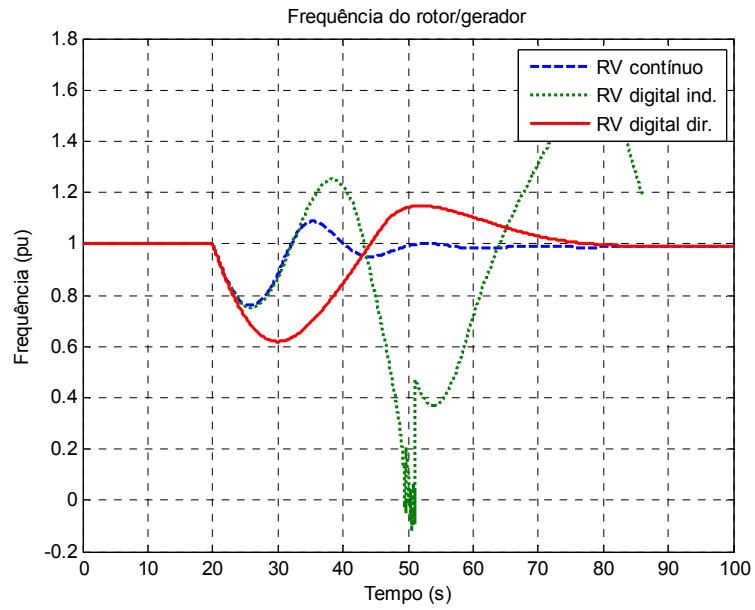


Figura 5.32- Velocidade de rotação do gerador – g. aumento da geração

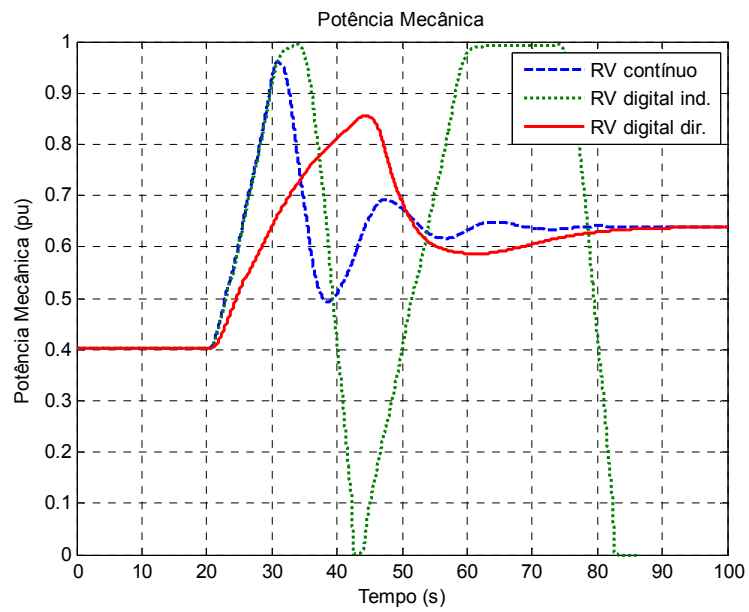
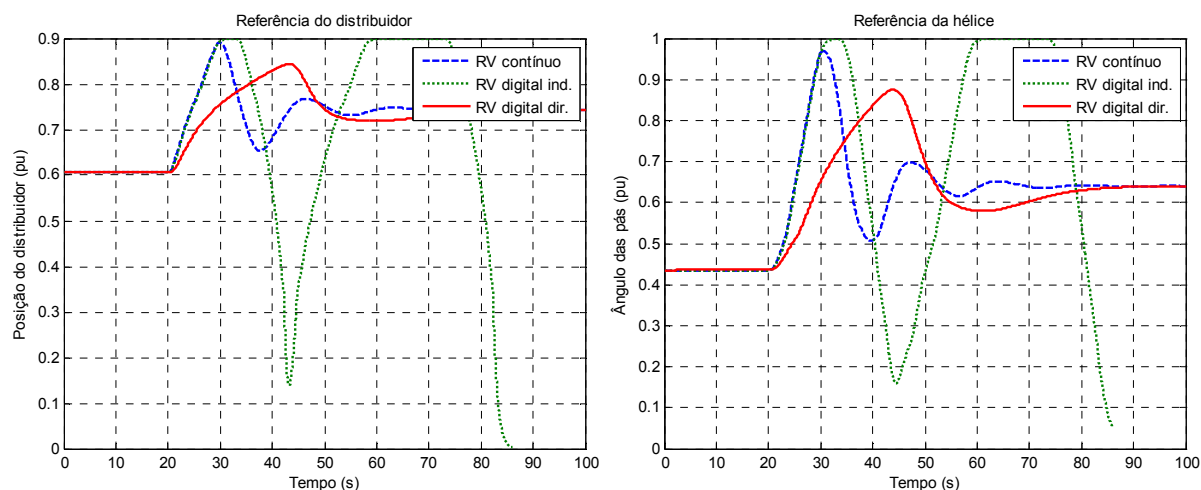


Figura 5.33- Potência mecânica gerada na turbina Kaplan – g. aumento da geração



**Figura 5.34- Sinais de referência do RV; à direita a referência de posição do distribuidor e à esquerda a angulação das hélices – g. aumento da geração**

Como esperado, as Figuras 5.32 e 5.33 mostram uma degradação crescente do desempenho dos controladores na atual condição de controle.

O RV digital direto tem um desempenho lento e com estabilidade incerta, uma vez que a frequência de rotação fica extremamente baixa, o que pode provocar falhas em sistemas auxiliares (como atuadores, motores, transformadores e linhas de transmissão).

O desempenho do RV digital indireto é instável. O esforço de controle satura o sistema e o faz oscilar, alcançando condições de operação instáveis.

O RV contínuo apresenta bom desempenho, entretanto ele está em seu limite, uma perturbação maior poderia fazer o sistema saturar e o resultado de tal pode provocar problemas de estabilidade, tal como o RV digital indireto.

#### 5.5.2.5 Redução de geração com diferentes níveis do reservatório– usina em ilhamento

As mesmas condições apresentadas na seção 5.5.2.1 são aplicadas nesta simulação (a carga local é fixada em 0.4 pu e exportando 0.2 pu para o barramento infinito).

Entretanto, é mostrado o comportamento do sistema para três níveis de reservatórios distintos. As Figuras 5.35, 5.36 e 5.37 mostram a velocidade da turbina se o sistema for controlado pelo RV contínuo, o RV digital indireto e o RV digital direto, respectivamente.

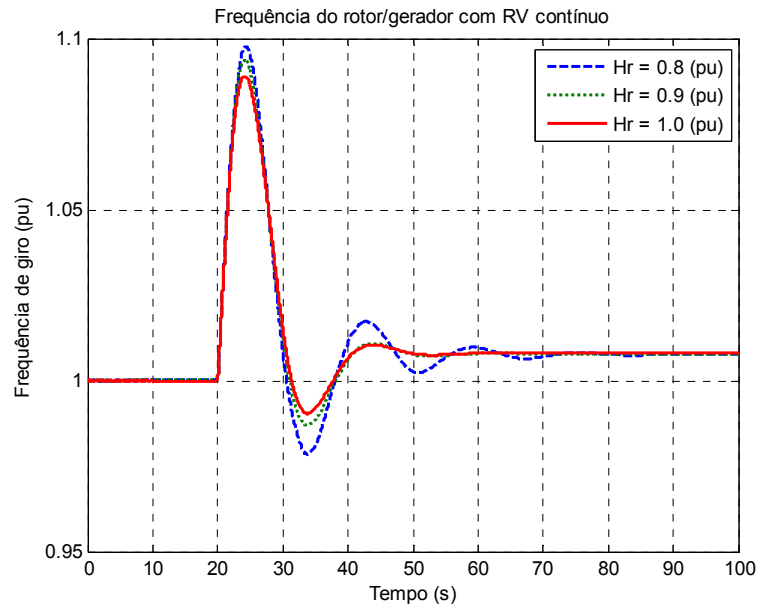


Figura 5.35- Velocidade de rotação para três níveis do reservatório controlado por um RV contínuo

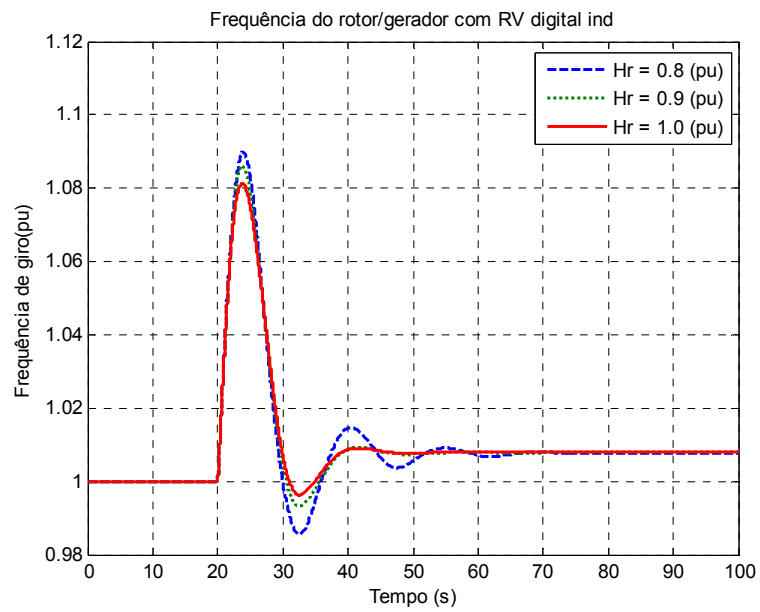
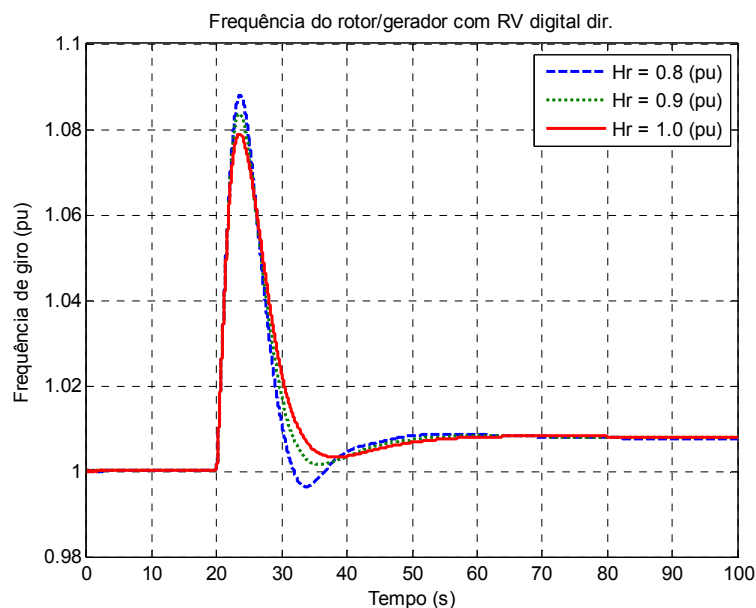


Figura 5.36- Velocidade de rotação para três níveis do reservatório controlado por um RV digital indireto





**Figura 5.37- Velocidade de rotação para três níveis do reservatório controlado por um RV digital direto**

Nas Figuras 5.34 a 5.37, nota-se que com o afastamento no nível do reservatório, com o de projeto, há um deterioramento do desempenho dos controladores. Tal degradação foi maior para o RV contínuo e especialmente para o RV digital indireto, já o RV digital direto teve pouca alteração, mantendo-se pouco oscilatório e com um tempo de regime similar.

### 5.5.3 CONCLUSÃO

Com uma análise de todos os gráficos e simulações do capítulo, pode-se afirmar que nenhum dos controladores apresentados tem ótimo desempenho para condições de operação isolada ou ilhamento.

O RV contínuo apresentou bom desempenho e se mostrou estável em todas as simulações, mesmo em condições muito diferentes das que foi projetado. Entretanto, ele operava no limite, isto é, muito próximo de regiões de saturação, logo, perturbações maiores poderiam instabilizar o sistema.

O RV digital indireto testou um desempenho muito bom, normalmente, sendo mais rápido que os demais. Entretanto, no caso de grandes perturbações o controlador instabilizava o sistema.

O RV digital direto mostrou um bom desempenho, melhor robustez para mudança do nível do reservatório e é o mais estável dos três controladores. Porém, ao

operar em regiões muito diferentes das de projeto, o desempenho do controlador foi o mais prejudicado.

Deste modo, o ideal seria utilizar técnicas de controle avançado para o controle da turbina Kaplan. Uma sugestão seria utilizar uma Rede de Compensadores Locais (COSTA, 1999) para se projetar um RV digital direto que tenha seus parâmetros previamente ajustados para diversas condições de operação do sistema primário de geração.

## CAPÍTULO 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 6.1 CONCLUSÃO

Neste trabalho é apresentada a teoria e as simulações utilizadas para o projeto de um regulador de velocidade para uma turbina hídrica do tipo Kaplan, mais precisamente, a turbina Kaplan instalada no gerador 1 da Usina Hidroelétrica de Curuá-Una. No trabalho foram projetados dois controladores digitais, abordando diferentes estratégias, indireta (onde é feito um projeto contínuo e este é convertido para o domínio discreto) e direta (onde o projeto todo é feito no domínio discreto). O trabalho levanta diferenças, vantagens e desvantagem de cada controlador, com o objetivo de auxiliar na escolha do controlador mais adequado para projetos de controladores avançados: tipo um controle adaptativo, controle *fuzzy* ou controle neural.

As dificuldades de projeto e os resultados das simulações foram os principais indicadores na avaliações dos dois RV digitais projetados. De uma forma geral o RV digital direto apresentou melhor desempenho, estabilidade e menor esforço computacional, entretanto, o RV digital indireto mostrou desempenho similar, menor degradação devido às não linearidades e menor esforço de projeto. De uma forma simplificada as vantagens e as desvantagens do RV digital indireto e do RV digital direto são mostradas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1- Comparação dos controladores digitais propostos

	Vantagens:	Desvantagens:
RV digital indireto	<ul style="list-style-type: none"><li>• maior insensibilidade a não linearidades</li><li>• projeto simples</li><li>• de fácil alteração</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• grande esforço computacional (tempo de amostragem pequeno)</li><li>• mais oscilatório</li><li>• apresenta o maior esforço de controle</li></ul>
	<ul style="list-style-type: none"><li>• melhor desempenho</li><li>• menor esforço de</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• sensível a não linearidade</li></ul>

RV digital direto	controle; <ul style="list-style-type: none"> <li>• menor esforço computacional</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• projeto complexo (requer análise gráfica)</li> </ul>
-------------------	--	---

Com a análise do resultado das simulações verifica-se que cada controlador tem pontos fortes e pontos fracos. Deste modo, os resultados são promissores, pois no ponto de referência em que os controladores digitais foram projetados, o sistema apresentou um ganho de desempenho (ficou mais rápido ou apresentou um menor esforço de controle) que o contínuo. Contudo, nenhum dos controladores tem um desempenho satisfatório em todas as condições de simulação com geração isolada ou em ilhamento, até mesmo o controlador RV contínuo apresentou risco de instabilidade. Isso é algo a se refletir, uma vez que os controladores presentes na UHE de Curuá-Una são RV contínuos não muito diferentes do apresentado neste trabalho. De uma forma geral, conclui-se que o uso de controle clássico para o controle de turbinas Kaplan são insuficientes para garantir um ótimo de desempenho e estabilidade quando o sistema de geração entra em estado de geração isolada ou de ilhamento. Logo, é sugerido o uso de técnicas de controle avançado para o controle desse sistema.

## 6.2 DIFICULDADES

O trabalho apresentou várias dificuldades, entretanto, a maioria delas não envolveram diretamente o projeto dos controladores. O maior desafio do trabalho foi a modelagem na turbina Kaplan e a sua implementação funcional no simulador. O primeiro problema foi a escolha do modelo que se enquadrasse no problema de controle. Com a escolha do modelo surgiram vários problemas no ambiente de simulação. Uma vez que o modelo definido tem a estrutura mosaica de vários modelos não-lineares, formados por dados experimentais interconectados por interpolação, consequentemente, tarefas simples como o cálculo de condições iniciais e normalização se tornaram difíceis de resolver e identificar. Outro problema grave é a ausência de sensores de fluxo de água na turbina e a falta de dados experimentais da fabricante da turbina instalada, o que fez com que grande parte da dinâmica da turbina não possa ser obtida, tornando necessário utilizar dados de uma turbina similar.

O projeto dos controladores foi relativamente simples, já que a maioria da teoria de reguladores de velocidade e de controladores digitais RST está consolidada.

Entretanto, houve complicações para o projeto do combinador e para os parâmetros  $R$  e  $S$  do RV digital direto quando desejado um comportamento de estatismo permanente. Isto se deve ao fato destes elementos serem muito específicos para o controle de turbinas Kaplan, onde foram encontradas poucas referências de possíveis soluções. Deste modo, foi necessário criar uma metodologia para o projeto do combinador e para os parâmetros  $R$  e  $S$  com estatismo permanente, durante o trabalho.

### 6.3 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros é sugerida a utilização do simulador e dos controladores do trabalho para a confecção de controladores digitais com estratégias avançadas de controle como: controle *fuzzy*, neural, adaptativo, supervisionado etc.

Para estratégias que precisem que o controlador tenha uma forma de fácil modificação durante o evento, como o controle adaptativo, é sugerido o uso do controlador digital indireto, pois utiliza estrutura de fácil manipulação e confecção do controlador é simples.

Para técnicas de controle que usam vários controladores, uma para condição de operação e depois são acoplados em um único controlador, como o controle supervísório, é sugerido o uso do controlador digital direto, por apresentar melhor desempenho e estabilidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAGON, L. D. G.; COSTA JR, C. T. Proposta de um controlador digital para o regulador de velocidade da Usina Hidroelétrica de Tucuruí. In: **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**, Belém, 2010.

ARRILLAGA; WATSON; NEVILLE, J.; WATSON, Neville R. **Computer Modelling of Electrical Power Systems**. 2 ed. Estados Unidos: Wiley, 2001.

BREZOVEC; KUZLE; TOMISA , M.; KUZLE I.; TOMISA T. **Nonlinear Digital Simulation Model of Hydroelectric Power Unit With Kaplan Turbine**, IEEE Transactions on Energy Conversion, V. 21(1), 2006.

COSTA JR, C. T. **Méthodes de Commande Adaptative par Supervision pour la Régulation d'un Générateur Entraîné par Turbine Hydraulique** 1999 Tese Doutorado em Engenharia Elétrica, Institut National Polytechnique de Grenoble, França, 1999.

DJUKANOVIĆ, M. B.; ČALOVIĆ, M. S.; VEŠOVIĆ, B. V.; ŠOBAJIĆ, D. J. **Neuro-Fuzzy Controller of Low Head Hydropower Plants Using Adaptive-Network Based Fuzzy Inference System**, IEEE Trans. On Energy Conversion, V. 12, N. 4, dez, 1997.

DOBRIJEVIC, D. M.; JANKOVIC, M. V. **An Approach to the Damping of Local Modes of Oscillations Resulting from Large Hydraulic Transients**, IEEE Transactions on Energy Conversion, V. 14, n. 3, 754p, set., 1999.

ELETRONORTE. **Ensaio no sistema de Regulação de Velocidade da UHE de Curuá-Una**. Belém: Projeto de Implementação de um Regulador de Velocidade, com Capacidade de Adaptação e Integrado ao Sistema de Supervisão e Controle Digital do Centro de Operações da UHE Tucuruí. Relatório técnico PPGEE-UFPA, 2009.

FERREIRA, A. M. D.; BARRA JR, W.; BARREIROS, J. A.; COSTA JR, C. T. Programa de simulação Multimáquina para Análise de Estabilidade de Dinâmica de Sistemas Elétricos de Potência. In: **Latin-American Congress: Electricity Generation and Transmission**, 5, São Pedro, Brasil, 2003.

FINDLAY, D.; DAVIE, H.; FOORD, T. R.; MARSHALL, A. G.; E WINNING, D. J. **Microprocessor-based adaptive water-turbine governor**, IEE PROC, V. 127, N. 6, November, 1980.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY C. JR.; STEPHEN D. **Máquinas Elétricas**, 6.ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D.; EMAMI-NAEINI A., **Livro Feed Back control of dybanic systems**, 3.ed. Estados Unidos: Addison Wesley, 1995.

GOMES, M. C. M. **Implementação e testes de campo de um ESP digital**. Dissertação de Mestrado em Engenharia elétrica PPGEE-UFPA, Belém, 2010.

GUO, A.; YANG, J.; BAO, H. **PID Neural Network Decoupling Control for Doubly Fed Hydro-generator System**. IEEE International World Congress on Inteligent and Automation, 7, Chongqing, China, June 25-27, 2008.

KUNDUR, P. **Power system stability and control**. Nova Iorque: McGraw-Hill, 1994.

LANDAU, I. D., ZITO, G. **Digital control systems: design, identification and implementation**. Alemanha, 2006.

LIGOCKI, L. P. **Comportamento geotécnico da barragem de Curuá-Una, Pará 2006**. Dissertação de Mestrado Engenharia Civil. Escola Politécnica de São Paulo, 2006.

NISE, N. S. **Engenharia de sistemas de controle**, 5.ed. Rio de Janeiro LTC Editora, 2009.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 4.ed. São Paulo: Prentice-Hall do Brasil, 2003.

SANTOS, E. Z. A. **Simulador em tempo real para testes de regulador de velocidade de turbinas hidráulicas 2006**. Dissertação Mestrado. Escola Politécnica de São Paulo, 2006.

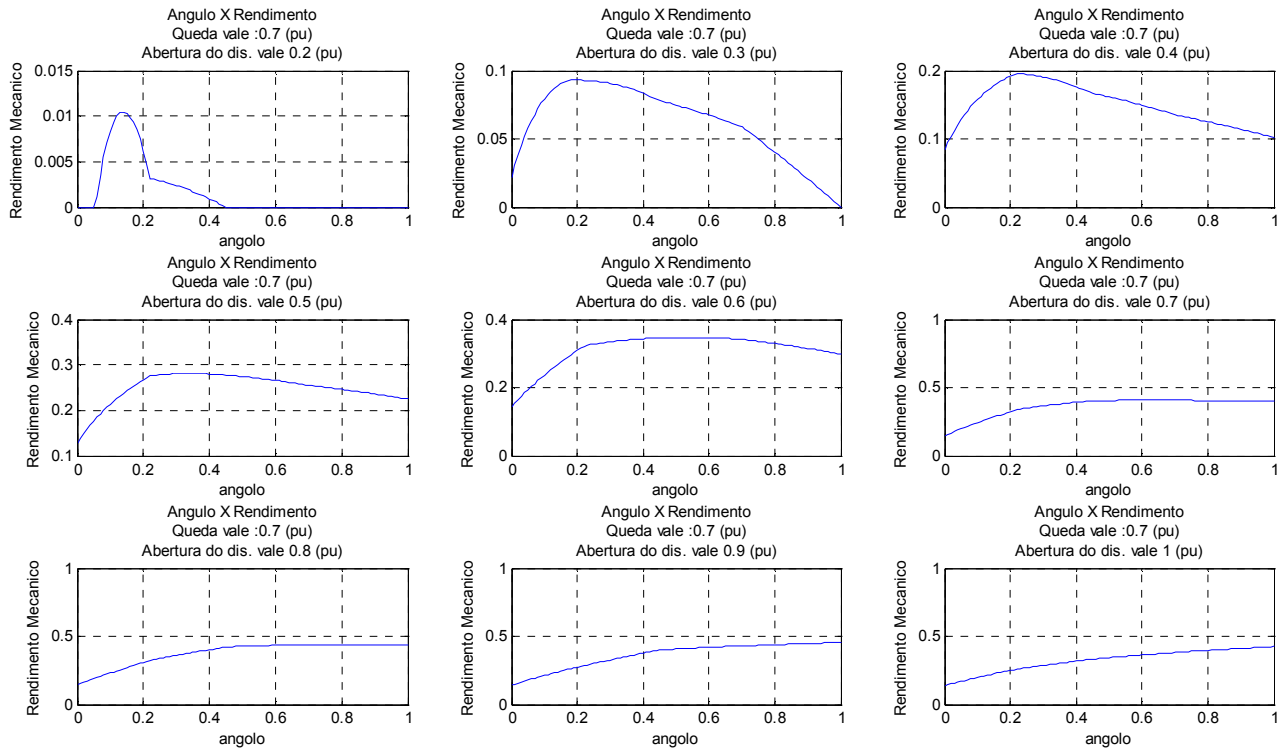
SARE, A. R. **Análise das condições de fluxo na barragem de Curuá-Una, Pará 2003**. Dissertação Mestrado em Geologia PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2003

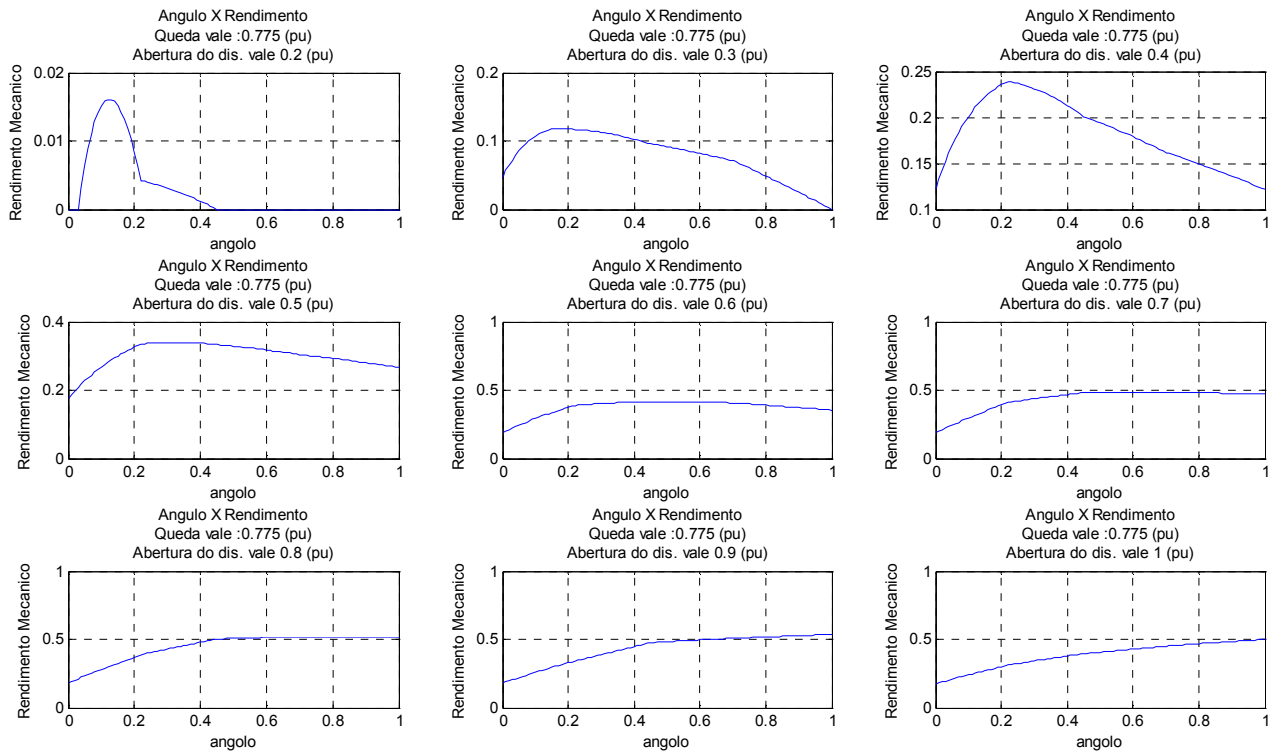
SIMONE, G. A. **Centrais e aproveitamento hidroelétricos, uma introdução ao estudo**. São Paulo: ERICA, 2000



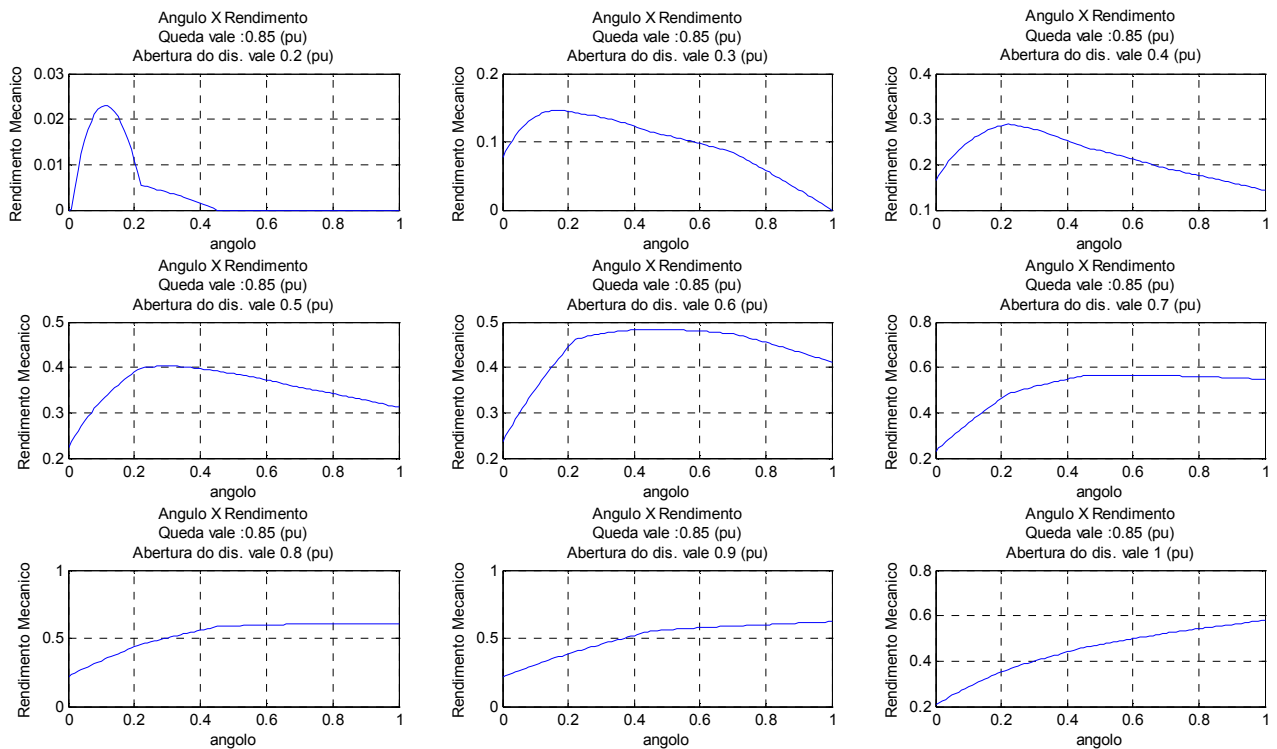
## APÊNDICE A

Os gráficos das Figuras A.1 a A.5 mostram o rendimento mecânico pela angulação das hélices. Os gráficos são utilizados para a obtenção da dinâmica do combinador utilizado no projeto.

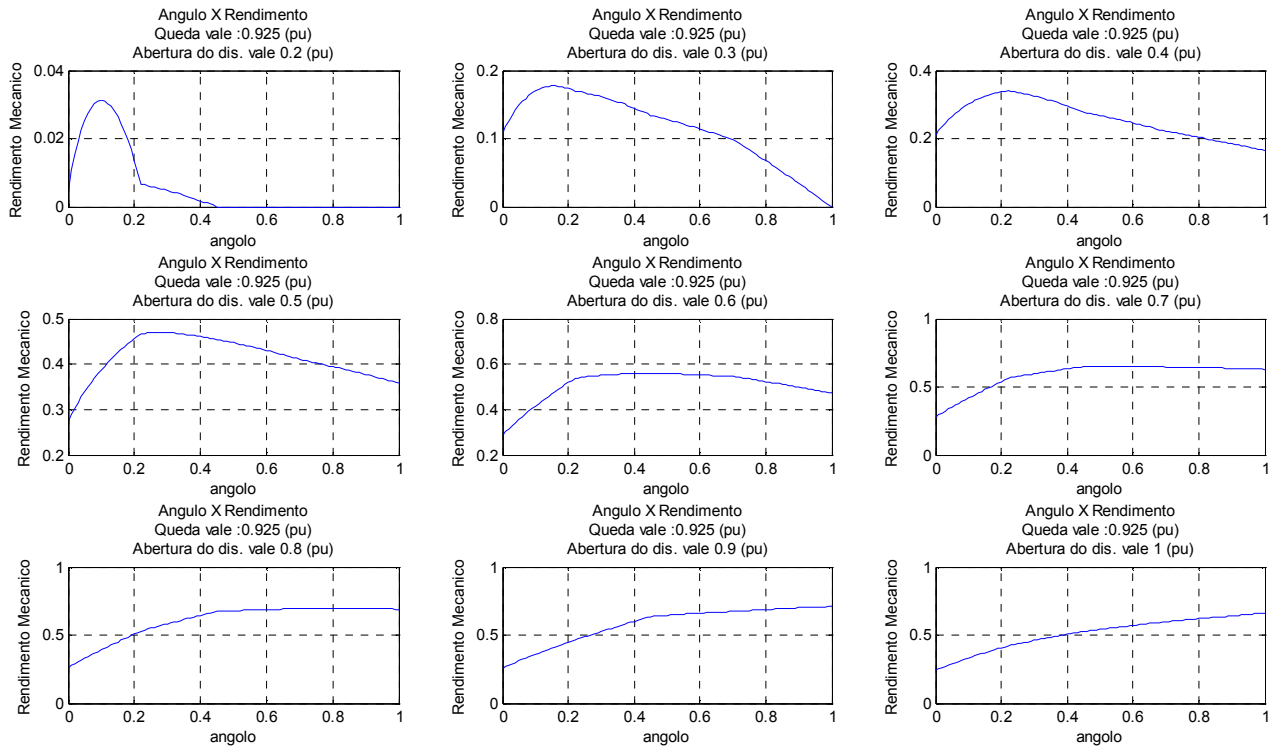




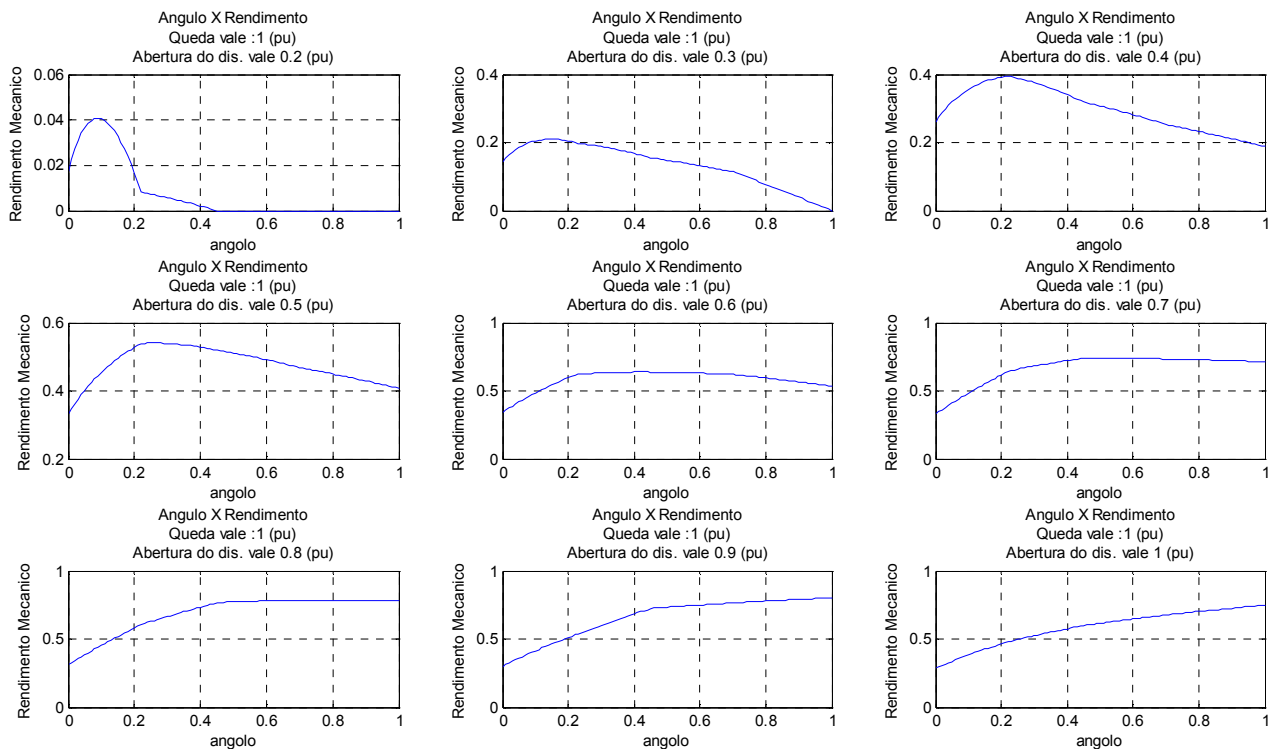
**Figura A.2- Relação do rendimento mecânico pela abertura do distribuidor e angulação das hélices com a altura do nível do reservatório em 0,775 pu**



**Figura A.3- Relação do rendimento mecânico pela abertura do distribuidor e angulação das hélices com a altura do nível do reservatório em 0,85 pu**



**Figura A.4- Relação do rendimento mecânico pela abertura do distribuidor e angulação das hélices com a altura do nível do reservatório em 0,925 pu**



**Figura A.5- Relação do rendimento mecânico pela abertura do distribuidor e angulação das hélices com a altura do nível do reservatório em 1 pu**

Para compensar a não linearidade de regime permanente, utiliza-se os gráficos nas Figuras A.6 ate A.10.

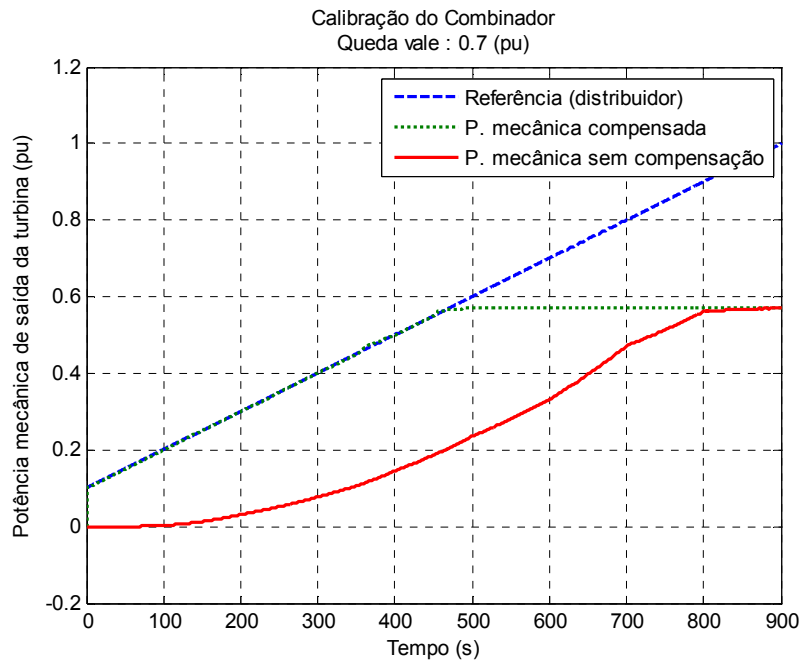


Figura A.6- Dinâmica compensada e não compensada para uma altura de 0.7 pu

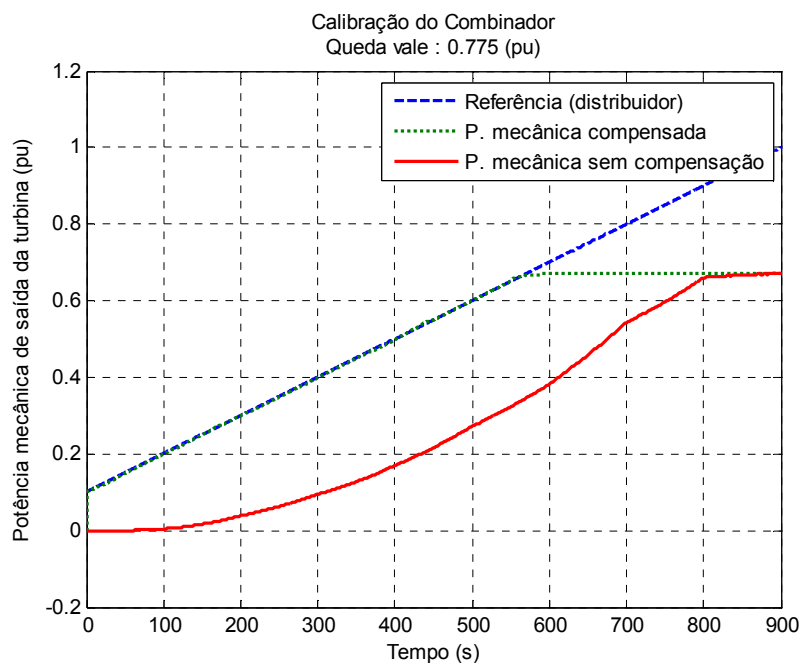


Figura A.7- Dinâmica compensada e não compensada para uma altura de 0.775 pu

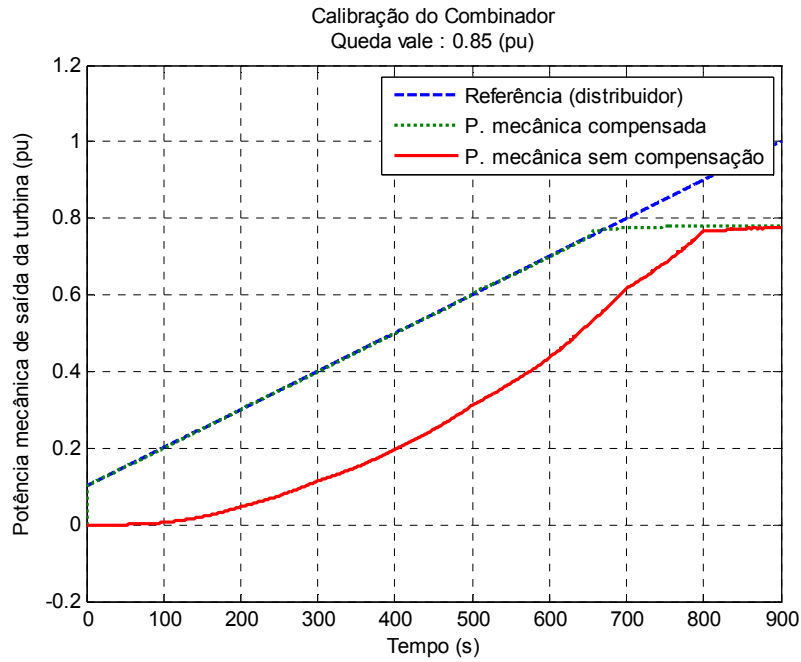


Figura A.8- Dinâmica compensada e não compensada para uma altura de 0.85 pu

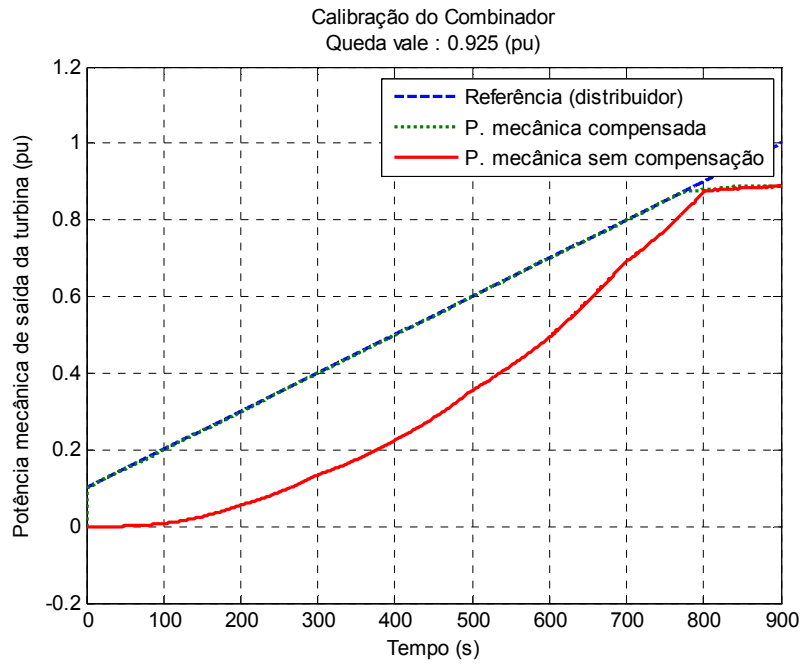


Figura A.9- Dinâmica compensada e não compensada para uma altura de 0.925 pu

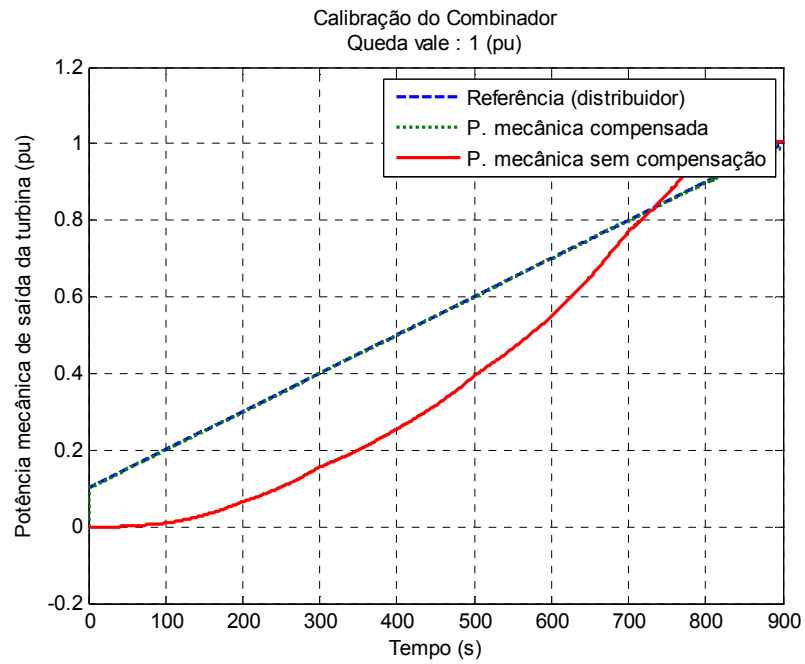


Figura A.10- Dinâmica compensada e não compensada para uma altura de 1 pu

Os gráficos da Figura A.1 ate A.10 são utilizados para montar o bloco *Rend. e Comp.* da Seção 4.6.