

LUCIANO FERNANDO DA ROSA

PROJETO DE CONTROLADOR PID ROBUSTAMENTE ESTÁVEL APLICADO AO
PROBLEMA DE CONTROLE DE CARGA E FREQUÊNCIA EM USINAS
HIDROELÉTRICAS

CURITIBA

2016

LUCIANO FERNANDO DA ROSA

**PROJETO DE CONTROLADOR PID ROBUSTAMENTE ESTÁVEL APLICADO AO
PROBLEMA DE CONTROLE DE CARGA E FREQUÊNCIA EM USINAS
HIDROELÉTRICAS**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica, pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Gustavo H. da C. Oliveira

Coorientador: Gideon V. Leandro

CURITIBA

2016

R788p

Rosa, Luciano Fernando da

Projeto de controlador PID robustamente estável aplicado ao problema de controle de carga e frequência em usinas Hidroelétricas / Luciano Fernando da Rosa. – Curitiba, 2016.

104 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2016.

Orientador: Gustavo Henrique da Costa Oliveira – Co-orientador: Gideon Villar Leandro.

Bibliografia: p. 100-104.

1. Usinas Hidrelétricas. 2. Engenharia Elétrica. 3. Eletrotécnica. 5. Carga e distribuição elétrica. 5. Sistemas de energia elétrica - Controle. I. Universidade Federal do Paraná. II. Oliveira, Gustavo Henrique da Costa. III. Leandro, Gideon Villar. IV. Título.

CDD: 621.31

TERMO DE APROVAÇÃO

LUCIANO FERNANDO DA ROSA

PROJETO DE CONTROLADOR PID ROBUSTAMENTE ESTÁVEL APLICADO AO
PROBLEMA DE CONTROLE DE CARGA E FREQUÊNCIA EM USINAS
HIDROELÉTRICAS

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:



Prof. Dr. Gustavo Henrique da Costa Oliveira
Orientador – UFPR



Prof. Dr. Gideon Villar Leandro
Coorientador – UFPR



Prof. Dr. Eduardo Parente Ribeiro
UFPR



Prof. Dr. Roman Kuiava
UFPR



Prof. Dr. Roberto Zanetti Freire
PUCPR

Curitiba, 29 de agosto de 2016

DEDICATÓRIA

Á minha família

Por todo o apoio e incentivo sem os
quais jamais teria conseguido

AGRADECIMENTOS

Ao meu Orientador Prof. Dr. Gustavo Henrique da Costa Oliveira, agradeço pela orientação, dedicação e paciência.

Ao meu Coorientador Prof. Dr. Gideon Vilar Leandro, agradeço pelo auxílio em discussões sobre questões técnicas.

À Universidade Federal do Paraná pela oportunidade conferida através do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica

À Companhia Energética de Minas Gerais, Geração e Transmissão (CEMIG GT) por fornecer informações técnicas relacionadas com usina do Sistema Interligado Nacional localizada no norte do estado de Minas Gerais e pelo apoio cuja origem é o projeto de pesquisa P&D ANEEL GT 465.

Aos professores da banca pelas sugestões

EPÍGRAFE

“O que sabemos é uma gota; o que ignoramos é um oceano. Mas o que seria o oceano se não infinitas gotas?”

(Isaac Newton)

SUMÁRIO

Lista de Figuras.....	viii
Lista de Tabelas.....	xi
Lista de Siglas.....	xii
Lista de Símbolos.....	xiii
Resumo.....	xviii
1 Introdução.....	1
1.1 Contextualização.....	1
1.2 Controle de Carga e Frequencia.....	3
1.3 Controle Robusto com Algoritmos Genéticos.....	6
1.4 Objetivos.....	8
1.4.1 Objetivos Específicos.....	8
2 Modelo do Sistema Elétrico.....	10
2.1 Modelo do Gerador.....	12
2.1.1 Modelo da Máquina Síncrona.....	12
2.1.2 Carga e Gerador.....	13
2.2 Modelo da Turbina.....	14
2.3 Controlador de Carga e Frequência.....	17
2.3.1 Controlador Isócrono.....	18
2.3.2 Controlador com Queda de Velocidade.....	20
2.4 Malha Hidráulica.....	21
2.5 Modelo da Linha de Transmissão.....	23
2.6 Modelo de Carga e Frequência de uma UHE.....	25
3 Algoritmos de Controle.....	27
3.1 Controle Robusto.....	27
3.1.1 Introdução.....	27
3.1.2 Norma \mathcal{H}_∞	29
3.1.3 Transformação Linear Fracionária.....	31
3.1.4 Critérios de Desempenho Nominal e Estabilidade Robusta.....	32
3.1.5 Modelagem do Sistema.....	35
3.1.6 Conclusão.....	38
3.2 Algoritmos Genéticos.....	39
3.2.1 Funcionamento do Algoritmo.....	40
3.2.2 População.....	41

3.2.3	Próximas Gerações	42
3.2.4	Métodos de Seleção	43
3.2.5	Critério de Finalização	44
3.2.6	Conclusão	45
4	Técnica de Controle	46
4.1	Introdução	46
4.2	Adaptação do Modelo da UHE	47
4.2.1	Incerteza no Modelo da Usina Hidroelétrica: Turbina	48
4.2.2	Modelo da UHE	51
4.3	Projeto do Controlador	53
4.3.1	Função Objetivo	54
4.3.2	Função Peso ou Filtro	57
4.3.3	Algoritmos Genéticos	58
4.4	Conclusão	60
5	Simulações e Resultados	61
5.1	Introdução	61
5.2	Usina do SEP Brasileiro: Desinterligação	62
5.2.1	Modelo Original do Sistema	63
5.2.2	Projeto do Controlador	64
5.2.3	Resultados	68
5.3	Usina do SEP Brasileiro: Isolada	75
5.3.1	Modelo Original do Sistema	75
5.3.2	Projeto do Controlador	76
5.3.3	Resultados	79
5.4	Modelo UHE Literatura	82
5.4.1	Modelo Original do Sistema	83
5.4.2	Projeto do Controlador	85
5.4.3	Resultados	90
6	Conclusão	97
6.1	Modelos Propostos	97
6.2	Técnica de Controle	97
6.3	Trabalhos Futuros	99
7	Bibliografia	100

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Diagrama de blocos simplificado de uma usina.	11
Figura 2.2: Diagrama de Blocos do Gerador e Carga	14
Figura 2.3: Regulador centrífugo.....	18
Figura 2.4: Gráfico controlador isócrono	19
Figura 2.5: Exemplo de controlador isócrono na malha de uma UHE.....	20
Figura 2.6: Exemplo de controlador com queda de velocidade na malha de uma UHE	20
Figura 2.7: Divisão de carga por usinas em paralelo com controlador com queda de velocidade	21
Figura 2.8: Diagrama de blocos da malha hidráulica	22
Figura 2.9: Válvula Piloto	23
Figura 2.10: Válvula Distribuidora	23
Figura 2.11: Servomotor do Distribuidor.....	23
Figura 2.12: Diagrama de blocos de uma UHE isolada em CCF	25
Figura 2.13: Diagrama de blocos de uma UHE interligada em CCF	25
Figura 2.14: Diagrama de blocos de uma UHE em desinterligação em CCF.....	26
Figura 3.1 Diagrama de Blocos típico de um controlador robusto \mathcal{H}_∞	28
Figura 3.2: Configuração para a TLFS	32
Figura 3.3: Configuração para TLFi	32
Figura 3.4: Diagrama de blocos exemplo para aplicação do teorema do ganho pequeno	34
Figura 3.5: Sistema Equivalente P do Sistema	35
Figura 3.6: Diagrama de Blocos Tradicional de Controle	36
Figura 3.7: Diagrama de Blocos do para modelagem em norma \mathcal{H}_∞	36
Figura 3.8: Diagrama de blocos: Constante incerta	37
Figura 3.9: Diagrama de Blocos: Constante incerta inversa	37
Figura 3.10: Diagrama de blocos da incerteza no formato adequado.....	38
Figura 3.11: Diagrama de blocos da incerteza inversa no formato adequado	38
Figura 4.1: Diagrama de blocos da Eq. 4.3	49
Figura 4.2: Diagrama de blocos parcial da turbina conforme Eq. 4.6.....	49
Figura 4.3: Diagrama de Blocos com incerteza.....	50
Figura 4.4: Modelo da turbina com incerteza separada	50
Figura 4.5: Diagrama de Blocos Final Turbina com Incerteza.....	51

Figura 4.6 Diagrama de blocos da UHE adaptado para o projeto do controlador	52
Figura 4.7: Fluxograma geral do projeto do controlador.....	54
Figura 4.8: Fluxograma da função objetivo	57
Figura 5.1: Diagrama de blocos para CCF do modelo da UHE do SEP em desinterligação	63
Figura 5.2: Diagrama de blocos do controlador PI original da UHE do SEP em desinterligação	64
Figura 5.3: Diagrama de blocos do controlador PID proposto da UHE do SEP em desinterligação	66
Figura 5.4: Gráfico da frequência para controlador atual e proposto em diferentes pontos de operação para a UHE do SEP em desinterligação com variação de carga de 70% para 47,5%	70
Figura 5.5: Gráfico da abertura da válvula injetora para controlador atual e proposto em diferentes pontos de operação para a UHE do SEP em situação desinterligação com variação de carga de 70% para 47,5%	71
Figura 5.6: Gráfico da frequência para controlador atual e proposto em diferentes pontos de operação para a UHE do SEP em desinterligação com variação de carga de 47,5% para 70%	73
Figura 5.7: Gráfico da abertura da válvula injetora para controlador atual e proposto em diferentes pontos de operação para a UHE do SEP em situação desinterligação com variação de carga de 47,5% para 70%	74
Figura 5.8 Diagrama de blocos para CCF do modelo da UHE do SEP isolada	75
Figura 5.9: Diagrama de blocos do controlador PID original da UHE do SEP isolada	76
Figura 5.10: Gráfico da frequência para controlador atual e proposto em diferentes pontos de operação para a UHE do SEP isolada.....	80
Figura 5.11: Gráfico da posição da válvula injetora para controlador atual e proposto em diferentes pontos de operação para a UHE do SEP isolada	81
Figura 5.12: Diagrama de blocos do modelo do sistema da literatura (KHODABAKHSHIAN e HOOSHMAND, 2010)	83
Figura 5.13: Diagrama de blocos do sistema da literatura adaptado	87
Figura 5.14: Gráfico da frequência para controlador atual e proposto em diferentes pontos de operação para a UHE 1 da literatura com variação na carga da UHE 1	92

Figura 5.15: Gráfico da frequência para controlador atual e proposto em diferentes pontos de operação para a UHE 1 da literatura com variação na carga da UHE 2.....	93
Figura 5.16: Gráfico da frequência para controlador atual e proposto em diferentes pontos de operação para a UHE 2 da literatura com variação na carga da UHE 1.....	94
Figura 5.17: Gráfico da frequência para controlador atual e proposto em diferentes pontos de operação para a UHE 2 da literatura com variação na carga da UHE 2.....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 Parâmetros do AG	59
Tabela 5.1: Parâmetros do controlador original da UHE do SEP em desinterligação	64
Tabela 5.2: Parâmetros não nulos do modelo linearizado da UHE em desinterligação	65
Tabela 5.3: Configuração do AG para o caso da UHE em desinterligação	67
Tabela 5.4: Parâmetros dos controladores obtidos pelo AG para o caso da UHE em desinterligação	68
Tabela 5.5: Parâmetros do controlador original da UHE do SEP isolada.....	76
Tabela 5.6: Parâmetros não nulos do modelo linearizado da UHE isolada.....	77
Tabela 5.7: Configuração do AG para o caso da UHE isolada	78
Tabela 5.8: Parâmetros dos controladores obtidos pelo AG para o caso da UHE em desinterligação	79
Tabela 5.9: Blocos equivalente do artigo neste trabalho	84
Tabela 5.10: Símbolos equivalentes do artigo neste trabalho	84
Tabela 5.11: Parâmetros do sistema, Frequência=60Hz, Potência base=100MVA ..	84
Tabela 5.12: Parâmetros dos Controladores.....	84
Tabela 5.13: Parâmetros da turbina	88
Tabela 5.14: Configuração do AG para o caso do sistema da literatura	89
Tabela 5.15: Parâmetros dos controladores obtidos pelo AG para o caso do sistema da literatura	90

LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CLP	Controlador Lógico Programável
AG	Algoritmo Genético
CCF	Controle de Carga e Frequência
TLF	Transformação Linear Fracionária
TLFI	Transformação Linear Fracionária Inferior
PI	Proporcional-Integral
PID	Proporcional-Integral-Derivativo
SEP	Sistema Elétrico de Potência
UHE	Usina Hidroelétrica
TLFS	Transformação Linear Fracionária Superior

LISTA DE SÍMBOLOS

\widetilde{G}_o	Média do valor G_o
\bar{T}_o	Torque do ponto de operação em pu
$\bar{\omega}_o$	Velocidade angular elétrica do ponto de operação em pu
Δ_{Tw}	Ponto de operação da turbina normalizado entre -1 e 1
g_a	Aceleração da gravidade
\bar{h}	Altura d'água na barragem, em pu
h_o	Altura da coluna d'água do ponto de operação
D_{pf}	Parâmetro de sensibilidade de frequência
\bar{G}	Abertura da válvula injetora em pu
G_o	Ponto de operação, ou posição de abertura da válvula injetora(pu)
G_1	Sistema linear estável invariante no tempo com uma ou mais entradas e saídas
G_2	Sistema linear estável invariante no tempo com uma ou mais entradas e saídas
G_s	Sistema linear invariante no tempo em sistema de espaço de estados
H_m	Matriz hamiltoniana de um sistema
H_u	Sistema da UHE em malha fechada com o controlador e sem a incerteza/ponto de operação
K_p	Constante da turbina
M_{Tw}	Matriz transferência da incerteza da turbina com duas entradas e duas saídas
M_b	Matriz equivalente da constante incerta b
M_d	Matriz equivalente da constante incerta d

M_u	Sistema da UHE no formato para o projeto do controlador
P_0	Potência da Carga no ponto de operação
P_e	Potência da Carga
P_m	Potência hidráulica disponível
P_t	Potência
R_r	Matriz com números reais
T_{elet}	Torque eletromagnético
T_{mec}	Torque mecânico da força motriz
a_i	Termo real de um polinômio
\bar{b}	Média da constante incerta b
\bar{d}	Média da constante incerta d
m_i	Média de cada autovalor
p_b	Constante de ajuste da incerteza b
p_d	Constante de ajuste da incerteza d
\bar{q}	Fluxo d'água em pu
u_Δ	Entrada da incerteza
v_0	Velocidade da água no ponto de operação
y_Δ	Saída da incerteza
γ_{lb}	Límite inferior da norma H_∞ de um sistema
γ_m	Valor limite da norma H_∞ de um sistema para cumprir o teorema do ganho pequeno
σ_{max}	Máximo valor singular
ω_m	Velocidade angular do rotor
ω_p	Autovalor de G_s

Δ	Constante incerta normalizada entre -1 e 1
Δ_x	Exemplo de nomenclatura para incertezas adotada neste documento. No caso é a incerteza x normalizada entre -1 e 1
Δ_{TW}	Constante incerta da turbina normalizada entre -1 e 1
Δx	Exemplo de nomenclatura para variações adotada neste documento. No caso é a variação de variável x normalizada entre -1 e 1
$\Delta \bar{P}_{m1}$	Variação da potência mecânica parcial 1 gerada pela turbina em pu
$\Delta \bar{P}_{m2}$	Variação da potência mecânica parcial 2 gerada pela turbina em pu
$\Delta \bar{P}_m$	Variação da potência mecânica da turbina em pu
$\Delta \bar{h}$	Variação da altura d'água na barragem em pu
$\Delta \bar{h}$	Variação da altura d'água na barragem em pu
$\Delta \bar{G}$	Variação abertura da válvula injetora em pu
$\Delta \bar{P}$	Variação de potência em pu
$\Delta \bar{T}$	Variação de torque em pu
$\Delta \bar{q}$	Variação do fluxo d'água em pu
$\Delta \bar{v}$	Variação da velocidade da água em pu
$\Delta \bar{\omega}$	Variação da velocidade angular elétrica em pu
h	Altura da barragem
M	Sistema linear invariante no tempo
p_c	Probabilidade de sofrer mutação
\mathbb{R}	Conjunto de todos os números reais
A	Matriz do sistema de espaço de estados G_s
B	Matriz do sistema de espaço de estados G_s
C	Matriz do sistema de espaço de estados G_s

D	Matriz do sistema de espaço de estados G_s
D	Termo de Amortecimento
H	Energia cinética das máquinas
J	Constante de inércia do rotor do gerador
K	Controlador representado por um sistema linear invariante no tempo com uma entrada e uma saída
P	Sistema linear invariante no tempo em malha fechada com o controlador porém sem a incerteza
S	Matriz com números reais
T	Torque
b	Constante incerta
d	Constante incerta inversa
d	Sinal de saída da incerteza e entrada para o sistema
i	Número natural
l	Comprimento do duto
p	Número natural
q	Fluxo de massa hidráulica
t	Tempo
u	Sinal de saída do controlador e entrada para o sistema
v	Sinal de saída do sistema e entrada para a incerteza
w	Sinal de entrada para o sistema
x	Sinal no tempo
y	Sinal de saída do sistema e entrada para o controlador
z	Sinal de saída do sistema

γ	Valor da norma H_∞ de um sistema
ε	Erro máximo permitido do cálculo da norma H_∞
η	Eficiência da turbina
ρ	Densidade da água
ω	Frequência em rad/s
K_p	Constante proporcional do controlador
T_n	Tempo integral do controlador
T_v	Tempo de amortecimento do termo derivativo do controlador
K_d	Constante derivativa do controlador

RESUMO

O sistema elétrico de potência precisa manter a qualidade e confiabilidade de operação. Entre outros fatores, isto significa manter a frequência com o mínimo de variação, responsabilidade esta do controlador de carga e frequência. Considerando as não-linearidades no sistema de uma usina hidroelétrica, o controle de carga e frequência é um assunto ainda em aberto exigindo amplo estudo. Neste trabalho propõe-se aplicar ao problema de controle de carga e frequência em usinas hidroelétrica uma técnica controle \mathcal{H}_∞ com otimização por Algoritmos Genéticos para obter um controlador PID. Mais especificamente, são usados algoritmos genéticos para sintonizar os parâmetros de um PID pelos critérios do controle \mathcal{H}_∞ robusto. O resultado é um controlador simples que ao mesmo tempo herda a principal característica do controlador \mathcal{H}_∞ robusto: a estabilidade robusta frente à variação do modelo do sistema. Neste problema o processo é o sistema elétrico cujo modelo varia conforme o carregamento. Para ser possível aplicar a técnica proposta, foram necessárias algumas modificações no modelo do sistema e na descrição usual da técnica de controle \mathcal{H}_∞ . Como estudo de caso, foram utilizados um sistema elétrico com uma área e uma usina, baseado em uma usina do Sistema Elétrico de Potência (SEP) Brasileiro, e outro sistema elétrico de potência composto por duas usinas. Analisa-se o comportamento do controlador proposto em situações de isolamento inesperado da área. Os resultados obtidos foram promissores ao apresentar desempenho superior aos controladores previamente propostos para a mesma situação.

Palavras-chave: Sistema Elétrico de Potência, Controle de Carga e Frequência, Usina Hidroelétrica, Controle Robusto, Controle \mathcal{H}_∞ , Algoritmo Genético.

ABSTRACT

The electric power system must maintain operation quality and reliability. Among others factors, this means to keep the frequency constancy, and this is the purpose of load frequency control. Because of the non-linearities in the hydroelectric power plant, the load frequency control is an open problem and requires extensive study. In this work, we propose to apply to load frequency problem in hydroelectric power plant a technique of \mathcal{H}_∞ control with optimization by Genetic Algorithm to obtain a PID controller. More specifically, we used genetic algorithms to tune the PID parameters using \mathcal{H}_∞ control specification. The result is a simple controller that at same time inherits the main feature of \mathcal{H}_∞ robust control: the robust stability to the variation of system model. In this problem the plant is the electric system whose model changes according load. To be possible apply the proposed technique, it were required some alteration in the model of system and in the usual description of the \mathcal{H}_∞ control technique. The case study was a single area and single power plant electric system, based in a power plant of Brazilian Electric Power System, and other composed of two power plants. It was analyzed the behavior of an area in an unexpected isolating. The obtained results were promising to present superior performance to the previously proposed controllers for the same situation.

Key-words: Electric Power System, Load Frequency Control, Hydroelectric Power Plant, Robust Control, \mathcal{H}_∞ Control, Genetic Algorithm.

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho apresenta um método de projeto de controlador de carga e frequência aplicado a usinas hidroelétricas. Este controlador visa manter a estabilidade mesmo com variação no ponto de operação da turbina. Com este fim são utilizadas técnicas de controle robusto por meio da norma \mathcal{H}_∞ , e Algoritmos Genéticos (AG).

Nas próximas subseções pretende-se: contextualizar sobre os motivos de um Controle de Carga e Frequência (CCF) adequado e os estudos já feitos na área, justificar a necessidade do estudo, e apresentar os objetivos.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Um Sistema Elétrico de Potência (SEP) permite transportar, de forma eficiente, energia das diversas fontes possíveis para casas, indústrias e comércios. Por ter vários pontos de consumo e geração funcionando de forma simultânea e interconectada, SEP's estão entre os sistemas mais complexos já feitos pela humanidade (EREMIA e SHAHIDEHPOUR, 2013). Portanto, requerem um adequado estudo e projeto dos seus componentes, os sistemas de transmissão, geração e distribuição.

Um SEP deve cumprir alguns requisitos fundamentais (KUNDUR, 1994):

- Manter a continuidade de funcionamento mesmo com variações na demanda de potência ativa ou reativa;
- Funcionar com o mínimo custo e com mínimo impacto ecológico;
- Manter qualidade de energia com padrões mínimos de:
 - Tensão
 - Frequência
 - Confiabilidade

Resumindo, pode-se considerar que se espera que o sistema supra seus consumidores com qualidade e confiabilidade.

A qualidade está relacionada com a conformidade dos parâmetros do sistema, ou seja, devem apresentar valores de tensão e frequência dentro de determinados limites. Isto é importante para os consumidores, pois máquinas são projetadas para trabalhar com valores elétricos fixos e variações nestes, mesmo que pequenas, podem acarretar falha prematura ou funcionamento de forma indesejada. Portanto, manter os parâmetros nos valores estabelecidos ou com poucas variações é uma obrigação do sistema elétrico de potência. Neste sentido, a ANEEL (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2015) estabelece valores mínimos e máximos para tensão e frequência: a tensão é em percentual conforme a tensão nominal e tipo de cliente; e a frequência deve estar entre 59,5Hz e 60,5Hz em regime permanente de operação.

Já a confiabilidade relaciona-se com a continuidade e estabilidade do sistema elétrico de potência. Principalmente para não haver interrupção no serviço devido causas não relacionadas à capacidade produtiva, e a habilidade de se recuperar de falhas de transmissão. Para a estabilidade, um sistema precisa ter a capacidade de retornar a um estado de equilíbrio após uma perturbação. Na área de estabilidade, existem três categorias de estabilidade: de tensão, de frequência e angular (KUNDUR *et al.*, 2004). Apesar de haver uma divisão das instabilidades, raramente as instabilidades ocorrem de forma pura, pois uma pode levar a outra e a distinção pode não ser tão clara (BEVRANI, 2009). Apesar disso, tensão e frequência possuem um sistema de controle específico para cada uma.

Apesar dos assuntos, qualidade e confiabilidade, serem distintos, eles estão relacionados com a variação mínima dos valores de tensão e frequência em relação seus valores nominais, ou seja, a estabilidade. O Controle do Sistema Elétrico de Potência pode ser dividido em duas partes: a) Controle de Tensão e Potência Reativa; e b) Controle de Frequência e Potência Ativa ou de Carga e Frequência. Ambos atuam na geração de energia elétrica. Como cada controle é um tema bastante amplo, este trabalho trata apenas do controle de carga e frequência. O controle deste parâmetro pode ser feito de forma isolada, pois existe um desacoplamento entre tensão e a frequência do sistema em condições próximas as nominais (VIEIRA, 1984).

1.2 CONTROLE DE CARGA E FREQUENCIA

O controle de carga e frequência regula a frequência agindo na força motriz da usina, sendo esta a mais importante função no sistema no sistema automático de controle de uma usina (BEVRANI, 2009). Além disso, Kundur (1994) afirma que um sistema elétrico com a frequência fora do nominal influencia diretamente na operação e desempenho do sistema. Este controle é importante para o equilíbrio entre geração e consumo, pois caso esse seja afetado haverá uma variação na frequência que poderá levar à instabilidade (VIEIRA, 1984).

O método de projeto de controladores de carga e frequência difere muito conforme o tipo de geração usado, pois cada máquina tem suas características que variam conforme a força motriz utilizada para movê-la. Portanto, o estudo para uma hidroelétrica é diferente de uma termoelétrica. No Brasil a geração de energia hidroelétrica corresponde a 70% da matriz energética (EPE, 2015), além disso, o potencial hídrico do país representa 20% das reservas hídricas superficiais da terra e é considerado o maior do planeta (FREITAS e SOITO, 2008). Isso torna o estudo neste tipo de geração bastante interessante no cenário nacional.

As dificuldades encontradas nesse tipo de controle são bastante variadas. A máquina síncrona, por exemplo, possui características não lineares e o sistema tem vários pontos de operação. Isto dificulta a ação do controlador em obter uma boa rejeição de perturbações e desempenho nos regimes transitório e permanente. Além disso, o sistema é interconectado com várias usinas, cada uma com seu próprio controlador e carga, aumentando, assim, a complexidade do sistema de controle como um todo.

A literatura descreve vários tipos de controladores com o objetivo de resolver os problemas descritos. Existem diferenças entre os sistemas de potência estudados, conforme sua configuração de usinas, cargas e linhas de transmissão. Portanto os estudos realizados podem ser divididos entre os tipos de sistemas e tipos de controladores.

Em sistemas reais, dificilmente uma usina opera isolada, onde só exista ela e sua carga. Normalmente, o sistema é formado por várias unidades geradoras e cargas diferentes interconectados por linhas de transmissão. Devido à dificuldade de simulação de sistemas muito grandes, utilizam-se em geral sistemas menores de

uma até quatro áreas, cada área formada por uma usina e uma carga interconectadas por linhas de transmissão (RERKPREEDAPONG, HASANOVIC e FELIACHI, 2003).

Os primeiros estudos de controle de carga e frequência foram em sistemas com uma área. Um exemplo é o trabalho de Foord (1978) que estudou a resposta transitória para uma usina isolada perto da carga máxima. Kusic *et al* (1988) apresentaram o controle automático de uma usina hidroelétrica isolada.

Sistemas com mais áreas podem ser compostos por usinas de apenas um tipo ou de tipos diferentes, i.e. hidroelétrica e hidroelétrica, termoelétrica e hidroelétrica, termoelétrica e termoelétrica, etc. No trabalho de Khodabakhshian e Hooshmand (2010), é estudado um sistema com duas usinas hidroelétricas ligadas por uma linha de transmissão e é projetado um controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) baseado no pico máximo de ressonância. Usinas de diferentes tipos são analisadas por Vrdoljak, Perić e Petrović (2010), são quatro usinas sendo duas termoelétricas e duas hidroelétricas.

Para controlar um sistema com várias usinas pode-se então adotar duas estratégias de controle: descentralizado ou centralizado. No centralizado, todas as usinas do sistema são controladas por apenas um controlador. Aplicado no estudo de Quazza (1966), propõe-se um sistema de controle centralizado no qual as usinas estão interconectadas por sistema controle que as controla ao mesmo tempo. Apesar de ser o melhor do ponto de vista de controle, é mais caro devido a toda a intercomunicação necessária entre as usinas. No descentralizado, cada usina tem seu próprio controlador. Como vantagem, tem-se que este é o mais barato, porém apresenta maiores dificuldades do ponto de vista de controle, pois os controladores devem trabalhar de forma coordenada mesmo sem ter informação um do outro. Esta é a estratégia de controle mais frequente, pois é mais simples e reduz esforço computacional (PANDEY, MOHANTY e KISHOR, 2013). Todos os controladores citados a seguir serão deste tipo.

Para o projeto do controlador, existem várias técnicas, entre elas: os métodos clássicos (SHIRAI, 1979; QUAZZA, 1996) otimização de PID via algoritmos genéticos (ABDEL-MAGID e DAWOUD, 1995; SHANKAR, CHATTERJEE e CHATTERJEE, 2012; SAXENA, GUPTA e GUPTA, 2012), síntese de controladores robustos (SHIBATA *et al.*, 2002; LU *et al.*, 2009; TAN e XU, 2009), entre outras.

Alguns métodos são considerados clássicos por utilizarem técnicas de controle tradicionais ou não tão modernas (PANDEY, MOHANTY e KISHOR, 2013), seguindo esta lógica, como exemplo, pode-se citar os trabalhos de Shirai (1979) e Quazza (1966).

Shirai (1979) utilizou o segundo método de aproximação de Lyapunov juntamente com a teoria do tempo de acomodação. Quazza (1966) propôs uma aproximação sem interação entre frequência e o fluxo de potência da linha de transmissão assim cada área é responsável pelas variações de suas cargas.

A otimização por meio de algoritmos genéticos visa o ajuste de parâmetros em busca da minimização de parâmetros de desempenho. Estes podem ser de vários tipos: Integral do Erro Quadrático vezes o Tempo, Integral do erro Quadrático, Integral Absoluta do Erro, entre outros. Normalmente o controlador possui uma estrutura fixa no qual seus valores serão ajustados através da busca realizada por estes algoritmos. Alguns exemplos desta linha de projeto de controladores foram aplicados por: Abdel-Magid e Dawoud (1995), Shankar, Chatterjee e Chatterjee (2012) e Saxena, Gupta, M. e Gupta, V. (2012).

Abdel-Magid e Dawoud (1995) utilizaram algoritmos genéticos para ajustar parâmetros de um controlador PI de forma a minimizar a Integral do erro Quadrático e a Integral do Erro Quadrático vezes o Tempo e um modelo de sistema duas áreas. Shankar, Chatterjee e Chatterjee (2012) propuseram, também para um sistema de duas áreas com usinas hidroelétrica e termoelétrica, um controlador PID e parâmetros ajustados por algoritmos genéticos de forma a minimizar o erro quadrático. Saxena, Gupta e Gupta (2012) utilizaram uma função multiobjetivo baseada em critérios Integral do erro Quadrático e a Integral do Erro Quadrático vezes o Tempo, minimizando-a utilizando algoritmos genéticos. O procedimento é aplicado em um sistema duas áreas e é obtido o controlador das duas áreas ao mesmo tempo. A estrutura do controlador foi um integrador.

Outro grupo soluções de controle possível é através de um controlador robusto. A vantagem do controlador robusto em relação a outras técnicas é manter a estabilidade e desempenho mesmo com variações nos parâmetros do sistema (GU, PETKOV e KONSTANTINOV, 2005). Esta característica é interessante visto a não linearidade do sistema elétrico de potência. Tradicionalmente, resultam em um controlador linear de estrutura variável e alguns exemplos dessa técnica foram feitos por Shibata *et al.* (2002), Lu *et al.* (2009), Tan e Xu (2009).

Shibata *et al.* (2002) propuseram um método que usa um controlador robusto μ -*synthesis* para o caso de um sistema de três áreas. A incerteza está associada ao coeficiente de amortecimento de cada uma das máquinas do sistema, por fim demonstra-se que este tem desempenho melhor que um PID tradicional. Lu *et al.* (2004), utilizaram um controlador \mathcal{H}_∞ para um sistema contendo 8 máquinas e 36 barramentos. O resultado mostrou que este controlador é superior ao controlador convencional. Tan e Xu (2009) utilizaram um modelo com uma incerteza no modelo da turbina com objetivo de demonstrar que extrapolando esta incerteza para uma dinâmica não modelada o sistema pode ser instável se o controlador não for robusto.

No Grupo de Sistemas Dinâmicos e Controle da Universidade Federal do Paraná também já foram desenvolvidos alguns trabalhos na área. Pelacini (2015) apresentou, para o benchmark publicado por Thorne e Hill (1973) e para um estudo de caso baseado em uma UHE brasileira, o projeto de um controlador PID com otimização por norma \mathcal{H}_∞ e analisou o desempenho de um controlador \mathcal{H}_∞ por realimentação de estados. Donaisky (2015) e Donaisky *et al.* (2016) apresentaram uma proposta de modelo híbrido do tipo PWA (Piecewise Affine) para a malha hidráulica de UHEs. Além disso, Donaisky (2015) propôs unir este modelo com um controlador de Carga e Frequência formando um MPC (Model Predictive Controller) híbrido. Resultados foram aplicados em um estudo de caso baseado em uma UHE brasileira, onde o controlador MPC teve desempenho superior ao PID tradicional. Alguns resultados parciais do presente trabalho de dissertação também já foram apresentados em (DA ROSA *et al.*, 2016).

O algoritmo genético permite uma ampla busca por valores dos parâmetros do controlador, isto em geral obtém-se controladores com bom desempenho. Já, as técnicas de controle robusto descrevem requisitos que o controlador deve cumprir para ser robusto a variações nos parâmetros do sistema. Uma técnica que utilize ambas, pode-se um controlador com bom e desempenho e robusto.

1.3 CONTROLE ROBUSTO COM ALGORÍTMOS GENÉTICOS

A otimização por meio de Algoritmos Genéticos (AG) e a síntese de controladores robustos são técnicas que são essencialmente diferentes, porém

podem ser unidas para obter um controlador resultante com as qualidades de cada uma.

O AG consegue selecionar adequadamente controladores dados critérios bastante não-lineares. O controle robusto consegue definir critérios para estabilidade e desempenho. Portanto, juntando as qualidades descritas de cada técnica pode-se obter um controlador PID robusto, fazendo o AG selecionar os parâmetros de um PID que respeite os critérios do controle robusto. Entretanto, existem alguns poucos trabalhos em que as duas técnicas foram unidas, principalmente no contexto de sistemas de potência. Alguns exemplos desta união são trabalhos feitos por Rerkpreedapong, Hasanovic e Feliachi (2003) e Farag e Werner (2006)

Rerkpreedapong, Hasanovic e Feliachi (2003), fizeram um estudo em um sistema de duas áreas, comparando dois tipos de controladores: um baseado na técnica tradicional de minimização da norma \mathcal{H}_∞ obtendo um controlador de décima ordem e outro usando algoritmos genéticos para minimizar a norma \mathcal{H}_∞ para obter um controlador PID. Como resultado, mostrou-se que o controlador PID teve desempenho muito semelhante ao controlador de décima ordem. Apesar de interessante e útil essa demonstração, não há uma indicação clara de robustez frente a variações do ponto de operação.

Farag e Werner (2006) utilizaram uma técnica mista de AG e algoritmo KD, sendo que este último é uma técnica μ -synthesis (GU, PETKOV e KONSTANTINOV, 2005) que normalmente resulta em um controlador de ordem variável. Entretanto, ao acrescentar o AG, foi possível obter um controlador de estrutura fixa. Apesar da aplicação não ser para controle de carga e frequência, a técnica de controle interessa a este trabalho. Uma questão se coloca aqui é que esta técnica não possui garantia de resultar em um controlador robustamente estável, pois não há restrições no projeto que impeçam de gerar um controlador instável em qualquer ponto fora do nominal.

Uma lacuna existente são controladores que, ao mesmo tempo, tenham um bom desempenho para pelo menos um ponto de operação, haja garantia de que será robustamente estável para todos os demais e que seja de implementação simples como um PID. Sendo assim, neste trabalho propõe-se uma técnica que buscará um controlador PID satisfaça a estes requisitos de projeto.

A justificativa para a escolha da estrutura PID é relatada a seguir. Por um lado, conforme Rerkpreedapong (2003), é possível obter um controlador PID minimizando a norma \mathcal{H}_∞ , com desempenho semelhante a controladores de ordem maior obtidos pela técnica tradicional de minimização da norma \mathcal{H}_∞ . Por outro lado, PID é a estrutura de controlador mais usual no contexto de aplicação deste trabalho, o que amplia a aplicabilidade da solução encontrada.

Desta forma, este trabalho completa a lacuna de falta de um controlador PID obtido por minimização da norma \mathcal{H}_∞ e que, ao mesmo tempo, seja robusto à incerteza paramétrica conhecida do modelo representada pela variação do ponto de operação.

1.4 OBJETIVOS

Obter, para usinas hidroelétricas, um controlador de carga e frequência com estrutura PID, desempenho nominal garantido e estabilidade robusta, utilizando técnicas de controle robusto e algoritmos genéticos.

1.4.1 Objetivos Específicos

O presente estudo utiliza conceitos de projeto de controle robusto com norma \mathcal{H}_∞ para obter um PID para controle de carga e frequência, onde este tenha bom desempenho nominal e estabilidade robusta. Sendo este último requisito interessante devido à variação no ponto de operação do sistema. Como encontrar um controlador PID com estes requisitos é um problema não convexo, a técnica utilizada para calcular os parâmetros do controlador escolhida é a otimização por algoritmos genéticos.

Esta técnica é aplicada em estudos de caso baseados em usinas hidroelétricas reais do sistema elétrico de potência e um sistema encontrado na literatura. Nestes são verificados a estabilidade e desempenho para vários pontos de operação alguns sinais internos do sistema. Portanto, podemos citar como objetivos específicos:

- Obter um controlador com desempenho nominal ótimo baseado na norma \mathcal{H}_∞ e seja robustamente estável para diferentes pontos de operação do sistema;
- Aplicar otimização por algoritmos genéticos para determinação dos parâmetros do controlador;
- Testar aplicabilidade das soluções em ambiente de simulação com dados de usinas reais presentes no sistema interligado nacional.

2 MODELO DO SISTEMA ELÉTRICO

A usina hidroelétrica transforma a energia cinética do movimento da água em energia elétrica. Apesar da simplicidade do conceito isto envolve várias máquinas e estruturas tornando a usina um sistema grande e complexo.

Sucintamente uma usina hidroelétrica é formada por: barragem, dutos, turbina, gerador, sistema de controle e carga. Assim, a barragem serve para captação da água do rio, esta água é levada através de dutos até a turbina que transforma o momento linear da água em momento angular para o eixo, este é conectado a um gerador onde energia cinética do eixo é transformada em energia elétrica transmitida a cargas. O sistema de controle é dividido em duas partes: o controle de tensão e controle de frequência cada um com seus próprios sensores e atuadores.

Devido a esta complexidade, o modelo pode ser representado de várias formas de acordo com o que se precise estudar. Caso deseje-se estudar o controle de tensão, ou o fluxo de potência, ou o controle de carga e frequência para cada um há um modelo específico com as devidas simplificações.

O presente estudo usa o modelo de carga e frequência para usina, que leva em consideração a influência das variações de carga na frequência do sistema. Mesmo sendo um modelo tão restrito ainda assim há várias não linearidades.

Uma maneira de se estudar este problema é dividir em partes o modelo, cada uma representando individualmente ou um conjunto de componentes da usina. Isto já simplifica o estudo, porém não é o suficiente, pois ainda existem não-linearidades que estão presentes em quase todos os sub-sistemas. Para resolver isto, é linearizado cada bloco do sistema, tornando-o linear por partes, o que simplifica o estudo, porém torna o sistema dependente do ponto de operação.

Na Figura 2.1 apresenta-se um esboço do diagrama de blocos da malha de carga e frequência típica de uma UHE.

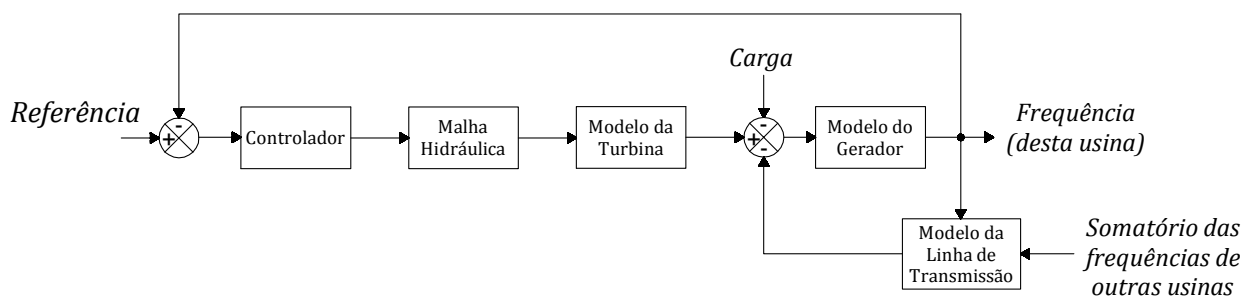


Figura 2.1: Diagrama de blocos simplificado de uma usina.

Portanto, como apresentado na Figura 2.1 os sub-sistemas de uma UHE são: Modelo do Gerador, Modelo da Turbina, Modelo do Controlador, Modelo da Malha Hidráulica, Modelo da Linha de Transmissão. Esta é uma divisão comum na literatura e é descrita em, por exemplo, Kundur (1994); Munoz-Hernandez, Mansoor e Jones (2013), Bevrani (2009), entre outros.

Portanto este capítulo está organizado de forma a explicar o básico do funcionamento de cada bloco. Não é objetivo uma dedução detalhada das equações apresentadas, pois estas poderão ser encontradas nas referências citadas. Assim cada bloco anteriormente citado terá seu subcapítulo, como brevemente será explicado a seguir.

O primeiro modelo representado é o Modelo do Gerador. Refere-se ao modelo da máquina síncrona e da carga. Este modelo é uma peça chave na representação da geração de energia e o modelo dos demais componentes são dependentes dele.

O segundo modelo apresentado é o Modelo da Turbina. Este modelo não se restringe apenas a turbina, mas também os dutos e a barragem em si. Esta é uma parte bastante não linear da usina.

O terceiro modelo apresentado é o Modelo do Controlador. Este modelo possui algumas peculiaridades que o tornam diferente de controladores tradicionais da indústria, que é discutido em seu próprio subcapítulo.

O quarto modelo é o Modelo da Malha Hidráulica. Este é responsável por receber o sinal elétrico que vem do controlador e transformá-lo em uma variação na abertura do distribuidor que regula a entrada de água na turbina. Este modelo varia conforme o tipo de usina e as características dos atuadores presentes na usina.

O quinto modelo é da linha transmissão, este modelo mostra como é o fluxo de potência no caso de uma variação de carga.

Por fim o capítulo é concluído mostrando o modelo com todas as suas partes com algumas considerações finais sobre o funcionamento dele.

2.1 MODELO DO GERADOR

O modelo do gerador é a principal parte em qualquer usina, por ser o sistema que de fato gera energia elétrica.

Uma usina pode ter vários geradores. Entretanto, por simplicidade, ao invés de se considerar cada gerador individualmente, todos podem ser modelados como se fossem uma única máquina. Além disso, o efeito da carga na frequência do gerador também é incluída neste modelo.

A entrada para este modelo é a diferença do torque mecânico gerado pela turbina com o torque elétrico gerado pela potência consumida pela carga. A saída é a própria variação de frequência em relação ao ponto de operação nominal.

Para simplificar o estudo esta parte está dividida em modelo da máquina síncrona, modelo da carga e do gerador.

2.1.1 Modelo da Máquina Síncrona

A equação mecânica da máquina síncrona é bem estabelecida, utilizando algumas equações básicas da física (MUNOZ-HERNANDEZ, MANSOOR e JONES, 2013). A equação propõe que o torque de aceleração do gerador é a diferença entre o torque mecânico da força motriz e o torque eletromagnético gerado pela corrente de carga. Este torque de aceleração, caso não seja nulo, provoca uma variação na velocidade angular do rotor, conforme:

$$T_{acl} = J \frac{d\omega_m}{dt} = T_{mec} - T_{elet} \quad \text{Eq. 2.1}$$

Nesta equação, tem-se: ω_m a velocidade angular do rotor, T_{mec} o torque mecânico da força motriz, hidráulica no caso de uma usina hidroelétrica, T_{elet} o torque eletromagnético, gerado pela corrente de carga, J a constante de inércia do rotor do gerador. Colocando-se a representação por unidade (pu) todas as variáveis conforme descrito por Munoz-Hernandez, Mansoor e Jones (2013), tem-se:

$$2H \frac{d\bar{\omega}}{dt} = \bar{T}_{mec} - \bar{T}_{elet} \quad \text{Eq. 2.2}$$

Nesta equação, tem-se: H a energia cinética das máquinas (a soma de todos os geradores) para certa potência aparente; $\bar{\omega}$ a velocidade angular elétrica, ou frequência, em pu; \bar{T}_{mec} o torque mecânico, em pu, e \bar{T}_{elet} o torque eletromagnético em pu. Como torque é difícil de medir, usualmente substitui-se por potência. Como existe uma relação da física entre potência (P_t), torque (T) e velocidade angular (ω), dada por:

$$P_t = T\omega \quad \text{Eq. 2.3}$$

A notação da Eq. 2.3 para um determinado ponto de operação, após aplicação de séries de Taylor e ignorando os termos maiores que segunda ordem torna-se:

$$\Delta\bar{P} = \bar{\omega}_0\Delta\bar{T} + \bar{T}_0\Delta\bar{\omega} \quad \text{Eq. 2.4}$$

Sendo $\Delta\bar{P}$ a variação de potência, $\bar{\omega}_0$ a velocidade angular elétrica do ponto de operação, \bar{T}_0 o torque do ponto de operação, $\Delta\bar{T}$ variação de torque, $\Delta\bar{\omega}$ variação da velocidade angular elétrica, sendo todos em pu.

Por fim, substituindo a Eq. 2.4 em Eq. 2.2 e considerando que o torque mecânico no ponto de operação, \bar{T}_{mec0} , e o torque eletromagnético no ponto de operação, \bar{T}_{elet0} , são aproximadamente iguais para o ponto de operação escolhido ($\bar{T}_{elet0} \cong \bar{T}_{mec0}$), para o caso do gerador em equilíbrio de consumo e geração, tem-se:

$$\Delta\bar{P}_m - \Delta\bar{P}_L = 2Hs\Delta\bar{\omega} \quad \text{Eq. 2.5}$$

onde $\Delta\bar{P}_m$ é a variação da potência mecânica fornecido pela turbina em pu, $\Delta\bar{P}_L$ é a variação da potência elétrica consumida pela carga.

2.1.2 Carga e Gerador

A carga pode ser representada por um modelo no qual existe uma dependência da frequência. Isto acontece quando o sistema possui cargas que não são puramente resistivas o que é compatível com a realidade do sistema. Usualmente, este modelo é escrito em relação a um ponto de operação do sistema, conforme a seguir:

$$P_e = P_0 + P_0 D_{pf} \Delta f \quad \text{Eq. 2.6}$$

onde, P_e é a potência da Carga, P_0 potência consumida pela carga no ponto de operação, D_{pf} é a sensibilidade de frequência e Δf é a variação da frequência em pu. Aplicando a análise de pequenos sinais na , série de Taylor, e ignorando os termos maiores que segunda ordem, obtém-se:

$$\Delta P_e = \Delta P_0 + D \Delta f \quad \text{Eq. 2.7}$$

onde D é o termo de amortecimento dado por $D = P_0 D_{pf}$, logo proporcional à carga P_0 conectada e ao parâmetro de sensibilidade de frequência D_{pf} . Portanto, D tende a zero se a carga for baixa (MUNOZ-HERNANDEZ, MANSOOR e JONES, 2013).

Substituindo Eq. 2.7 em Eq. 2.5 tem-se o modelo final da carga e gerador tem-se:

$$\Delta \bar{P}_m - \Delta \bar{P}_e = (T_m s + \bar{D}) \Delta \bar{f} \quad \text{Eq. 2.8}$$

onde $\Delta \bar{P}_e$ é a variação de potência consumida pela carga em pu, $\Delta \bar{P}_m$ é a variação da potência mecânica fornecida pelo gerador, T_m é a constante de tempo do gerador, \bar{D} é o termo de amortecimento em pu, e $\Delta \bar{f}$ a variação de frequência em pu. Na Figura 2.2, apresenta-se o diagrama de blocos correspondente à Eq. 2.8.

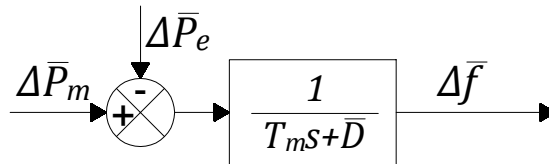


Figura 2.2: Diagrama de Blocos do Gerador e Carga

2.2 MODELO DA TURBINA

A turbina é o equipamento que irá transferir a energia cinética da água em movimento para o eixo do gerador. Entretanto, a quantia de água que chega à turbina depende de características dos dutos, altura de água da barragem e abertura da válvula injetora ou distribuidor. Portanto, o modelo da turbina abrange não apenas a turbina, mas também a barragem, dutos e a válvula injetora, sendo que a entrada é a variação da posição do distribuidor ΔG e a saída é a variação de potência mecânica entregue no eixo do gerador ΔP_m .

Entretanto, este modelo possui não-linearidades que se manifestam por vários motivos, podendo-se citar: a variação de altura d'água da barragem durante a operação, compressibilidade dos dutos, compressibilidade da água, etc. A solução, conforme a literatura (KUNDUR, 1994; MUNOZ-HERNANDEZ, MANSOOR e JONES, 2013) é assumir algumas hipóteses simplificadoras, como por exemplo:

- Considera-se a água incompressível;
- Os dutos são inelásticos, não variando seu tamanho conforme a pressão;

Assim, as equações a seguir descritas são validas apenas considerando estas simplificações.

A equação geral para a potência mecânica em equipamentos hidráulicos é (MUNOZ-HERNANDEZ, MANSOOR e JONES, 2013) (KUNDUR, 1994):

$$P_m = \eta q \rho g_a h \quad \text{Eq. 2.9}$$

assim, P_m é a potência hidráulica disponível, η é a eficiência da turbina, q é o fluxo de massa hidráulica, ρ é a densidade da água, g_a é a aceleração da gravidade, e h é a altura d'água na barragem. Assim simplificando os termos constantes para a turbina:

$$P_m = K_p v h \quad \text{Eq. 2.10}$$

$$K_p = A \eta \rho g_a \quad \text{Eq. 2.11}$$

onde v é a velocidade da água K_p é a constante da turbina, que é composto da área da tubulação A , e demais termos constantes: η , g_a , ρ . Esta equação é não-linear e, portanto, deve ser linearizada por séries de Taylor para um ponto de operação. Após transformar as unidades para pu, a Eq. 2.12 contém o resultado final (KUNDUR, 1994):

$$\Delta \overline{P}_m = \Delta \overline{h} + \Delta \overline{v} \quad \text{Eq. 2.12}$$

sendo $\Delta \overline{P}_m$ a variação da potência mecânica da turbina, $\Delta \overline{v}$ a variação da velocidade da água, em pu, $\Delta \overline{h}$ a variação da altura d'água na barragem, em pu.

O fluxo de água na turbina é controlado pela válvula injetora para regulação da potência injetada na turbina, sendo a sua equação em relação ao ponto de operação dada por:

$$\overline{q} = \overline{G} \sqrt{\overline{h}} \quad \text{Eq. 2.13}$$

sendo \bar{q} fluxo d'água em pu, \bar{h} da altura d'água na barragem em pu, \bar{G} abertura da válvula injetora em pu. Assim, linearizando esta equação por séries de Taylor tem-se:

$$\Delta\bar{q} = \Delta\bar{G} + \Delta\bar{h} \quad \text{Eq. 2.14}$$

onde $\Delta\bar{q}$ é a variação do fluxo d'água em pu, $\Delta\bar{h}$ é a variação da altura d'água na barragem em pu, $\Delta\bar{G}$ é a variação abertura da válvula injetora em pu.

Para continuar, é necessária a equação da aceleração da coluna d'água. Assim, considera-se que a água uma massa solida que obedece a segunda lei de newton:

$$-\Delta h \rho g_a A = \rho A l \frac{dv}{dt} \quad \text{Eq. 2.15}$$

assim, A é a área do duto e l é o comprimento do duto, substituindo os termos por variação em pu dos mesmos:

$$t_w \frac{d\Delta\bar{v}}{dt} = -\Delta\bar{h} \quad \text{Eq. 2.16}$$

onde t_w é conhecido como tempo de aceleração (KUNDUR, 1994; MUNOZ-HERNANDEZ, MANSOOR e JONES, 2013), sendo a sua equação:

$$t_w = \frac{lv_0}{g_a h_0} \quad \text{Eq. 2.17}$$

Importante aqui observar que os parâmetros desta equação não são todos fixos. Em particular, a altura base da coluna d'água, h_0 , e a velocidade base da água, v_0 , são parâmetros que vão depender do ponto de operação.

Substituindo nas equações Eq. 2.12, Eq. 2.14 e Eq. 2.16, e calculando a transformada de Laplace, conforme é descrito por Kundur (1994) obtém-se a equação geral da turbina:

$$\frac{\Delta\bar{P}_m(s)}{\Delta\bar{G}(s)} = \frac{1 - t_w s}{1 + 0,5 t_w s} \quad \text{Eq. 2.18}$$

A representação da influência do ponto de operação é descrita a seguir, conforme sugerido em algumas literaturas (DE MELLO *et al.*, 1992; KUNDUR, 1994). Neste caso, altera-se o tempo de aceleração, t_w , por:

$$G_0 T_w = t_w \quad \text{Eq. 2.19}$$

Assim, pode-se verificar o comportamento para diferentes cargas para a usina, pois T_w passa a representa o valor máximo de t_w , e G_0 passa a representar a posição de abertura da válvula injetora, ou o ponto de operação (DE MELLO *et al.*,

1992). Seu valor varia de 0 a 1, sendo 0 para a válvula totalmente fechada e 1 para a válvula totalmente aberta. Portanto altera-se a equação geral da turbina Eq. 2.18 para:

$$\frac{\Delta \overline{P}_m(s)}{\Delta \overline{G}(s)} = \frac{1 - G_0 T_w s}{1 + 0,5 G_0 T_w s} \quad \text{Eq. 2.20}$$

Portanto, o modelo da equação Eq. 2.20 é linear onde os sinais são válidos para pequenas variações em torno de um ponto de operação específico definido por G_0 .

2.3 CONTROLADOR DE CARGA E FREQUÊNCIA

O objetivo do controlador, em sistemas de potência, é levar o sistema de um estado de fora das condições nominais de operação para o estado normal (BEVRANI, 2009). Assim, para qualquer perturbação na frequência, o controlador deve fazê-la retornar para sua condição nominal. Para melhor compreensão, alguns aspectos que alteram sua malha principal devem ser observados no projeto de um controlador de carga e frequência, sobre a sua construção física e características do sistema.

Fisicamente, o controlador recebe o sinal de velocidade ou frequência dos sensores e após processamento envia um sinal para a malha hidráulica que acionará a válvula injetora. Os primeiros sistemas utilizados para esta finalidade eram exclusivamente mecânicos, eram conhecidos como reguladores centrífugos ou *flyball governor* (VIEIRA, 1984) conforme Figura 2.3. Este método está em desuso em grandes usinas, atualmente utilizam-se controladores eletrônicos digitais (ANDERSON e FOUAD, 2003). A tecnologia *flyballs* ainda é utilizada como sensor de velocidade, perdendo sua função original de controle, e possivelmente logo também será substituída por sensores eletrônicos e magneto-eletrônicos (MUNOZ-HERNANDEZ, MANSOOR e JONES, 2013, p. 30). Estes novos controladores são baseados em Controladores Lógico Programáveis (CLP), possibilitando a utilização de controladores de estrutura PI ou PID (MUNOZ-HERNANDEZ, MANSOOR e JONES, 2013, p. 31).

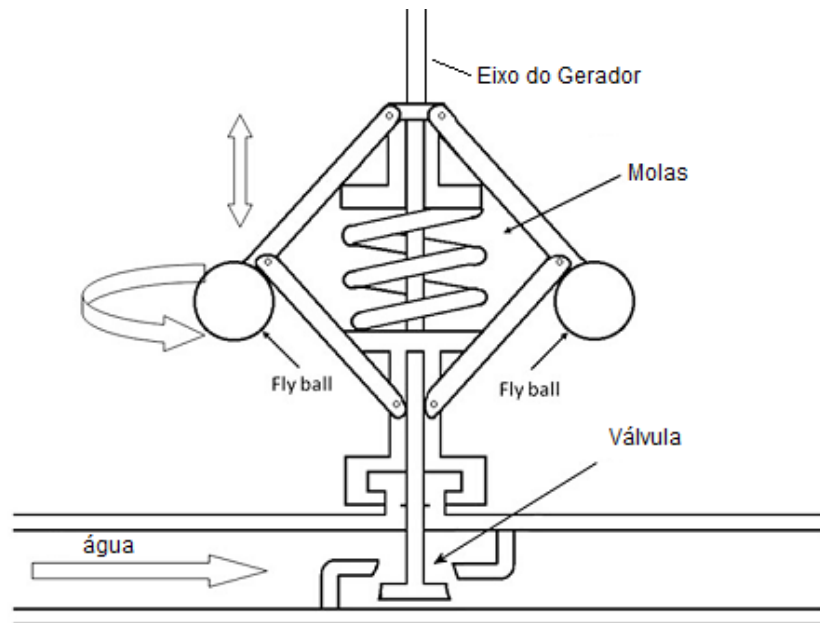


Figura 2.3: Regulador centrífugo
(MUNOZ-HERNANDEZ, MANSOOR e JONES, 2013)

O sistema no qual o controlador está inserido também difere da engenharia de controle tradicional. O principal motivo ocorre que usinas podem ou não operar isoladas (PANDEY, MOHANTY e KISHOR, 2013). Caso a usina seja ou esteja isolada, algo raro, o controlador é único no sistema e será como em sistemas de controle tradicionais onde se tem um controle para o sistema todo. Porém, no caso de usinas não isoladas ou interconectadas, cada usina tem seu próprio controlador, então se tem um sistema com vários controladores operando paralelamente e que possivelmente podem entrar em conflito. Dois tipos de controladores são os mais utilizados: o Controlado Isócrono e Controlador com Queda de Velocidade (MUNOZ-HERNANDEZ, MANSOOR e JONES, 2013).

2.3.1 Controlador Isócrono

O controlador isócrono, que significa velocidade constante, ajusta o sistema sempre para voltar para frequência nominal (KUNDUR, 1994, p. 587). Este controlador funciona satisfatoriamente quando o gerador está suprindo uma carga isolada, onde apenas um gerador supre todo o sistema; isto ocorre, pois este controlador não consegue dividir a carga quando há duas ou mais usinas

interconectadas, fazendo com que uma fique com toda a carga e a outra com muito pouca (MUNOZ-HERNANDEZ, MANSOOR e JONES, 2013, p. 90).

Neste trabalho, este controlador é apresentado pelo fato de ainda estar em uso na prática, além de ser uma das estruturas de controle utilizada no modelo de usina do SEP brasileiro. Isto é possível, pois a UHE analisada tem um controlador do tipo CLP e este consegue trocar o controlador quando está em uma situação em que a usina está isolada ou durante a aceleração da turbina antes de ser conectar ao sistema.

Este controlador é muito semelhante aos encontrados em engenharia de controle tradicional para rejeição de perturbação ou ruído, pois, após ocorrer a perturbação ou ruído, ele faz o sistema voltar a condição original conforme é demonstrado na

Figura 2.4.

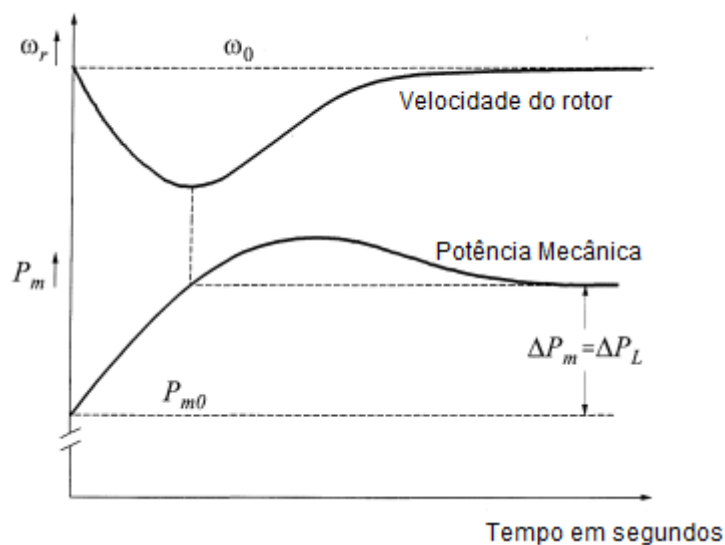


Figura 2.4: Gráfico controlador isócrono

Fonte: (KUNDUR, 1994)

A implementação dele também é igual o usado em engenharia de controle tradicional, onde o sinal de erro entre a referência e a frequência é alimentado para um controlador, normalmente um PI ou PID. A saída do controlador é um sinal para a malha hidráulica acionar a válvula injetora da turbina. Como exemplo a

Figura 2.5.

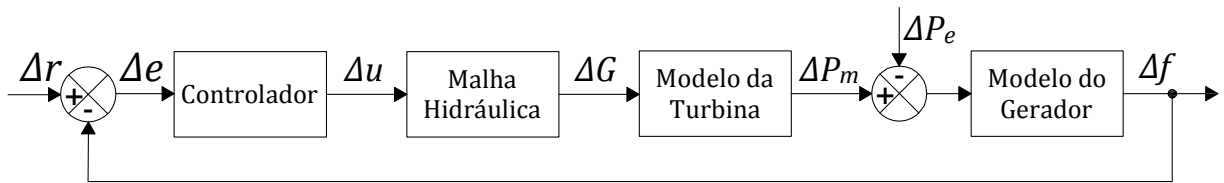


Figura 2.5: Exemplo de controlador isócrono na malha de uma UHE

2.3.2 Controlador com Queda de Velocidade

O controlador isócrono é inaceitável para usinas interconectadas, pois, neste caso, é necessária uma divisão na carga entre as usinas. O controlador isócrono não consegue efetuar esta divisão (EREMIA e SHAHIDEHPOUR, 2013).

Conhecido como controlador com queda de velocidade, este é mais adequado quando há usinas operando em paralelo (KUNDUR, 1994). Funcionalmente, este controlador faz a válvula injetora abrir em uma posição fixa determinada pela relação da frequência do sistema e a referência de frequência, como o gerador não pode operar em frequência diferente do sistema, isto o muda a referência do gerador possibilitando a divisão de carga (MUNOZ-HERNANDEZ, MANSOOR e JONES, 2013, p. 90).

Ao controlador, é adicionada uma realimentação com ganho fixo para obter o efeito descrito (KUNDUR, 1994). Não importa qual seja a estrutura do controlador K, se é um PI ou PID ou qualquer outra função, para qualquer controlador deve-se aplicar uma realimentação de ganho, R , fixo conforme mostrado na Figura 2.6

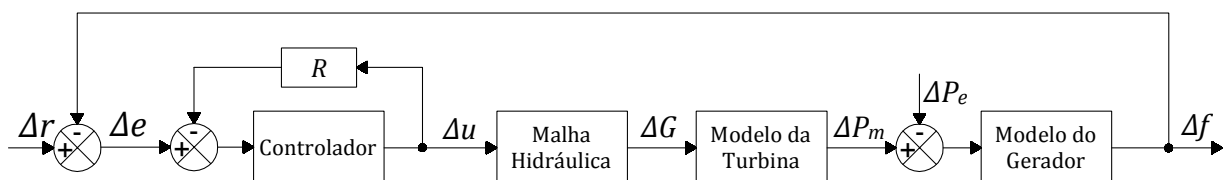


Figura 2.6: Exemplo de controlador com queda de velocidade na malha de uma UHE

O aumento de potência para cada unidade geradora pode ser expresso pela seguinte fórmula (MUNOZ-HERNANDEZ, MANSOOR e JONES, 2013):

$$\Delta \overline{P}_m = -\frac{\Delta \bar{f}}{R} \quad \text{Eq. 2.21}$$

O valor desta realimentação é fixo para todas as usinas do SEP brasileiro, sendo o valor fixado pela ANEEL igual a 0,05; também conhecido como regulação de 5%.

Graficamente essa variação de potência entregue por duas usinas conectadas conforme Eq. 2.21 pode ser expresso pela Figura 2.7 (KUNDUR, 1994).

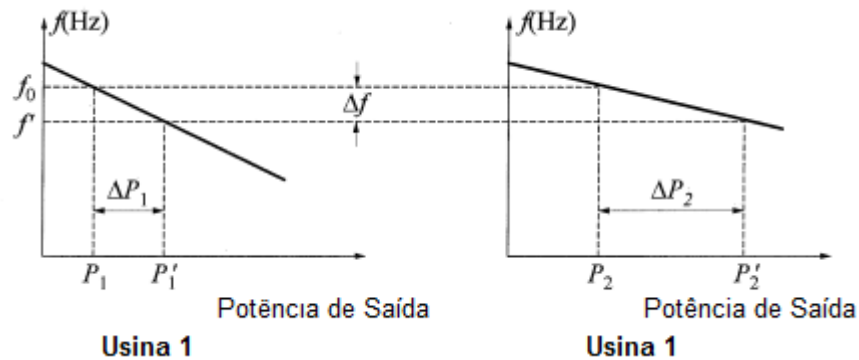


Figura 2.7: Divisão de carga por usinas em paralelo com controlador com queda de velocidade

Assim sempre que houver duas ou mais usinas interconectadas, existe a necessidade de um controlador com queda de velocidade para haver uma adequada divisão de carga. Portanto, para os modelos de UHE analisados, as que estiverem isoladas utilizarão controladores do tipo isócrono, e as que estiverem interconectadas, controladores do tipo queda de velocidade.

2.4 MALHA HIDRÁULICA

Conforme usual, controladores geram um sinal de controle a partir do sinal de referência e saída do sistema. Entretanto, normalmente faz-se necessário também um atuador que irá amplificar este sinal fazendo que o estado do sistema tenha a potência necessária para ir ao ponto de operação desejado. No caso de uma UHE, há um mecanismo que irá mover a abertura da válvula injetora conforme

o sinal do controlador. Há várias possibilidades de como este mecanismo pode ser implementado (EREMIA e SHAHIDEHPOUR, 2013). Nas usinas estudadas neste trabalho, tem-se apenas um atuador eletro-hidráulico, que aqui é chamado de malha hidráulica.

A malha hidráulica usa um sinal de referência elétrico como entrada, que é amplificado por meio de um amplificador eletro-hidráulico para ao final posicionar o servo motor hidráulico. Este sistema é tipicamente empregado em grandes UHE onde óleo em alta pressão é necessário para acionar a válvula injetora (EREMIA e SHAHIDEHPOUR, 2013, p. 177).

Matematicamente a malha hidráulica é descrita, por alguns autores, em sua forma linearizada como um sistema de primeira ou segunda ordem conforme a usina (KUNDUR, 1994; ANDERSON e FOUAD, 2003; BEVRANI, 2009):

$$\frac{\Delta \bar{u}}{\Delta \bar{G}} = \frac{1}{1 + sT_G} \quad \text{Eq. 2.22}$$

$$\frac{\Delta \bar{u}}{\Delta \bar{G}} = \frac{1}{(1 + sT_1)(1 + T_2)} \quad \text{Eq. 2.23}$$

Onde nas Eq. 2.22 e Eq. 2.23 T_G , T_1 , T_2 representam os tempos da malha hidráulica.

Para os casos apresentados na literatura a malha hidráulica é modelada por cada um dos dois métodos. No caso da usina do SEP brasileiro foi escolhida uma modelagem mais realista, para isto foi considerado a modelagem proposta por Donaisky *et al.* (2016) baseada em IEEE STD 1207 (2011). O diagrama de blocos desta modelagem pode ser observado na Figura 2.8.

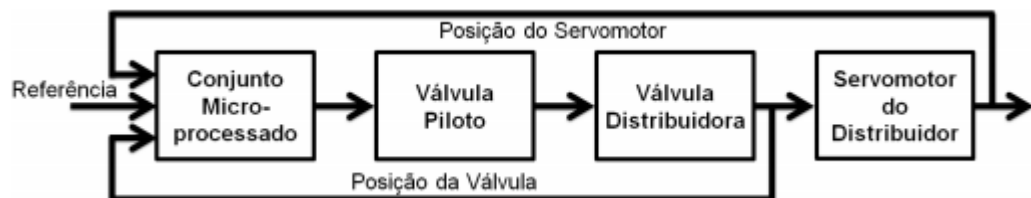


Figura 2.8: Diagrama de blocos da malha hidráulica

Neste caso, a malha hidráulica é representada por quatro partes: conjunto micro-processado, válvula piloto, válvula distribuidora e servomotor do distribuidor (IEEE STD 1207, 2011). De acordo com (DONAISKY *et al.*, 2016), cada um pode ser representado conforme a seguir descrito.

A válvula piloto é representada como um ganho em série com uma não-linearidade do tipo *backlash*, conforme Figura 2.9.

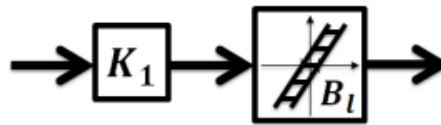


Figura 2.9: Válvula Piloto

A válvula distribuidora é modelada como uma configuração em série composta por um ganho variável e um bloco integral com não-linearidade do tipo saturação, conforme Figura 2.10:

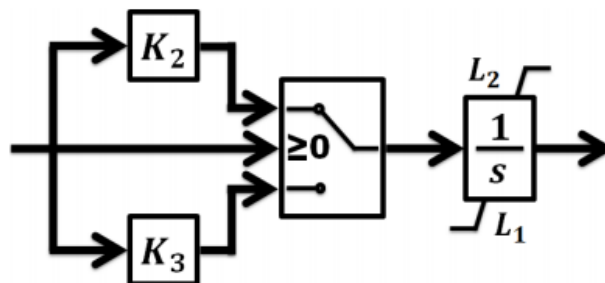


Figura 2.10: Válvula Distribuidora

O servomotor do distribuidor é modelado semelhante a válvula distribuidora acrescido de uma não-linearidade do tipo zona morta conforme se observa na Figura 2.11.

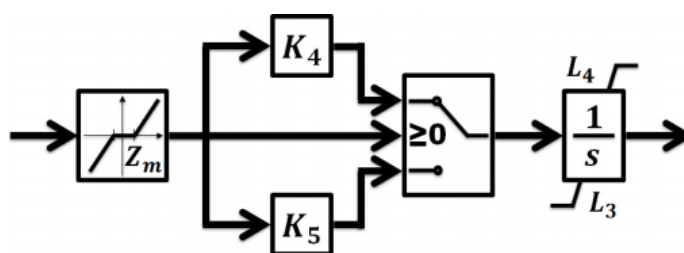


Figura 2.11: Servomotor do Distribuidor

2.5 MODELO DA LINHA DE TRANSMISSÃO

Uma usina dificilmente opera de forma isolada, normalmente está interligada com várias outras usinas do SEP. Esta interligação é feita por meio de linhas de transmissão que permitem um fluxo de potência entre as áreas.

Quando interligadas, diferentes áreas compartilham potência ativa potência reativa, tensão e frequência. Para o presente estudo, não serão abordados problemas associados com tensão ou potência reativa, uma vez que não possuem influência direta na frequência, conforme visto no modelo do gerador.

O modelo descrito, comumente utilizado em diversos trabalhos científicos e descrito por Bevrani (2009), utiliza a equação básica de fluxo de potência entre duas extremidades de uma linha de transmissão puramente indutiva:

$$P_{LT\ 1,2} = \frac{V_1 V_2}{X_{12}} \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad \text{Eq. 2.24}$$

onde $P_{LT\ 1,2}$ é potência que flui de uma extremidade da linha para outra em Watts, V_1 a tensão na extremidade 1 da linha de transmissão em Volts, V_2 a tensão na extremidade 2 da linha de transmissão em Volts, X_{12} a indutância da linha de transmissão em Ohms, δ_1 o ângulo da tensão 1, δ_2 o ângulo da tensão 2. Assim, linearizando o sistema para um ponto de operação considerando fixos os ângulos de tensão (δ_1^0, δ_2^0) , como sendo, respectivamente, o ponto de operação do ângulo de tensão 1 e 2 do sistema e considerando o torque de sincronização do sistema como sendo constante (BEVRANI, 2009), tem-se:

$$T_{12} = \frac{|V_1||V_2|}{X_{12}} \cos(\delta_1^0 - \delta_2^0) \quad \text{Eq. 2.25}$$

sendo T_{12} (V^2/Ω) o torque de sincronização entre 1 e 2 que pode ser considerado fixo, visto a pouca variação na tensão e ângulo durante um transitório. Juntando as Eq. 2.25 e Eq. 2.26 obtém-se:

$$\Delta P_{LT\ 1,2} = T_{12}(\Delta\delta_1 - \Delta\delta_2) \quad \text{Eq. 2.26}$$

assim, $\Delta P_{LT\ 1,2}$ é a variação da potência que flui de 1 para 2, $\Delta\delta_1$ a variação do ângulo de tensão no ponto 1 e $\Delta\delta_2$ a variação do ângulo de tensão no ponto 2. Por fim, considerando a relação entre o ângulo e a frequência, transformando em pu obtém-se o modelo da linha transmissão para o ponto de operação:

$$\overline{\Delta P_{LT\ 1,2}}(s) = \frac{2\pi}{s} T_{12}(\overline{\Delta f_1}(s) - \overline{\Delta f_2}(s)) \quad \text{Eq. 2.27}$$

sendo $\overline{\Delta P_{LT\ 1,2}}$ a variação da potência que flui de 1 para 2 em pu, $\overline{\Delta f_1}$ a variação de frequência no ponto 1 em pu e $\overline{\Delta f_2}$ a variação de frequência no ponto 1 em pu.

O caso de uma usina logo após desinterligação, a UHE tem um controlador com queda de velocidade, porém o modelo da linha de transmissão é suprimido pois a interligação com outras usinas foi suprimida e a usina ficou isolada. Neste caso o diagrama de blocos está conforme Figura 2.15.

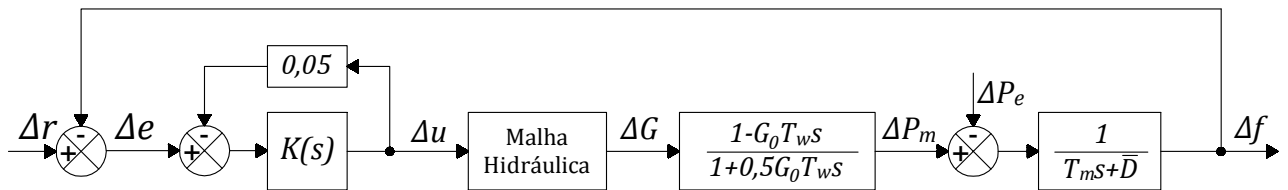


Figura 2.14: Diagrama de blocos de uma UHE em desinterligação em CCF

Cada modelo descrito será utilizado para cada estudo de caso. O modelo da turbina está linearizado em torno de um ponto de operação em todos os casos analisados. O modelo da malha hidráulica em alguns estudos será utilizado o modelo linearizado outros o modelo não-linear apresentado. Nos resultados, Capítulo 5, será apresentado o modelo específico de cada UHE estudado e suas peculiaridades.

3 ALGORITMOS DE CONTROLE

Antes de apresentar a metodologia de controle proposta nesta dissertação, existe a necessidade de apresentar uma fundamentação teórica que serviu de base para a proposta. Assim, este capítulo terá um breve resumo sobre o que já existe na literatura neste contexto.

Duas técnicas bastante distintas são necessárias: o controle robusto e o algoritmo genético. Devido a isto, a literatura de ambos também é distinta. Neste sentido, este capítulo está dividido em duas partes que contém a literatura específica de cada área: 3.1 Controle Robusto e 3.2 Algoritmos Genéticos.

3.1 CONTROLE ROBUSTO

3.1.1 Introdução

Os objetivos do uso da norma \mathcal{H}_∞ é o desempenho nominal e estabilidade robusta (GU, PETKOV e KONSTANTINOV, 2005). Isso se aplica em sistemas que possuem incerteza ou não linearidades severas que possam levar a instabilidade ou baixo desempenho.

O desempenho nominal garantido significa que o sistema terá o desempenho desejado caso o modelo real do sistema seja o modelo nominal. A estabilidade robusta garantida significa que o sistema será estável para qualquer modelo real dentro do espaço de incerteza especificado.

A estabilidade robusta e desempenho nominal podem ser obtidos através de um controlador que minimizará a norma \mathcal{H}_∞ do sistema. Porém, isto requer um diagrama de blocos diferente do visto em sistemas de controle tradicionais, conforme apresentado na Figura 3.1. Onde o bloco M representa a planta a ser controlada, Δ , representa a incerteza do sistema e por fim K representa o

controlador. Assim, ao ser minimizada a norma \mathcal{H}_∞ do sistema será diminuída a influência das entradas w e d sobre as saídas, v e z .

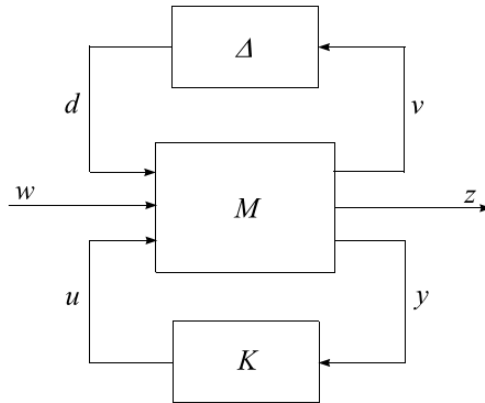


Figura 3.1 Diagrama de Blocos típico de um controlador robusto \mathcal{H}_∞

Fonte: (GU, PETKOV e KONSTANTINOV, 2005)

O projeto do controlador robusto exige que sejam seguidos alguns critérios além de alguns métodos e ferramentas matemáticas. Assim, nas seguintes seções, propõe-se descrever os principais pontos em que se baseia o projeto de um controlador robusto. Não é objetivo apresentar toda a teoria de controle robusto, mas apenas o que interessa a este trabalho.

Portanto, este subcapítulo está dividido em seis partes. Na seção 3.1.1, Introdução, apresenta-se os objetivos e motivos deste subcapítulo. Na seção 3.1.2, Norma \mathcal{H}_∞ , esta é apresentada assim como suas características e método de cálculo rápido. Na seção 3.1.3, Transformação Linear Fraccionária, apresenta-se um método de cálculo do equivalente de malha fechada da Figura 3.1. Na seção 3.1.4, Critérios de Desempenho Nominal e Estabilidade Robusta, são explicados os critérios para estabilidade e desempenho conforme a literatura de controle robusto. Na seção 3.1.5, Modelagem do Sistema, á apresentado o método de modelagem para tornar o sistema conforme o diagrama de blocos da Figura 3.1. Por fim na seção 3.1.6, Conclusão, apresentam-se as conclusões deste subcapítulo em relação ao controle \mathcal{H}_∞ .

3.1.2 Norma \mathcal{H}_∞

O controle \mathcal{H}_∞ é baseado na norma \mathcal{H}_∞ aplicada a sistemas. Ela é bastante conhecida da área de sistemas lineares. Para o caso de um sinal qualquer $x(t)$, as normas podem ser representadas conforme as equações 3.1 a 3.3.

$$\|x(t)\|_1 = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)| dt \quad \text{Eq. 3.1}$$

$$\|x(t)\|_p = \left(\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^p dt \right)^{\frac{1}{p}} \text{ para } 1 < p < \infty \quad \text{Eq. 3.2}$$

$$\|x(t)\|_\infty = \sup_{t \in \mathbb{R}} |x(t)| \quad \text{Eq. 3.3}$$

A norma 1, Eq. 3.1, representa a integral do valor absoluto do sinal. A norma 2, Eq. 3.2, para $p=2$ pode ser interpretado como a energia do sinal sobre um resistor de 1Ω , e norma infinita representa o valor máximo do sinal.

Semelhante ao caso da norma infinita de sinais, a norma infinita serve para sistemas, e é denominada de norma \mathcal{H}_∞ . Ela é o máximo do ganho, ou módulo, de uma função transferência, conforme a Eq. 3.4.

$$\|M(s)\|_\infty = \max_{-\infty < \omega < \infty} |M(j\omega)| \quad \text{Eq. 3.4}$$

Caso seja uma matriz de transferência, faz-se uma varredura por todas as frequências, cada uma desta resulta em uma matriz de números complexos, às quais se calcula a norma 2 para cada uma destas. A norma \mathcal{H}_∞ é valor máximo da norma 2 anteriormente calculada, conforme a Eq. 3.5

$$\|M(s)\|_\infty = \max_{-\infty < \omega < \infty} \|M(j\omega)\|_2 \quad \text{Eq. 3.5}$$

Deve-se observar aqui, que a norma infinito aplicada a matrizes de valores reais ou complexos é diferente desta que está sendo apresentada, pois o método de

calculado é diferente levando a resultados diferentes. No caso de matrizes de valores somam-se os valores de cada linha e o maior total é o valor da norma infinito (CHEN, 1999), já neste caso está ligada a norma 2 de matrizes.

O cálculo da norma \mathcal{H}_∞ de forma direta (ou seja, testando ponto a ponto) pode ser muito lento, além de ter-se uma baixa precisão levando conclusões erradas sobre o sistema. Com este intuito, Bruinsma e Steinbuch (1990) desenvolveram um algoritmo rápido para o cálculo da norma \mathcal{H}_∞ , sendo este utilizado pelo pacote de controle robusto do aplicativo MATLAB conforme descrito em seu respectivo *site* (THE MATHWORKS INC., 2016).

Considere o sistema de espaço de estado G_s , com matrizes (A, B, C, D) , o qual deseja-se calcular a norma \mathcal{H}_∞ :

$$G_s = [A, B, C, D] \quad \text{Eq. 3.6}$$

O algoritmo de Bruinsma e Steinbuch (1990), define a matriz Hamiltoniana H_m a partir das matrizes de G_s , Eq. 3.7.

$$H_m(\gamma) = \begin{bmatrix} A - BR^{-1}D^TC & -\gamma BR_r^{-1}B^T \\ \gamma C^T S^{-1}C & -A^T + C^T DR_r^{-1}B^T \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 3.7}$$

Onde $R_r = (D^T D - \gamma^2 I)$ e $S = (DD^T - \gamma^2 I)$.

Proposição 3.1

Para todo $\omega_p \in \mathbb{R}$,

$j\omega_p$ é um autovalor de $H_m(\gamma_1) \Leftrightarrow \gamma_1$ for um valor singular $G_s = (j\omega_p)$

O algoritmo possui dois passos, sendo o limite inferior da norma \mathcal{H}_∞ , γ_{lb} . A Eq. 3.8, apresenta o valor inicial de γ_{lb} onde σ_{max} representa o máximo valor singular.

$$\gamma_{lb} = \sigma_{max}(D) \quad \text{Eq. 3.8}$$

Em cada iteração, o valor de γ_{lb} é aumentado até que se atinja a precisão desejada.

Normalmente calcula-se o valor singular para uma matriz de transferência para uma frequência. A proposição 3.1 permite ser feito o inverso, calcular a frequência correspondente para um valor singular γ .

Passo 1

Calcula-se os autovalores ω_p para $\gamma = (1 + 2\varepsilon)\gamma_{lb}$, sendo ε o erro relativo desejado, para os autovalores da matriz Hamiltoniana, aplicando o cálculo dos autovalores para a matriz Hamiltoniana $H_m(\gamma_{lb}(i))$.

Passo 2

A partir das frequência m_1 até m_{k-1} com $m_i = \frac{1}{2}(\omega_i + \omega_{i+1})$, calcula-se o valor singular de $G_s(jm_i)$, e a partir disso obtém-se um novo limite inferior.

$$\gamma_{lb}(i + 1) = \max_i \{\sigma_{max}[G_s(jm_i)]\} \quad \text{Eq. 3.9}$$

Para finalizar o valor da norma \mathcal{H}_∞ será conforme a Eq. 3.9.

3.1.3 Transformação Linear Fracionária

A configuração comumente utilizada para o projeto de controladores robustos está representada na Figura 3.1. A matriz transferência equivalente desse sistema é importante para a análise e projeto do controlador desenvolvido neste trabalho

A Transformação Linear Fracionária TLF foi desenvolvida na década de 1950 para análise de circuitos e mais tarde usada no estudo de controle robusto (GU, PETKOV e KONSTANTINOV, 2005). Existem dois tipos: a Transformação Linear Fracionária Superior (TLFS), para o caso da Figura 3.2, e Transformação Linear Fracionária Inferior (TLFI), para o caso da Figura 3.3. Matematicamente será representado $F_u(M, \Delta)$ para a TLFS, e $F_l(M, K)$ para a TLFI, usando como exemplo as Figura 3.2 e Figura 3.3 respectivamente. Assim as Eq. 3.11 e Eq. 3.12 representam respectivamente a TLFI e a TLFS, usando como elementos para M a Eq. 3.10, e I para a matriz identidade.

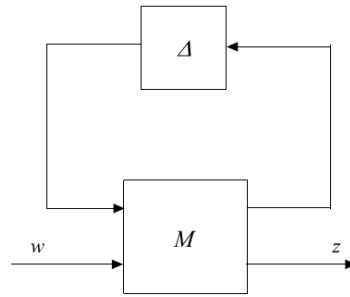


Figura 3.2: Configuração para a TLFS

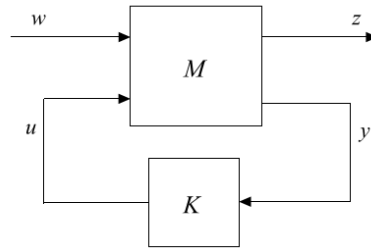


Figura 3.3: Configuração para TLF

$$M(s) = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 3.10}$$

$$F_u(M, \Delta) = M_{22} + M_{21}\Delta(I - M_{11}\Delta)^{-1}M_{12} \quad \text{Eq. 3.11}$$

$$F_l(M, K) = M_{11} + M_{12}K(I - M_{22}K)^{-1}M_{21} \quad \text{Eq. 3.12}$$

3.1.4 Critérios de Desempenho Nominal e Estabilidade Robusta

Projetar-se um controlador que minimiza a norma \mathcal{H}_∞ de um sistema não garante nem desempenho nominal nem estabilidade robusta, para isto é necessário obedecer a certos critérios que irão garantir cada um individualmente.

O método tradicional de minimização da norma \mathcal{H}_∞ está bastante consolidado, sendo descrito, por exemplo, por Zhou, Doyle e Glover (1995), Colaneri et al. (1997), Gu, Petkov e Konstantinov (2005). Pelo fato de não ser o foco principal deste trabalho este não será descrito, entretanto interessa o conhecimento de quais são os critérios a serem cumpridos para que o sistema tenha desempenho nominal e estabilidade robusta.

O desempenho nominal é teoricamente garantido se caso a norma \mathcal{H}_∞ do elemento da matriz correspondente a função, ou matriz, transferência das entradas e saídas nominais do sistema, for menor que um (COLANERI *et al.*, 1997). Porém nem sempre a resposta será adequada mesmo cumprindo este requisito, pois o sistema pode ainda assim apresentar baixo tempo de resposta ou mesmo nem conseguir corrigir o erro em regime permanente. Para isto, é quase obrigatório o uso de funções peso que permitam direcionar o que deve ser minimizado, pois é muito difícil obter-se um resultado satisfatório sem a utilização destas (GU, PETKOV e KONSTANTINOV, 2005).

Antes de definir a estabilidade robusta são necessárias algumas considerações sobre o modelo de um sistema incerto e sobre estabilidade.

Pode ser representado como um sistema incerto, sistemas em que o modelo real não é conhecido, ou muito complexos cujo objetivo é a simplificação, ou mesmo para sistema não-lineares (ZHOU, DOYLE e GLOVER, 1995). Assim define-se um valor máximo e mínimo para algum parâmetro deste sistema, e a isto se atribui como incerteza do modelo, pois o seu valor real pode ser qualquer valor entre o máximo e mínimo. Desta forma, fixa-se o modelo em um modelo nominal e a incerteza sempre é em relação a este modelo (ZHOU, DOYLE e GLOVER, 1995). No exemplo da Figura 3.1, o modelo nominal é obtido quando a incerteza Δ é nula.

A estabilidade, aqui, é dividida em três diferentes tipos: estabilidade interna, estabilidade nominal e estabilidade robusta. Um sistema é considerado internamente estável se para qualquer sinal de entrada com amplitude limitada, o sinal de saída também é limitado. Isto ocorre quando a parte real de todos os polos de um sistema (ou seu equivalente de malha fechada) é negativa (CHEN, 1999; GU, PETKOV e KONSTANTINOV, 2005). A estabilidade nominal aplica-se em sistemas incertos, assim caso o modelo nominal seja internamente estável, o sistema é nominalmente estável. Por fim, um sistema incerto é robustamente estável caso qualquer modelo possível dentro da faixa de variação da incerteza seja internamente estável.

A estabilidade robusta é garantida caso o sistema em malha fechada atenda aos critérios do teorema do ganho pequeno, na Figura 3.4 observa-se um exemplo de um modelo deste tipo.

Teorema do Ganho Pequeno (Adaptado, ZHOU, DOYLE, GLOVER; 1995)

Supondo que $G_2(s)$ é um sistema estável. Então o sistema interconectado mostrado na Figura 3.4 é internamente estável para todo sistema $G_1(s)$ estável tal que:

- a) $\|G_1\|_\infty \leq 1/\gamma_m$ se e somente se $\|G_2\|_\infty < \gamma_m$
- b) $\|G_1\|_\infty < 1/\gamma_m$ se e somente se $\|G_2\|_\infty \leq \gamma_m$

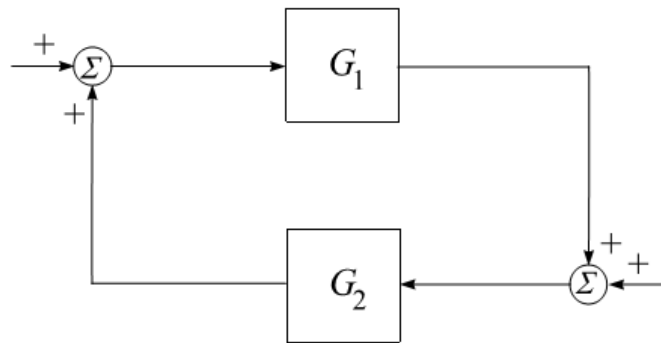


Figura 3.4: Diagrama de blocos exemplo para aplicação do teorema do ganho pequeno

De acordo com Colaneri et al. (1997), este teorema é condição necessária e suficiente, portanto caso os critérios deste teorema não sejam cumpridos, por exemplo $\|G_2\|_\infty \geq \gamma_m$ para o caso a), isto significa que poderá haver um $\|G_1\|_\infty \leq 1/\gamma_m$ que poderá tornar o sistema instável. A forma apresentada do teorema é a base do controle robusto, a partir dele consegue-se verificar a estabilidade robusta de um sistema para o caso de variação dos parâmetros do sistema.

Entretanto é necessária uma adaptação para o caso de um modelo com uma incerteza e um sistema com várias entradas e saídas, considerando que $\gamma_m = 1$. Para o caso de um sistema como a Figura 3.5 e a respectiva matriz transferência de P ,

$$P(s) = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix}, \quad \text{Eq. 3.13}$$

levando-se em consideração o teorema citado, a estabilidade robusta será garantida se:

1. P for estável;
2. $\|P_{11}\|_\infty < 1$; Eq. 3.14
3. $\|\Delta\|_\infty \leq 1$; Eq. 3.15

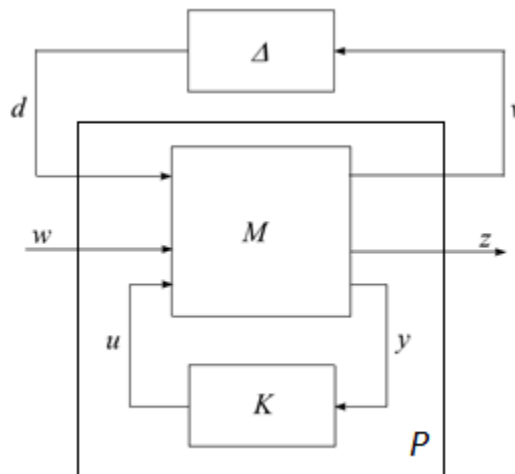


Figura 3.5: Sistema Equivalente P do Sistema

Assim, pode-se dizer que garantir a estabilidade robusta completa depende de dois fatores: estabilidade nominal e a, assim chamada neste trabalho, estabilidade robusta parcial. A estabilidade nominal pode ser calculada pela maneira que se achar mais adequada, como, por exemplo, pelos autovalores da matriz $P(s)$ que devem ser menores que zero. A estabilidade robusta parcial é atendida caso a norma \mathcal{H}_∞ da função, ou matriz, transferência da parte correspondente às entradas e saídas da incerteza, for menor do que um. Além disso, a norma \mathcal{H}_∞ da incerteza, Δ , deve ser menor ou igual a um. Deve se observar que a incerteza, Δ , pode ser tanto uma variável compreendida entre 1 e -1, como pode ser um uma função, ou matriz, transferência.

Os outros elementos da matriz $P(s)$ a literatura não descreve nada a respeito, apesar disso algumas referências sugerem projetar o controlador para minimizar a norma \mathcal{H}_∞ de todos os elementos da matriz $P(s)$ e sempre visar os critérios de estabilidade e desempenho.

3.1.5 Modelagem do Sistema

O uso de técnicas de controle robusto requer que o sistema esteja no formato da figura 3.1. Porém, a maneira de se modelar também depende muito do sistema e objetivos pretendidos.

Os objetivos para desempenho nominal, neste trabalho, são:

- i. Minimizar a influência da perturbação sobre a saída,
- ii. Seguimento de referência.

Ambos podem ser obtidos minimizando a influência da perturbação e referência sobre o erro, que é a diferença entre a saída e a referência

O objetivo para estabilidade robusta tem o objetivo de manter estável o sistema para variações da incerteza, como visto no capítulo 2.

O diagrama de blocos comumente utilizado para sistemas na área de engenharia de controle pode ser observado na Figura 3.6. Entretanto, ele é inadequado para esta técnica de controle, pois não são as entradas e saídas que normalmente objetiva-se minimizar influência. O diagrama de blocos da Figura 3.7 é uma adaptação do diagrama da Figura 3.6, considerando no caso que pretende-se minimizar a influência da referência para o sinal de erro, além disso o bloco do controlador é colocado a parte.

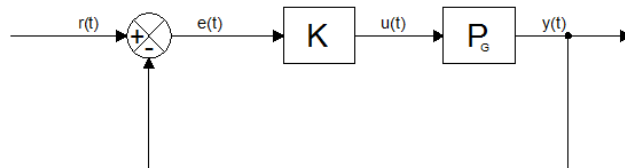


Figura 3.6: Diagrama de Blocos Tradicional de Controle

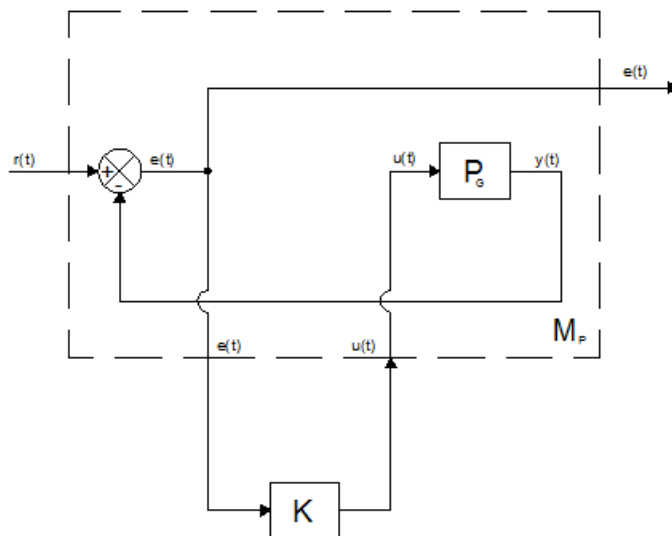


Figura 3.7: Diagrama de Blocos do para modelagem em norma \mathcal{H}_∞

A incerteza deve ser uma variável normalizada que seu módulo seja menor do que 1, para que sua norma \mathcal{H}_∞ seja menor do que 1, além disso, esta ainda precisa conectar-se ao modelo. Isso porque quando for calculada a TLFS do modelo para o valor da incerteza sendo igual a 1 o resultado seja o modelo com sua incerteza no máximo, e da mesma maneira se for -1 o modelo será com a incerteza no mínimo. Assim define-se a incerteza normalizada, Δ , está varia apenas de -1 a 1.

Aqui serão apresentadas duas situações: uma constante incerta e uma constante inversa incerta. Ambas podem fazer parte de um sistema mais complexo servindo de base para incerteza em polos e zeros do sistema. As Figura 3.8 e Figura 3.9, mostram como exemplo dois sistemas, o primeiro com uma constante incerta b e o segundo com uma constante incerta inversa $\frac{1}{d}$. O importante neste ponto é conhecer o limite máximo e mínimo destas constantes pois ambas serão transformadas em incerteza normalizada Δ

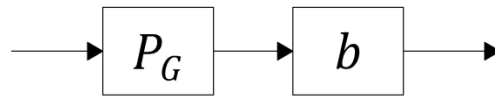


Figura 3.8: Diagrama de blocos: Constante incerta

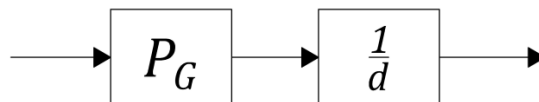


Figura 3.9: Diagrama de Blocos: Constante incerta inversa

De acordo com Gu, Petkov e Konstantinov (2005) se a incerteza for apenas uma constante esta pode ser representada por:

$$b = \bar{b}(1 + p_b \Delta) \quad \text{Eq. 3.16}$$

onde \bar{b} representa a média do valor máximo e mínimo da incerteza, Δ a incerteza normalizada e p_b uma constante de ajuste para que quando $\Delta = 1$, b seja o valor máximo, e para quando $\Delta = -1$, seja o valor mínimo. Sendo assim, a matriz M_b junto com Δ representa a incerteza b no formato da Figura 3.10.

$$M_b = \begin{bmatrix} 0 & \bar{b} \\ -p_b & \bar{b} \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 3.17}$$

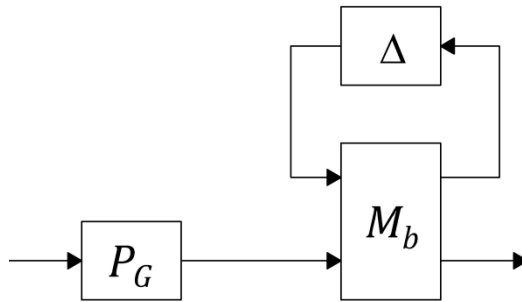


Figura 3.10: Diagrama de blocos da incerteza no formato adequado

De forma análoga é feito para a constante inversa d (GU, PETKOV e KONSTANTINOV, 2005)

$$\frac{1}{d} = \frac{1}{\bar{d}(1 + p_d\Delta)} \quad \text{Eq. 3.18}$$

$$M_d = \begin{bmatrix} -p_d & \frac{1}{\bar{d}} \\ -p_d & \frac{1}{\bar{d}} \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 3.19}$$

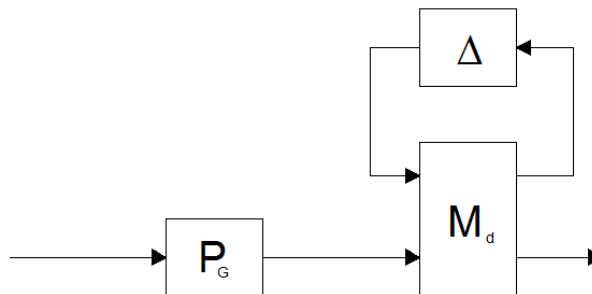


Figura 3.11: Diagrama de blocos da incerteza inversa no formato adequado

3.1.6 Conclusão

Neste subcapítulo foi apresentado o básico da teoria de controle robusto, assim isto reflete apenas uma pequena parcela do que existe na literatura sobre este assunto.

Assim, nesta seção foram apresentadas ferramentas que serão utilizadas no próximo capítulo, sendo esta a sua finalidade, e não apresentar todos os detalhes sobre esta técnica de controle robusto. Na literatura, ainda apresenta-se o método

de cálculo do controlador, este não será abordado aqui, pois não será usado. O método tradicional obtém um controlador da mesma ordem do sistema original (GU, PETKOV e KONSTANTINOV, 2005), entretanto como já foi mostrado por Repredaspong et al. (2003) pode-se obter um controlador PID que minimiza a norma \mathcal{H}_∞ do sistema e ainda possuir uma resposta semelhante. O trabalho de Repredaspong et al. (2003), entretanto não garante estabilidade robusta pelos critérios visto neste subcapítulo.

O método de minimização tradicional também não garante que o controlador terá os critérios mencionados, ele apenas garante que minimizará a norma \mathcal{H}_∞ do sistema como um todo que pode, ou não, atender aos critérios mencionados, inclusive podendo resultar em sistemas instáveis.

Ainda é necessário mencionar que para o bom funcionamento do controlador obtido pela norma \mathcal{H}_∞ , qualquer que seja a utilização de funções peso, pois pode ser muito difícil obter um bom controlador sem função peso (ZHOU, DOYLE e GLOVER, 1995)

Portanto o que foi apresentado serviu de base para o controlador juntamente com o AG que será apresentado na próxima seção deste capítulo.

3.2 ALGORÍTMOS GENÉTICOS

As técnicas de otimização visam buscar qual solução é melhor para um problema. Caso seja um problema simples, a solução, em muitos casos, pode ser meramente analítica, entretanto para problemas complexos a solução analítica pode ser difícil ou mesmo impossível. Neste caso pode ser necessárias técnicas mais sofisticadas.

Uma técnica de otimização pode ser determinística ou heurística (LINDEN, 2006), as técnicas determinísticas, é possível prever seus passos, assim a sua resposta é sempre a mesma, no caso de um técnica heurística esta é aleatória e não há como prever sua resposta. Apesar de ambas as técnicas resolverem vários problemas de aplicação prática em nenhum existe a garantia que a solução encontrada é a melhor, pois pode se tratar de um mínimo local (LINDEN, 2006).

Diferente das técnicas determinísticas, as heurísticas dificilmente apresentam duas soluções iguais (MELANIE, 1999), entretanto se todas as vezes apresentar uma solução com pequena margem de diferença sobre a outra pode ser que seja a melhor solução.

O Algoritmo Genético (AG) é uma técnica heurística que permite realizar uma busca por melhores valores para uma função ou um problema em geral. Baseado na Teoria da Evolução de Charles Darwin, e no conhecimento sobre genética este algoritmo faz uma busca por soluções, para um problema ou função, permitindo que as melhores sejam consideradas mais “aptas” e possam deixar mais “descendentes” e a partir disso a “população” de soluções se aproxime ao máximo da solução definitiva (HAUPT e HAUPT, 2004).

3.2.1 Funcionamento do Algoritmo

O funcionamento básico de um AG envolve em uma sequência de passos que devem ser seguidos e repetidos até obter-se a solução pretendida ou até chegar-se o mais próximo possível dessa. Antes que seja possível entender os seus passos é necessário entender algumas definições importantes.

O fundamental antes de tudo é a *Função Objetivo*, esta é a equação, fórmula ou problema que se quer resolver com o auxílio do AG. Normalmente ela possui uma quantidade de entradas de valores e uma saída. A saída da função objetivo define quão boa é a solução, que pode ser para maximizar ou minimizar o valor de uma dada função, sendo o último o utilizado neste trabalho.

O *indivíduo* ou *cromossomo* é cada uma das soluções para a função objetivo, ele é representado pelos valores entrada da função objetivo. Por exemplo, se uma função objetivo tem duas entradas de valores o indivíduo será representado por dois valores. Cada valor atribuído ao indivíduo é um *gene*, ele será passado para as gerações futuras. Em última análise, o indivíduo é formado por genes que eles são formados. No exemplo anterior, cada indivíduo teria dois genes.

A *população* é o número total de indivíduos, esta é de livre escolha para uma simulação, entretanto, quanto maior a população, mais recursos computacionais serão consumidos, não existe um valor apropriado a qual deva ser escolhido depende da avaliação de quem implementa a técnica.

A cada iteração do AG, é gerada uma nova população de indivíduos, cada população é chamada de *Geração*, elas são formadas pela *Reprodução* das gerações anteriores, como isto procede será explicado adiante, assim como a *mutação*.

A partir desse conhecimento, os seguintes passos podem ser descritos para um algoritmo genético básico (LINDEN, 2006).

1. Inicie a população de indivíduos;
2. Avalie cada indivíduo da população;
3. Selecione pais para próxima geração;
4. Aplique os operadores de recombinação e mutação a estes pais de forma a gerar os indivíduos da nova geração;
5. Apague parte dos velhos membros da população;
6. Avalie todos os novos indivíduos da população;
7. Se o tempo acabou, ou o melhor indivíduo satisfaz os requerimentos e desempenho, fim, caso contrário, volte para o passo 2.

Cada passo do AG será descrito conforme o que foi utilizado para o presente trabalho. Assim os próximos subcapítulos são: População, Próximas Gerações, Método de Seleção, Critérios de Finalização. Por fim, uma conclusão para este subcapítulo e considerações sobre a implementação utilizada.

3.2.2 População

Decisões sobre a população precisam feitas antes de se iniciar qualquer busca por AG. Entre estas estão: o seu tamanho, como será formada inicialmente, como será formada entre as gerações, etc.

Tratando na ordem dos passos descritos na seção anterior, a população inicial e conseguinte tamanho da população são dados importantes. O tamanho da população, como já dito, depende de escolha de quem implementa a técnica. Algumas literaturas falam em valores como algo em torno de 100 indivíduos (LINDEN, 2006). Há, também, trabalhos que sugerem quantidades de indivíduos de acordo características do sistema (EIBEN, HINTERDING e MICHALEWICZ, 1999).

Ainda assim, a escolha da população é uma opção de quem implementa a técnica (HAUPT e HAUPT, 2004).

Para formar a população inicial deve-se antes analisar os genes que cada indivíduo será formado (HAUPT e HAUPT, 2004). No caso trabalhado cada gene é um número real, mas como a computação é limitada por valores máximos e mínimos devido ao número de bits, sempre haverá um valor máximo e mínimo que um gene pode assumir. Ao gerar-se a população inicial, escolhe-se os indivíduos de forma aleatória, assim atribui-se um máximo e mínimo para cada gene e aleatoriamente cada gene de cada indivíduo é gerado e, por conseguinte a população inteira.

3.2.3 Próximas Gerações

A parte mais importante de um algoritmo genético é como são formadas as próximas gerações. A próxima geração pode ser formada por indivíduos filhos (crossover), indivíduos por mutação e por indivíduos da geração anterior (elitismo) (LINDEN, 2006).

Pode-se dizer que a principal característica do AG, que o distingue de outras técnicas, é o crossover (MELANIE, 1999). Este método consiste em usar dois indivíduos da geração anterior e misturar seus genes, existem algumas maneiras de ser feito isto, Linden (2006) relata duas delas. A primeira seria uma troca de genes dois para os filhos pode ser escolhido um ponto de corte (*crossover simples*) ou escolhido pontos de corte aleatórios (*crossover discreto*). Outra, conhecida por *crossover flat*, este método em vez de haver uma troca os genes dos pais são definidos como pontos de máximo e mínimo, os genes dos filhos serão um número aleatório entre o máximo e mínimo dos pais, isto pode gerar filhos bem diferentes dos pais. Para qualquer dos casos apresentados tem-se, pelo menos, dois pais que irão gerar dois filhos, assim a população nunca aumenta nem diminui.

A outra operação de indivíduos é a mutação, ela possibilita a formação de indivíduos com genes diferentes dos que formaram a população inicial, diferente do *crossover* esta operação ocorre apenas para um indivíduo pai gerando apenas um indivíduo filho (LINDEN, 2006; THE MATHWORKS INC., 2016). De acordo com Melanie (1999), a mutação é o principal meio de inovação no AG. Entre as maneiras possíveis de se executar esta operação uma delas, segundo Linden (2006), é a

mutação aleatória, nela um gene é aleatoriamente escolhido e é modificado para um valor aleatoriamente escolhido entre uma gama de valores com máximo e mínimo pré-determinados.

Um método utilizado para a *mutação* e *crossover* é uma parte dos indivíduos passam pelo *crossover* e outra passa pela *mutação*, assim se um indivíduo tem a probabilidade p_c de sofrer *crossover* então ele terá a probabilidade $1-p_c$ de sofrer *mutação* (LINDEN, 2006).

Além do *crossover* e *mutação* a próxima geração pode ser formada por indivíduos das gerações anteriores, isso é chamado de elitismo. Este é um conceito introduzido pela primeira vez por De Jong (1975), em adição a outros métodos de seleção, ele força o AG a manter uma parte dos indivíduos da geração anterior na próxima geração. Pois eles podem não serem selecionados para o *crossover* ou destruídos na *mutação*. Muitos autores perceberam uma melhoria significativa nos seus algoritmos com a introdução do elitismo (MELANIE, 1999). Assim é escolhida um percentual da população para continuar na próxima geração.

3.2.4 Métodos de Seleção

Selecionar quais indivíduos passarão pelo *crossover* ou *mutação* é um passo importante dentro do AG. Pois deve-se permitir que os melhores indivíduos sejam mais suscetíveis a terem mais filhos, porém se os médios e os piores não tiverem nenhum pode-se perder variabilidade genéticas e assim não se obter um bom resultado (HAUPT, 2006).

Na literatura consultada verificou-se que há muitos métodos disponíveis, um deles, bastante utilizado conforme Linden (2006) e utilizado no software MATLAB, é o *método da roleta viciada*. Este método garante que os indivíduos mais aptos, que obtiveram melhor desempenho na minimização da função, tenham prioridade sobre os menos aptos e ainda garante que estes últimos ainda tenham alguma probabilidade de se reproduzirem proporcional ao seu desempenho. O método funciona criando uma roleta virtual no qual cada indivíduo recebe um pedaço proporcional a sua avaliação na função objetivo, depois a roleta é girada e é escolhido aleatoriamente um indivíduo por vez para ser pai.

A literatura ainda descreve ainda outros métodos como *método do torneio*, *método de Amostragem Estocástica Uniforme*, *Seleção por Ranking*, *Seleção Trancada*, entre outros. Estes não serão descritos por dois motivos, o melhor para o problema analisado foi o método da roleta viciada, e segundo, este é o mais tradicional (LINDEN, 2006).

3.2.5 Critério de Finalização

O AG, diferente de outros métodos, precisa ser definido um critério quando deve-se finalizar. Como não se sabe até aonde o AG conseguirá chegar em sua simulação, podem ser definidos vários critérios e qual for atingido primeiro finalizará o algoritmo.

Há quatro possibilidades para finalizar a execução de um algoritmo genético (HAUPT e HAUPT, 2004):

1. Resposta Correta: Pode parecer muito simples. Verifique se o melhor indivíduo possui a resposta correta ou uma resposta aceitável para o problema. Caso seja, então pare.
2. Nenhum aprimoramento: Se o AG continuar com o mesmo melhor indivíduo por uma determinada quantidade de iterações, então melhor parar. Tanto o algoritmo pode ter encontrado a melhor solução ou ele travou em um mínimo local. Deve-se ser cuidadoso. Pode acontecer que a solução encontrada ainda não seja a melhor, e a qualquer momento um indivíduo sortudo consiga chegar nela por *crossover* ou *mutação*.
3. Por estatística: Se a média ou desvio padrão do resultado da população chegue em certo nível, então pare o algoritmo. Isto significa que o valor não mudará mais.
4. Numero de iterações: Se o algoritmo não parar por alguma das razões anteriores, então limita-se o número de iterações. Pois pode-se continuar para sempre sem parar.

Mesmo aplicando todos estes critérios e estando correto o algoritmo, este pode não chegar a uma boa solução e pode ser necessário mudar as estratégias de população inicial, seleção, mutação, *crossover*, elitismo, etc. Ainda assim, pode-se não chegar ao mínimo global, porém as vezes é suficiente um mínimo local que pelo menos seja melhor do que a solução existente (HAUPT e HAUPT, 2004).

3.2.6 Conclusão

Resumindo a técnica de AG é uma consagrada técnica de otimização ela permite resolver uma grande quantidade de problemas (MELANIE, 1999). Deve-se observar, no entanto, que este subcapítulo apenas apresentou um breve resumo do que existe em AG.

O objetivo deste subcapítulo foi apresentar quais ferramentas serão usadas no próximo capítulo e não detalhar o AG. Por exemplo, tradicionalmente, segundo Lindem (2006), utiliza-se uma representação binária para o AG, isto pode ser visto também nos livros de Haupt (2006), Melanie (1999), além de outros artigos na área. Isto não foi citado neste subcapítulo, pois a representação usada foi por número de ponto flutuante por acredita-se ser mais adequando a um problema tipicamente contínuo. Também existem outras muitas técnicas de mutação, população, seleção e *crossover*, que são tradicionais e ficaram de fora por não serem as utilizadas neste trabalho.

O aplicativo utilizado, o MATLAB, para simulação também teve influência em algumas escolhas, porém optou-se por escolher sempre as estratégias, mutação, *crossover*, seleção, que estivessem mais sintonizadas com a literatura vigente. O objetivo disto é possibilitar que os resultados obtidos possam ser mais facilmente reproduzidos em outros pacotes de programação, além de dar uma fundamentação teórica mais consistente ao proposto.

Por fim pode-se observar que o AG é uma técnica consistente e que possui uma vasta bibliografia com muitas variações e possibilidades diferentes de implementações, devendo, então, ser cuidadosamente escolhida para resolver o problema em questão.

4 TÉCNICA DE CONTROLE

Neste capítulo será abordada a técnica de controle proposta neste trabalho. Será então utilizada a teoria vista no Capítulo 3 aplicando os conceitos de controle robusto e AG, para obter um controlador PID que garanta estabilidade para todos os pontos de operação. Para isto além do algoritmo de projeto do controlador precisa-se fazer adaptações no modelo de UHE descrito no Capítulo 2.

4.1 INTRODUÇÃO

Como visto no Capítulo 1 o problema de controle de carga e frequência é problema ainda em aberto com muitas soluções possíveis. O motivo de haver tantas soluções fica claro no Capítulo 2 onde é apresentado o modelo básico da usina hidroelétrica e é possível ver sua complexidade e não linearidade em vários pontos. Na introdução, foi visto que uma solução seria a utilização de técnicas de controle robusto que possibilitam o controlador lidar com essas não linearidades e incertezas.

Neste capítulo pretende-se apresentar o método escolhido para trabalhar com as não linearidades do sistema. Os livros sobre controle robusto mostram os critérios de estabilidade robusta que devem ser atendidos pelo sistema com o controlador, porém não é explicado um meio analítico de como chegar a este resultado em nenhuma das referências investigadas, (ZHOU, DOYLE e GLOVER, 1995; COLANERI *et al.*, 1997; GU, PETKOV e KONSTANTINOV, 2005; TSAI e GU, 2014), portanto, até o momento deste trabalho (2016) não se encontrou nenhuma referência que pudesse fazê-lo.

O artigo de Tan e Xu (2009) mostra a importância que esses critérios sejam atingidos, no qual ele compara controladores que não atingem este critério e mostra que caso haja dinâmicas, ou incertezas, não conhecidas pode levá-lo a instabilidade, isto pode ocorrer, de acordo com o artigo, na dinâmica da turbina. Por fim, no artigo de Rerkpreedapong, Hasanovic e Feliachi (2003), apresenta-se uma maneira de minimizar a norma \mathcal{H}_∞ , usando AG para um controlador PID, porém deve ficar claro que ele não atinge, e nem tinha como objetivo, atender os critérios de estabilidade

robusta, pois seu objetivo era apenas mostrar que é possível obter um controlador PID com mesmo desempenho que quando comparado a norma \mathcal{H}_∞ tradicional.

Tendo como objetivo encontrar um controlador simples como um PID e robusto como descrito pela literatura de controle robusto, este é objetivo desse capítulo. Assim comprovada a importância descrita por Tan e Xu (2009), a técnica apresentada por Rerkpreedapong, Hasanovic e Feliachi (2003), e os critérios de controle robusto amplamente conhecidos na literatura, isto é possível como será apresentado.

Nos capítulos anteriores foi revisto o que já foi apresentado na literatura sem praticamente nenhuma alteração. Entretanto algumas coisas precisam ser ajustadas para funcionarem corretamente assim este capítulo apresenta poucas referências e a maior parte do que é explicado foi desenvolvido para este trabalho. Portanto este capítulo é dividido em: 4.2 Adaptação do Modelo da UHE, onde são apresentadas as alterações no modelo do Capítulo 2, 4.3 Projeto do Controlador, onde é apresentado a técnica de controle e por fim 4.4 Conclusões, é apresentados as conclusões.

4.2 ADAPTAÇÃO DO MODELO DA UHE

O diagrama blocos e o modelo para controle de carga e frequência para usinas hidroelétricas, Figura 2.12, Figura 2.13 ou Figura 2.14, é inadequado para a aplicação dos critérios de estabilidade robusta (teorema do ganho pequeno, subcapítulo 3.1.4). Assim, são necessários alguns ajustes para que fique com a incerteza separada do resto do sistema, Figura 3.1.

O subcapítulo 3.1.5 apresenta o método sugerido pela literatura pesquisada de como fazer estes ajustes. Assim, o objetivo dessa subseção é mostrar a adaptação desta solução para o uso em controle de carga e frequência de usinas hidroelétricas.

Portanto, será apresentado apenas o modelo da turbina com a incerteza, que será inserido no modelo da usina em cada caso, quando analisado.

4.2.1 Incerteza no Modelo da Usina Hidroelétrica: Turbina

O modelo da usina é não-linear, como visto no Capítulo 2, normalmente sendo linearizado em torno de um ponto de operação. Uma solução é considerar essa não linearidade como uma incerteza na qual é possível tratar com controle robusto. No caso da usina hidroelétrica a turbina possui uma não-linearidade bastante expressiva em relação a outras partes do modelo, de forma que há uma mudança significativa no modelo cada vez que é mudado seu ponto de operação. Este, portanto, é considerado, para o presente trabalho, como sendo a incerteza no modelo.

Antes de aplicar os conceitos vistos na literatura são necessários alguns ajustes no modelo da turbina para que este fique adequado. Neste modelo, a Eq. 2.20, tem como ponto de operação G_o , que aparece duas vezes na equação. Porém para que fique adequado ao projeto do controlador é necessário que esta apareça apenas uma vez na equação. Para fazer isto, a Eq. 4.1 mostra uma igualdade matemática para polinômios que pode ser facilmente obtida por divisão de polinômios:

$$\frac{a_1s + 1}{a_2s + 1} = \frac{1 - \frac{a_1}{a_2}}{a_2s + 1} + \frac{a_1}{a_2} \quad \text{Eq. 4.1}$$

assim aplicando a igualdade da Eq. 4.1 para a Eq. 2.14 obtém-se a Eq. 4.2, e simplificando obtém-se a Eq. 4.3:

$$\frac{\Delta \bar{P}_{\bar{m}}(s)}{\Delta \bar{G}(s)} = \frac{1 - G_o T_w s}{1 + 0,5 G_o T_w s} = \frac{1 - \frac{G_o T_w}{0,5 T_w}}{0,5 G_o T_w s + 1} + \frac{-G_o T_w}{0,5 G_o T_w} \quad \text{Eq. 4.2}$$

$$\frac{\Delta \bar{P}_{\bar{m}}(s)}{\Delta \bar{G}(s)} = \frac{3}{0,5 G_o T_w s + 1} - 2 \quad \text{Eq. 4.3}$$

Assim, a Eq. 4.3 mostra a variável aparecendo apenas uma vez na função transferência. Isto ainda não é o suficiente para aplicar-se o método descrito no subcapítulo 3.1.5. Para isto, primeiro separa-se o ganho constante da parte dinâmica da função transferência da Eq. 4.3, conforme se observa no diagrama de blocos na Figura 4.1 onde se considera que $\Delta \bar{P}_{\bar{m}}$ é formado por duas parcelas $\Delta \bar{P}_{m1}$ e $\Delta \bar{P}_{m2}$.

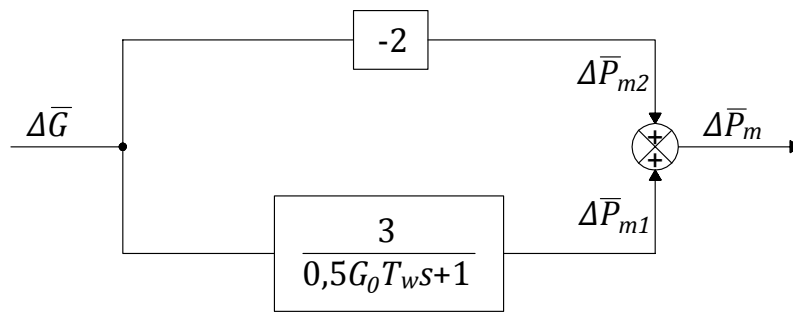


Figura 4.1: Diagrama de blocos da Eq. 4.3

Considerando-se apenas a parte dinâmica deste sistema a Eq. 4.4 mostra apenas esta parcela:

$$\frac{\Delta\bar{P}_{m1}(s)}{\Delta\bar{G}(s)} = \frac{3}{0,5G_oT_ws + 1} \quad \text{Eq. 4.4}$$

em seguida aplica-se a transformada inversa de Laplace na Eq. 4.4:

$$\frac{\Delta\dot{\bar{P}}_{m1}G_oT_w0,5 + \Delta\bar{P}_{m1}}{3} = \Delta\bar{G} \quad \text{Eq. 4.5}$$

em seguida reagrupa-se os termos da Eq. 4.5 onde é obtida a Eq. 4.6 (GU, PETKOV e KONSTANTINOV, 2005)

$$\Delta\dot{\bar{P}}_{m1} = \frac{1}{\frac{G_oT_w}{6}} \left(\Delta\bar{G} - \frac{\Delta\bar{P}_{m1}}{3} \right) \quad \text{Eq. 4.6}$$

baseado na Eq. 4.6, faz-se o diagrama de blocos da Figura 4.2

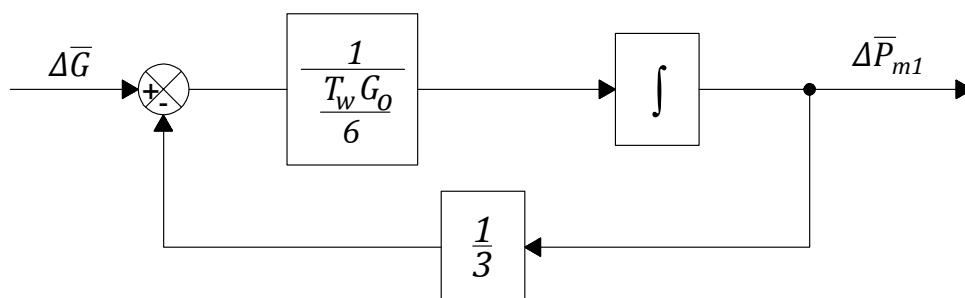


Figura 4.2: Diagrama de blocos parcial da turbina conforme Eq. 4.6

Assim considerando $\frac{G_oT_w}{6}$ como uma incerteza inversa conforme foi apresentado no Subcapítulo 3.1.5, então substituindo d por essa incerteza na Eq. 3.18 obtém-se a Eq. 4.7:

$$\frac{1}{\frac{G_o T_w}{6}} = \frac{1}{\frac{\widetilde{G}_o T_w}{6} (1 + p_{T_w} \Delta_{T_w})} \quad \text{Eq. 4.7}$$

onde \widetilde{G}_o é o valor médio de G_o , p_{T_w} é uma constante de ajuste da incerteza e Δ_{T_w} é a incerteza normalizada tal que $-1 \leq \Delta_{T_w} \leq 1$. Assim a partir da Eq. 3.19 obtém-se a matriz M_{T_w} :

$$M_{T_w} = \begin{bmatrix} -p_{T_w} & \frac{6}{\widetilde{G}_o T_w} \\ -p_{T_w} & \frac{6}{\widetilde{G}_o T_w} \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 4.8}$$

substituindo esta matriz no diagrama de blocos da Figura 4.2 resulta no diagrama de blocos da Figura 4.3

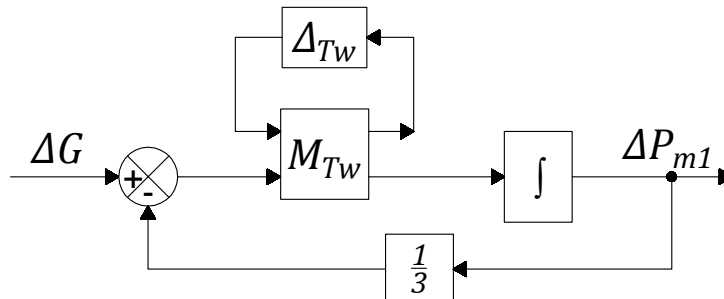


Figura 4.3: Diagrama de Blocos com incerteza

Substituindo o diagrama de blocos da Figura 4.3 na Figura 4.1 resulta no diagrama de blocos da Figura 4.4

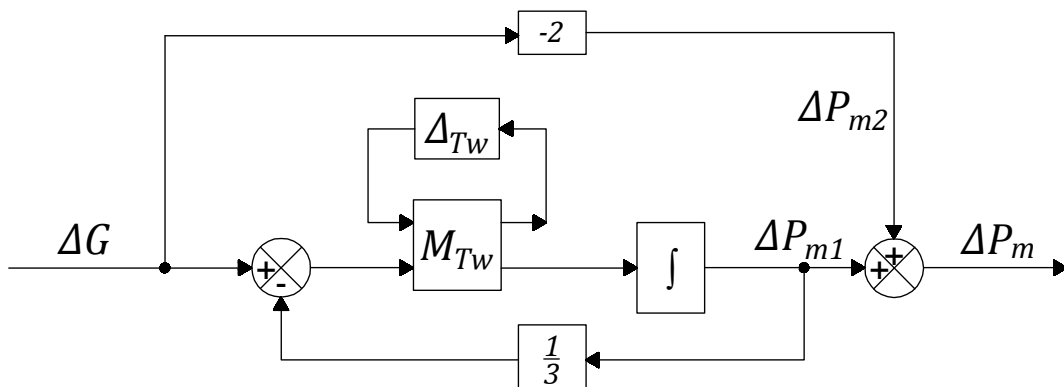


Figura 4.4: Modelo da turbina com incerteza separada

Simplificando o diagrama de blocos em um sistema de espaço de estados obtém-se o sistema de espaço de estados com incerteza para a turbina como na Figura 4.5 e Eq. 4.9:

$$\begin{cases} \dot{x} = \left[-\frac{2}{\overline{G}_o} \right] x + \begin{bmatrix} -p_{Tw} & \frac{6}{\overline{G}_o} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\Delta \\ \Delta \overline{G} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} y_\Delta \\ \Delta \overline{P}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{2}{\overline{G}_o} \\ 1 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} -p_{Tw} & \frac{6}{\overline{G}_o} \\ 0 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\Delta \\ \Delta \overline{G} \end{bmatrix} \end{cases} \quad \text{Eq. 4.9}$$

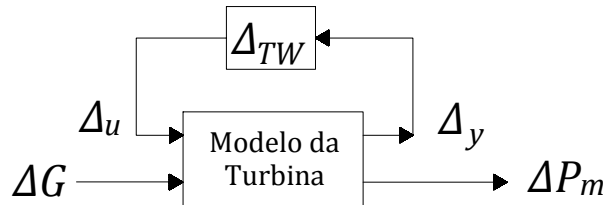


Figura 4.5: Diagrama de Blocos Final Turbina com Incerteza

Assim o objetivo deste equacionamento foi concentrar a incerteza da turbina em Δ_{Tw} , que varia de -1 a 1, isto possibilita a aplicação dos critérios de estabilidade robusta vistos no subcapítulo 3.1.4, caso Δ_{Tw} varie além destes valores não há nenhuma garantia da estabilidade robusta. Outro fato que deve ser observado é que caso $\Delta_{Tw} = -1$ isto significa que a incerteza está no mínimo, ou seja G_o é o menor valor esperado, se $\Delta_{Tw} = 1$ a incerteza está no máximo, e se $\Delta_{Tw} = 0$, a incerteza está no valor médio, ou seja, $G_o = \widetilde{G}_o$.

4.2.2 Modelo da UHE

O modelo final da UHE para o projeto do controlador é resultado de algumas alterações feitas ao modelo apresentado no Capítulo 2. Essas alterações são: a substituição do modelo da turbina e a alteração das entradas e saídas do sistema, tornando, assim, o modelo semelhante ao que foi apresentado na seção 3.1.5.

O modelo da turbina é alterado para o que foi apresentado seção anterior, subcapítulo 4.1.1, substituindo o modelo tradicional, apresentado no subcapítulo 2.2. Assim, o modelo do sistema tem o ponto de operação tratado como incerteza e separado do resto do sistema. Isso é importante para a avaliação da estabilidade robusta

As entradas e saídas também são alteradas, tendo-se quatro entradas: entrada da incerteza, variação da referência de frequência, variação da carga, sinal

de controle; e três saídas: saída da incerteza, e duas saídas de variação do erro, uma para o controlador e outra para a função peso. Essa alteração permite selecionar um controlador que diminua a influência das entradas nas saídas. Portanto deseja-se neste caso que a influência da variação de carga e da variação de referência seja o mínimo na variação do erro. Neste caso fica claro o porquê a variação na frequência não foi considerada como saída, pois se assim fosse a variação da referência não influenciaria na variação de frequência, algo indesejável.

Observa-se na Figura 4.6 todas as modificações sugeridas no parágrafo anterior para o modelo da usina onde M_u representa o sistema da usina no formato indicado da figura.

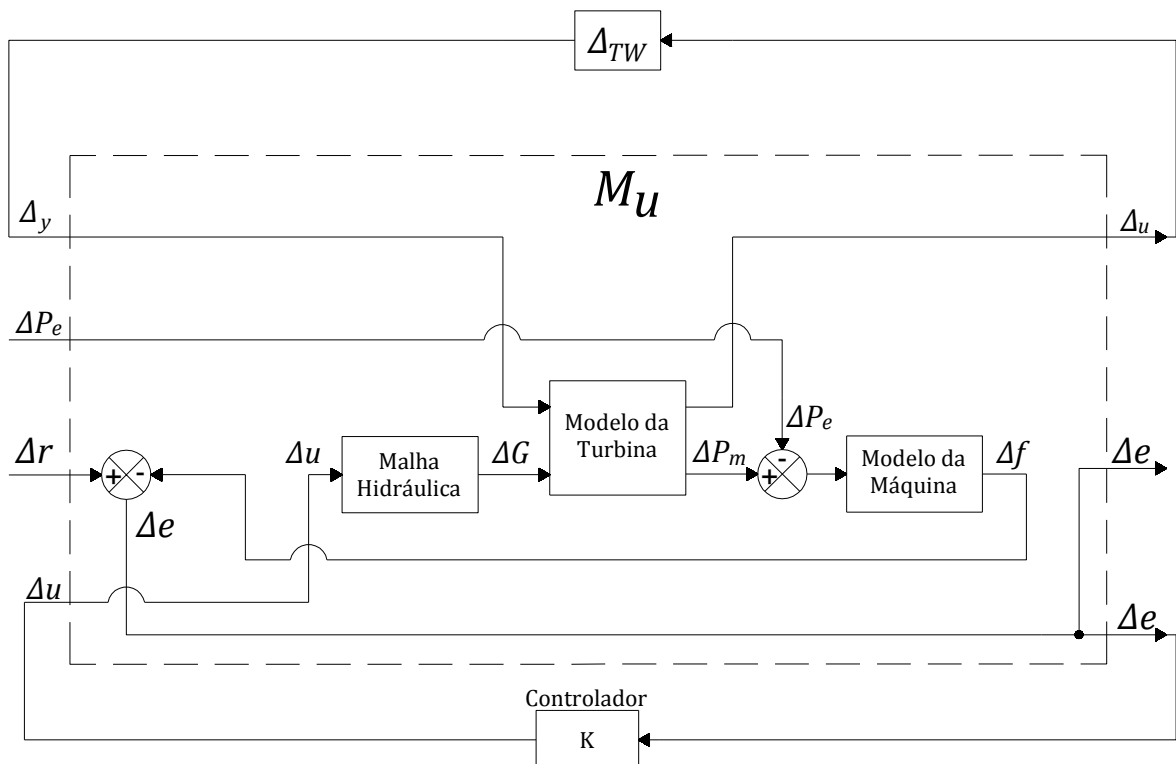


Figura 4.6 Diagrama de blocos da UHE adaptado para o projeto do controlador

4.3 PROJETO DO CONTROLADOR

O controlador proposto tem como principais características ser um PID que garante estabilidade robusta. Assim, utilizando-se as seguintes ferramentas já apresentadas:

- Teorema do ganho pequeno, como teste de estabilidade robusta,
- Minimização da norma \mathcal{H}_∞ , para desempenho nominal
- Algoritmo genético, para seleção do controlador.

é possível atingir esse objetivo.

A ideia inicial foi baseada no trabalho publicado por Rerkpreedapong (2003), neste usa-se algoritmos genéticos para selecionar um PID que minimiza a norma \mathcal{H}_∞ , entretanto não foi considerada a estabilidade robusta do sistema.

Antes do projeto do controlador o sistema deve estar no formato descrito no Subcapítulo 4.2, preferencialmente em um sistema de espaço de estados, de forma que seja possível calcular a norma \mathcal{H}_∞ pelo algoritmo rápido de cálculo descrito no Subcapítulo 3.1.2 conforme e utilizado, por exemplo, pelo aplicativo MATLAB (BRUINSMA e STEINBUCH, 1990; THE MATHWORKS INC., 2016).

O projeto do controlador pode ser resumido em três partes: filtro, função objetivo e algoritmo genético. O AG é um algoritmo de seleção, neste caso sua função é encontrar os melhores parâmetros para o PID, entretanto precisa-se definir quais valores de parâmetros são melhores do que outros, o que é feito pela função objetivo que, para este caso, devolve um valor para cada grupo de parâmetros PID, sendo considerado que, quanto menor o valor, melhor é o controlador. O filtro modifica a forma de seleção da função objetivo com relação ao desempenho nominal. Na Figura 4.7 observa-se o fluxograma simplificado do processo de busca do controlador

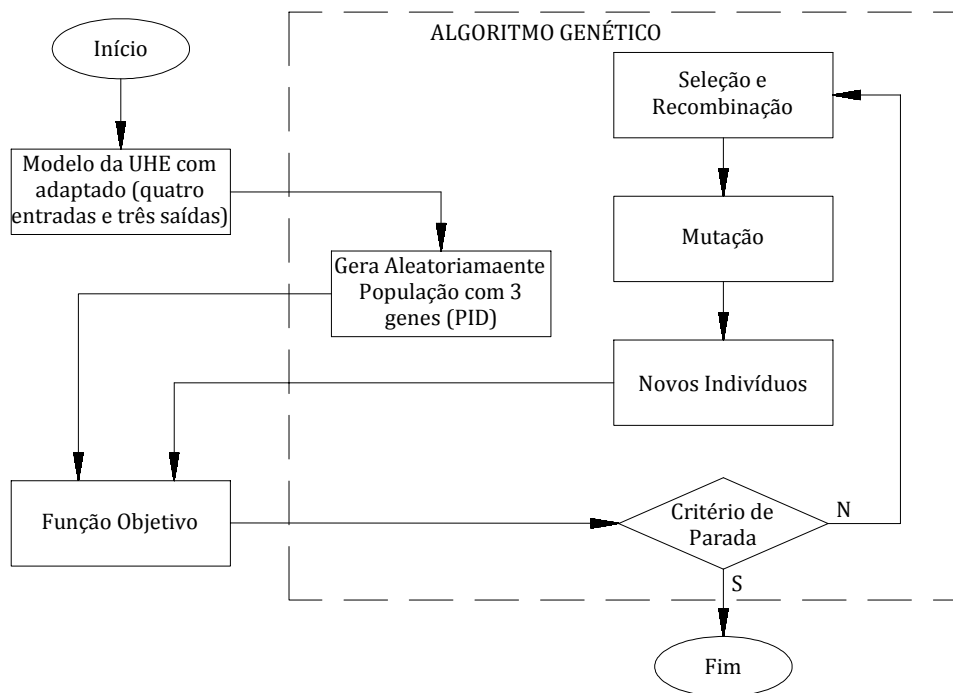


Figura 4.7: Fluxograma geral do projeto do controlador

A explicação detalhada de cada parte se dá nas próximas seções, por fim é mostrado um resumo no qual é juntada todas as parte explicadas na ordem a qual foi feito o código. A ordem das partes segue: função objetivo, filtro e algoritmo genético; esta ordem foi escolhida para facilitar a compreensão, indo primeiro no núcleo do projeto e em seguida para periferia.

4.3.1 Função Objetivo

A função objetivo é o núcleo do projeto do controlador, sendo este o que norteia o algoritmo genético para quais parâmetros são melhores, quais devem prosseguir e quais devem ser descartados. Devido sua importância no contexto, este é o primeiro tópico dentro do projeto do controlador.

A função aqui sugerida avalia cada controlador PID proposto pelo AG através de três testes que vão definir se o controlador consegue manter a estabilidade nominal, estabilidade robusta e desempenho para um ponto de

operação, este ultimo também dependerá do filtro conforme apresentado na próxima seção.

O primeiro passo é usar a TLFI, visto no Subcapítulo 3.1.3, para fechar a malha do controlador PID, proposto pelo AG, e o sistema da usina. Assim considerando-se o sistema em malha aberta, M_u , como pode ser visto na Figura 4.6 e o controlador PID proposto em cada tentativa do AG, K_n , tem-se o sistema em malha fechada conforme a Eq. 4.10

$$H_u = F_l(M_u, K_n) = \begin{bmatrix} H_{u_{11}} & H_{u_{12}} & H_{u_{13}} \\ H_{u_{21}} & H_{u_{22}} & H_{u_{23}} \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 4.10}$$

Ao se fechar a malha do sistema, subtrai-se uma entrada e uma saída do mesmo, portanto, obtendo um sistema com três entradas: entrada da incerteza, u_Δ , variação da carga, Δc , e variação da referência, Δr , e duas saídas: saída da incerteza, y_Δ , e variação do erro, Δe ; conforme equação 4.12.

$$\begin{bmatrix} y_\Delta \\ \Delta e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{u_{11}} & H_{u_{12}} & H_{u_{13}} \\ H_{u_{21}} & H_{u_{22}} & H_{u_{23}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_\Delta \\ \Delta c \\ \Delta r \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 4.11}$$

Assim a variação do erro, Δe , ainda passará por um filtro conforme será esclarecido na próxima seção, porém isto serve apenas para melhorar o desempenho nominal. Para este sistema resultante são executados três testes, onde é dado um peso para cada teste:

1. Teste 1: Estabilidade Nominal
2. Teste 2: Estabilidade Robusta Parcial (conforme subcapítulo 3.1.5)
3. Teste 3: Norma \mathcal{H}_∞ do ponto de operação desejado (conforme subcapítulo 3.1.5)

O Teste 1 verifica a estabilidade nominal do sistema através dos autovalores do sistema em malha fechada com o controlador testado, H_u , que devem ser menores do que zero. Caso não seja atendido este critério, a função objetivo retorna 10^{50} . Considerando que é indesejável um controlador instável, a função objetivo, ao retornar um valor alto indica para o AG que esta solução é inadequada.

O Teste 2 verifica se H_u cumpre o primeiro critério de estabilidade robusta: a norma \mathcal{H}_∞ do elemento $H_{u_{11}}$ menor do que um. Como visto no Subcapítulo 3.1.4 a estabilidade robusta exige que sejam cumpridos dois critérios: a estabilidade

nominal, a norma \mathcal{H}_∞ do elemento referente a entrada e saída para a incerteza e a norma \mathcal{H}_∞ da incerteza menores do que um. A estabilidade nominal já foi cumprida no teste anterior, a norma \mathcal{H}_∞ da incerteza foi cumprida durante a adaptação do modelo conforme Subcapítulo 4.2.1, portanto este teste garante o último critério a ser cumprido para manter a estabilidade robusta. Caso não seja atendido este critério, a função objetivo retorna 10^{20} . O motivo é o mesmo do teste 1, porém com um valor um pouco menor, pois a falha no teste 1 considera-se pior que a falha no teste 2.

O terceiro teste serve para comparar desempenho nominal entre diferentes controladores propostos. Assim é calculada a norma \mathcal{H}_∞ para os elementos nominais do sistema H_u : $[H_{u22} \ H_{u23}]$. Quanto menor a norma \mathcal{H}_∞ , menor é a influência das respectivas entradas sobre as saídas, assim no caso isso significa que menor será a influência de Δc e Δr sobre Δe . O resultado deste teste é o valor da própria norma \mathcal{H}_∞ calculada, pois quanto menor o valor desta considera-se que melhor será o desempenho dinâmico do controlador.

As Eq. 4.12, Eq. 4.13 e Eq. 4.14 mostram resumidamente cada teste efetuado:

$$\text{Autovalores}(H_u) < 0 \quad \text{Eq. 4.12}$$

$$\|H_{u11}\|_\infty < 1 \quad \text{Eq. 4.13}$$

$$\|H_{u\Delta}\|_\infty \quad \text{Eq. 4.14}$$

O fluxograma da Figura 4.8 resume a função objetivo descrita, esta função será usada pelo AG sendo aplicada para controlador proposto com finalidade de selecionar aqueles que obtiverem o menores resultados. Pois isto significará que o controlador consegue manter a estabilidade nominal e robusta além de ter um bom desempenho

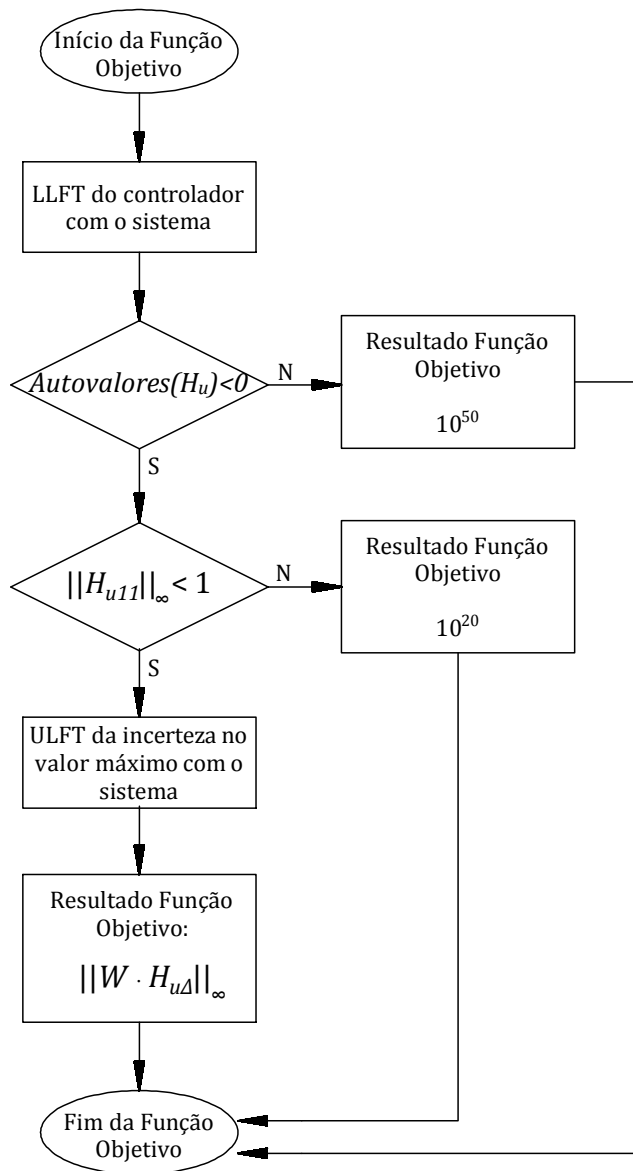


Figura 4.8: Fluxograma da função objetivo

4.3.2 Função Peso ou Filtro

Como visto na seção anterior a minimização da norma \mathcal{H}_∞ tem como objetivo obter um bom desempenho nominal. Entretanto a minimização direta da norma \mathcal{H}_∞ nem sempre gera bons resultados, podendo ocorrer tempo de resposta muito grande, sobrelevações, e erro em regime permanente. Para obter um bom

resultado com a minimização da norma \mathcal{H}_∞ pode ser necessário usar uma função peso ou filtro (GU, PETKOV e KONSTANTINOV, 2005; ZHOU, DOYLE e GLOVER, 1995; COLANERI *et al.*, 1997).

Infelizmente, para a literatura analisada, nenhuma sugere um método definitivo para o cálculo e projeto da função peso. Segundo Gu, Petkov e Konstantinov (2005) as funções peso são usados para fornecer diferentes pesos para diferentes frequências, eles também afirmam que encontrar o função peso adequado é um passo crucial do projeto de um controlador robusto, porém algumas vezes é necessário algumas tentativas, e para sistemas complexos pode ser necessárias várias tentativas.

Bevrani (2009), sugere utilizar um filtro proporcional e integral sobre o erro (diferença do sinal de referência e a saída), para usinas de geração de energia, assim criando para o sistema duas saídas, uma com o erro multiplicado por duas constantes e outra com a integral do erro. A sugestão proposta por Bevrani (2009), infelizmente não se mostrou adequada para minimização da norma \mathcal{H}_∞ com o AG, o motivo talvez seja pela falta de “ladeira para descer” (LINDEN, 2006), nesse caso o algoritmo genético não obteve bons resultados, fornecendo ao final do processo um controlador instável para os casos analisados. Mostrou-se mais eficiente, depois de alguns testes, uma função peso de primeira ordem com um polo e um zero, sendo o polo em -10^{-7} , e o zero escolhido para cada caso de UHE. Um polo próximo a zero tem como objetivo tornar a função pesos próxima a um integrador. Ficando assim próximo ao sugerido pela literatura de usinas hidroelétricas e de controle robusto.

Para o caso analisado o filtro foi colocado logo após a saída variação do erro. A intenção, neste caso, é analisar a norma \mathcal{H}_∞ do sistema das entradas do sistema, variação da carga e variação da referência, para saída do filtro. Isso é usado apenas para avaliação do desempenho e não tem relação com estabilidade robusta.

4.3.3 Algoritmos Genéticos

Nos experimentos, foi aplicada uma variação tradicional do AG, sendo essa descrita nesta parte do trabalho.

Assim como ocorre com o filtro, o AG não existe parâmetros adequados que resolvam qualquer problema, assim os parâmetros podem ser encontrados por tentativa e erro (LINDEN, 2006). Diferente do filtro, que para cada modelo de UHE houve filtros diferentes, os parâmetros do AG foram iguais para todos os modelos, assim aqui será mostrado quais parâmetros foram usados.

O aplicativo utilizado foi o MATLAB, no qual existe um pacote específico para o uso de algoritmos genéticos, sendo este ajustado para obter-se um melhor resultado. Entretanto, para uma melhor compreensão e talvez até possibilitar uma portabilidade entre pacotes de aplicativos, foi feito um comparativo dos ajustes no MATLAB com a literatura

Considerando os dois fatos mencionados, a tabela 4.1 mostra os valores usados no ajuste do AG:

Tabela 4.1 Parâmetros do AG

Descrição	Literatura: Subcapítulo 3.2 (MATLAB)
Tamanho da População	400
População Inicial	Uniforme: 0 a 100 (gacreationuniform, PoplnitRange,[0,100])
Número de Genes	3
Seleção	Roleta Viciada (selectionroulette)
Crossover	Crossover Flat (crossoverheuristic)
Mutação	Uniforme: 0 100, Probabilidade 1% (mutationuniform, 0.01)
Elitismo	5% da população (EliteCount, 0.05)
Máximo de Gerações	25 (Generations,25)

Talvez possa gerar alguma dúvida no que se refere a dois itens da Tabela 4.1, o primeiro é população inicial, esta é uniformemente gerada aleatoriamente entre os valores de 0 e 100. O percentual de *Crossover*/Mutação, refere-se ao fato que o algoritmo considera duas possibilidades para um indivíduo: ou ele passa pelo

crossover e seus genes são trocados com outro indivíduo gerando os indivíduos filhos, ou ele passa direto pelo *crossover* e seus genes são aleatoriamente modificados. O elitismo refere-se que os 5% melhores passarão para a próxima geração sem sofrer modificação. O critério de parada foi por Estatística usando a mínima variação média dos melhores valores encontrados, sendo mantido a valor padrão de 10^{-6} .

Estes valores foram encontrados empiricamente após vários testes com os modelos testados e pareceram adequados para todos.

4.4 CONCLUSÃO

O método descrito foi simulado com alguns modelos de UHE e o que foi apresentado pode ser considerado o método base. Há pequenas variações no método conforme particularidades no modelo da UHE, que são apresentadas junto com os respectivos resultados para cada modelo de UHE

Assim, no próximo capítulo será apresentado as simulações com estas variações e comparadas com outro algum outro controlador projetado por outro método.

5 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Neste capítulo, os resultados das simulações serão apresentados e comparados com os outros controladores propostos para os mesmos modelos em diferentes pontos de operação. Para a simulação e projeto do controlador, utilizou-se o aplicativo MATLAB.

5.1 INTRODUÇÃO

O projeto do controlador foi testado em dois modelos diferentes de UHE: a) existente no SEP brasileiro obtido junto a concessionária, b) encontrado na literatura. O controlador proposto então é comparado com o do referido artigo ou com o atual da concessionária.

A UHE do SEP brasileiro possui um sistema de controle do tipo CLP no qual consegue alterar os parâmetros do controlador conforme a necessidade: operação interligada e isolada. Por isso é separadamente projetado e analisado um controlador para cada caso. No modelo obtido desta UHE, há vários blocos não-lineares. Por isso para o projeto do controlador o sistema é linearizado, da seguinte forma:

- Zona Morta: Considera-se um bloco com ganho unitário;
- Saturação: Considera-se que o sinal pode assumir qualquer valor;
- *Backlash*: Considera-se um bloco com ganho unitário;
- Variação do ganho: Considera-se a média do máximo e mínimo:
 - Neste caso bloco C1 e C2, (que estarão presentes nos modelos das Figura 5.1 e Figura 5.8) considera-se a média dos ganhos imediatamente anteriores ligados a este.

O projeto do controlador, para o caso da UHE do SEP brasileiro, é executado com o aplicativo MATLAB, por meio de linha de código, como já mencionado no Capítulo 4. Nas simulações, adotou-se o modelo com todas as não-linearidades, portanto utilizou-se o pacote SIMULINK do aplicativo MATLAB.

A técnica de controle também foi aplicado no modelo de UHE proposto por Khodabakhshian e Hooshmand (2010), este é um sistema com duas UHE

interligadas. Projeta-se, então, um controlador para cada modelo de UHE, ao mesmo tempo e é comparado com o controlador proposto no artigo original. Nesse caso tanto o controlador como a simulação são por meio de linha de código.

Cada estudo de caso possui um subcapítulo próprio, sendo estes divididos em três partes: o Modelo do Sistema, Projeto do controlador e Resultados. Esta divisão é necessária de forma a manter uma organização para facilitar eventuais comparações entre os casos estudados. Pois, há diferenças entre os modelos de usina exigindo pequenas adaptações no modelo geral descrito no Capítulo 2, e isto implica em pequenas alterações no projeto do controlador descrito no Capítulo 4.

Portanto serão apresentados nos subcapítulos 5.2, 5.3 e 5.4 os resultados dos estudos de caso para a UHE do SEP brasileiro nas seguintes situações: desinterligação, operação isolada, e tomada de carga, respectivamente. Compondo os três controladores necessários na operação desta UHE. No subcapítulo 5.4, serão apresentados, os resultados para o estudo de caso do artigo e comparados com os resultados obtidos por este.

5.2 USINA DO SEP BRASILEIRO: DESINTERLIGAÇÃO

A UHE analisada trata-se de uma UHE do SEP brasileiro, que neste caso está interligada com o SEP e passa por uma situação de desinterligação, no qual serão avaliadas duas condições de carga:

- Desinterligar a UHE gerando 70% da potência nominal, sendo a carga remanescente de 47,5% do valor nominal.
- Desinterligar a UHE gerando 47,5% da potência nominal, sendo a carga remanescente de 70% do valor nominal.

Mesmo sendo um caso de usina isolada, pois durante a simulação é este o seu estado final, utiliza-se um controlador com queda de velocidade, visto no Subcapítulo 2.3.2, pois apesar da UHE em questão poder trocar de controlador, nem sempre há tempo para troca caso a desinterligação seja repentina. Assim, a UHE terá um controlador com queda de velocidade para uma usina isolada com uma carga.

Nesta, mostra-se o diagrama de blocos de uma UHE do SEP brasileiro, cada bloco representa uma função transferência ou a função descrita abaixo do respectivo bloco. As condições iniciais e definição de parâmetros das demais funções estão escritas abaixo de cada bloco. Caso não haja condições iniciais descritas elas são consideradas nulas. Estas condições iniciais referem-se ao estado da UHE interligada. O controlador original é um PI com queda de velocidade com $R = 0,05$, os parâmetros: proporcional, K_{pr} , tempo integral, T_n conforme a Figura 5.2 e Tabela 5.1:

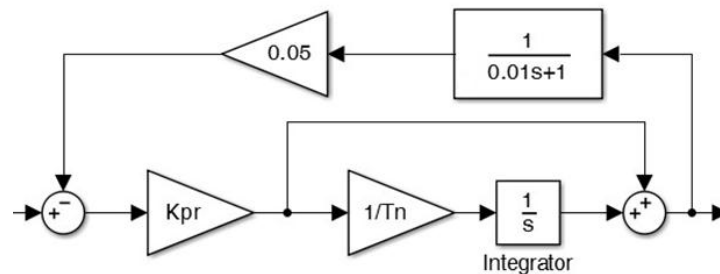


Figura 5.2: Diagrama de blocos do controlador PI original da UHE do SEP em desinterligação

Tabela 5.1: Parâmetros do controlador original da UHE do SEP em desinterligação

Parâmetro	Sigla	Valor
Ganho Proporcional	K_{pr}	1,25
Cte Tempo Integração	T_n	20
Queda de Velocidade	R	0,05

5.2.2 Projeto do Controlador

Conforme foi explicado no capítulo 4, primeiro fez-se uma remodelagem do sistema para adequação ao projeto do controlador, em seguida foi executado o algoritmo para obtenção do controlador. Sendo esta a ordem seguida.

5.2.2.1 Remodelagem do Sistema

O diagrama de blocos da Figura 5.1 é linearizado conforme descrito na seção 5.1, além disso, são consideradas as seguintes entradas e saídas:

- Entradas:
 - Entrada da incerteza u_{Δ}
 - Variação na carga: ΔP_e
 - Entrada de controle: Δu
- Saídas:
 - Saída da incerteza y_{Δ}
 - Variação da frequência Δf
 - Variação do erro Δe

Após estas considerações o sistema é representado em espaço de estados no seguinte formato:

$$M_u: \begin{cases} \dot{x} = A_u x + B_u u \\ y = C_u x + D_u u \end{cases} \quad \text{Eq. 5.1}$$

sendo as matrizes $A_u(8 \times 8)$, $B_u(8 \times 3)$, $C_u(8 \times 3)$ e $D_u(3 \times 3)$, tendo todos os termos iguais a zero com exceção dos que estão descritos na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Parâmetros não nulos do modelo linearizado da UHE em desinterligação

Var.	Valor	Var.	Valor	Var.	Valor
A ₁₁	-1000/3	A ₅₅	-0,07001	B ₈₃	2
A ₁₆	-1000	A ₆₂	8	C ₁₃	0,01991
A ₁₇	-464	A ₆₆	-100	C ₁₄	-1,843
A ₂₁	78,13	A ₇₂	2	C ₂₅	-0,28
A ₃₂	3,431	A ₇₇	-100	C ₂₈	-2,5
A ₄₃	0,01991	A ₈₈	-100	C ₃₅	-0,28
A ₄₄	-1,843	B ₁₃	2560	C ₃₈	-2,5
A ₅₃	-0,0036	B ₄₁	-1	D ₁₁	-1
A ₅₄	0,5	B ₅₃	-0,5		

5.2.2.2 Projeto do Controlador

Optou-se por utilizar um controlador PID em vez do PI que está no atual, assim o diagrama de blocos do controlador é conforme a Figura 5.3.

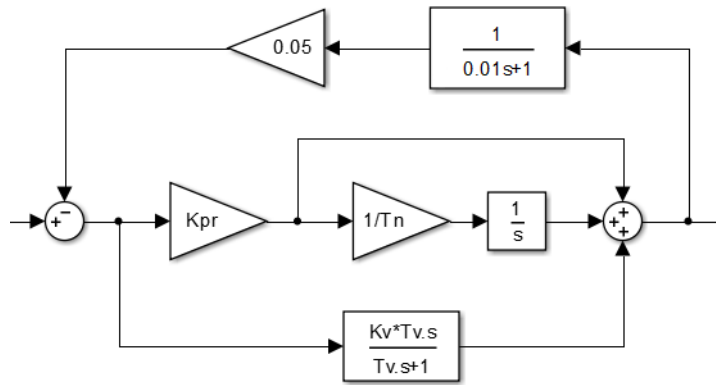


Figura 5.3: Diagrama de blocos do controlador PID proposto da UHE do SEP em desinterligação

O controlador foi projetado utilizando método descrito no capítulo 4, considerando a função objetivo com três entradas, uma para cada parâmetro do PID, e a constante $T_v = 1$. A Tabela 5.3 mostra os parâmetros para ajuste do AG.

Tabela 5.3: Configuração do AG para o caso da UHE em desinterligação

Descrição	Literatura (MATLAB)
Tamanho da População	400
População Inicial	Uniforme: 0 a 100 (gacreationuniform, PoplNitRange,[0,100])
Número de Genes	3
Seleção	Roleta Viciada (selectionroulette)
Crossover	Crossover Flat (crossoverheuristic)
Mutação	Probabilidade 1% (mutationuniform, 0.01)
Elitismo	5% da população (EliteCount, 0.05)
Máximo de Gerações	20 (Generations,20)

A função peso utilizado na saída, necessária conforme o capítulo 4, é:

$$W = \frac{8s + 1}{s + 10^{-7}} \quad \text{Eq. 5.2}$$

Assim executando o algoritmo do controlador, com os parâmetros mencionados, várias vezes a fim de obter uma média de valores conforme a Tabela 5.4, sendo o valor médio sendo o valor considerado para avaliação dos resultados.

Tabela 5.4: Parâmetros dos controladores obtidos pelo AG para o caso da UHE em desinterligação

n ^o	K_{pr}	T_n	K_v	Norma \mathcal{H}_∞ ¹	Norma \mathcal{H}_∞ ²
1 ^a	1,6934	10,0759	4,8258	704,91	748,67
2 ^a	1,6894	9,8195	5,0158	706,04	747,85
3 ^a	1,6944	10,1836	4,7436	704,76	749,2
4 ^a	1,6946	10,2031	4,7287	704,74	749,28
5 ^a	1,6946	10,2039	4,7280	704,75	749,29
6 ^a	1,6873	9,7454	5,0779	706,61	748,07
7 ^a	1,6946	10,1904	4,7338	704,81	749,15
8 ^a	1,6949	10,3189	4,6387	704,91	750
9 ^a	1,6945	10,1947	4,7354	704,74	749,24
10 ^a	1,6946	10,2048	4,7267	704,75	749,28
Média	1,6932	10,1140	4,7954		749,1

¹do sistema com o controlador e função peso

²do sistema com o controlador

5.2.3 Resultados

Depois de projetado o controlador, é necessário verificar se o desempenho está adequado, além disso, compara-se o controlador projetado, “proposto”, com o controlador original, “atual”. São então simuladas duas situações de carga e para cada uma são apresentados dois sinais: a frequência e posição da válvula injetora, sendo que para cada um são apresentados para 6 (seis) pontos de operação.

O modelo de CCF utilizado para a simulação dos resultados é o apresentado na Figura 5.1, sendo este um modelo não-linear. O modelo do controlador utilizado é igual ao apresentado na Figura 5.2 para o “atual”, e o apresentado na Figura 5.3 para o “proposto”, seus parâmetros estão de acordo respectivamente com a Tabela 5.1 e Tabela 5.4, valor médio.

As simulações são feitas no aplicativo MATLAB no pacote de simulação SIMULINK, pois se trata de um modelo não-linear sendo facilmente simuladas por este pacote.

As duas situações de variação de carga representam duas situações da prática. A primeira a UHE está gerando 70% (0,7pu) de sua carga nominal e após a desinterligação passa a gerar 47,5% (0,475pu), e a segunda é ao contrário passa de 47,5% (0,475pu) para 70% (0,7pu).

Foram simulados alguns pontos de operação para verificar desempenho e estabilidade dos controladores. Os pontos de operação escolhidos, G_o , foram: 0,1 ; 0,3 ; 0,5 ; 0,7 ; 0,9 ; 1 .

Para a análise foram escolhidas as saídas de frequência e posição da válvula injetora. A frequência é o desempenho para o sistema elétrico de potência, e o que de fato vai contribuir para a estabilidade deste último. A posição da válvula injetora representa o quanto de esforço e desgaste que isso provocará no sistema da UHE. Para cada situação de carga é feita a análise individualmente, pois como o modelo é não-linear a resposta de cada uma será diferente.

A primeira simulação é o caso onde a geração passa de 47,5% (0,475pu) para 70% (0,7pu). Assim os resultados para cada ponto de operação citado e para cada controlador nesta condição de carga para frequência observa-se na Figura 5.4 e para abertura da válvula injetora na Figura 5.5.

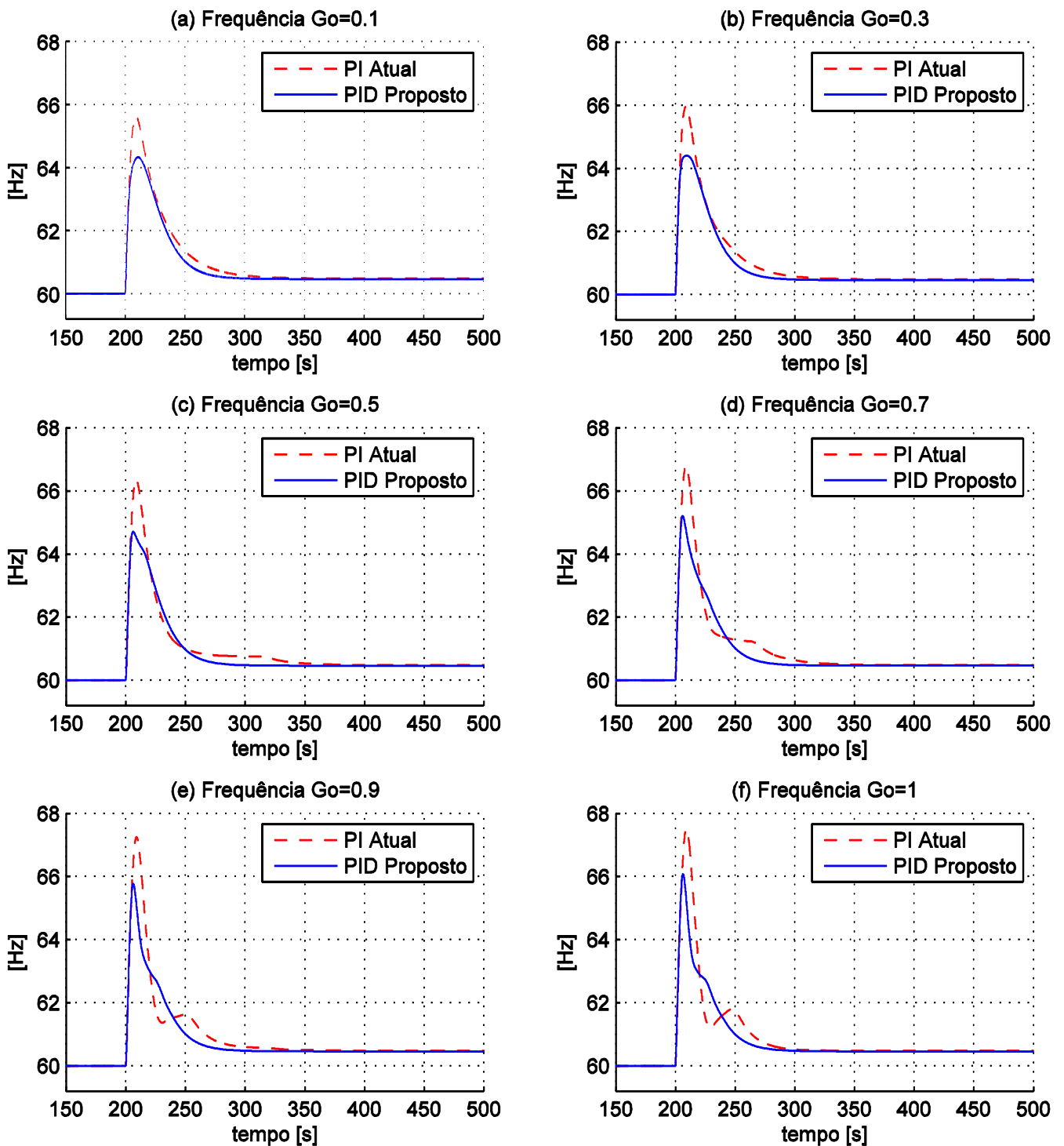


Figura 5.4: Gráfico da frequência para controlador atual e proposto em diferentes pontos de operação para a UHE do SEP em desinterligação com variação de carga de 70% para 47,5%

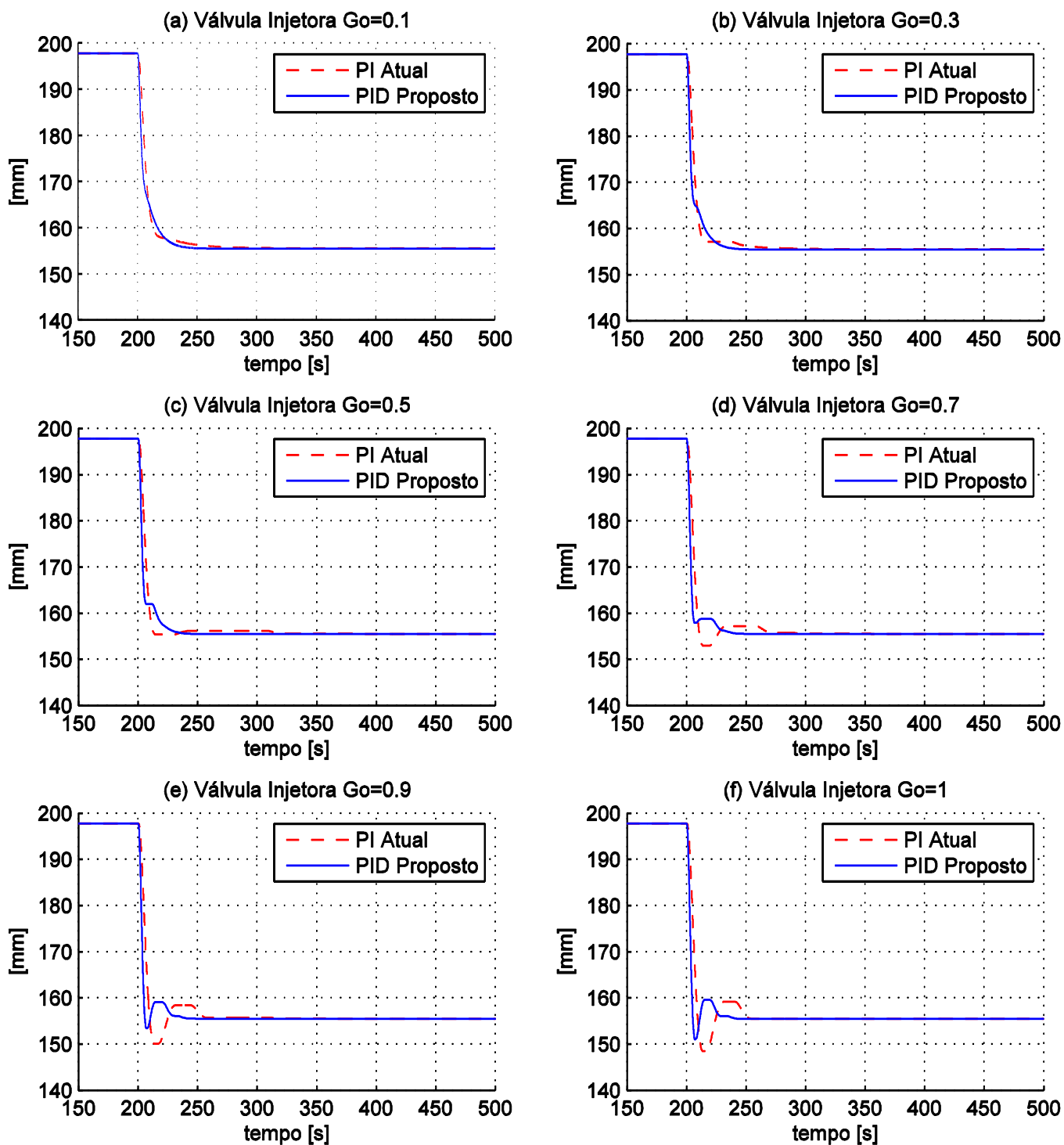


Figura 5.5: Gráfico da abertura da válvula injetora para controlador atual e proposto em diferentes pontos de operação para a UHE do SEP em situação desinterligação com variação de carga de 70% para 47,5%

Observa-se na Figura 5.4 o comportamento dinâmico da variação da carga na frequência. Pode-se perceber que o controlador proposto teve um melhor desempenho em qualquer ponto de operação para a situação proposta. O tempo de resposta em qualquer ponto de operação tanto para o controlador atual e proposto foi aproximadamente 350s, porém a sobrelevação foi de 1Hz a 2Hz menor dependendo do ponto de operação. A diferença, apesar de pequena, é o suficiente para evitar um eventual desligamento da usina por atuação da proteção contra sobrefrequência

Na Figura 5.5, observa-se que a variação da abertura da válvula entre o controlador atual e proposto em geral é pequena. No controlador proposto a válvula tem um tempo de acomodação inferior.

Portanto conclui-se que para este caso simulado o controlador PID proposto se mostrou mais adequado que o controlador PI existente. A sua implementação prática na UHE também é simples visto que o sistema físico de controle permite essa flexibilidade. Porém ainda falta mais uma análise: quando há aumento na carga que definirá se este controlador está adequado

O segundo caso de simulação é uma desinterligação com aumento de carga ocorre quando a UHE ao ser desconectada do SEP a carga que estava sendo suprida por outras usinas passa para a UHE simulada. Há um aumento de 47,5% para 95% do valor máximo, 0.7pu para 0.475pu. Assim os resultados para cada ponto de operação citado e para cada controlador nesta condição de carga para frequência observa-se na Figura 5.6 e para abertura da válvula injetora na Figura 5.7.

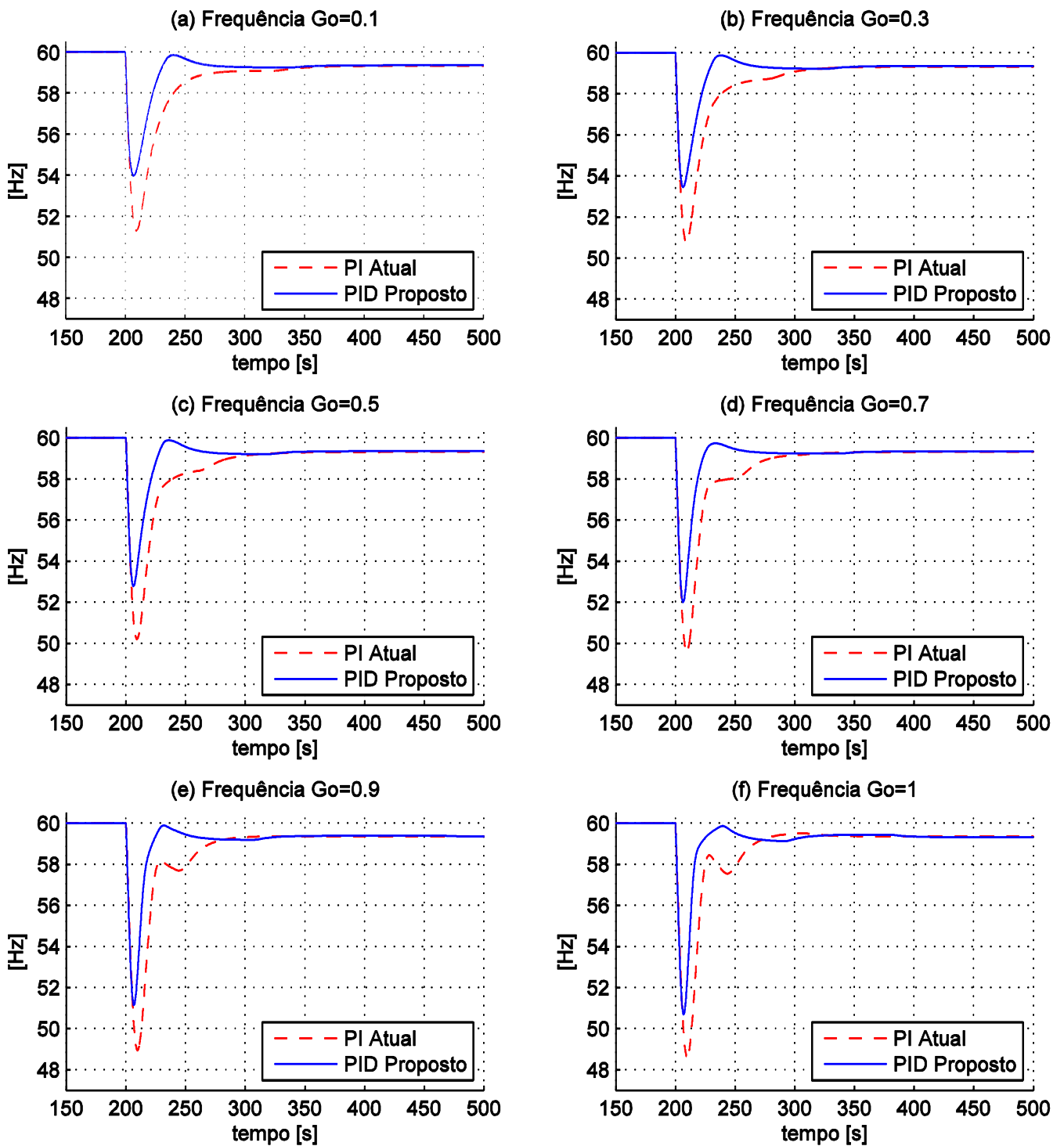


Figura 5.6: Gráfico da frequência para controlador atual e proposto em diferentes pontos de operação para a UHE do SEP em desinterligação com variação de carga de 47,5% para 70%

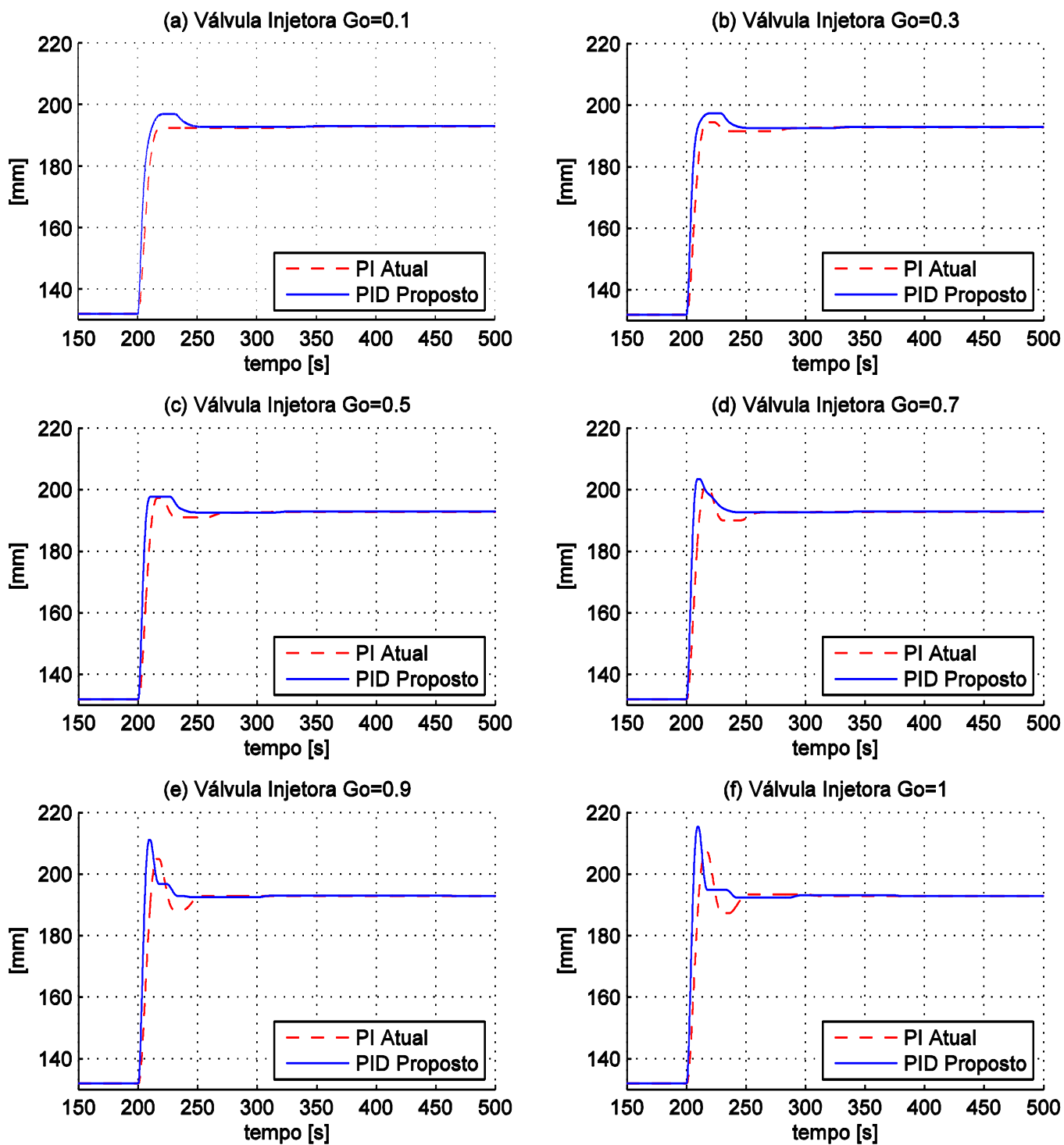


Figura 5.7: Gráfico da abertura da válvula injetora para controlador atual e proposto em diferentes pontos de operação para a UHE do SEP em situação desinterligação com variação de carga de 47,5% para 70%

Através das Figura 5.6 e Figura 5.7 observa-se que neste caso o controlador também teve um bom desempenho e de forma muito semelhante. O controlador proposto teve menor sobrelevação na maioria dos casos na frequência e pouca variação na posição da válvula em relação ao controlador atual, .

Portanto conclui-se que em ambos os casos o controlador proposto possui desempenho superior e com a simulação nos dois casos e para todos estes pontos de operação o controlador apresentou desempenho superior.

5.3 USINA DO SEP BRASILEIRO: ISOLADA

A UHE do SEP brasileiro neste caso está isolada operando com apenas uma carga conectada. Nesta situação, o controlador atual utiliza um PID sem queda de velocidade, portanto o controlador proposto seguirá o mesmo formato. A condição de carga analisada é uma diminuição de carga de 90% para 50% da potência nominal da UHE. A divisão deste subcapítulo segue a mesma lógica dos anteriores.

5.3.1 Modelo Original do Sistema

O modelo da UHE tem apenas como diferença em relação ao subcapítulo anterior a ausência da queda de velocidade e condições iniciais diferentes. Na Figura 5.8, pode-se observar o diagrama de blocos do modelo nestas condições:

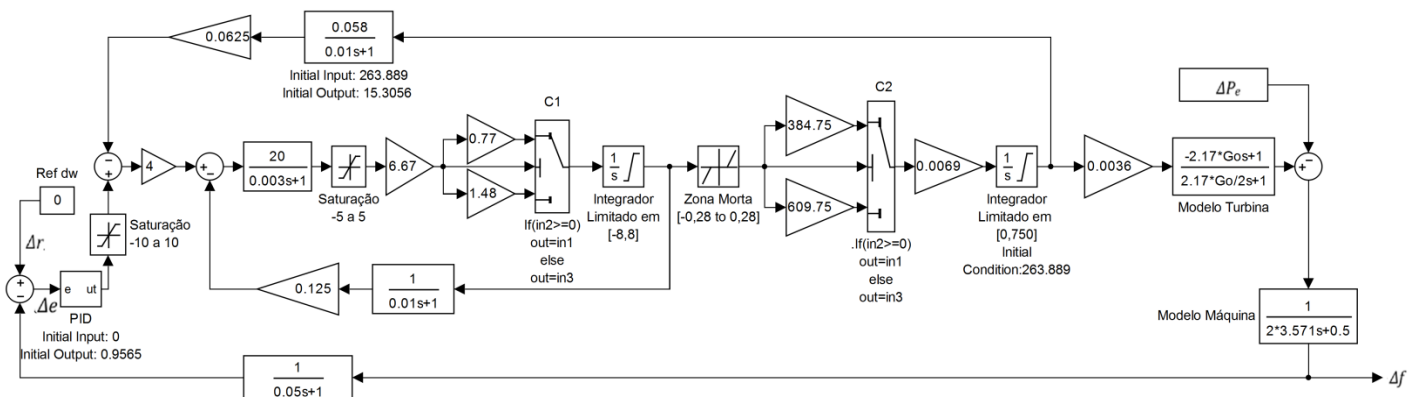


Figura 5.8 Diagrama de blocos para CCF do modelo da UHE do SEP isolada

Nos mesmos moldes do subcapítulo anterior, na Figura 5.8 cada bloco representa uma função transferência ou a função descrita abaixo do respectivo bloco, com suas respectivas condições iniciais caso não sejam nulas.

O controlador original é um PID conforme se observa na Figura 5.9 e com os parâmetros conforme a Tabela 5.5.

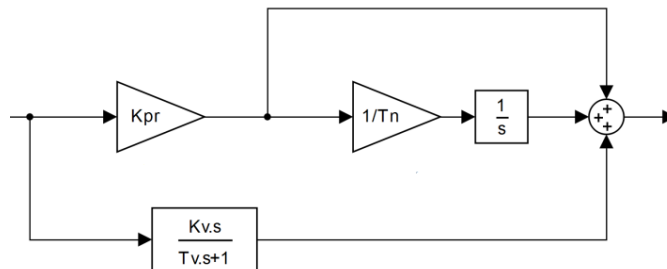


Figura 5.9: Diagrama de blocos do controlador PID original da UHE do SEP isolada

Tabela 5.5: Parâmetros do controlador original da UHE do SEP isolada

Parâmetro	Sigla	Valor
Ganho Proporcional	Kpr	2,5
Constante Tempo Integração	Tn	20
Ganho Derivativo	Kv	0,15
Constante Tempo Filtro Derivativo	Tv	1,0

5.3.2 Projeto do Controlador

Conforme fora explicado no capítulo 4, primeiro fez-se uma remodelagem do sistema para adequação ao projeto do controlador em seguida é executado o algoritmo para obtenção do controlador. Sendo esta a ordem seguida.

5.3.2.1 Remodelagem do Sistema

O diagrama de blocos da Figura 5.8 então é linearizado e o modelo da turbina substituído, conforme descrito na seção 5.1. Além disso, são consideradas as seguintes entradas e saídas:

- Entradas:
 - Entrada da incerteza u_{Δ}
 - Variação na carga: ΔP_e
 - Entrada de controle: Δu
- Saídas:
 - Saída da incerteza y_{Δ}
 - Variação da frequência Δf
 - Variação do erro Δe

Após estas considerações o sistema é representado em espaço de estados no seguinte formato:

$$M_u: \begin{cases} \dot{x} = A_u x + B_u u \\ y = C_u x + D_u u \end{cases} \quad \text{Eq. 5.3}$$

sendo as matrizes $A_u(7 \times 7)$, $B_u(7 \times 3)$, $C_u(7 \times 3)$ e $D_u(3 \times 3)$, tendo todos os termos nulos com exceção dos que estão descritos na Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Parâmetros não nulos do modelo linearizado da UHE isolada

Var.	Valor	Var.	Valor	Var.	Valor
A ₁₁	-1000/3	A ₅₄	0,5	B ₅₂	-0,5
A ₁₆	-1000	A ₅₅	-0,07001	C ₁₃	0,01991
A ₁₇	-464	A ₆₂	8	C ₁₄	-1,843
A ₂₁	78,13	A ₆₆	-100	C ₂₅	-0,28
A ₃₂	3,431	A ₇₃	2	C ₃₅	-0,28
A ₄₃	0,01991	A ₇₇	-100	D ₁₁	-1
A ₄₄	-1,843	B ₁₃	2560		
A ₅₃	-0,0036	B ₄₁	-1		

5.3.2.2 Projeto do Controlador

O controlador atual da UHE para estas condições é um PID conforme apresentado na Figura 5.9, e este será o modelo para o controlador proposto.

O controlador foi projetado utilizando método descrito no capítulo 4, considerando a função objetivo com três entradas, uma para cada parâmetro do PID, e a constante $T_v = 0,1$. Optou-se por manter o filtro derivativo, T_v , para diminuir amplificação de ruídos, o valor não foi alterado por pouco influenciar no desempenho do controlador. A Tabela 5.3 mostra os parâmetros para ajuste do AG, com a nomenclatura da literatura e do MATLAB.

Tabela 5.7: Configuração do AG para o caso da UHE isolada

Descrição	Literatura (MATLAB)
Tamanho da População	300
População Inicial	Uniforme: 0 a 30 (gacreationuniform, PopInitRange,[0,30])
Número de Genes	3
Seleção	Roleta Viciada (selectionroulette)
Crossover	Crossover Flat (crossoverheuristic)
Mutação	Uniforme: 0 100, Probabilidade 1% (mutationuniform, 0.01)
Elitismo	5% da população (EliteCount, 0.05)
Máximo de Gerações	25 (Generations,100)

O filtro utilizado na saída, necessário conforme o capítulo 4, é:

$$W = \frac{s + 1}{s + 10^{-7}} \quad \text{Eq. 5.4}$$

Assim executando o algoritmo do controlador, com os parâmetros mencionados, várias vezes a fim de obter uma média de valores:

Tabela 5.8: Parâmetros dos controladores obtidos pelo AG para o caso da UHE em desinterligação

nº	K_{pr}	T_n	K_v	Norma \mathcal{H}_∞ ¹	Norma \mathcal{H}_∞ ²
1ª	2,6547	8,2463	5,4279	3,1528	1,6376
2ª	2,6779	8,3219	5,4294	3,1236	1,6486
3ª	2,6791	8,3256	5,4315	3,1211	1,6496
4ª	2,6666	7,6826	5,4042	3,378	1,6282
5ª	2,6698	8,3532	5,3918	3,1381	1,6376
6ª	2,3872	8,6055	4,913	3,63	1,4319
7ª	2,6795	8,3242	5,4333	3,1204	1,6502
8ª	2,678	8,3251	5,4268	3,1242	1,6482
9ª	2,683	8,3792	5,4253	3,1483	1,6507
10ª	2,6791	8,3247	5,4325	3,1208	1,6498
Média	2,6455	8,2888	5,3716		1,6222

¹do sistema com o controlador e função peso

²do sistema com o controlador

5.3.3 Resultados

A simulação foi feita no MATLAB/SIMULINK, para o controlador PID proposto comparando com atual. Foram escolhidos seis pontos de G_o para a simulação: 0,1 ; 0,3 ; 0,5 ; 0,7 ; 0,9 ; 1.

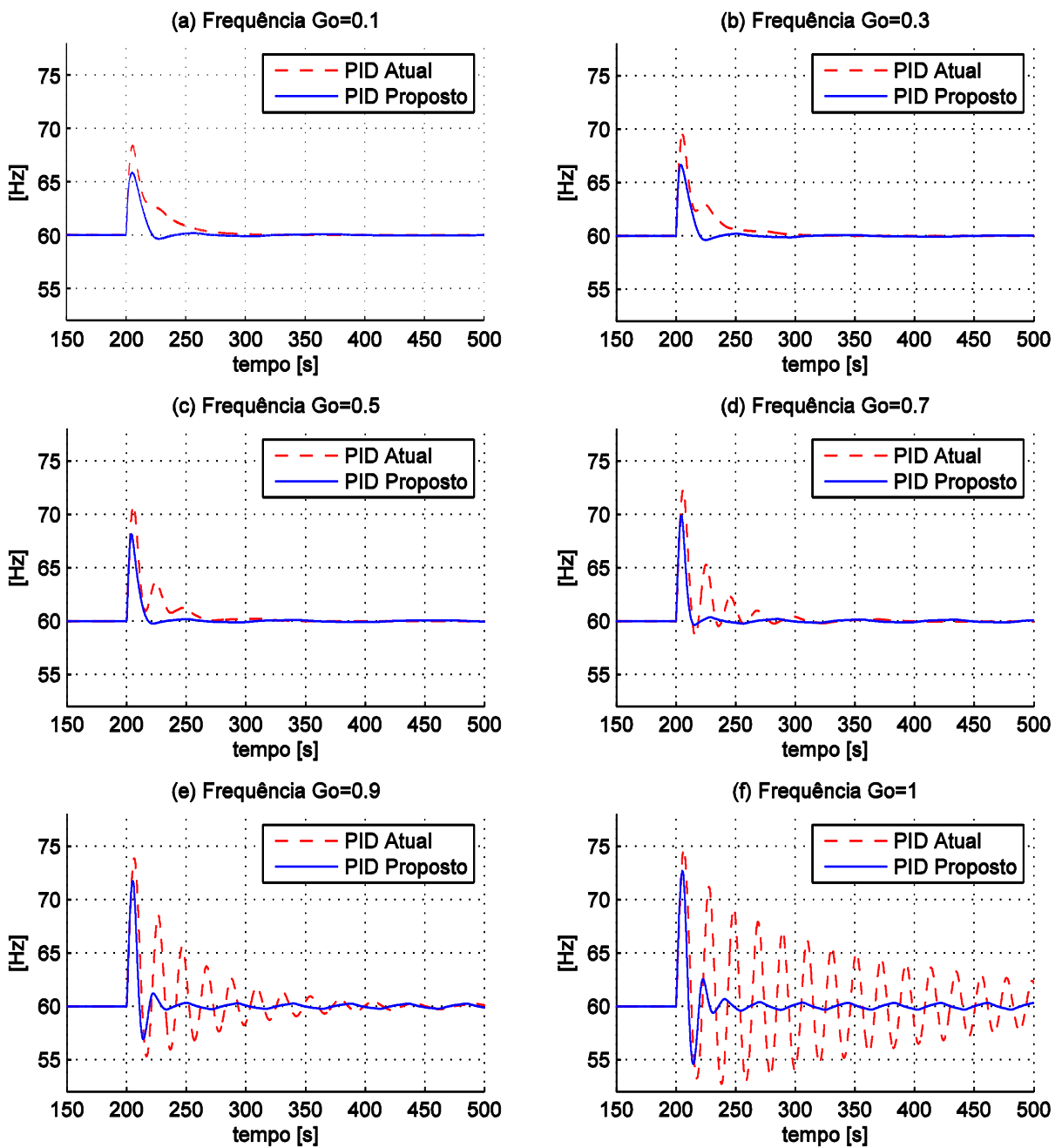


Figura 5.10: Gráfico da frequência para controlador atual e proposto em diferentes pontos de operação para a UHE do SEP isolada

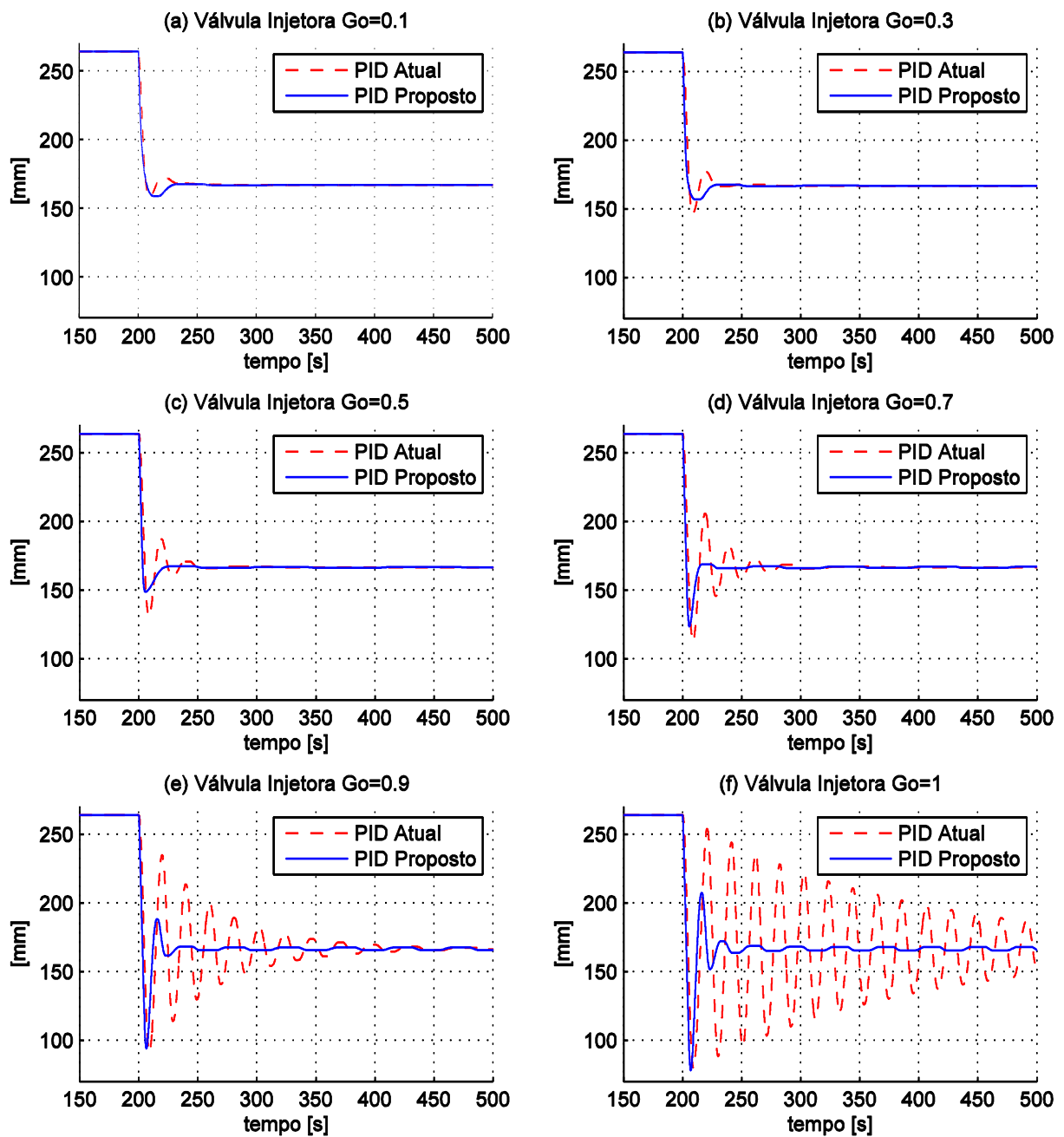


Figura 5.11: Gráfico da posição da válvula injetora para controlador atual e proposto em diferentes pontos de operação para a UHE do SEP isolada

Através dos resultados pode-se observar que o controlador proposto teve melhores tempos de resposta e melhor oscilação em todos os pontos de operação analisados para a variação de carga proposta. Neste caso tanto para a frequência quanto para a posição da válvula injetora.

5.4 MODELO UHE LITERATURA

O último caso analisado é um modelo obtido na literatura, a partir do artigo de Khodabakhshian e Hooshmand (2010). Neste sistema há duas UHE, cada uma com sua carga, interligadas por uma linha de transmissão. Aqui o objetivo é analisar o comportamento da frequência quando há variações na carga em uma UHE e analisar o comportamento da frequência na mesma usina e na outra usina.

O controlador proposto no artigo de Khodabakhshian e Hooshmand (2010) é um PID robusto para as duas UHE que tem como objetivo manter a estabilidade para toda a faixa de valores entre o valor nominal e até 50% acima do valor nominal. O método de ajuste do PID é baseado no contorno da carta de Nichols, e a especificação é em termos do pico máximo de ressonância, M_r , de malha fechada (KHODABAKHSHIAN e HOOSHMAND, 2010). Os parâmetros do controlador são ajustados tal que a função transferência de malha aberta segue o contorno correspondente ao desejado M_r (KHODABAKHSHIAN e HOOSHMAND, 2010). Esta aproximação permite controlar, simultaneamente, o pico máximo de sobrelevação, o mínimo de margem de ganho e de fase e a largura de banda em malha fechada (KHODABAKHSHIAN e HOOSHMAND, 2010). Então é proposta uma fórmula na qual, a partir dos parâmetros do sistema é obtido o controlador.

Assim, a diferença do método proposto neste trabalho e deste artigo é em relação a técnica de robustez e de desempenho. A robustez neste artigo é obtida por margem de ganho e margem de fase, neste trabalho utiliza-se o teorema do ganho pequeno. O desempenho no artigo é obtido controlando o máximo pico de sobrelevação, neste trabalho é utilizado a minimização da norma \mathcal{H}_∞ com uma função peso.

O projeto do controlador e simulação do sistema é desenvolvido no ambiente de simulação MATLAB, neste caso, não foi necessário a utilização do SIMULINK.

Como nos subcapítulos anteriores, este divide-se em três partes. A primeira, é apresentado o modelo de UHE do artigo com incluindo o controlador do mesmo. A segunda parte é descrito o projeto do controlador. A última são comparados os resultados obtidos.

5.4.1 Modelo Original do Sistema

O modelo do sistema é composto de duas UHE's interligadas por meio de uma linha de transmissão e cada uma com sua carga. Na Figura 5.12: Diagrama de blocos do modelo do sistema da literatura Figura 5.12 (KHODABAKHSHIAN e HOOSHMAND, 2010) pode-se observar o diagrama de blocos do modelo.

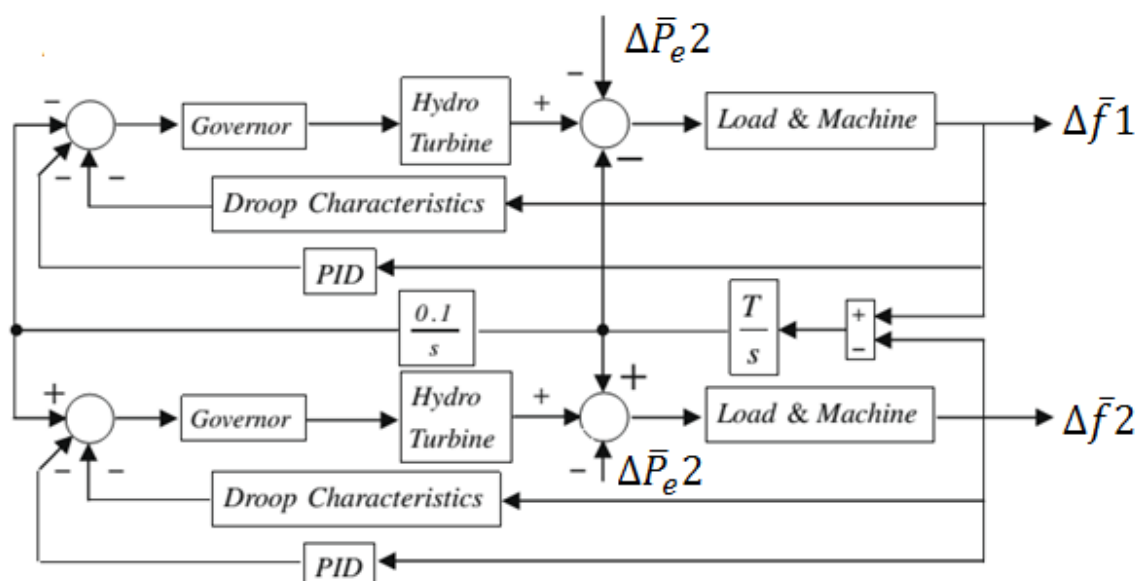


Figura 5.12: Diagrama de blocos do modelo do sistema da literatura (KHODABAKHSHIAN e HOOSHMAND, 2010)

Há uma pequena diferença de nomenclatura entre o artigo e este trabalho, assim é apresentado na Tabela 5.9 e Tabela 5.10 a nomenclatura equivalente e a equação que cada bloco da Figura 5.12.

Tabela 5.9: Blocos equivalente do artigo neste trabalho

Artigo	Neste Trabalho	Modelo
<i>Load & Machine</i>	Modelo do Gerador	Eq. 2.8 ou Figura 2.2
<i>Hydro Turbine</i>	Modelo da Turbina	Eq. 2.18
<i>Governor</i>	Malha Hidráulica (primeira ordem)	Eq. 2.22
<i>Droop Characteristics</i>	Queda de Velocidade	Eq. 2.21

O controlador PID segue no formato da Eq. 5.5

$$PID = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_D s}{T_v s + 1} \quad \text{Eq. 5.5}$$

Tabela 5.10: Símbolos equivalentes do artigo neste trabalho

Nomenclatura	Símbolo deste trabalho
Variação de potência consumida pela carga em pu na UHE 1	$\Delta \bar{P}_e 2$
Variação de potência consumida pela carga em pu na UHE 2	$\Delta \bar{P}_e 2$
Variação da frequência em pu na UHE 1	$\Delta \bar{f} 1$
Variação da frequência em pu na UHE 2	$\Delta \bar{f} 2$

Considerando a Figura 5.12, e o modelo de cada bloco indicado na Tabela 5.9, a Tabela 5.11 indica os parâmetro do sistema utilizados e a Tabela 5.12 os parâmetros dos controladores.

Tabela 5.11: Parâmetros do sistema, Frequência=60Hz, Potência base=100MVA

Símbolo	UHE 1	UHE 2
T_m	10	6
\bar{D}	1,0	1,0
T_G	0,5	0,2
R	0,05	0,05
t_w	4,0	4,0

Tabela 5.12: Parâmetros dos Controladores

Símbolo	UHE 1	UHE 2
K_p	-18,58	-19,017
K_i	0,117	0,122
K_D	2,5	1,5
T_v	0,01	0,01

É importante observar que neste modelo originalmente não se utiliza o ponto de operação G_o , em vez disto usa-se um t_w , que varia de 100% até 150%. Como o objetivo é comparar as técnicas sem perder muito a referência do que foi feito originalmente, foi mantida esta estrutura.

5.4.2 Projeto do Controlador

Neste caso como se trata de duas UHE's, o método foi modificado para obter-se o controlador para as duas ao mesmo tempo, mantendo a estabilidade robusta para ambas também. Assim será ampliado o conceito apresentado para um sistema de duas áreas. Substitui-se o modelo da turbina, modifica-se as entradas e saídas e por fim aplica-se a otimização por AG na qual em vez de ser com 3 genes serão 6, pois são dois controladores.

5.4.2.1 Remodelagem do Sistema

O modelo do sistema neste caso já está linearizado tanto para o projeto do controlador quanto para a simulação final. Assim, apenas é necessário alterar as entradas e saídas para o projeto do controlador e alterar o modelo da turbina da Eq. 2.18, para o modelo da Eq. 4.9.

As entradas e saídas do sistema são modificadas para as seguintes

- Entradas:
 - Entrada da incerteza da UHE 1: $\Delta_y 1$
 - Entrada da incerteza da UHE 2: $\Delta_y 2$
 - Variação na carga na UHE 1: $\Delta P_e 1$
 - Variação na carga na UHE 2: $\Delta P_e 2$
 - Entrada de controle da UHE 1: $\Delta u 1$
 - Entrada de controle da UHE 2: $\Delta u 2$
- Saídas:
 - Saída da incerteza da UHE 1: $\Delta_u 1$
 - Saída da incerteza da UHE 2: $\Delta_u 2$

- Variação na frequência na UHE 1: Δf_1
- Variação na frequência na UHE 2: Δf_2
- Variação na frequência na UHE 1: Δf_1
- Variação na frequência na UHE 2: Δf_2

O diagrama de blocos da Figura 5.13 apresenta o modelo final com todas as alterações.

$\Delta_{TW}2$. forem menores do que um, então a norma \mathcal{H}_∞ da matriz transferência será menor do que um.

Para finalizar são considerados para o modelo da turbina modificado, os parâmetros da Tabela 5.13 baseados e calculados no subcapítulo 4.2.1

	UHE 1	UHE 2
\widetilde{G}_o	5	5
p_{TW}	0,2	0,2

5.4.2.2 Projeto do Controlador

Há duas diferenças para o projeto do controlador para este caso. A primeira é a quantidade de genes que passarão de 3 para 6, pois são dois controladores PID. A segunda é a condição para estabilidade robusta que deixará de ser o que foi apresentado. Primeiro reformulam-se as Eq. 4.10 (elementos da matriz transferência do sistema em malha fechada com o controlador) e Eq. 4.11 (entradas e saídas do sistema em malha fechada) por respectivamente Eq. 5.6 e Eq. 5.7,

$$H_u = F_l(M_u, K) = \begin{bmatrix} H_{u11} & H_{u12} & H_{u13} & H_{u14} \\ H_{u21} & H_{u22} & H_{u23} & H_{u24} \\ H_{u31} & H_{u32} & H_{u33} & H_{u34} \\ H_{u41} & H_{u42} & H_{u43} & H_{u44} \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 5.6}$$

$$\begin{bmatrix} y_{\Delta 1} \\ y_{\Delta 2} \\ \Delta f 1 \\ \Delta f 2 \end{bmatrix} = H_u \begin{bmatrix} u_{\Delta 1} \\ u_{\Delta 2} \\ \Delta P_e 1 \\ \Delta P_e 2 \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 5.7}$$

por fim condição de robustez passa da Eq. 4.13 para a Eq. 5.8

$$\left\| \begin{bmatrix} H_{u11} & H_{u12} \\ H_{u21} & H_{u22} \end{bmatrix} \right\|_{\infty} < 1 \quad \text{Eq. 5.8}$$

A condição de desempenho, Eq. 4.14, é a mesma, a única diferença é a função peso W que passa a ser uma matriz diagonal conforme Eq. 5.9

$$W = \begin{bmatrix} W_1 & 0 \\ 0 & W_2 \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 5.9}$$

$$W_1 = \frac{1}{s + 10^{-8}} \quad \text{Eq. 5.10}$$

$$W_2 = 5 \quad \text{Eq. 5.11}$$

Assim montando a função objetivo conforme Figura 4.8, com a modificação da Eq. 5.8, e aplicando a otimização por AG, com os parâmetros da Tabela 5.14

Tabela 5.14: Configuração do AG para o caso do sistema da literatura

Descrição	Literatura (MATLAB)
Tamanho da População	400
População Inicial	Uniforme: <ul style="list-style-type: none"> • -30 a 0 (Kpr UHE 1 e UHE 2) • 0 a 20 (Ki UHE 1 e UHE 2) • 0 a 20 (Kv UHE 1 e UHE 2) (gacreationuniform, PopInitRange, [-30 0 0 -30 0 0 ; 0 20 20 0 20 20])
Número de Genes	6
Seleção	Roleta Viciada (selectionroulette)
Crossover	Crossover Flat (crossoverheuristic)
Mutação	Probabilidade 1% (mutationuniform, 0.01)
Elitismo	5% da população (EliteCount, 0.05)
Máximo de Gerações	50 (Generations,50)

Após várias simulações obtém-se os resultados da Tabela 5.15

Tabela 5.15: Parâmetros dos controladores obtidos pelo AG para o caso do sistema da literatura

nº	UHE1			UHE2			Norma	Norma
	Kpr	Ki	Kv	Kpr	Ki	Kv	\mathcal{H}_∞^1	\mathcal{H}_∞^2
1ª	-19,7577	-0,1025	2,2045	-17,9068	0,3294	4,3086	4,4097	4,8387
2ª	-19,0364	-0,1658	2,673	-19,2555	0,0297	3,4516	5,1129	3,1204
3ª	-19,7220	-0,1080	2,1422	-17,8586	0,3352	4,2473	4,4016	4,6116
4ª	-19,5241	-0,1008	1,9702	-18,1717	0,3165	2,8897	4,6431	2,2453
5ª	-19,6976	-0,1357	2,0542	-17,6877	0,3644	4,0939	4,3736	4,3453
6ª	-19,5240	-0,0826	1,8880	-18,3490	0,2996	3,0591	4,6541	2,1833
7ª	-19,5642	-0,0430	2,0587	-17,4778	0,1955	3,3658	4,8424	3,2694
8ª	-19,6634	-0,1165	2,2677	-17,8378	0,0930	3,9858	4,7732	4,8625
9ª	-19,5837	-0,1095	1,9198	-17,9656	0,3302	3,3385	4,5323	2,3184
10ª	-19,4847	-0,0933	2,1418	-17,5922	0,1309	2,5462	5,0091	2,4440
Média	-19,5558	-0,1058	1,8915	-18,0103	0,2424	3,5286		3,4239

¹do sistema com o controlador e função peso

²do sistema com o controlador

5.4.3 Resultados

A simulação final foi feita no aplicativo MATLAB para o sistema linearizado e são comparados com o controlador PID proposto por Khodabakhshian e Hooshmand (2010), para alguns pontos de operação.

Simula-se uma variação na carga na área de cada UHE e analisa-se a variação de frequência resultante em cada área, para alguns pontos de operação. A variação na carga é sempre de 0,01pu ou 1MVA, os pontos de operação são em percentagens em relação ao valor de t_w apresentado na Tabela 5.11 sendo estes: 100%, 110%, 120%, 130%, 140%, 150%. O valor máximo foi escolhido por ser o limite de estabilidade do controlador original (KHODABAKHSHIAN e HOOSHMAND, 2010), e portanto foi o limite também escolhido para o controlador proposto.

Portanto são apresentados os resultados em quatro figuras:

- Figura 5.14:
 - Δf_1 : Variação da Frequência na área da UHE 1
 - $\Delta P_e 1$: Variação de Carga na área da UHE 1
- Figura 5.15:
 - Δf_1 : Variação da Frequência na área da UHE 1

- $\Delta P_e 2$: Variação de Carga na área da UHE 2
- Figura 5.16:
 - $\Delta f 2$: Variação da Frequência na área da UHE 2
 - $\Delta P_e 1$: Variação de Carga na área da UHE 1
- Figura 5.17:
 - $\Delta f 2$: Variação da Frequência na área da UHE 2
 - $\Delta P_e 2$: Variação de Carga na área da UHE 2

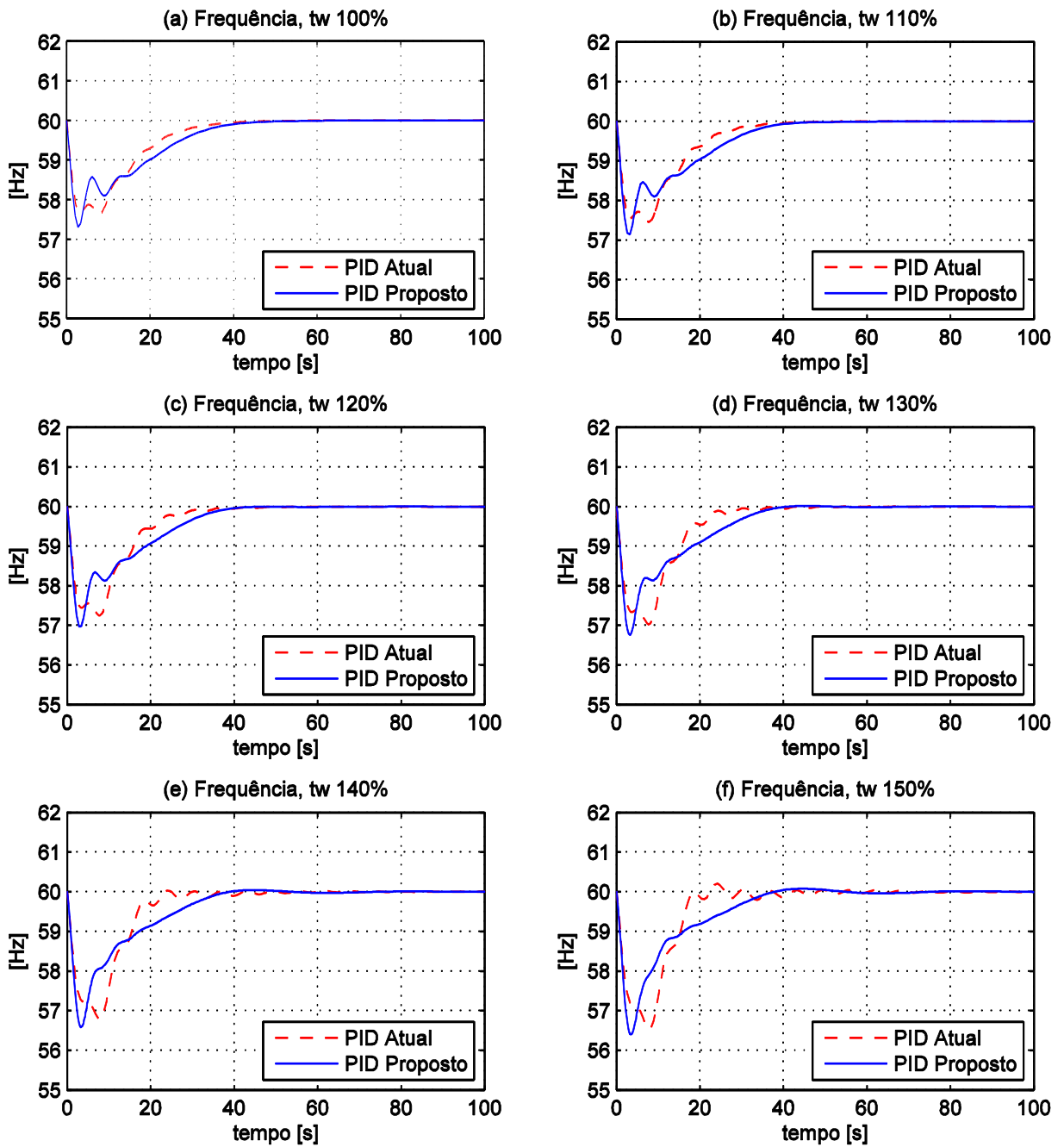


Figura 5.14: Gráfico da frequência para controlador atual e proposto em diferentes pontos de operação para a UHE 1 da literatura com variação na carga da UHE 1

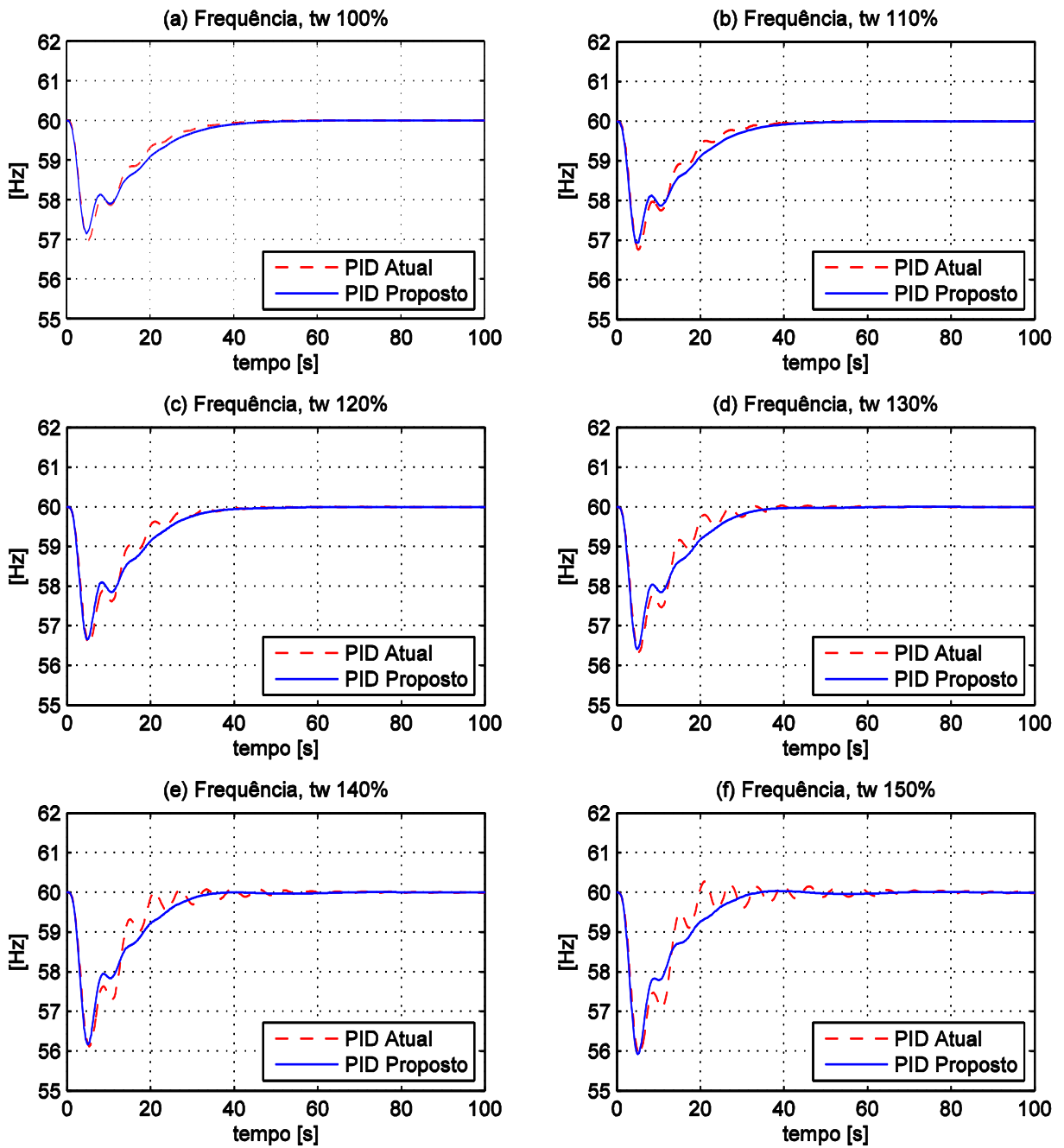


Figura 5.15: Gráfico da frequência para controlador atual e proposto em diferentes pontos de operação para a UHE 1 da literatura com variação na carga da UHE 2

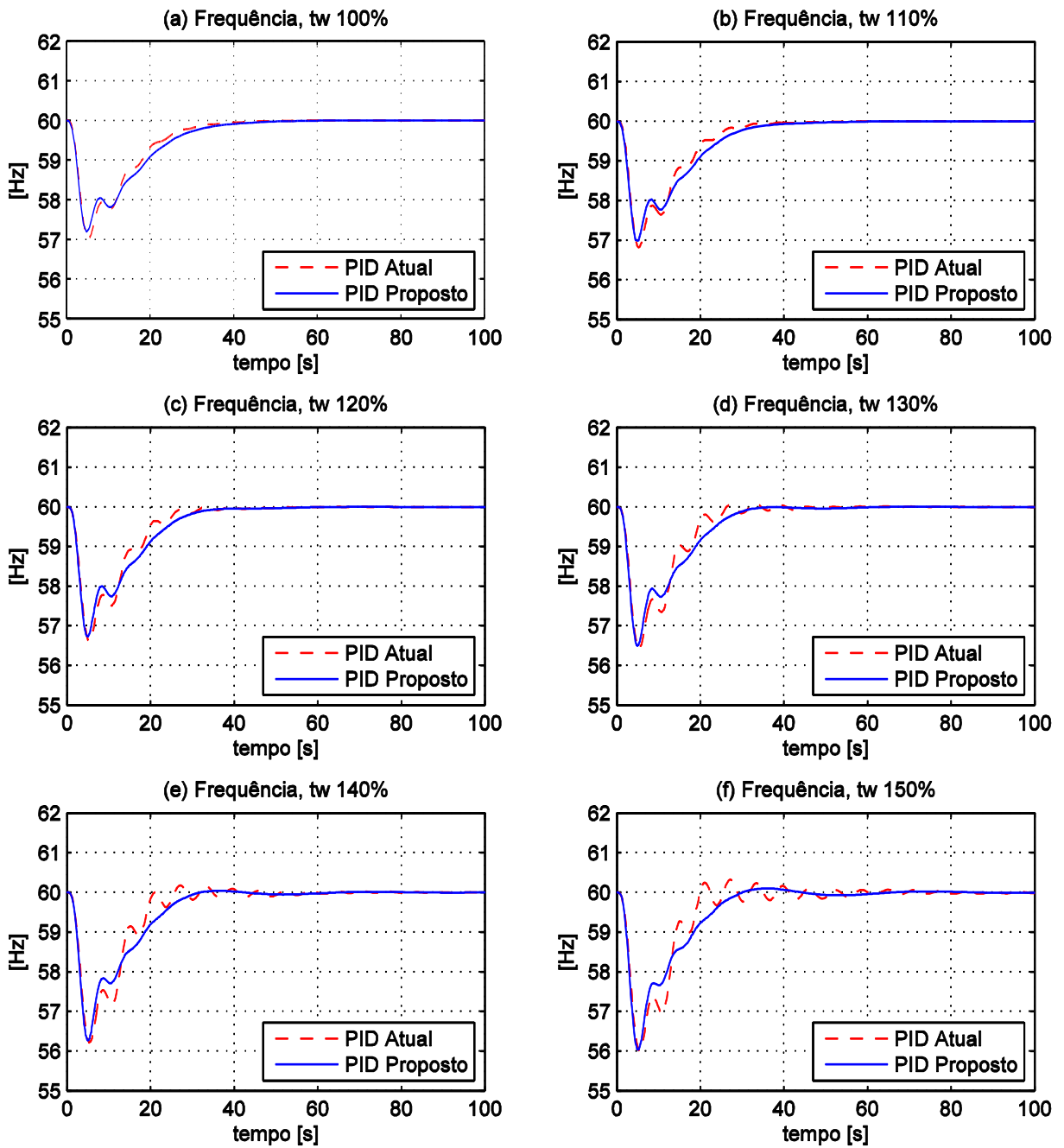


Figura 5.16: Gráfico da frequência para controlador atual e proposto em diferentes pontos de operação para a UHE 2 da literatura com variação na carga da UHE 1

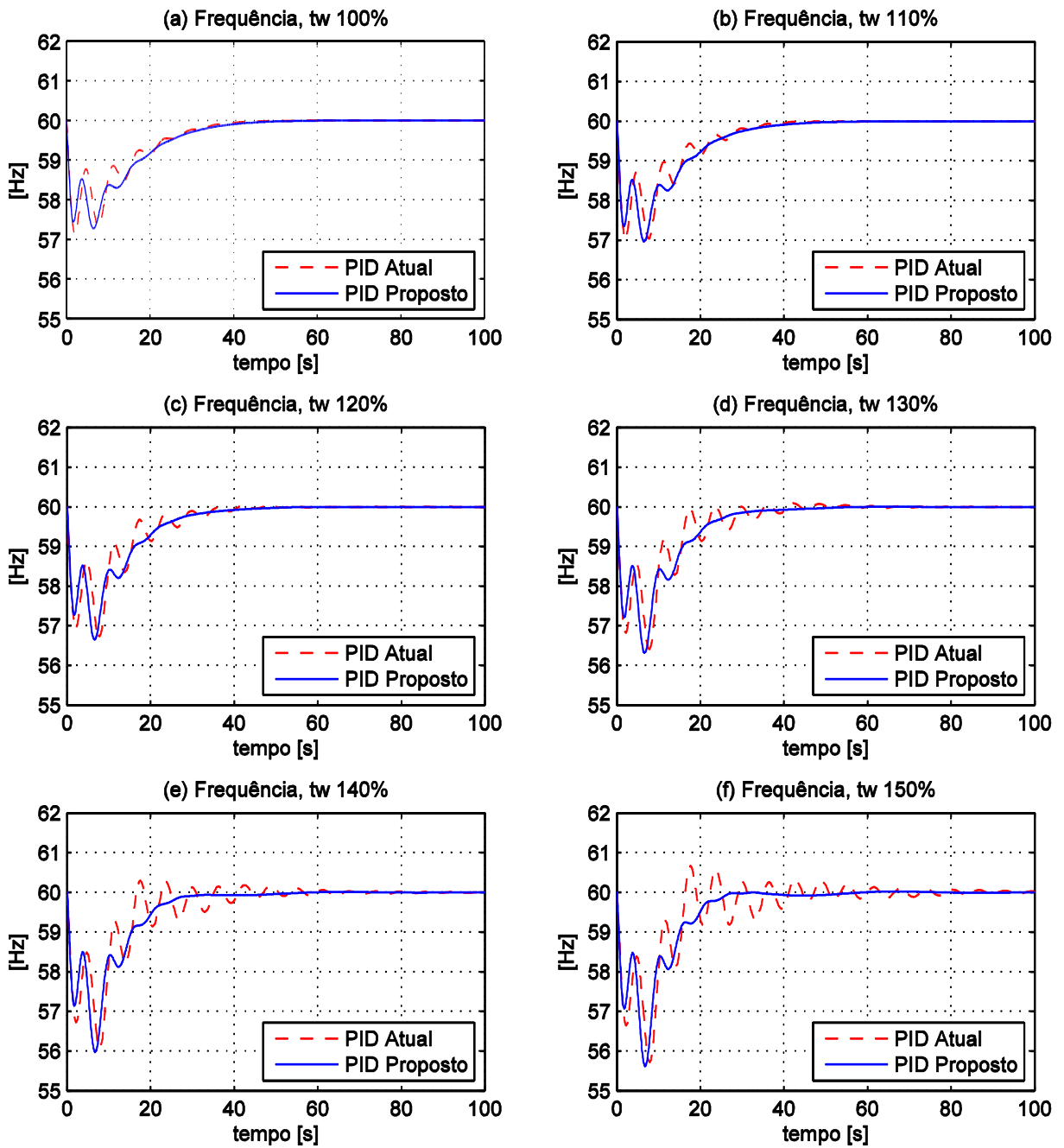


Figura 5.17: Gráfico da frequência para controlador atual e proposto em diferentes pontos de operação para a UHE 2 da literatura com variação na carga da UHE 2

Assim por meio dos gráficos das Figura 5.14, Figura 5.15, Figura 5.16, Figura 5.17 é possível perceber, para este caso, que no mínimo a técnica proposta possui desempenho semelhante à técnica proposta no artigo, em alguns pontos, porém em vários pontos a que foi proposta se mostrou superior.

No gráfico da Figura 5.14, o desempenho se mostrou diferente, em tempos de resposta, sobresinal e oscilação. O pico de sobresinal para o controlador proposto é um pouco maior, porém a frequência rapidamente volta para frequências menores. O tempo de resposta é semelhante para a maioria dos pontos analisados, porém o controlador proposto apresentou menor oscilação na maioria dos casos.

Na Figura 5.15, o desempenho foi semelhante em relação a tempo de resposta e sobrelevação, porém o controlador proposto apresenta uma menor oscilação para todos os pontos analisados. O mesmo pode-se dizer para os gráficos das Figura 5.16 e Figura 5.17.

Portanto o controlador proposto apresentou um melhor desempenho para um maior número de situações, demonstrando que este é mais adequado para o sistema proposto

Portanto, apesar do controlador do artigo Khodabakhshian e Hooshmand (2010) também ser robustamente estável, o controlador proposto apresentou um melhor desempenho para um maior número de situações, demonstrando que este é mais adequado para o sistema proposto. Pois, menos oscilações

6 CONCLUSÃO

A pesquisa realizada demonstrou que é possível obter um controlador PID com estabilidade robusta e usando como critério de desempenho a minimização da norma \mathcal{H}_∞ , por meio do AG como algoritmo de busca. Os modelos testados foram dois diferentes modelos de usina, um em publicação de revista científica e outro obtido na prática.

Todos os objetivos propostos foram cumpridos como será descrito. Porém, algumas conclusões extras pode se obter do estudo. Desta forma, a conclusão é dividida em duas partes conforme o aspecto analisado.

6.1 MODELOS PROPOSTOS

A primeira parte da conclusão refere-se ao que se pode concluir para cada modelo e situação analisada. No caso, seguindo a ordem em que foram apresentados na seção de resultados.

No modelo da usina do SEP brasileiro, o controlador proposto obteve um resultado melhor que o controlador existente na usina em questão. Neste caso tanto em tempo de resposta como em sobrelevação.

As conclusões sobre o outro modelo de UHE será apresentado junto com o texto final

6.2 TÉCNICA DE CONTROLE

A avaliação da técnica de controle proposta é a parte mais importante desta conclusão apesar de não ser a última, aqui se avalia o desempenho geral do algoritmo do controlador para todos os modelos propostos. Neste caso é importante avaliar-se quatro pontos: os parâmetros do AG, os resultados obtidos pelo AG, o filtro utilizado, e por fim o desempenho geral da técnica de controle.

A variação nos resultados obtidos pelo algoritmo cada vez que é executado é normal em técnicas baseadas em AG. Ocorre, pois há uma aleatoriedade nas

condições iniciais, a população inicial é aleatória, isto leva a diferentes respostas no final da simulação. Porém sabe-se que para um AG bem ajustado, a variação nos resultados é bem pequena, pois isto indica que provavelmente trata-se de um mínimo global e não apenas um mínimo local. Entre os casos analisados, em todos, a variação dos resultados foi inferior a 5% indicando um bom ajuste dos parâmetros do AG, i.e. tipo de seleção população inicial, taxa de mutação, etc.

Estes parâmetros para o AG foram obtidos depois de inúmeros testes. Sendo mantidos com poucas variações ao aplicar-se a técnica em diferentes modelos. A diferença foram apenas a população inicial e critério de parada que tiveram que ser modificados conforme a complexidade do sistema. Portanto conclui-se que estes parâmetros são bem adequados para o projeto de controlador e para o tipo de modelo, i.e. modelo de carga e frequência de usina hidroelétrica. O motivo disso talvez seja ao tipo de função objetivo escolhida ou o modelo da usina, pois todos compartilham estruturas semelhantes. Portanto, conclui-se que os parâmetros utilizados são bem adequados para minimização da norma H infinito por meio de AG.

Outro aspecto a ser analisado é o filtro utilizado para cada modelo de usina, que ao contrario do caso dos parâmetros do AG, neste houve uma diferença maior. Porém, nota-se que a estrutura do filtro , um polo em 10^{-7} e um valor de zero conforme o modelo, foi a que obteve melhores resultados. Durante os testes foram testados vários outros filtros, passa alta, passa baixa, passa faixa, ressonante, 2ª e 3ª ordem, projetado por ferramentas computacionais, etc.. Entretanto o filtro que melhor funcionou foi na estrutura mencionada, sendo este baseado no filtro proposto por Tan e Xu (2009). Talvez realmente este seja o tipo mais adequado para modelo de controle de carga e frequência, visto que no caso deste artigo era para uma usina termoelétrica e esta mesma estrutura funcionou adequadamente para o modelo de uma usina hidroelétrica. Portanto conclui-se que o filtro foi adequado para os casos analisados e possivelmente será adequado para outros casos de controle CCF.

Analisando como um todo a técnica de controle, conclui-se que esta atingiu seus objetivos iniciais de desempenho e estabilidade, além disso conseguiu mostrar-se eficiente para três modelos de usina em diferentes situações sendo inclusive um destes baseado em um modelo real do SEP brasileiro. O mesmo ajuste do AG se mostrou eficiente para diferentes situações, algo inesperado, o que demonstra certa robustez da técnica neste quesito. O filtro, mostrou-se que a mesma estrutura foi

eficiente para qualquer caso o que pode indicar um padrão para a aplicação de técnicas baseadas na norma \mathcal{H}_∞ em CCF. Por todos os motivos apresentados conclui-se que foram cumpridos os objetivos no quesito da técnica de controle.

6.3 TRABALHOS FUTUROS

Considerando tudo o que já foi explicado há vários caminhos que podem ser seguidos em novas pesquisas. Aqui vou citar algumas possibilidades sucintamente, assim como seus objetivos

- Obter controlador robusto para outras não-linearidades, como as que estão presentes no modelo da malha hidráulica e no modelo do gerador
- Comparar desempenho com outros algoritmos de busca ou minimização. O AG foi escolhido, mas nada garante que seja o melhor método.
- Utilizar outros critérios de desempenho que não sejam a norma \mathcal{H}_∞ , porém mantendo os critérios para estabilidade robusta, pode resultar em melhores desempenho para todos os pontos de operação

7 BIBLIOGRAFIA

ABDEL-MAGID, Y. L.; DAWOUD, M. M. Genetic Algorithms Applications in Load Frequency. **Control Genetic Algorithms in Engineering Systems: Innovations and Applications**, p. 207-213, 1995. ISSN 414.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional**. Brasília. 2015.

ANDERSON, P. M.; FOUAD, A. **Power System Control and Stability**. [S.l.]: A John Wiley & Sons, 2003.

BEVRANI, H. **Robust Power System Frequency Control**. [S.l.]: Springer, 2009.

BRUINSMA, N. A.; STEINBUCH, M. A fast algorithm to compute the H infinity norm of a transfer function matrix. **Systems and Control Letters**, v. 14, n. 4, p. 287-293, 1990.

CHEN, C.-T. **Linear System Theory and Design**. 3^a. ed. New York: Oxford University Press, 1999.

COLANERI, P.; GEROMEL, J. C.; LOCATELLI, A.; GEROMEL, J. C.; LOCATELLI, A. **Control Theory and Design. An RH_2 and RH_∞ Viewpoint**. [S.l.]: Acad. Press, 1997.

DA ROSA, L. F.; OLIVEIRA, G. H. C.; LEANDRO, G.; DONAISKY, E.; PENA, A. M.; SOUZA, J. A. PID Robusto com Norma H_∞ e Otimização por Algoritmos Genéticos para Controle de Frequência em Usinas Hidrelétricas. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**, 2016

DE MELLO, F. P. et al. Hydraulic Turbine and Turbine Control Models for System Dynamic Studies. **IEEE Transactions On Power Systems**, v. 7, n. 1, p. 167–179, 1992

DONAISKY, E. **Representação PWA Semi-Física para Reguladores de Velocidade em Sistemas de Geração Hidrelétrica e Controle Preditivo Híbrido de Carga-Frequência**. Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR. Curitiba. 2015.

DONAIISKY, E.; OLIVEIRA, G. H. C.; LEANDRO, G. V.; SANTOS, E. A. P.; PENA, A. M. A. S. J. A. Semi-physical piecewise affine representation for governors in hydropower system generation. **Electric Power Systems Research**, v. vol. 136, p. 181-188, 2016

DONAIISKY, E.; OLIVEIRA, G. H. C.; LEANDRO, G. V.; SANTOS, E. A. P.; PENA, A. M.; SOUZA, J. A. Semi-physical piecewise affine representation for governors in hydropower system generation. **Electric Power Systems Research**, v. vol. 136, p. 181-188, 2016

EIBEN, A. E.; HINTERDING, R.; MICHALEWICZ, Z. Parameter control in evolutionary algorithms. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 3, n. 2, p. 124-141, 1999.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Balanço Energético Nacional, 2015. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2013.pdf>. Acesso em: 14 Junho 2015.

EREMIA, M.; SHAHIDEHPOUR, M. **Handbook of electrical power system dynamics: modeling, stability, and control**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2013.

FARAG, A.; WERNER, H. Fixed-Structure μ -Synthesis - An Evolutionary Approach. **Proceedings of the 2006 American Control Conference**, p. 4332-4337, 2006

FOORD, T. R. Step response of a governed hydro-generator. **Proceedings of the Institution of Electrical Engineers**, v. 125, n. 11, p. 1247-1248, 1978.

FREITAS, M. A. V.; SOITO, J. L. S. Energia e recursos hídricos. **Parcerias Estratégicas**, n. 27, p. 177-215, 2008.

GU, D.-W.; PETKOV, P. H.; KONSTANTINOV, M. M. **Robust Control Design with MATLAB®**. London: Springer, 2005.

HAUPT, L. R.; HAUPT, S. E. **Practical Genetic Algorithms**. 2ª. ed. Hobokey: Wiley, 2004.

IEEE STD 1207. IEEE guide for the application of turbine governing systems for hydroelectric generating units. **IEEE Std 1207-2011**, p. 1-131, 2011.

KHODABAKHSHIAN, A.; HOOSHMAND, R. A new PID controller design for automatic generation control of hydro power systems. **International Journal of Electrical Power & Energy System**, v. 32, p. 375-382, 2010.

KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**. New York: McGraw-Hill, 1994.

KUNDUR, P. et al. Definition and Classification of Power System Stability. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 19, n. 2, Maio 2004.

KUSIC, G. L.; SUTTERFIELD, J. A.; CAPREZ, A. R.; HANELINE, J. L.; BERGMAN, B. R. Automatic generation control for hydrosystems. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 3, n. 1, p. 33-39, 1988.

LINDEN, R. **Algoritmos Genéticos**. 1ª. ed. Rio de Janeiro: Brasport, 2006.

LU, Q.; SUN, Y.; WU, F. F.; NI, Y. A. Y. A. Nonlinear Decentralized Robust Governor Control for Hydroturbine-generator Sets in Multi-Machine Power Systems. **Electrical Power and Energy Systems**, v. 26, p. 333-339, 2004

LU, Q.; SUN, Y.; WU, F. F.; NI, Y. A. Y. A. Nonlinear Decentralized Robust Governor Control for Hydroturbine-generator Sets in Multi-Machine Power Systems. **Electrical Power and Energy Systems**, v. 26, p. 333-339, 2009

LU, Q.; SUN, Y.; WU, F. F.; NI, Y. A. Y. A. Nonlinear Decentralized Robust Governor Control for Hydroturbine-generator Sets in Multi-Machine Power Systems. **Electrical Power and Energy Systems**, v. 26, p. 333-339, 2009

MANDOUR, M. E.-D.; ALI, S.; LOTFY, M. E. Robust Load Frequency Controller Design Via Genetic Algorithm and H^∞ . **Modern Electric Power Systems**, 2010

MELANIE, M. **An Introduction to Genetic Algorithms**. 5ª. ed. [S.I.]: MIT Press, 1999.

MUNOZ-HERNANDEZ, G. A.; MANSOOR, S. P.; JONES, D. I. **Modelling and Controlling Hydropower Plants**. [S.I.]: Springer, 2013.

PANDEY, S. K.; MOHANTY, S. R.; KISHOR, N. A Literature Survey on Load-Frequency Control for Conventional and Distribution Generation Power Systems. **Renewable and Sustainable Energy**, v. vol. 25, p. 318-334, 2013

PANDEY, S. K.; MOHANTY, S. R.; KISHOR, N. A literature survey on load-frequency control for conventional and distribution generation power systems. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v. 25, p. 318-334, 2013.

PELACINI, D. A. F. **Análise de PID Robusto com Minimização da Norma H^∞ Aplicado ao Problema de Carga e Frequência em Usinas Hidrelétricas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2015.

QUAZZA, G. Noninteracting Controls of Interconnected Electric Power Systems. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-85, p. 727 – 741, 1996. ISSN 7.

RERKPREEDAPONG, D.; HASANOVIC, A.; FELIACHI, A. Robust Load Frequency Control Using Genetic Algorithms and Linear Matrix Inequalities. **IEEE Transactions On Power Systems**, v. 18, n. 2, 2003

SAXENA, A.; GUPTA, M.; GUPTA, V. Automatic Generation Control of Two Area Interconnected Power System Using Genetic Algorithm. **2012 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research**, 2012

SHANKAR, R.; CHATTERJEE, K.; CHATTERJEE, T. K. Genetic Algorithm Based Controller for Load-Frequency. **Control of Interconnected Systems 1st Int'l Conf. on Recent Advances in Information Technology | RAIT-2012 |**, 2012

SHIBATA, T.; YOUNEYAMA, S.; OHTAKA, T.; S., I. Design of Load Frequency Control Based on μ -Synthesis. **Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES**, v. 3, p. 1589-1594, 2002

SHIRAI, G. Load frequency control using Lyapunov's second method: Bang-bang control of speed changer position. **Proceedings of the IEEE**, v. 67, n. 10, p. 1458 - 1459, 1979.

TAN, W.; XU, Z. Robust Analysis and Design of Load Frequency Controller for Power Systems. **Electric Power Systems Research**, v. 79, p. 846-853, 2009

THE MATHWORKS INC. MathWorks, 2016. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/help/symbolic/norm.html>>. Acesso em: 03 Junho 2016.

THORNE, D. H.; HILL, E. F. Field Testing and Simulation of Hydroelectric Turbine Governor Performance. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, p. 1183-1191, 1973

TSAI, M.-C.; GU, D.-W. **Robust and Optimal Control**. 1^a. ed. New Delhi: Springer-Verlag London, 2014.

VIEIRA, X. F. **Operação de Sistemas de Potência com Controle Automático de Geração**. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1984.

VRDOLJAK, K.; PERIĆ, N.; PETROVIĆ, I. Liding mode based load-frequency control in power systems. **Electric Power Systems Research**, v. 80, p. 514-527, 2010

ZHOU, K.; DOYLE, J. C.; GLOVER, K. **Robust and Optimal Control**. 1^a. ed. Englewood Cliffs: [s.n.], 1995.