

 UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**ASPECTOS BÁSICOS DO CONTROLE CARGA-
FREQUÊNCIA EM SISTEMAS DE POTÊNCIA**

FREDERICO ALVES MATOS DE LIMA

ORIENTADOR: FRANCISCO DAMASCENO FREITAS

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

BRASÍLIA/DF: NOVEMBRO – 2008

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ASPECTOS BÁSICOS DO CONTROLE CARGA-FREQÜÊNCIA EM
SISTEMAS DE POTÊNCIA**

FREDERICO ALVES MATOS DE LIMA

**MONOGRAFIA SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO
ELETRICISTA.**

APROVADA POR:

**Prof. Francisco Damasceno Freitas, Dr. (ENE-UnB)
(Orientador)**

**Prof. Luís Filomeno de Jesus Fernandes, Dr. (ENE-UnB)
(Examinador Interno)**

**Profa. Alessandra Macedo de Souza, Dr. (ENE-UnB)
(Examinador Interno)**

BRASÍLIA, 04 DE JULHO DE 2008

FICHA CATALOGRÁFICA

LIMA, FREDERICO ALVES MATOS DE LIMA

Aspectos Básicos do Controle Carga-Frequência em Sistemas de Potência
ix, 69p., (ENE/FT/UnB, Engenheiro Eletricista, 2008). Monografia de Graduação –
Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Elétrica.

- | | |
|-----------------------|------------------------|
| 1. Carga-frequência | 2. Controle de Geração |
| 3. Sistemas Elétricos | 4. Sistema de Potência |
| I. ENE/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LIMA, F. A. M. (2008). Aspectos Básicos do Controle Carga-Frequência em Sistemas de Potência. Monografia de Graduação, Publicação ENE 01/2008, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 69p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTORE: Frederico Alves Matos de Lima.

TÍTULO: Aspectos Básicos do Controle Carga-Frequência em Sistemas de Potência.

GRAU: Engenheiro Eletricista ANO: 2008

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta monografia de graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa monografia de graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Frederico Alves Matos de Lima
SHIS QI 26, conjunto 04, casa 16
71670-040 Brasília – DF – Brasil.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, irmãos e amigos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter feito com que eu estivesse aqui para a conclusão deste projeto.

Agradeço aos meus pais e irmãos que sempre me incentivaram e apoiaram durante toda minha vida e principalmente durante meus anos de estudo.

Ao professor Doutor Francisco Damasceno Freitas, que em todo tempo esteve disposto a me auxiliar e resolver quaisquer dúvidas que surgiram durante a execução do projeto, sempre apresentando muita paciência, cordialidade e respeito.

A todos os professores que contribuíram decisivamente para minha formação acadêmica, profissional e pessoal.

Aos amigos que fiz durante essa jornada na Universidade de Brasília os quais considero um dos grandes frutos colhidos em ter estudado nesta Universidade.

RESUMO

ASPECTOS BÁSICOS DO CONTROLE CARGA-FREQÜÊNCIA EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

Autor: Frederico Alves Matos de Lima

Orientador: Francisco Damasceno Freitas

Palavras-chave: carga-freqüência, controle de geração, sistemas elétricos, sistema de potência.

Brasília, 04 de julho de 2008.

O presente trabalho apresenta um estudo sobre o modelo utilizado para sistemas de controle carga-freqüência. Primeiramente, é feita a caracterização do sistema gerador-carga e dos componentes fundamentais que estão envolvidos na geração e no controle do sistema. Em seguida são apresentados os modelos dos componentes que serão utilizados para análise individual e de diversas combinações que ocorrem em um sistema de controle de geração

É realizada uma análise transitória e de regime permanente para que seja possível mostrar como se comportam individualmente os componentes do sistema, e também, quando atuando em conjunto. Para comprovação da análise e melhor entendimento da mesma, são apresentadas simulações em resposta a uma variação de carga em degrau.

A partir dos resultados obtidos com as simulações é possível compreender o funcionamento de um sistema de controle carga-freqüência e a atuação de cada componente envolvido.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

1 – INTRODUÇÃO

1.1 – INTRODUÇÃO GERAL

A Dinâmica dos Sistemas de Potência é um assunto amplo e de considerável complexidade. Existem diversos sistemas e subsistemas que contribuem para a amplitude do problema de análise e previsão de efeitos dinâmicos em sistemas de potência.

Esses efeitos dinâmicos normalmente se enquadram nas áreas de dinâmica do sistema motor, dinâmica das máquinas elétricas e controles de excitação ou dinâmica de geração.

Na parte de Dinâmica do Sistema Motor, é importante para o texto o controle e as respostas das variáveis da máquina motriz, tais como potência do eixo da turbina, pressões da caldeira, temperatura e fluxos.

A área de controle da Dinâmica das Máquinas Elétricas e da Excitação envolve o estudo de condições da rede e o comportamento do fluxo de potência da rede, tensões correntes, etc.

A terceira área de Dinâmica da Geração diz respeito ao comportamento de todo o sistema de potência em relação à frequência e potência nas linhas de interligação [1].

Em todas as áreas, os problemas devem conter modelos de todo o sistema, por causa da natureza dos acoplamentos e das realimentações das malhas fechadas do sistema de potência. Porém, usualmente não é necessário considerar, simultaneamente, todas as áreas em detalhes e, dependendo do fenômeno em interesse, várias simplificações podem ser feitas.

O assunto deste texto é o estudo da Dinâmica do Controle da Geração conhecido como Regulação de Velocidade e Controle Carga-Frequência que é um ponto importante da Dinâmica dos Sistemas de Potência.

Em um sistema de potência a carga alimentada varia constantemente. Este trabalho mostra quais são as conseqüências destas alterações de cargas na geração de energia, e mostrará também, como atuam reguladores e controladores para que o sistema continue funcionando apesar das diversificadas cargas apresentadas.

É realizada uma análise transitória e de regime permanente para que seja possível mostrar como se comportam individualmente os componentes do sistema, e também, quando atuando em conjunto.

Para ilustração da análise e melhor entendimento da mesma, é apresentado simulações em resposta a uma variação de carga em degrau, em exemplos de sistemas completos.

A partir dos resultados obtidos com as simulações é possível compreender o funcionamento do controle de um sistema de controle carga-freqüência e a atuação de cada componente envolvido no controle.

1.2 – TRABALHOS QUE ABORDAM

Para a realização do presente trabalho foram utilizadas diversas referências cada uma contribuindo com parte das informações necessárias para a realização do texto. A teoria apresentada, os dados utilizados para as simulações, parte das figuras, parte da análise foram retiradas da bibliografia.

Os controles primários e secundários são apresentados pelo texto de referência [2]. São apresentados detalhes das características de cada controlador além de abordar, também, o controlador terciário, que não está no escopo deste trabalho.

O texto de referência [3] descreve uma aproximação, para facilitar o aprendizado, de controle carga-freqüência de um sistema de uma única área isolada. Está aproximação é baseada primeiramente no uso do SIMULINK para a construção do modelo do sistema e para a simulação de seu comportamento.

A referência [4] estuda o desempenho do controle de carga-freqüência para um sistema de potência de uma única área isolada, tendo mais de uma unidade geradora de potência.

É possível verificar [5] grandes detalhes do sistema do controle carga-freqüência utilizado em sistemas de potência. Incluindo medidas de desempenho, medidas de condições de emergência

A referência [1] apresenta os dados utilizados para as simulações que se encontram no capítulo 4.

1.3 – OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo do presente trabalho é apresentar os aspectos básicos do controle carga-freqüência abordando a dinâmica do controle de geração.

É feita uma caracterização dos componentes fundamentais do sistema de controle carga–freqüência que estão envolvidos na geração. Posteriormente, apresenta-se uma modelagem, seguida de testes que servirão como base para as análises e conclusões.

1.4 – ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O capítulo 2 faz uma descrição dos principais componentes envolvidos no problema de controle de carga-freqüência, até que se alcance um modelo para cada um deles, em um sistema de geração.

No capítulo 3, é feita uma análise dinâmica de cada componente, assim como, suas características em regime permanente, e mostra o modelo de alguns exemplos de sistemas para serem analisados.

O capítulo 4 apresenta as simulações para todos os modelos criados nos capítulos 2 e 3. Compara com os modelos criados e suas respectivas análises desenvolvidas.

No capítulo 5, são realizadas as conclusões do trabalho.

No apêndice A, está a programação feita no MatLab para simular a situação de uma área isolada com três máquinas ligadas em paralelo, sendo que o sistema é representado no espaço de estados.

No apêndice B, está a programação da simulação da situação de duas áreas interligadas representadas no espaço de estados.

No apêndice C, encontra-se a programação realizada para simular, também, a situação de duas áreas interligadas, porém, agora, ao sistema, será adicionado o controle suplementar.

2 – DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES DO SISTEMA

O objetivo deste capítulo é apresentar uma descrição de componentes do sistema de potência e de sua modelagem para os estudos a serem conduzidos mais a frente.

Os componentes descritos são o conjunto gerador-carga, o amortecimento do sistema, o acoplamento elétrico entre as máquinas, os sistemas de fornecimento de energia, controle primário de carga frequência e controle suplementar de geração.

Sendo que os sistemas de fornecimento são as turbinas a vapor, sem reaquecimento e com reaquecimento, e a turbina hidráulica. Como controles primários serão apresentados três dispositivos, o regulador isócrono, regulador com queda de velocidade e o regulador de velocidade com compensação de queda transitória.

2.1 – CONJUNTO GERADOR-CARGA ISOLADO

O gerador é aproximado por fonte de tensão alternada e constante. Sua velocidade é determinada pelas equações de quantidade de movimento que ligam o torque mecânico de acionamento aos torques de inércia do rotor e ao torque desacelerador produzido pela carga alimentada.

O gerador alimenta a carga com frequência constante, sob condições de regime permanente. O torque mecânico de acionamento é igual ao torque elétrico desacelerador produzido pela carga.

A equação para pequenas variações em torno de um estado de equilíbrio é



(2.1)



Onde J é o momento angular da máquina, ΔT_m é a variação do torque mecânico, ΔT_e a variação do torque elétrico e $\Delta \omega$ é o desvio de frequência ou velocidade (ω_0). Onde, $\omega = \omega_0 + p\delta$, é a frequência ou velocidade real do rotor. O símbolo sempre que utilizado denota variação em relação a um ponto de operação (ponto de equilíbrio).

A mesma equação no domínio da frequência pode ser reescrita como:



(2.2)

Em que S é o operador da transformada de Laplace.

A equação 2.2 pode ser representada na forma de um diagrama de blocos que relaciona grandezas de entrada e de saída. A Figura 2.1 ilustra este procedimento para a variável de saída de velocidade.

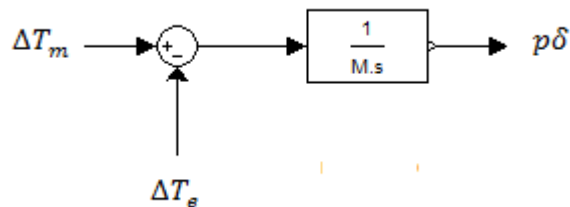


Figura 2.1 – Diagrama de blocos da função de transferência do gerador relacionando torque mecânico e elétrico.

Algumas relações básicas são definidas a seguir.

$$I\alpha = T_{net} \quad (2.3)$$

$$M = \omega I \quad (2.4)$$

$$P_{net} = \omega T_{net} = \omega I \alpha = M \alpha \quad (2.5)$$

Em que:

I : momento de inércia da máquina

α : aceleração angular

P_{net} : potência resultante

T_{net} : torque resultante

O interesse é em $\Delta\omega$ e $\Delta\delta$, onde δ é o deslocamento angular, e ω a velocidade.

$$\omega = \omega_0 + at \quad (2.6)$$

$$\Delta\delta = \omega_0 + atdt - \omega_0 dt = at^2 \quad (2.7)$$

$$\Delta\omega = Ia = d\Delta\delta dt \quad (2.8)$$

$$T_{net} = Ia = Id\Delta\omega dt = Id^2\Delta\delta dt^2 \quad (2.9)$$

Ainda, utilizando as relações de torque, de potência e das relações entre eles

$$T_{net} = T_{mec0} - T_{elet0} + (\Delta T_{mec} - \Delta T_{elet}) \quad (2.10)$$

$$P_{net} = P_{mec0} - P_{elet0} + (\Delta P_{mec} - \Delta P_{elet}) \quad (2.11)$$

Sabendo que:

$$P_{net} = \omega T_{net} \quad (2.12)$$

$$P_{net0} + \Delta P_{net} = \omega_0 + \Delta\omega T_{net} + \Delta T_{net} \quad (2.13)$$

$$P_{mec0} - P_{elet0} + \Delta P_{mec} - \Delta P_{elet} = \omega_0 + \Delta\omega T_{mec0} - T_{elet0} + (\Delta T_{mec} - \Delta T_{elet}) \quad (2.14)$$

Em regime permanente, $P_{mec0} = P_{elet0}$, $T_{mec0} = T_{elet0}$ e desconsiderando $\Delta\omega$

$$\Delta P_{mec} - \Delta P_{elet} = \omega_0 (\Delta T_{mec} - \Delta T_{elet}) \quad (2.15)$$

De (2.9), e sabendo que $T_{mec0} = T_{elet0}$

$$\Delta P_{mec} - \Delta P_{elet} = \omega_0 Id \Delta\omega dt \quad (2.16)$$

Sendo $\omega_0 I = M$ e aplicando a transformada de Laplace com condições iniciais nulas

$$\Delta P_{mec} - \Delta P_{elet} = Ms \Delta\omega \quad (2.17)$$

2.2 – AMORTECIMENTO DO SISTEMA

As cargas de um sistema de potência são em maior parte compostas de motores com várias características de velocidade-torque, de iluminação e de aquecimento. Como

parte da carga é composta por motores, alterações na frequência causam alterações nas velocidades dos motores e, em consequência, alterações na carga.

Desta maneira, a potência elétrica pode ser afetada pela frequência e pode ser expressa como a soma da potência da carga conectada à frequência nominal P_L , como uma componente que representa a variação da carga devido à alteração da frequência

$$P_e = P_L(1 + D' p\delta) \quad (2.18)$$

Em que D' é a característica de frequência de carga.

Desenvolvendo esta equação na forma de pequenos sinais, desprezando termos de segunda ordem, tem-se

$$\Delta P_e = \Delta P_L + D' P_{L0} p\delta \quad (2.19)$$

Em que P_{L0} é a carga conectada com uma característica de amortecimento $D' P_{L0} = D$.

O sistema pode ser representado pela Figura 2.2.

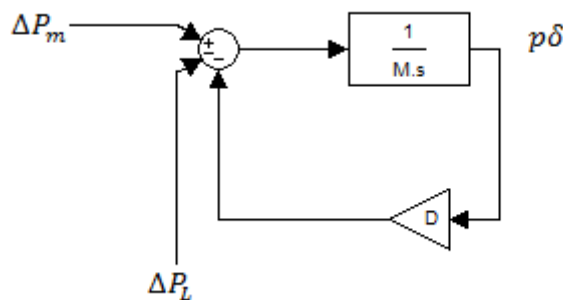


Figura 2.2 – Diagrama de blocos do gerador com amortecimento.

2.3 – ACOPLAMENTO ELÉTRICO ENTRE MÁQUINAS

Nos sistemas de potência, em geral, as máquinas não trabalham isoladas e sim, em paralelo. Ou seja, existem diversas interligações entre as máquinas do sistema e que trocam potência entre si.

Será examinado o caso de duas máquinas síncronas, conectadas através de uma reatância.

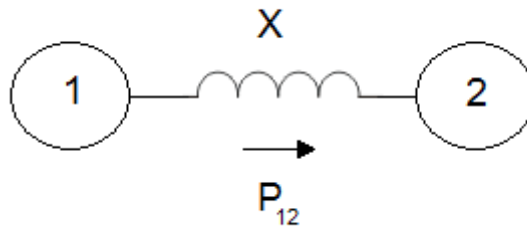


Figura 2.3 – Representação do acoplamento elétrico entre máquinas.

A Figura 2.3 ilustra a interligação, onde X é reatância da interligação e P_{12} é a potência transferida da unidade geradora 1 para 2.

A troca de potência entre as duas máquinas é dada pela expressão ângulo – potência.

Lembrando que as unidades geradoras foram aproximadas por fontes de tensão alternadas e constantes.

$$P_{12} = E_1 E_2 X \sin \delta_{12} \quad (2.20)$$

Em que E_1 é a tensão na primeira unidade geradora e E_2 na segunda, δ_{12} é a diferença angular e X a reatância de interligação.

Para a análise de controle, o interesse é em pequenas variações da frequência em torno de um ponto, então não se faz necessária a solução da equação do ângulo de potência em sua forma não linear. Assim, a equação em torno de um ponto de operação é representada na forma linear

$$\Delta P_{12} = E_1 E_2 X \cos \delta_{12} \Delta \delta_{12} \quad (2.21)$$

É possível observar que a variação da potência entre as máquinas é dada pelo produto de uma constante $E_1 E_2 X \cos \delta_{12}$ com a variação do ângulo entre as máquinas. Este coeficiente é a inclinação da curva ângulo-potência em torno de um ponto de operação e é denominado coeficiente do torque sincronizante (T).

A variação do ângulo entre as máquinas é encontrada pela integração da variação da frequência entre elas, $\Delta \delta_1 - \Delta \delta_2$.

O acoplamento elétrico entre duas máquinas é representado pela equação

$$\Delta P_{TL12} = T_s(p\delta_1 - p\delta_2) \quad (2.22)$$

O coeficiente de torque sincronizante é

$$E_1 E_2 X \cos(\delta_{12} \cdot 2\pi f), \quad f = 60 \text{ Hz} \quad (2.23)$$

Como até agora $p\delta$ está sendo representado por unidade da frequência nominal, se faz necessário multiplicá-la por 377 para que seja convertida para radianos por segundo, o que, quando integrado, fornecerá δ_{12} em radianos.

A Figura 2.4 mostra o diagrama de blocos do acoplamento entre duas máquinas, junto com a característica de amortecimento de cada área.

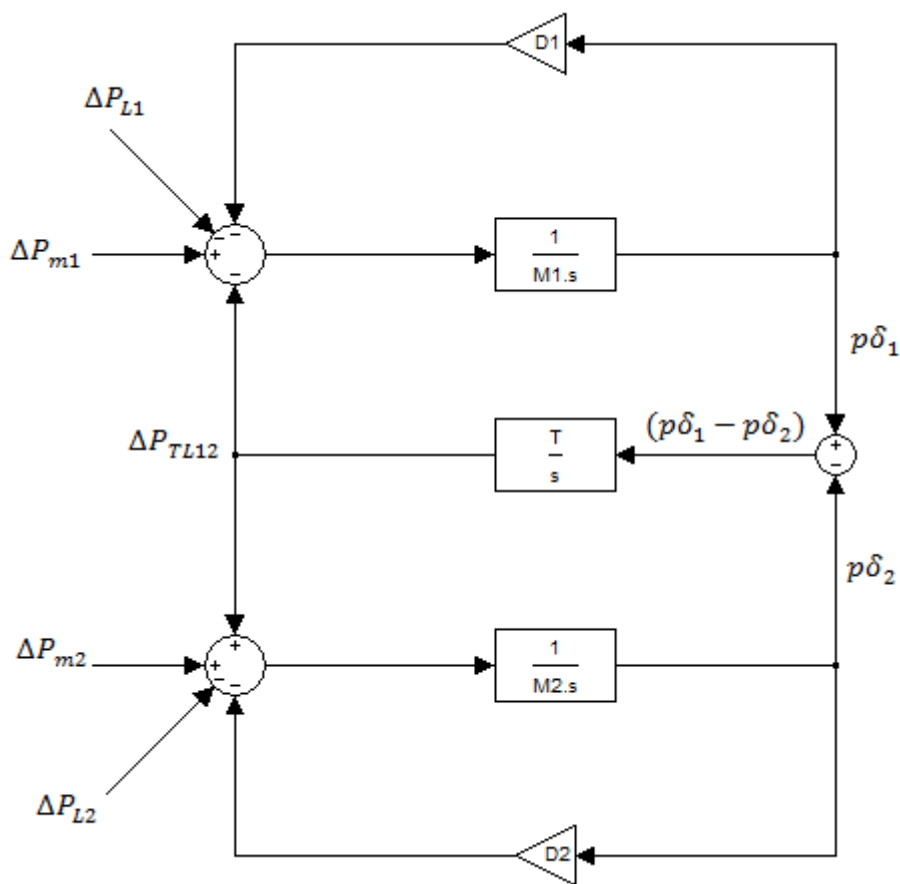


Figura 2.4 – Diagrama de blocos do acoplamento entre duas áreas.

Em que:

ΔP_m : variação da potência da máquina motriz em p.u.

ΔP_L : variação da carga em frequência nominal em p.u.

2.4 – SISTEMAS DE FORNECIMENTO DE ENERGIA

Nesta seção é descrita a resposta da potência da máquina motriz a variações na posição da válvula ou palhetas de entrada.

2.4.1 - Turbina a vapor

Turbina a vapor utiliza a energia cinética do vapor, transforma a energia térmica e de pressão em energia mecânica.

O elemento básico da turbina é o rotor, que contém palhetas, de forma que o fluido que passe por elas exerça uma força tangencial que impulsiona a roda, fazendo-a girar.

A turbina a vapor é atualmente a mais usada entre os diversos tipos de acionadores primários existentes [6].

Componentes básicos:

estator: É o elemento fixo da turbina cuja função é transformar energia potencial do vapor em energia cinética através dos distribuidores;

rotor: É o elemento móvel da turbina, envolvido pelo estator, tem a função de transformar a energia cinética do vapor em trabalho mecânico;

expansor: É o componente cuja função é orientar o jato de vapor sobre as palhetas móveis. No expansor o vapor perde pressão e ganha velocidade. Pode ser visualizado na Figura 2.5;

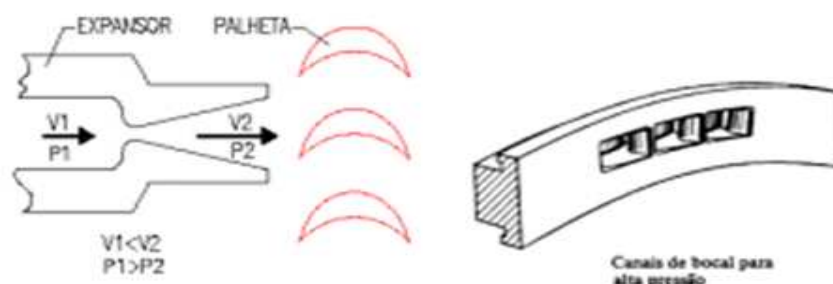


Figura 2.5 – Expansor [6].

palhetas: São chamadas palhetas móveis, as fixadas ao rotor, e fixas, as fixadas no estator. As palhetas fixas têm a função de orientar o vapor para as palhetas

móveis. As palhetas móveis têm a finalidade de receber o impacto do vapor proveniente dos expansores (palhetas fixas) para movimentar o rotor. Poder ser visualizada na Figura 2.5.

A potência da turbina a vapor é proporcional ao fluxo de vapor $P_m \propto m(h_i - h_0)$, onde P_m é a potência da máquina motriz, h_i e h_0 são entalpias do vapor de entrada e de saída. Como h_i e h_0 são quase constantes, a resposta de P_m segue a do fluxo de vapor.

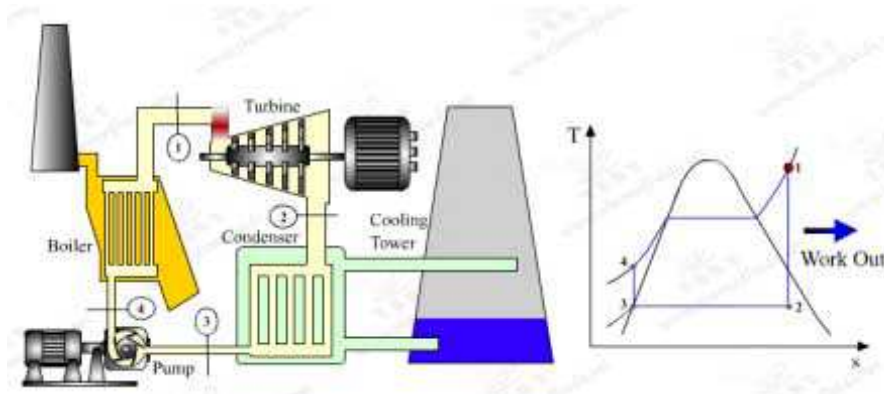


Figura 2.6 – Turbina a vapor sem reaquecimento [6].

Em turbinas sem reaquecimento, a resposta do fluxo de vapor a uma variação na válvula reguladora da turbina é quase instantânea por apresentar constante de tempo pequena, de 0,2 a 0,3 segundos. Devido ao pequeno tempo de carregamento do volume da turbina. A Figura 2.6 mostra esquematicamente uma turbina a vapor sem reaquecimento.

Supondo que a pressão do vapor de suprimento permaneça essencialmente constante, então, a variação de potência fornecida pela turbina devido a alguma variação da válvula pode ser descrita pela função de transferência a seguir. Lembrando que é uma turbina sem reaquecimento.

$$\Delta P_m \Delta P_v = 11 + T_s s \quad (2.24)$$

Em que T_s é a constante de tempo.

A Figura 2.7 mostra uma turbina com reaquecedor, representado pelo item 2.

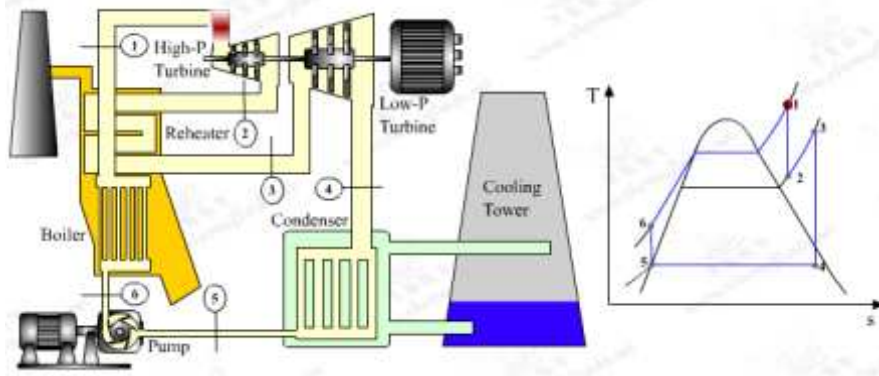


Figura 2.7 – Turbina a vapor com reaquecimento [6].

Embora a variação no fluxo na turbina de alta pressão se estabeleça com uma pequena constante de tempo, o fluxo na turbina de baixa pressão só pode variar com o desenvolvimento de pressão no volume do reaquecedor.

As próximas equações descrevem os fenômenos do fluxo transitório de vapor para dentro do reaquecedor e para dentro do estágio da turbina a jusante do reaquecedor.

Equação de continuidade

$$V \frac{dp}{dt} = m_1 - m_2 \tag{2.25}$$

Equação de fluxo

$$m_2 = m_0 \rho V \tag{2.26}$$

Em que:



: fluxo de vapor entrando no reaquecedor em libras/segundos



: fluxo de vapor saindo do reaquecedor e entrando na turbina de baixa pressão em libras/segundos

ρ : densidade do vapor no reaquecedor em libras-pés cúbicos (valor médio)

V : volume do reaquecedor e condutores de vapor em pés cúbicos

m_0 : fluxo nominal do reaquecedor

P_0 : pressão nominal do reaquecedor

Ainda podemos escrever

$$d\rho/dt = dP/dt \cdot \partial\rho/\partial P \quad (2.27)$$

Em que:

$\partial\rho/\partial P$: variação da densidade de vapor devida à pressão

P : pressão do reaquecedor em psi

E é determinada a partir de tabelas de vapor.

Fazendo as substituições na equação (2.25)

$$m_2 s = m_1 s_1 + V \partial\rho/\partial P P_0 m_0 s = m_1 s (1 + TR_s) \quad (2.28)$$

Em que:

TR : constante de tempo do reaquecedor, igual a $V \partial\rho/\partial P P_0 m_0$

A função de transferência da potência da máquina motriz em relação à posição da válvula, para uma turbina com reaquecimento, é obtida somando-se as potências desenvolvidas na turbina de alta pressão e pela turbina de baixa pressão. Considerando uma proporção de potência desenvolvida na turbina de alta pressão C , então, temos

$$\Delta P_m / \Delta P_v = 1 + T_{ss} + 1 - C + T_{ss} + TR_s = 1 + C TR_s + T_{ss} + TR_s \quad (2.29)$$

Para a análise feita anteriormente foram desconsiderados efeitos de segunda ordem. Tais efeitos são considerados em análise dinâmica detalhada da turbina, porém, foram desprezados para o estudo do comportamento do sistema geral por serem de segunda ordem.

2.4.2 - Turbina Hidráulica

Para a dedução da função de transferência da potência da turbina hidráulica em relação à posição da palheta é admitido que a tubulação seja inelástica e o fluido incompressível.

A Figura 2.8 mostra as variáveis necessárias para a dedução da função de transferência.

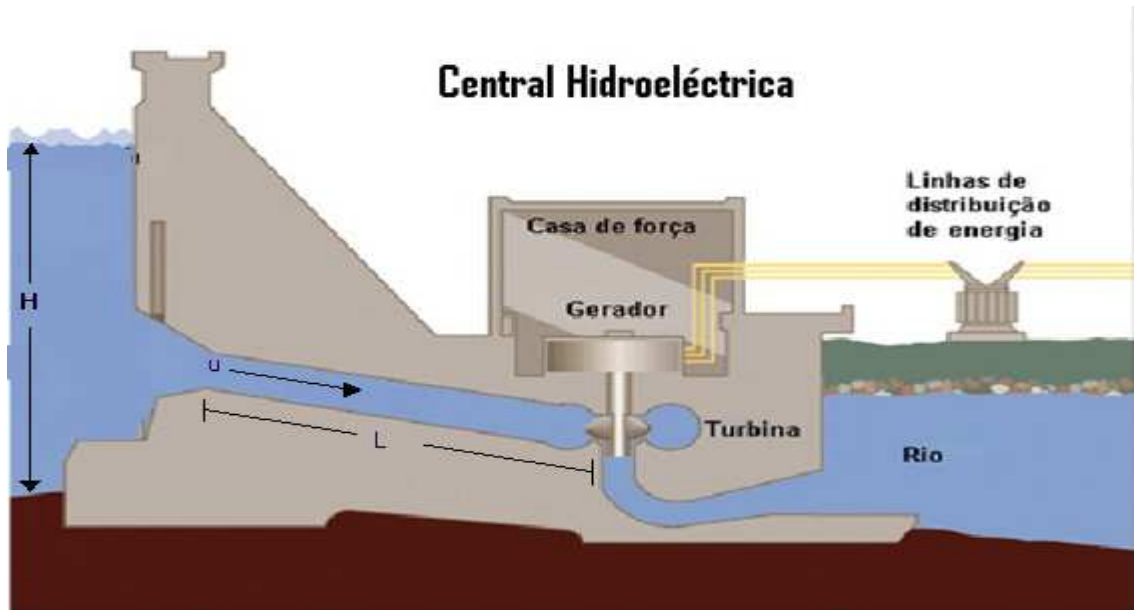


Figura 2.8 – Arranjo físico da turbina com conduto forçado e a admissão [7].

A velocidade da água dentro da tubulação é

$$u = GH \quad (2.30)$$

Em que:

H : pressão da água nas palhetas

G : fator proporcional à posição das palhetas

u : velocidade da água

Linearizando a equação em torno de um ponto a equação (2.30) pode ser escrita da forma

$$\Delta u u_0 = 12 \Delta H H_0 + \Delta G G_0 \quad (2.31)$$

Os valores com o índice “0” são valores em regime permanente.

A equação da aceleração para a coluna de água é dada pela Lei de Newton

$$L A \rho d \Delta u dt = -A \rho g \Delta H \quad (2.32)$$

Em que:

ρ : massa específica

A: área da tubulação

g: aceleração da gravidade

L: comprimento da tubulação

$L\rho$: massa da água dentro da tubulação

$\rho g \Delta H$: variação incremental da pressão hidráulica nas palhetas da turbina

A seguir é feita uma normalização da equação dividindo os dois lados pelo fator $A\rho g H_0 u_0$ e com resultado encontrado aplica-se transformada de Laplace, chegamos a

$$L u_0 g H_0 s \Delta u u_0 = -\Delta H H_0 \quad (2.33)$$

definindo

$$T_w = L u_0 g H_0 \quad (2.34)$$

T_w é conhecido como tempo de partida nominal. Pode ser definido como o tempo necessário para acelerar a água na tubulação até a velocidade u_0 sob a ação da pressão H_0 .

Substituindo (2.34) em (2.33), e logo a seguir substituindo (2.33) em (2.31), é encontrado

$$\Delta u u_0 = \frac{1}{1 + T_w s} \Delta G G_0 \quad (2.35)$$

Sabendo que a potência da turbina é proporcional ao produto da pressão e do fluxo, isto é,

$$P_m \propto H u \quad (2.36)$$

Linearizando e normalizando

$$\frac{\Delta P_m}{P_m_0} = \frac{\Delta H}{H_0} + \Delta u u_0 \quad (2.37)$$

Substituindo (2.34), (2.33) e (2.31) em (2.37)

$$\frac{\Delta P_m}{P_m_0} = \frac{1 - T_w s}{1 + T_w s} \Delta G G_0 \quad (2.38)$$

Sabendo que ΔG é um fator proporcional à posição das palhetas a equação pode ser reescrita da seguinte forma

$$\Delta P_m \Delta P_v = 1 - T_{ws1} + T_{ws2} \quad (2.39)$$

2.5 – CONTROLE PRIMÁRIO CARGA FREQUÊNCIA

Foram apresentadas, até este ponto, as características dinâmicas das máquinas motrizes. Os próximos componentes a serem descritos serão os controles primários de carga-frequência.

Esses são basicamente compostos por um sensor de velocidade da máquina motriz e um mecanismo mecânico que varia a posição da válvula da turbina. Desta maneira eles identificam qualquer variação na frequência do sistema e tomam a devida providência alterando a posição da admissão da turbina.

O regulador isócrono é pouco utilizado, pois não pode ser utilizado em um com interligações, como será mostrado mais adiante. O regulador com compensação de queda transitória é utilizado em turbinas hidráulicas, as demais turbinas utilizam o regulador com queda de velocidade.

2.5.1 - Regulador isócrono

O regulador isócrono é do tipo mostrado na Figura 2.9.

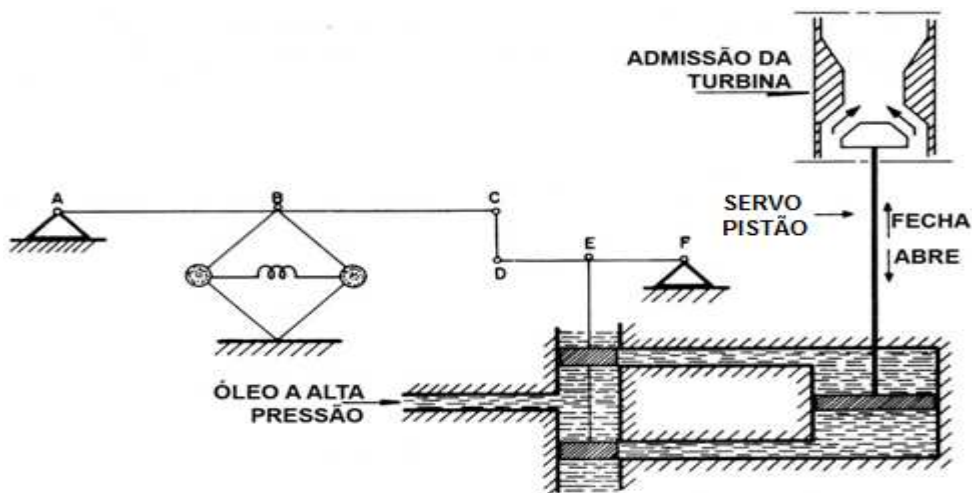


Figura 2.9 – Regulador isócrono [8].

Na Figura 2.9 é possível observar o corpo centrífugo, que é o conjunto das duas massas interligadas por uma mola, conectado ao ponto “B”, que gira em sincronismo

com a máquina, e a força centrífuga exercida sobre ele é em função de sua velocidade de rotação.

A cada desvio de velocidade detectado causará um deslocamento Δx na válvula piloto a qual o corpo centrífugo está ligado. Permitindo que o óleo a alta pressão, que está entrando na região da válvula piloto, flua pelo canal superior ou inferior do servo pistão. Este, por sua vez, será responsável pelo fechamento ou abertura da válvula ou palheta da turbina, dependendo da direção do deslocamento Δx .

Dessa forma, é verificado que o fluxo de óleo será em função da frequência, sendo que o fluxo somente será interrompido quando a turbina estiver girando à velocidade nominal.

Um deslocamento Δx da válvula causa uma taxa de variação de volume de óleo no servo pistão e em conseqüência uma taxa de variação do deslocamento do próprio servo pistão e na posição da válvula de admissão da turbina.

Em relação à Figura 2.7:



(2.40)

Em que Δf é o desvio de frequência ($f_0 - f$) e k_1 uma constante de proporcionalidade.

Também,



(2.41)

Ou seja, um deslocamento Δx da válvula piloto é proporcional a taxa de variação da posição da válvula da turbina e k_2 é a constante de proporcionalidade.

Substituindo (2.40) em (2.41)



(2.42)

Porém, importante é encontrar a nova posição da válvula para certa variação na frequência. Logo



(2.43)

A representação em diagrama de bloco é mostrada na Figura 2.10.

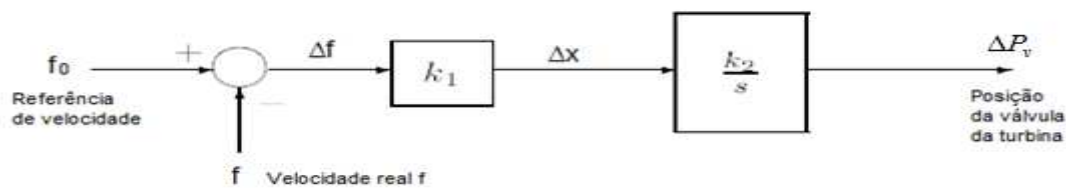


Figura 2.10 – Diagrama de blocos do regulador isócrono.

O regulador irá movimentar a posição da válvula da turbina para qualquer posição que seja necessária para que a velocidade retorne rigorosamente ao seu valor inicial. Por isso é conhecido como regulador Isócrono. Característica natural de um integrador matemático.

Observar que um desvio de frequência pode ocorrer tanto por variação da frequência real, como por alteração do valor de referência f_0 .

A regulação isócrona não pode ser usada em um sistema de múltiplas máquinas, apenas, no caso simples, de uma única máquina suprindo uma única carga.

Um aumento de carga ΔPD resultaria em uma queda de frequência $p\delta$. Em um sistema de uma única máquina todo o acréscimo de carga teria que ser suprido por uma variação ΔP_v da posição da válvula do único gerador existente no sistema.

Em caso de mais de uma máquina, o novo estado de equilíbrio, para uma variação na velocidade, pode ser encontrado de diversas formas utilizando variações ΔP_v de cada máquina existente no sistema. Assim, a repartição da carga fica indeterminada.

2.5.2 - Regulador com queda de velocidade

Com o intuito de fazer um regulador mais rápido e mais estável estabelece-se uma conexão entre a válvula piloto e o servo pistão.

Diferente do regulador isócrono em que a posição da válvula piloto era definida apenas pelo medidor de frequência do sistema, no regulador com queda de velocidade a nova conexão existente, também, influenciará na posição da válvula piloto.

Quando ocorrer um aumento de carga e, em consequência, uma queda de frequência, haverá o deslocamento ΔX na válvula piloto. Então, o servo pistão terá um deslocamento no sentido em que resultará em um aumento da frequência do sistema.

Desta maneira, a conexão entre a válvula piloto e o servo pistão está atuando como uma realimentação. E o deslocamento ΔX não irá para zero apenas pela atuação do medidor de frequência, mas também, pela atuação da realimentação que diminuirá o deslocamento causado pela queda de frequência no momento em que o servo pistão começar a se deslocar no sentido em que resulta em aumento de frequência.

É importante perceber que devido a essa realimentação o estado de equilíbrio será atingido mais rápido, ou seja, antes da frequência atingir seu valor nominal.

Portanto, é um regulador com queda de velocidade, e o estado de equilíbrio é atingido em uma frequência diferente da nominal.

Este regulador permite distribuir as variações de carga do sistema entre as unidades de geração em paralelo de forma adequada, o que o regulador isócrono não permite.

Para representar o diagrama de blocos, basta colocar a conexão de realimentação, com um ganho, no diagrama de blocos do regulador isócrono, como pode ser visto na Figura 2.11.

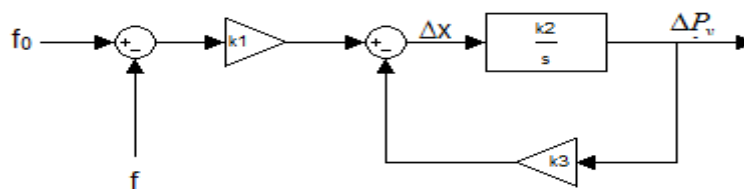


Figura 2.11 – Diagrama de blocos do regulador com queda de velocidade.

A função de transferência da posição da válvula em relação à variação da frequência é mostrada a seguir na Figura 2.12.

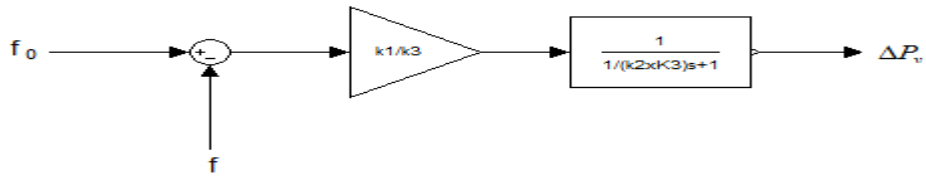


Figura 2.12 – Função de transferência do regulador com queda de velocidade.

A partir da Figura 2.12 podemos encontrar a função de transferência relacionando a variação da posição da válvula com a variação da frequência.



$$(2.44)$$

Em que $TG=1K2K3$ é a constante de tempo e $R=K3K1$ é o parâmetro regulação de velocidade e pode ser expresso em porcentagem como $N0-NNR$ onde $N0$ é a velocidade do estado de equilíbrio a vazio (válvulas fechadas), N é a velocidade de estado de equilíbrio em plena carga (válvulas totalmente abertas) e NR a velocidade nominal.

2.5.3 - Regulador de velocidade com compensação de queda transitória

A função de transferência das turbinas hidráulicas apresenta um zero no semi-plano direito. Essa característica resulta em um comportamento particular que requer reguladores de velocidade com características especiais.

Se uma turbina hidráulica for controlada por um simples regulador com queda de velocidade, é possível verificar, com a análise do lugar das Raízes, que o sistema só será estável para valores demasiados altos de estatismo, para valores usuais o sistema fica instável, ou com comportamento transitório muito oscilatório. O problema é o alto ganho estático em malha aberta, $1R$, suficiente para criar problemas a altas frequências.

É preciso que se utilize uma compensação para que o ganho reduza a altas frequências, enquanto que, para baixas frequências, o ganho volta a assumir o valor ditado pelo estatismo em regime permanente.

A Figura 2.13 mostra o esquema de um regulador que obtém esta compensação por meio de uma realimentação onde se utiliza um amortecedor hidráulico.

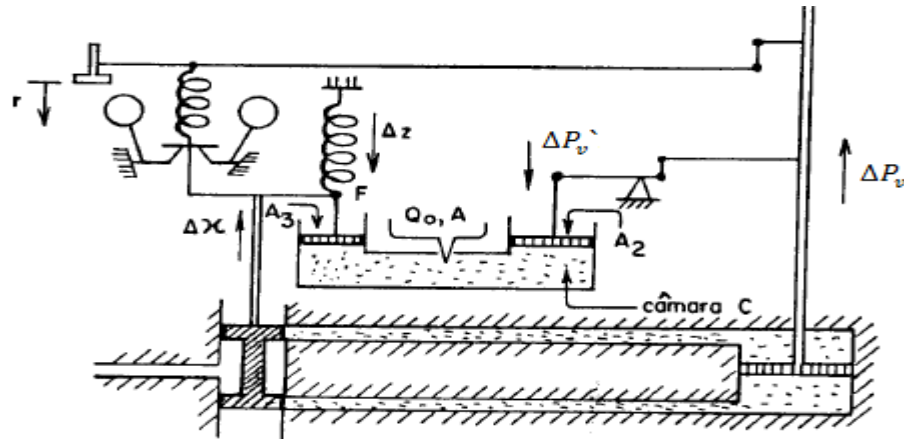


Figura 2.13 – Regulador de velocidade com compensação de queda de transitória [9].

Se a haste do servo pistão sofre uma variação lenta ΔP_v , o pistão de área A_2 será empurrado para baixo sofrendo um deslocamento $\Delta P_v'$. A vazão Q_0 na câmara C provocada por este deslocamento será completamente drenada pela válvula de agulha. Assim, o ponto F permanece estacionário, e também, a válvula piloto. O ganho de realimentação será inteiramente determinado pela realimentação rígida. A atuação é a de um regulador com queda de velocidade comum.

Para variações bruscas da haste do servo pistão, a vazão de óleo na câmara C provocado pelo deslocamento $\Delta P_v'$ do pistão de área A_2 , a válvula de agulha não será capaz de drenar toda vazão e então ocorrerá uma variação na posição do pistão de área A_3 e conseqüentemente do ponto F e da válvula piloto no sentido de diminuir Δx , e assim, reduzir transitariamente o ganho de realimentação.

Para encontrar a função de transferência da realimentação transitória é preciso considerar a aplicação da equação da continuidade na câmara C antes da válvula de agulha:



(2.45)

Em que:

A_2, A_3 : área dos pistões da câmara C

Q_0 : vazão de óleo na válvula agulha

$\Delta P_v', \Delta z$: deslocamento dos pistões

Se k_y é a relação entre ΔP_v e $\Delta P_v'$, então

$$\Delta P_v' = k_y \Delta P_v \quad (2.46)$$

Sabendo que a vazão do óleo é proporcional à pressão do óleo, temos:

$$Q_0 = k_Q \Delta P \quad (2.47)$$

No ponto F pode-se verificar que a variação da pressão exercida no óleo está ligada ao esforço exercido na mola. A relação entre eles é dada pela soma das forças equilibradas que agem no pistão de área A_3 .

$$\Delta P A_3 = -k_m \Delta z \quad (2.48)$$

Substituindo (2.48) em (2.47):

$$Q_0 = -k_Q k_m \Delta z \quad \square -k_q \Delta z \quad (2.49)$$

Substituindo (2.49) e (2.46) em (2.45)



(2.50)

aplicando a transformada de Laplace com condições iniciais nulas

$$\Delta z s + A_3 k_q s \Delta z s = -k_y A_2 k_q s \Delta P_v(s) \quad (2.51)$$

Definindo-se

$$k_4 \square k_y A_2 k_q \quad \text{e} \quad T_d \square A_3 k_q \quad (2.52)$$

por fim, é obtido a função de transferência de realimentação transitória

$$\Delta z s = -s k_4 + s T_d \Delta P_v(s) \quad (2.53)$$

O diagrama de blocos resultante é representado na Figura 2.14.

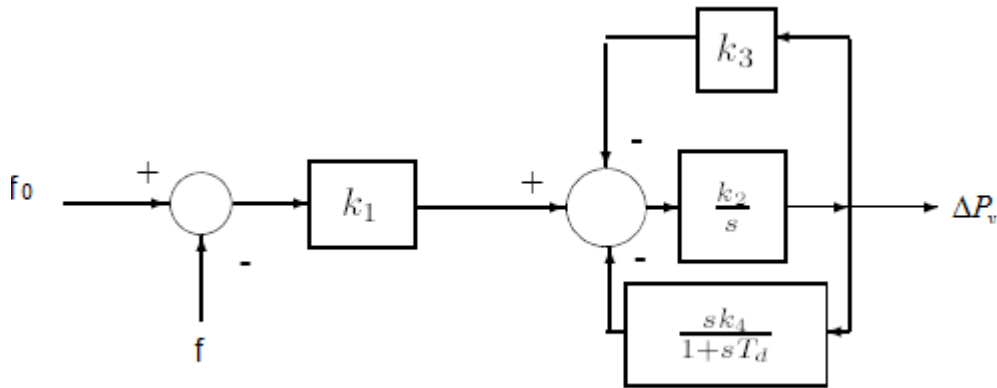


Figura 2.14 – Diagrama de blocos do regulador de velocidade com compensação de queda de transitória.

A partir do diagrama de blocos é possível encontrar a função de transferência entre ΔP_v e Δf . Notar que a função de transferência é de segunda ordem e deve ser fatorada para se obter a seguinte forma:

$$\Delta P_v \Delta f = +1R1 + sTr1 + srRTr(1 + sTG) \quad (2.54)$$

Em que:

R: regulação de estado de equilíbrio

r: regulação transitória

rTrR: constante de tempo de escoamento

TG: constante de tempo do regulador

2.6 – CONTROLE SUPLEMENTAR OU AUTOMÁTICO DE GERAÇÃO

O estudo dos modelos apresentados até aqui e as relações entre eles, mostram que existe duas maneiras de controle para que se possa variar a potência da máquina motriz.

A primeira é controlando a velocidade da máquina motriz por meio da ação do regulador de velocidade ou controle primário de velocidade.

A segunda é por meio das variações na referência de carga do controle de velocidade, ou mecanismos de regulação.

Um sistema em operação normal tem desvios de frequência muito pequenos e o mecanismo básico para controlar a potência, que faz a máquina motriz se adaptar às variações de carga em uma determinada área, é a manipulação do mecanismo de referência de carga. Este é o controle suplementar.

Considerando uma dada unidade individual sincronizada a um sistema grande, se comparado ao tamanho da unidade, qualquer alteração em sua frequência não resultará em efeitos na frequência do sistema, por outro lado, resultará em variações de potência elétrica fornecida por esta unidade. Estas variações da potência elétrica causam alterações no fluxo de carga no sistema de transmissão.

Para que a frequência se restabeleça para valores nominais após uma variação da geração é necessário a manipulação da referência velocidade/carga que é o controle de geração ou controle suplementar.

Se o mecanismo de variação de geração para se adaptar a carga é deixado para o controle primário, a única maneira pela qual uma variação de geração pode ocorrer é através de um desvio de frequência.

O objetivo do controle de geração em uma dada área é adaptar as alterações de geração com as alterações de carga da área.

Em um sistema de potência isolado, um desequilíbrio entre a potência da máquina motriz e cargas conectadas leva a um desvio de frequência de intensidade suficiente para causar um equilíbrio entre as potências elétrica e mecânica.

Portanto a existência de um desvio de frequência é uma indicação de um desequilíbrio entre geração e carga. O controle suplementar reconduz o desvio de frequência a zero.

A ação integral no controle suplementar garante erro de frequência zero no estado de equilíbrio.

2.6.1 - Controle suplementar – sistemas de potência de interligados

Como já visto, um desequilíbrio entre carga e geração em sistemas interconectados resulta em variação do fluxo de potência das linhas de interligação e da frequência. Para áreas interligadas, que fazem parte de um grande sistema, a variação da frequência é muito pequena, assim, o efeito de um desequilíbrio em uma área é sentido como uma variação no fluxo de potência da linha de interligação entre a área e os sistemas vizinhos.

O objetivo do controle suplementar, que é a restauração do equilíbrio entre as variações de carga e as variações de geração da área, é alcançado quando a ação do controle zera o desvio de frequência e o desvio de potência da linha de interligação.

A sua atuação deve corrigir somente variações de carga naquela área. Não deve gerar variações de carga nas áreas vizinhas através de sua característica de regulação de área.

A não-interação entre as atuações dos controles suplementares de áreas vizinhas levam ao conceito de Erro de Controle de Área (ECA) que é resultado da soma do desvio de potência da linha de interconexão com o produto do desvio de frequência por um peso.

Considerando uma variação de carga em uma área 1 vizinha de uma área 2, com uma linha de interligação entre elas. Então para a área 1 temos uma variação de potência de:

$$\Delta P_{TL12} = -\Delta L_1 R_2 + D_2 \Delta \omega + D_1 \Delta P + \Delta P \quad (2.55)$$

e desvio de frequência

$$p\delta = -\Delta L_1 R_1 + D_1 \Delta P + \Delta P \quad (2.56)$$

E para área 2 temos:

$$\Delta P_{TL21} = +\Delta L_1 R_2 + D_2 \Delta \omega + D_1 \Delta P + \Delta P \quad (2.57)$$

Pode se notar que com o uso de um peso igual a $(R_2 + D_2)$ na área 2 teremos o Erro de Controle de Área (ECA) igual a zero, o que é desejável, já que, o desequilíbrio ocorreu na área 1.

Assim, o ECA da área 2 seria $\Delta P_{TL21} + B_2 P\delta$, em que

$$B2=1R2+D2 \quad (2.58)$$

Para a área 1, o ECA seria $\Delta PTL12+B1P\delta$, que

$$B1=1R1+D1 \quad (2.59)$$

resultando em um ECA $=-\Delta L$.

Vê-se, portanto, que se for usado para o ECA, o fator de peso igual à característica de regulação de área, tem-se a informação necessária sobre qual área deveria exercer o controle suplementar.

3 – MÉTODOS DE ANÁLISE

Neste capítulo será apresentada uma análise de cada componente que participa do controle carga-freqüência descrito no capítulo anterior. Serão feitas análises transitórias e de regime permanente.

Ao fim das análises, terão exemplos ilustrativos onde todo o conteúdo, apresentado até então no capítulo, serão utilizados comparativamente com uma futura simulação.

3.1 – CONJUNTO GERADOR-CARGA ISOLADO COM AMORTECIMENTO

O sistema foi descrito nas seções 2.1 e 2.2 do texto. Agora faremos sua análise.

A representação em diagrama de bloco encontrada está apresentada Figura 2.2. Usando redução de diagrama de blocos é possível representar esse mesmo sistema conforme a Figura 3.1.

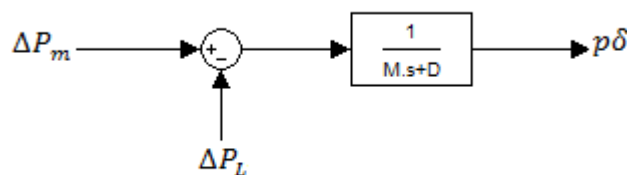


Figura 3.1 – Diagrama de blocos do conjunto gerador-carga com amortecimento.

Sua função de transferência para uma variação na carga é:

$$p\delta(s)\Delta Ls = -1Ms + D \quad (3.1)$$

Se tivermos como entrada uma variação de carga em forma de degrau, com uma amplitude ΔL , na entrada do sistema, então teremos:

$$p\delta s = -\Delta Ls + 1Ms + D \quad (3.2)$$

Para que se possa aplicar a transformada de Laplace, a equação é escrita da forma:

$$p\delta s = -a_1s + a_2Ms + D \quad (3.3)$$

Em que:

$$a_1 = \Delta L D$$

$$a_2 = -\Delta L M D$$

Aplicando a transformada inversa de Laplace a função toma a seguinte forma:

$$p\delta t = \Delta L D e^{-D M t} - 1 \quad (3.4)$$

É possível tirar algumas conclusões desta equação, como se segue:

- Se $\Delta L > 0$, ocorrerá uma queda na frequência do sistema;
- Se $\Delta L < 0$, ocorrerá uma aumento na frequência do sistema;
- Quanto maior o ΔL maior será a queda ou subida da frequência no sistema;
- D e M sempre são valores positivos
- Se $D < 1$, maior será a queda ou subida da frequência devido à variação da carga. Quanto maior o valor de D , mais rápido será a resposta do sistema e vice-versa;
- Quanto menor o valor de M mais rápido será a resposta do sistema e vice-versa;
- A constante de tempo é MD ;
- O valor final da variação da frequência é dado por $-\Delta L D$.

- **3.2 – ACOPLAMENTO ELÉTRICO ENTRE MÁQUINAS**

- O acoplamento elétrico entre máquinas foi descrito na seção 2.3 do texto. Agora será apresentado um método de análise do sistema encontrado.

- A análise será feita a partir de uma variação de carga na forma de degrau em uma das áreas. A partir dessa entrada, vê-se como o sistema está se comportando em alguns pontos fundamentais para o entendimento do comportamento do acoplamento elétrico.

- Novamente é utilizada a redução de diagramas de blocos para encontrar a função de transferência tendo como saída, a variação da frequência da primeira máquina, e entrada, a variação de carga na primeira máquina. Então, a função de transferência é:

$$p\delta_1 \Delta PL_1 = - \frac{M_2 s^2 + D_2 s + T M_1 M_2 s^3 + D_1 M_2 + D_2 M_1 s^2 + D_1 D_2 + T M_1 + M_2 s + T D_1 + D_2}{M_2 s^2 + D_2 s + T M_1 M_2 s^3 + D_1 M_2 + D_2 M_1 s^2 + D_1 D_2 + T M_1 + M_2 s + T D_1 + D_2} \quad (3.5)$$

- Com o intuito de simplificar a função encontrada será feito a suposição que as que as unidades do acoplamento são iguais. O que quer dizer que $M_1 = M_2$ e $D_1 = D_2$, e então:

$$p\delta_1 \Delta PL_1 = - \frac{M s^2 + D s + T M s^3 + 2 D M s^2 + D_2 s + 2 T M s + 2 T D}{M s^2 + D s + T M s^3 + 2 D M s^2 + D_2 s + 2 T M s + 2 T D} \quad (3.6)$$

- fatorando

$$p\delta_1 \Delta PL_1 = - \frac{M s^2 + D s + T M s + D M s^2 + D s + 2 T}{M s^2 + D s + T M s + D M s^2 + D s + 2 T} \quad (3.7)$$

- Com esta equação é possível observar que, quando aplicado um degrau de entrada com amplitude ΔL , e utilizando o teorema do valor final, $p\delta_1 t = \infty = -\Delta L \frac{2D}{2D}$.

- Para encontrarmos a resposta no tempo de $p\delta_1$, para um degrau de amplitude ΔL , deveremos aplicar a transformada inversa de Laplace. Porém, antes serão necessários alguns ajustes na equação para que seja possível realizar a transformação.

- Primeiro M é isolado no denominador da função. Posteriormente, deve-se considerar que o de DD_2 é pequeno relativamente ao valor de $2TM$. E finalmente, devemos escrever a equação de uma forma fatorada que permita a aplicação da Transformada.

- $$p\delta_1\Delta PL_1 = -Ms^2 + Ds + TMs + DMs + D^2M^2 + 2TM \quad (3.8)$$

- Aplicando o degrau de amplitude ΔL

- $$p\delta_1\Delta PL_1 = -Ms^2 + Ds + TsMs + DMs + D^2M^2 + 2TM \quad (3.9)$$

- E finalmente a transformada inversa de Laplace é da forma:

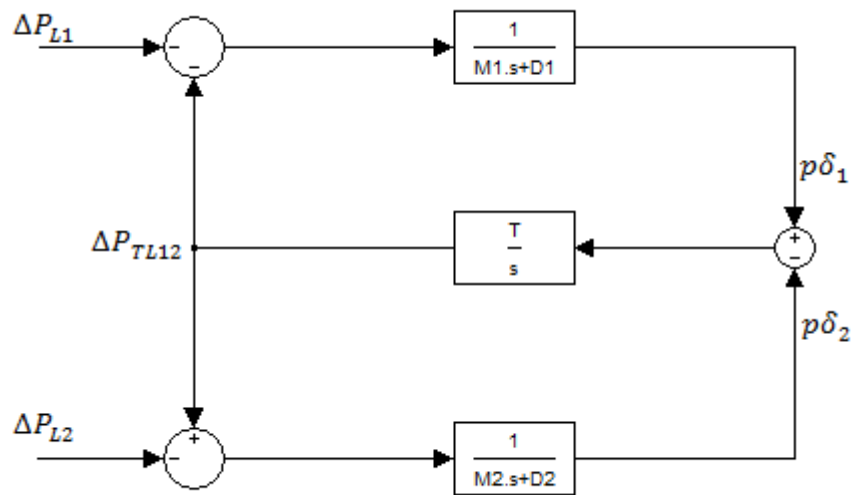
- $$p\delta_1 t = K_1 + K_2 e^{-DMt} + K_3 e^{-D^2Mt} \sin 2TMt + \emptyset \quad (3.10)$$

- Onde K_1 , K_2 e K_3 podem ser encontrados pelas regras das frações parciais e transformação inversa de Laplace, porém, não serão utilizadas nesta análise.

- Como $p\delta_1$ dado no domínio do tempo podemos tirar algumas conclusões: o sistema tem duas constantes de tempo que são perceptíveis MD e $2MD$, e é possível notar uma oscilação com frequência $2TM$. Quanto maior for o valor de T maior será a frequência de oscilação do sistema, e como T é inversamente proporcional a reatância da interligação menores valores para essa reatância causam maiores valores de frequência de oscilação. O valor do amortecimento do sistema D contribui para maior taxa de decréscimo das oscilações.

- Outra maneira de representar duas máquinas com uma interligação entre elas é utilizando as equações de espaço de estado.

- Utilizando a representação do sistema com o diagrama de blocos da Figura 3.2.



• Figura 3.2 – Diagrama de blocos do acoplamento elétrico entre máquinas.

• E ainda fazendo as seguintes definições:

• $\Delta P_{L1} = U1$

• $\Delta P_{L2} = U2$

• $p\delta_1 = X1$

• $p\delta_2 = X2$

• $\Delta P_{TL12} = X3$

• A seguir serão encontradas as funções necessárias para representar o sistema no espaço de estados:

• Estado 1:



•

(3.11)



• (3.12)



• (3.13)

• Estado 2:



• (3.14)



• (3.15)

• Estado 3:



• (3.16)



• (3.17)



• (3.18)

• Como as equações em mãos é possível a representação no espaço de estados na forma matricial.



•



•

• 3.3 – SISTEMAS DE FORNECIMENTO DE ENERGIA

- Agora iniciaremos a análise de comportamento dos sistemas de fornecimento de energia descritos no capítulo 2.

• 3.3.1 - Turbina a vapor

- Para turbina a vapor sem reaquecimento, foi encontrada a equação (2.24) que representa seu funcionamento.

- Será feita uma análise simples para seu funcionamento, apenas será aplicado um degrau de entrada de magnitude ΔV , representado a variação da posição da válvula da turbina. Em seguida será aplicada a transformada inversa de Laplace para que seja possível perceber seu funcionamento no domínio do tempo:

- $\Delta P_m = \Delta P_v s (1 + T_s s)$ (3.19)

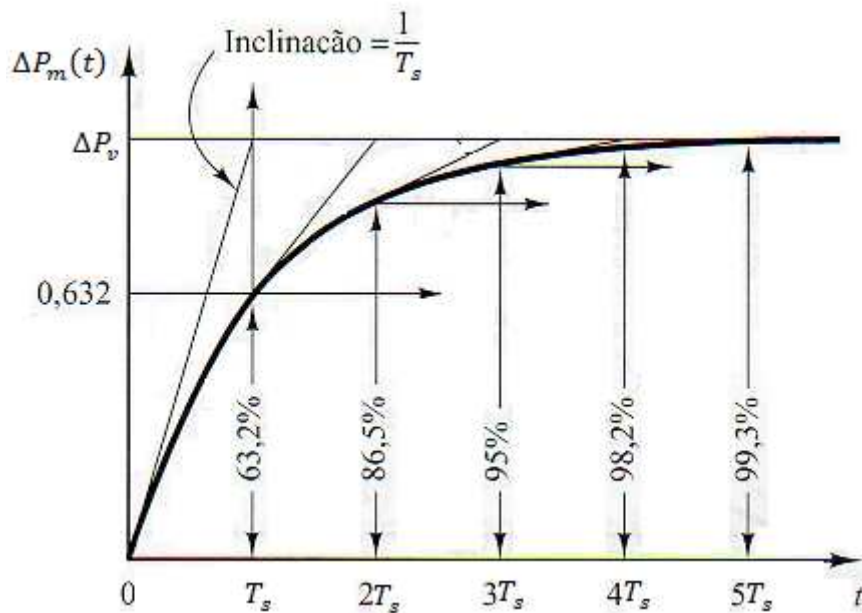
- reescrevendo a equação na forma

- $\Delta P_m = a_1 s + a_2 (1 + T_s s)$ (3.20)

- chega-se a:

- $\Delta P_{mt} = \Delta P_v (1 - e^{-t/T_s})$ (3.21)

- É possível perceber que a amplitude da variação da potência é dada pela amplitude do degrau de entrada, isto em regime permanente. A resposta transitória tem como constante de tempo T_s . É um sistema de primeira ordem simples. A curva encontrada é a apresentada pela Figura 3.3.



• Figura 3.3 – Resposta no tempo de um sistema de primeira ordem [10].

- Para a turbina a vapor com reaquecimento a função de transferência global obtida foi (2.29).

- Aplicando a uma entrada na forma de degrau com amplitude ΔP_v :

- $\Delta P_m = \Delta P_v s + CTR s + T_s s + TR s$ (3.22)

- A equação pode ser reescrita na forma

- $\Delta P_m = a_1 s + a_2 TR (1 + TR s) + a_3 T_s (1 + Ts + s)$ (3.23)

- e os valores dos índices a_1 , a_2 e a_3 são:

- $a_1 = \Delta P_v (1 + CTR s + TR s + T_s s) = \Delta P_v$ (3.24)

- $a_2 = \Delta P_v (1 + CTR s + T_s s) = -1 TR = \Delta P_v TR (2 - CT_s - TR)$ (3.25)

- $a_3 = \Delta P_v (1 + CTR s + TR s) = -1 T_s = \Delta P_v T_s (T_s - CTR - T_s + TR)$ (3.26)

- então, no domínio do tempo temos:

- $\Delta P_m(t) = \Delta P_v TR (1 - CT_s - TR) e^{-t/TR} + T_s - CTR - T_s + TR e^{-t/T_s} + 1$ (3.27)

- Analisando a equação encontrada percebe-se que a resposta terá duas constantes de tempo TR e Ts, e que a resposta em regime permanente tem a amplitude ΔPv.

- É importante observar, também, que para t=0

- $\Delta P_{mt} = \Delta P_v \left(\frac{1}{TR} - \frac{1}{Ts} \right) e^{-t/TR} - \Delta P_v \left(\frac{1}{TR} - \frac{1}{Ts} \right) e^{-t/Ts} + \Delta P_v \left(\frac{1}{TR} - \frac{1}{Ts} \right) = 0$ (3.28)

-

• 3.3.1 - Turbina hidráulica

- A função de transferência da turbina hidráulica já foi definida agora será feita a análise de sua resposta a um degrau de entrada com amplitude ΔPv:

- $\Delta P_m = \Delta P_v \left(1 - \frac{t}{T_w} + \frac{t^2}{2T_w^2} \right)$ (3.29)

- escrevendo na forma:

- $\Delta P_m = \Delta P_v \left(a_1 s + a_2 \frac{1}{T_w} \right) \frac{1}{s^2 + \frac{1}{T_w} s + \frac{1}{T_w^2}}$ (3.30)

- $a_1 = 1$ (3.31)

- $a_2 = -3T_w^2$ (3.32)

- $\Delta P_m(t) = \Delta P_v (1 - 3e^{-2t/T_w})$ (3.33)

- Desta maneira, quando t=0, ΔPm=-2ΔPv e em regime permanente a amplitude é ΔPv.

• 3.4 – CONTROLE PRIMÁRIO CARGA FREQUÊNCIA

- Os próximos componentes a serem analisados serão os controles primários de carga-frequência.

• 3.4.1 - Regulador isócrono

- A partir da caracterização do regulador isócrono é possível obter a seguinte função de transferência para o sistema

- $\Delta P_v \Delta f = K_1 K_2 s$ (3.34)

- Ou seja, foi aplicada a transformada de Laplace na função obtida. Agora, será observado seu comportamento mediante a aplicação de uma perturbação em forma de degrau com amplitude Δf

- $$\Delta P_v = \Delta f s K_1 K_2 s \quad (3.35)$$

- Então no tempo obtemos

- $$\Delta P_v(t) = \Delta f K_1 K_2 t \quad (3.36)$$

- Em que: $1/K_1 K_2$ é denominada de regulação de velocidade, representada por R.

- **3.4.2 - Regulador com queda de velocidade**

- Da função de transferência alcançada, equação (2.44), para o modelo do regulador isócrono utilizado no texto e junto com a representação deste modelo no diagramas de blocos na Figura 2.11, é importante perceber que

- $$K_3 K_1 = R \quad (3.37)$$

- $$1/K_2 K_3 = T_G \quad (3.38)$$

- Voltando para a análise, será aplicada a transformada inversa de Laplace da função em resposta a um degrau de entrada com amplitude Δf

- $$\Delta P_v = \Delta f s 1/R (1 + s T_G) \quad (3.39)$$

- Para aplicação da transformada teremos

- $$\Delta P_v = \Delta f R a_1 s + a_2 T_G (1 T_G + s) \quad (3.40)$$

- e os valores de a_1 e a_2 são

- $$a_1 = 1 \quad (3.41)$$

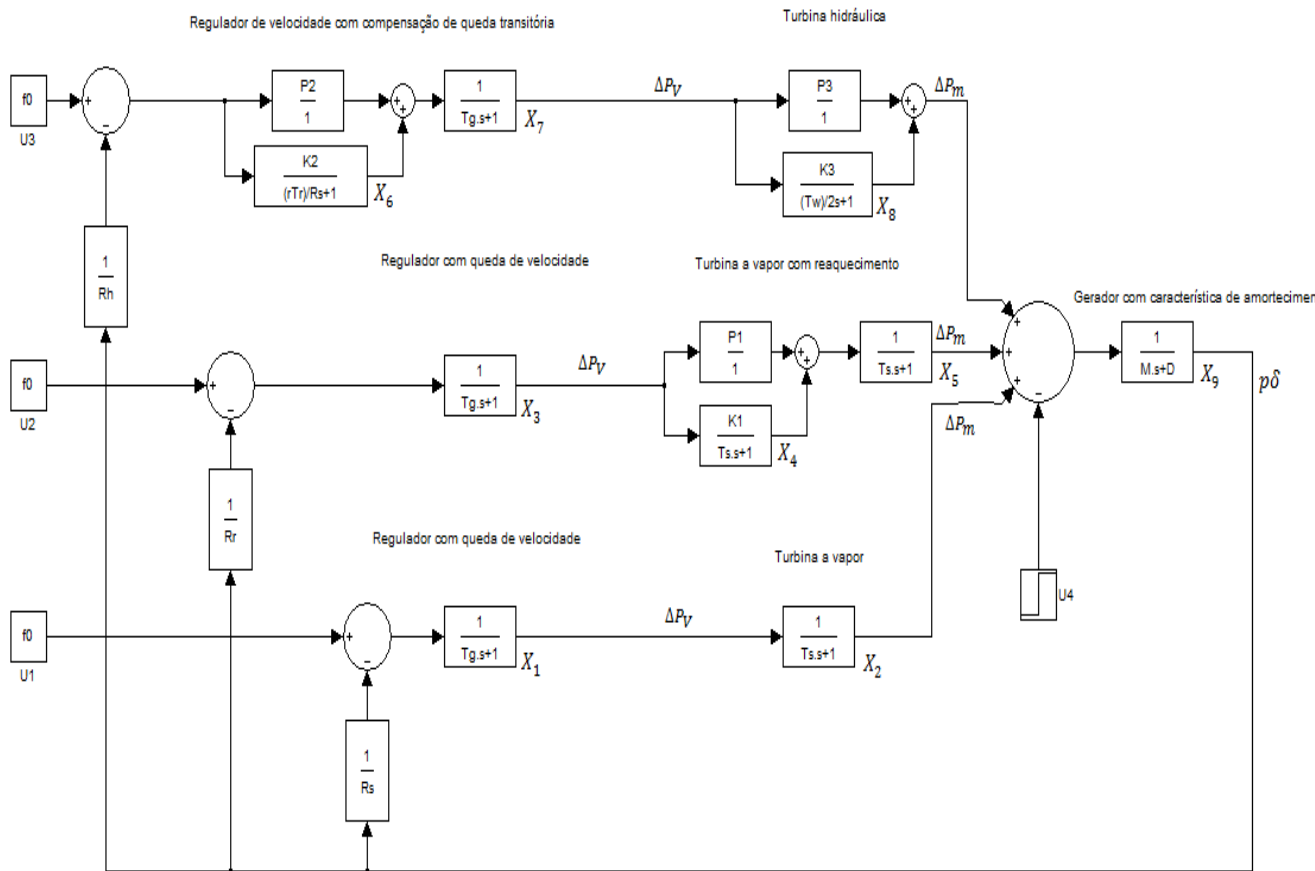
- $$a_2 = -T_G \quad (3.42)$$

- Por fim, no domínio do tempo temos

- $$\Delta P_v(t) = \Delta f R (1 - e^{-t/T_G}) \quad (3.43)$$

- Então temos que para $t=0$, $\Delta P_v=0$. E em regime permanente a variação da posição da válvula será dada pela razão da variação da frequência pela regulação de velocidade.

- O próximo diagrama de blocos a ser apresentado é de uma área isolada representada por apenas uma inércia, que pode significar a representação de diversas inércias combinadas em apenas uma, sendo acionada por três diferentes tipos de turbinas com seus respectivos controladores. Ilustrada na Figura 3.4. A variação de carga ΔPL é representada pela entrada $U4$.



- Figura 3.4 – Diagrama de blocos de três máquinas em uma área isolada.

- Em que:
- $M: M_S+M_R+M_H$
- D : característica de amortecimento
- R_S : regulação do vapor sem reaquecimento
- R_r : regulação do vapor com reaquecimento
- R_h : regulação do sistema hidráulico
- r_h : regulação transitória do sistema hidráulico
- T_R : constante de tempo do reaquecedor
- T_W : tempo de partida da inércia da água
- P_1 : canal proporcional da turbina a vapor com reaquecimento, γ_1
- P_2 : canal proporcional do regulador da turbina hidráulica, γ_2
- P_3 : canal proporcional da turbina hidráulica, γ_3
- Devido à impossibilidade de utilizar constantes, como γ , no programa utilizado para fazer o diagrama de blocos, utilizou-se $P \stackrel{def}{=} \gamma$.
- Notar que na Figura 3.4 estão definidas as variáveis de estados para a representação no espaço de estados que estão sendo relacionadas com as entradas e realimentação pelas funções de transferência do sistema.
- A seguir serão montadas a equação de estado e a equação de saída para o sistema na forma matricial.
- Estado 1:



•

(3.44)



• (3.45)



• (3.46)

-
- Estado 2:



• (3.47)



• (3.48)



• (3.49)

- Estado 3:



• (3.50)



• (3.51)



• (3.52)

• Estado 4:



• (3.53)



• (3.54)



• (3.55)

• Estado 5:



• (3.56)



• (3.57)



• (3.58)

•

•

• Estado 6:



• (3.59)



• (3.60)



• (3.61)

• Estado 7:



• (3.62)



• (3.63)



• (3.64)

• Estado 8:



• (3.65)



• (3.66)



• (3.67)

• Estado 9:



• (3.68)



• (3.69)



• (3.70)



• (3.71)



• (3.72)



• (3.73)



• (3.74)



• (3.75)



• (3.76)



• Sendo que os vetores são, $X = [X_1 \ X_2 \ X_3 \ X_4 \ X_5 \ X_6 \ X_7 \ X_8 \ X_9]^T$ e $U = [U_1 \ U_2 \ U_3 \ U_4]^T$.

• **3.6 – COMPORTAMENTO DO CONTROLE PRIMÁRIO DE ÁREA ISOLADA**

- A partir da Figura 3.5, e utilizando redução de diagramas de blocos é possível chegar a uma função de transferência entre a variação da frequência e variação da carga.

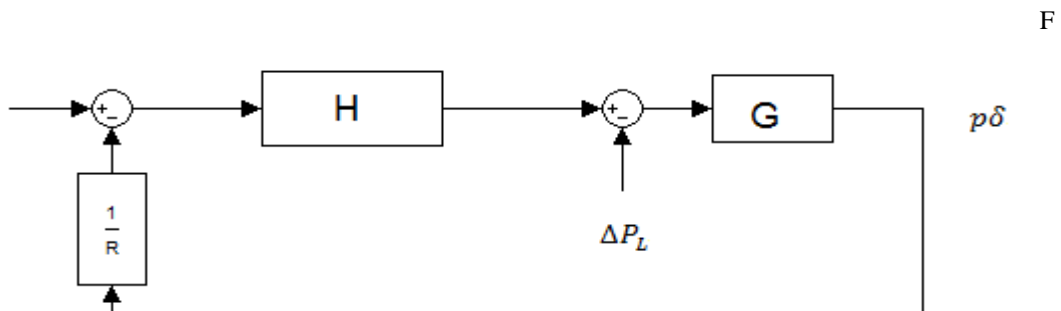


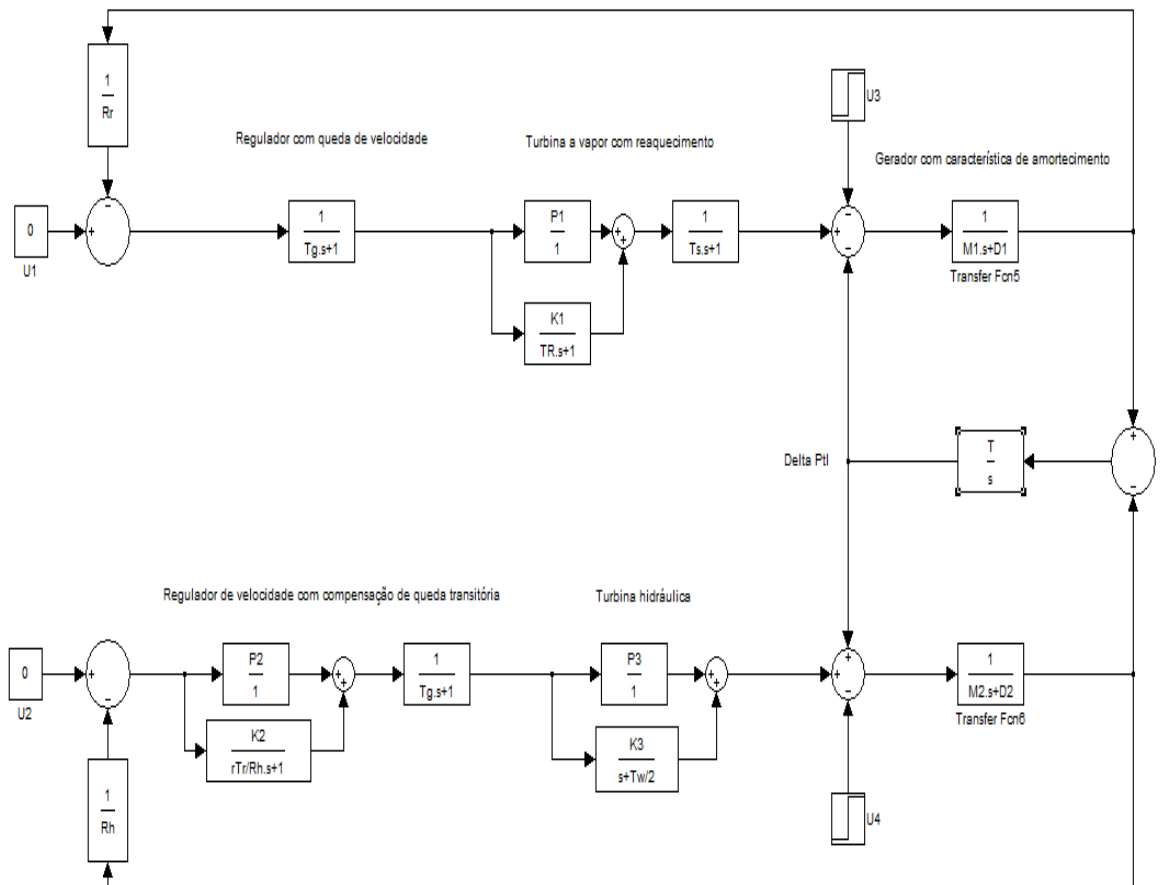
Figura 3.5 – Diagrama de blocos do controle primário de uma área isolada.

- $p\delta\Delta PL = -G1 + GHR$ (3.77)
- Portanto para um desvio de carga em degrau com amplitude ΔPL o desvio de frequência em regime permanente é:
 - $p\delta = -\Delta PL D + 1R$ (3.78)
- Se o sistema apresentar várias máquinas
 - $p\delta = -\Delta PL D + 1Req$ (3.79)
- Em que:
 - $Req = 1/R1 + 1/R2 + \dots + 1/Rn$ (3.80)

3.7 – REGULADOR DE VELOCIDADE EM ÁREAS INTERLIGADAS

- Para o funcionamento dos reguladores de velocidade o caso áreas interligadas não muda em nada seus efeitos.

- A Figura 3.6 é o diagrama de blocos de duas áreas isoladas interligadas. As variações de carga ΔPL , em cada área, são representadas por $U4$ e $U3$.



- Figura 3.6 – Diagrama de blocos de duas máquinas com reguladores e uma interligação.
- Notar que na figura acima estão definidas as variáveis de estados para a representação no espaço de estados.

- A seguir serão montadas a equação de estado e a equação de saída para o sistema na forma matricial.

-

- Estado 1:



- (3.81)



- (3.82)



- (3.83)

- Estado 2:



- (3.84)



- (3.85)



- (3.86)

- Estado 3:



• (3.87)



• (3.88)



• (3.89)

• Estado 4:



• (3.90)



• (3.91)



• (3.92)

• Estado 5:



• (3.93)



• (3.94)



• (3.95)

• Estado 6:



• (3.96)



• (3.96)



• (3.97)

• Estado 7:



• (3.98)



• (3.99)



• (3.100)

- Estado 8:



- (3.101)



- (3.102)



- (3.103)

- Estado 9:



- (3.104)



- (3.105)

-

- Formando, assim, a matriz A e B:



-



-



•



•



- Sendo que os vetores são, $X = [X_1 \ X_2 \ X_3 \ X_4 \ X_5 \ X_6 \ X_7 \ X_8 \ X_9]^T$ e $U = [U_1 \ U_2 \ U_3 \ U_4]^T$.

•

•

•

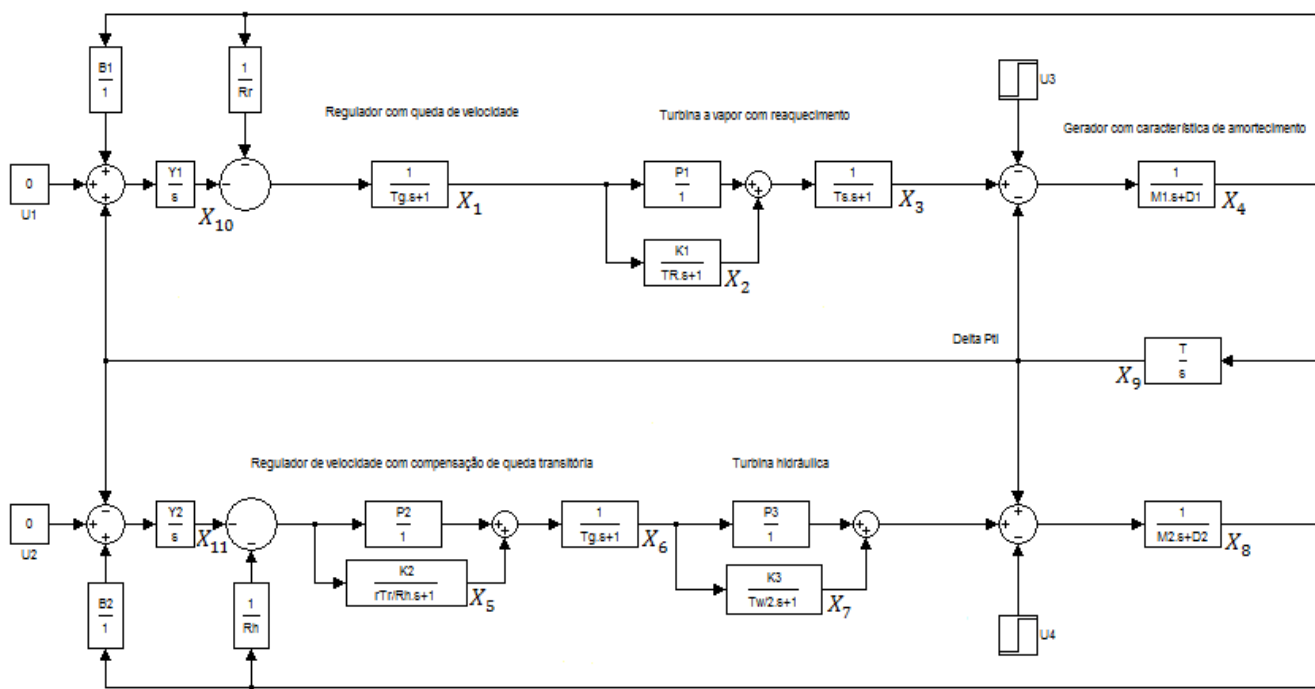
•

•

•

• **3.8 – CONTROLE SUPLEMENTAR – SISTEMAS INTERLIGADOS**

- Notar que na Figura 3.7 estão definidas as variáveis de estados para a representação no espaço de estados. E que a variação de carga ΔPL é representada pela entrada U_4 e U_3 .



• Figura 3.7 – Diagrama de blocos do controle suplementar.

• A seguir serão montadas a equação de estado e a equação de saída para o sistema na forma matricial.

• Estado 1:



• (3.106)



• (3.107)



• (3.108)

-
- Estado 2:



• (3.109)



• (3.110)



• (3.111)

- Estado 3:



• (3.112)



• (3.113)



• (3.114)

• Estado 4:



• (3.115)



• (3.116)



• (3.117)

• Estado 5:



• (3.118)



• (3.119)



• (3.120)

• Estado 6:



• (3.121)



• (3.122)



• (3.123)

• Estado 7:



• (3.124)



• (3.125)



• (3.126)

• Estado 8:



• (3.127)



• (3.128)



• (3.129)

• Estado 9:



• (3.130)



• (3.131)

• Estado 10:



• (3.132)



• (3.133)

• Estado 11:



• (3.134)



-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-

• Chega-se, assim, às matrizes A e B:



•



•



•



-

- **4 – SIMULAÇÕES E RESULTADOS**

- Neste capítulo serão apresentadas todas as simulações realizadas. O objetivo da realização dessas simulações é confirmar a análise feita a partir da descrição de cada componente do sistema.

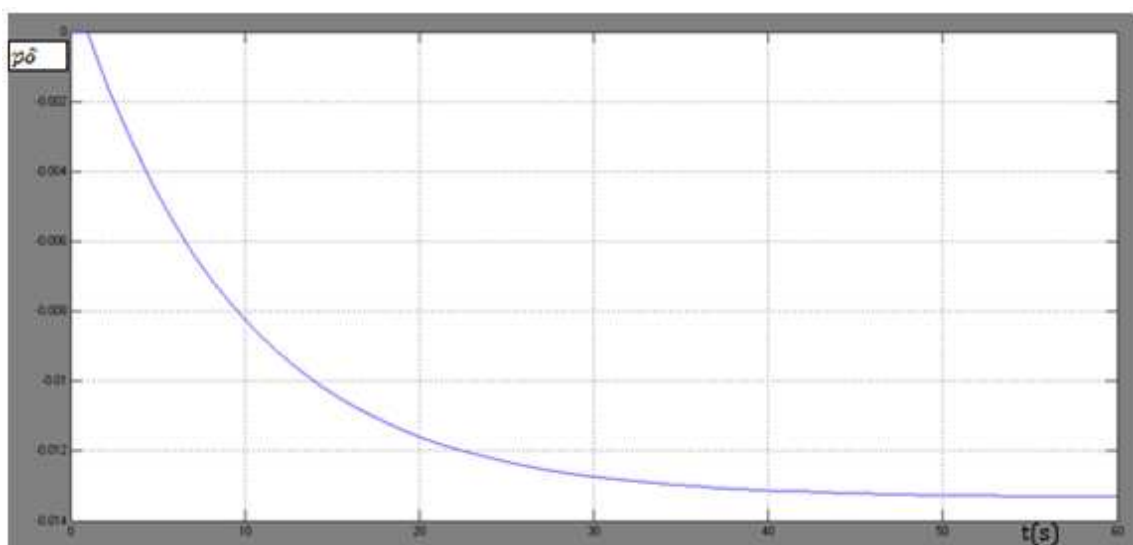
- Os dados utilizados podem ser encontrados na referência bibliográfica [1] do texto.

- É importante dizer que todas as imagens de blocos simulados foram elaboradas no MatLab, e então, a notação dos blocos de todas as imagens são desse programa.

- **4.1 – CONJUNTO GERADOR-CARGA ISOLADO COM AMORTECIMENTO**

- Fazendo a simulação com os valores: $D=0.75$; $M=7$, $\Delta L=0.01$ p.u.

-



- Figura 4.1 – Simulação do conjunto gerador-carga isolado com amortecimento.

- O gráfico mostra a variação da frequência, em p.u., no sistema devido a uma variação da carga.

- Substituindo os valores na equação (3.4) encontra-se:

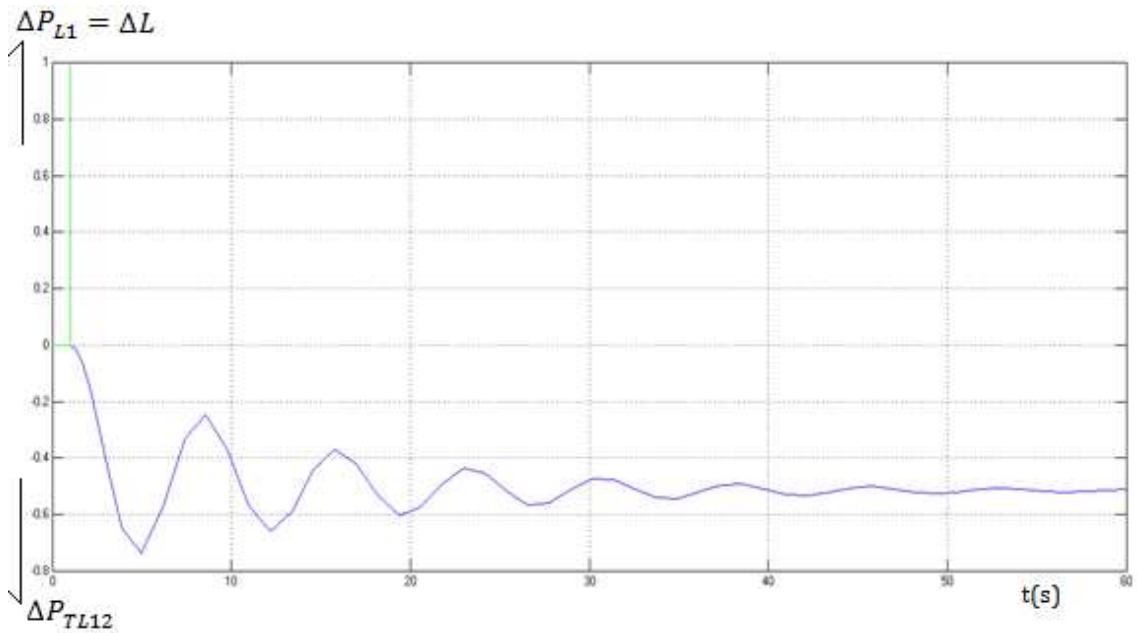
- $p\delta t = 0.010.75 - 1 = -0.013$ p.u.

- Confirmando a análise feita para este modelo.

-

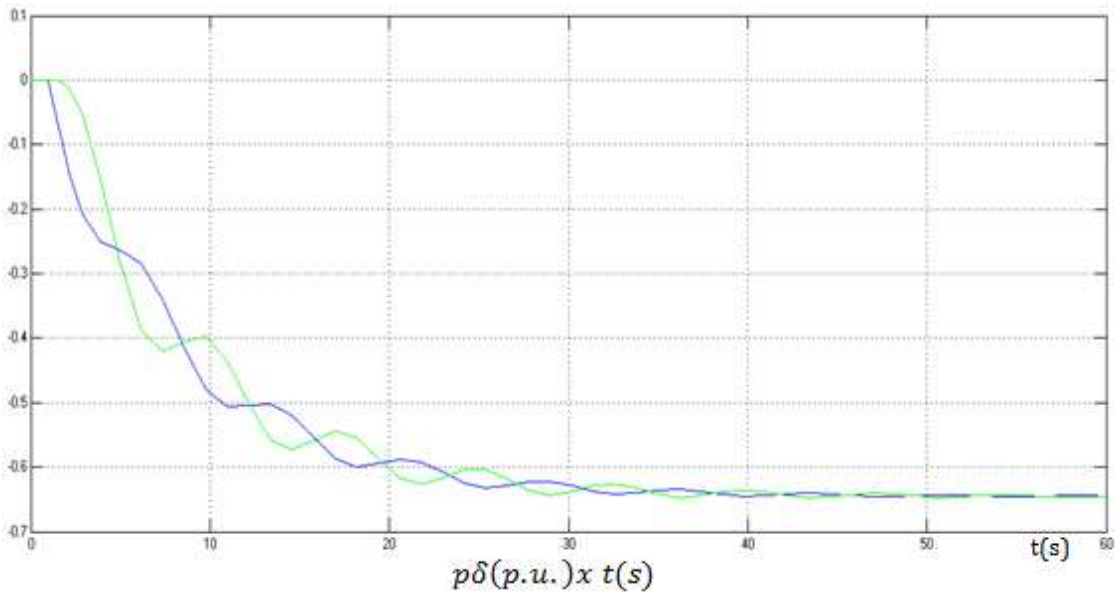
- **4.2 – ACOPLAMENTO ELÉTRICO ENTRE MÁQUINAS**

- Fazendo a simulação com os valores: $D1=D2=D=0.75$; $M1=M2=M=7$, $\Delta L=1$ p.u. e $T=2$. O sinal de entrada é representado pela cor verde e a saída, $\Delta PTL12$, pela cor azul.



• Figura 4.2 – Simulação da variação da potência na interligação.

- Para a dada variação de ΔP_{L1} temos a oscilação em ΔP_{TL12} que se estabiliza na metade do valor de ΔL .
- Agora para a estabilização das frequências de saída do sistema é possível notar pela equação (3.10) que existe um componente exponencial que oscila com certa frequência. Então a função terá uma oscilação até que se estabilize na frequência final determinada pela equação (3.7) com o tempo tendendo ao infinito resultando em $\rho \delta t = \infty = -\Delta L / 2D$. A variação final da frequência será a mesma nas áreas um e dois, pois $D1 = D2$ e $M1 = M2$. Na simulação a área um está representada pela cor azul e a área dois pela cor verde.

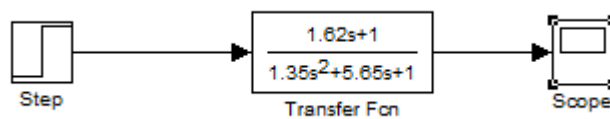


• Figura 4.3 – Variação da frequência com interligação.

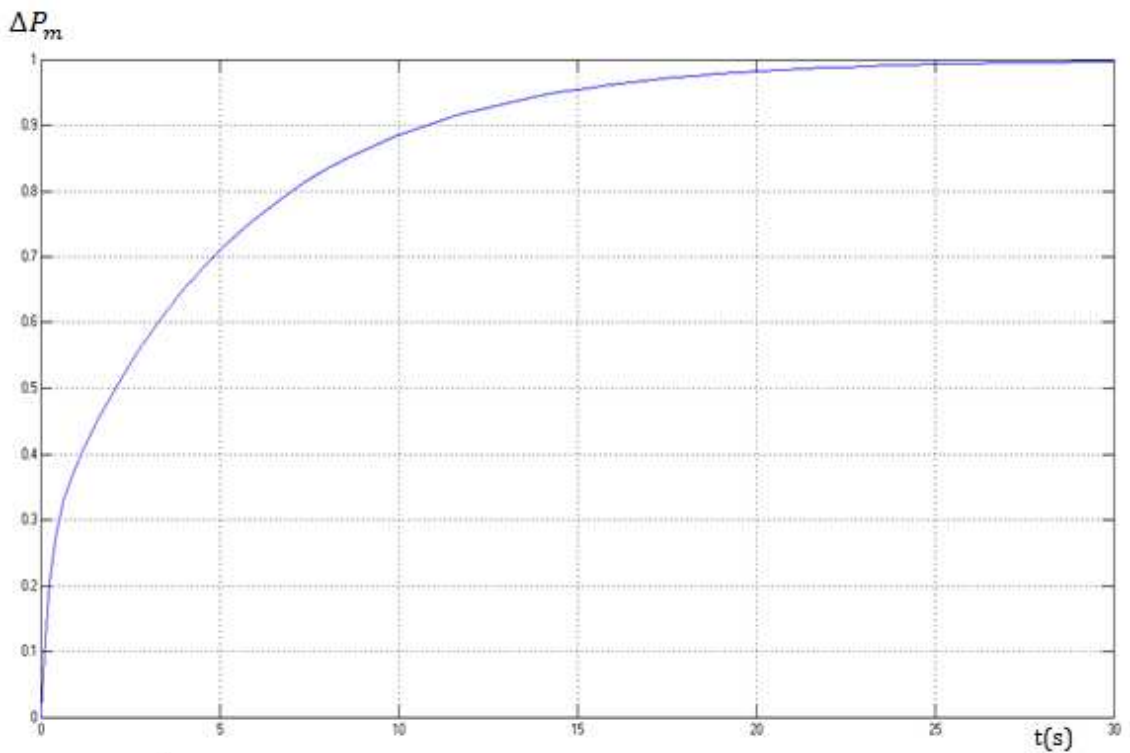
• 4.3 – TURBINA A VAPOR REAQUECIDA

• Em que $C=0.3$ é a proporção de potência desenvolvida na turbina de alta pressão. E $TR=5.4$ é a constante de tempo do reaquecedor.

• Agora é mostrada uma simulação utilizando $T_s=0.25$ e um degrau de entrada de 1 p.u. A Figura 4.5 mostra a resposta ao degrau para a turbina com reaquecedor.



• FIGURA 4.4 – FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DA TURBINA COM REAQUECEDOR.



• Figura 4.5 – Simulação da turbina com reaquecedor.

• A simulação mostra três pontos abordados na análise. A forma de onda é a esperada, $\Delta P_m(0)=0$ e em regime permanente $\Delta P_m=\Delta P_v$, sendo que ΔP_v é o sinal de entrada.

• **4.4 – TURBINA HIDRÁULICA**

• Para $T_w=2$ e um degrau de entrada unitário é obtida a seguinte resposta

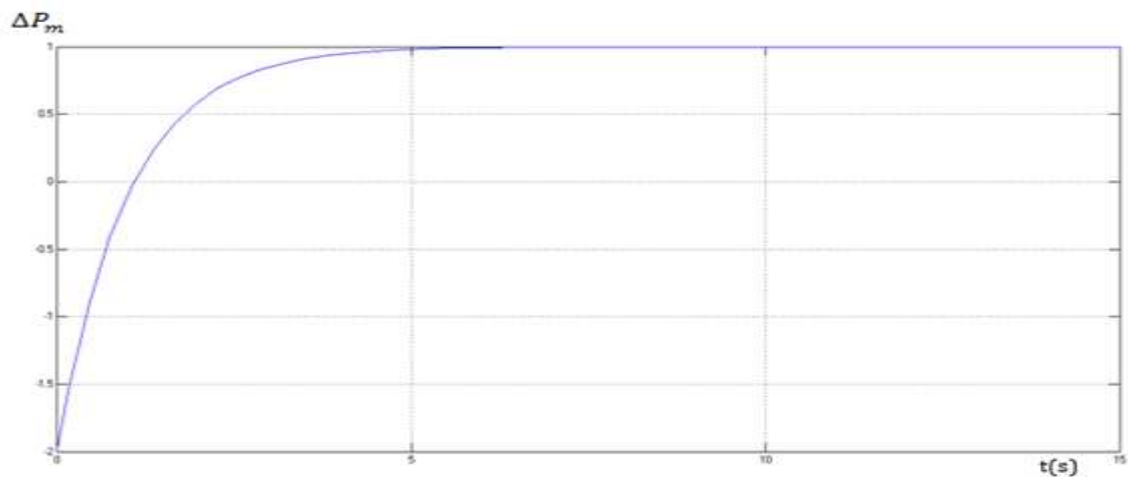


Figura 4.6 – Simulação da turbina hidráulica.

- Comprovando a análise feita para o tempo inicial e para o regime permanente.

- **4.5 – REGULADOR ISÓCRONO**
 - Nessa simulação a constante 0 é o valor de referência para velocidade e o degrau é o desvio de velocidade medido pelo controlador. O degrau tem valor inicial 0 e valor final -1. O valor de R (regulação de velocidade) utilizado foi 0.05.

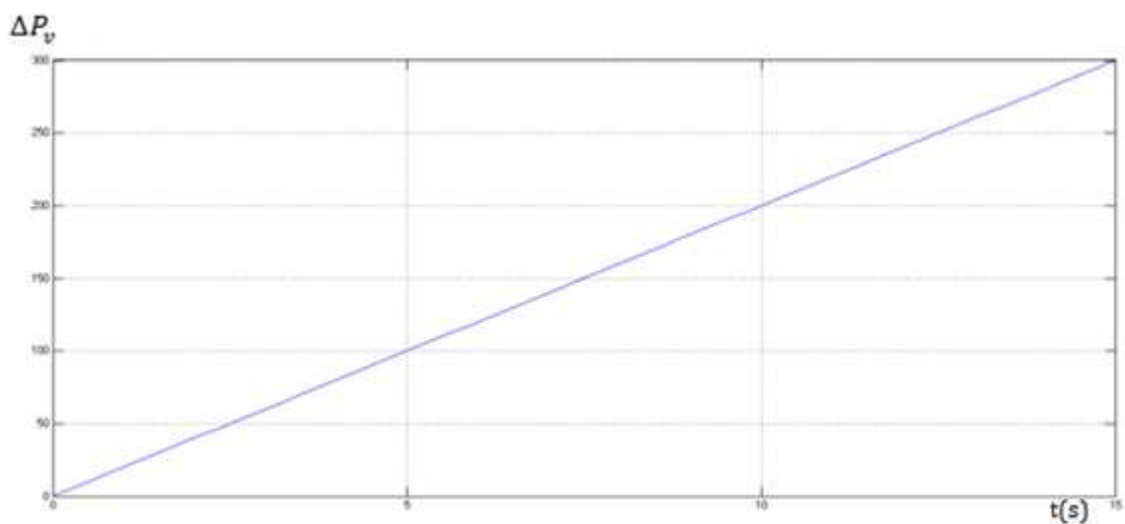


Figura 4.7 – Simulação do regulador isócrona.

- No gráfico pode-se observar que após 1 segundo que a rampa começa a subir é encontrado o valor de 1R.

- 4.6 – REGULADOR COM QUEDA DE VELOCIDADE**

- Neste modelo a simulação usa os valores de $T_g=0.5$ e $R=0.5$. O degrau começa em 0 e termina em -1. Pelo gráfico podemos observar que a resposta ao degrau tem a amplitude dividida por R.

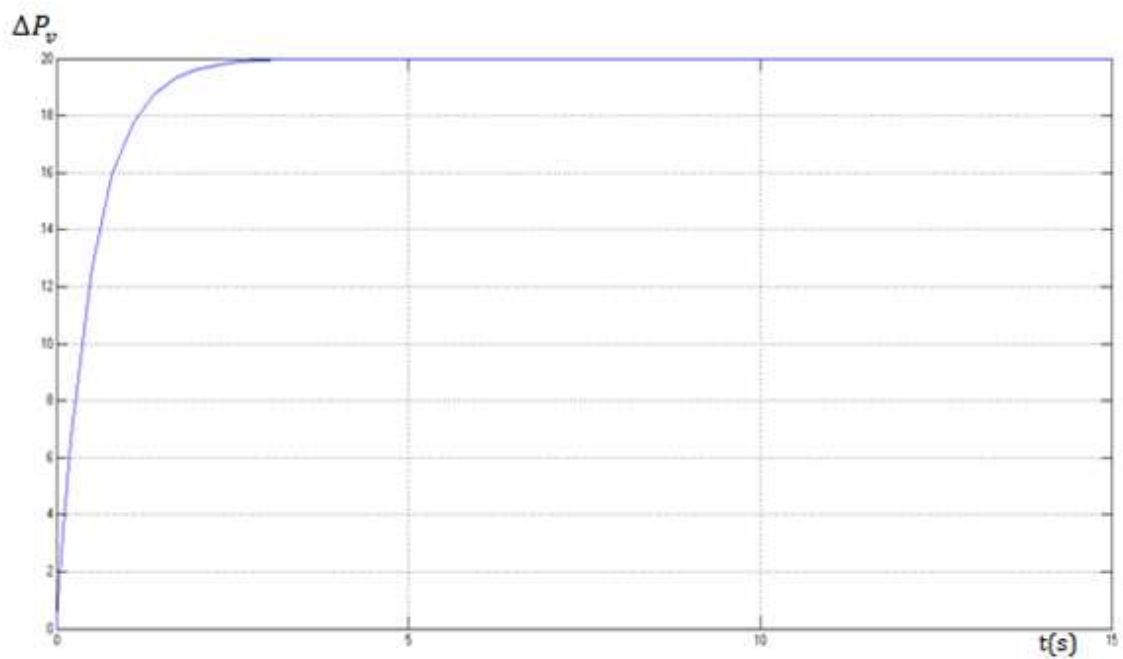
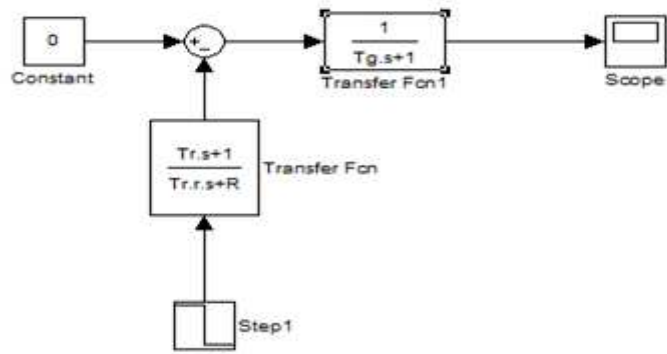


Figura 4.8 – Simulação do regulador com queda de velocidade.

- **4.7 – REGULADOR COM COMPENSAÇÃO DE QUEDA TRANSITÓRIA**
 - Neste modelo a simulação usa os valores de $r=1$ $T_r=0.5$, $R=0.01$ e $T_g=0.6$. O degrau começa em 0 e termina em -1p.u.



• Figura 4.9 – Função de transferência do regulador com compensação de queda transitória.

-
-
-
-
-
-
-
-

A resposta é

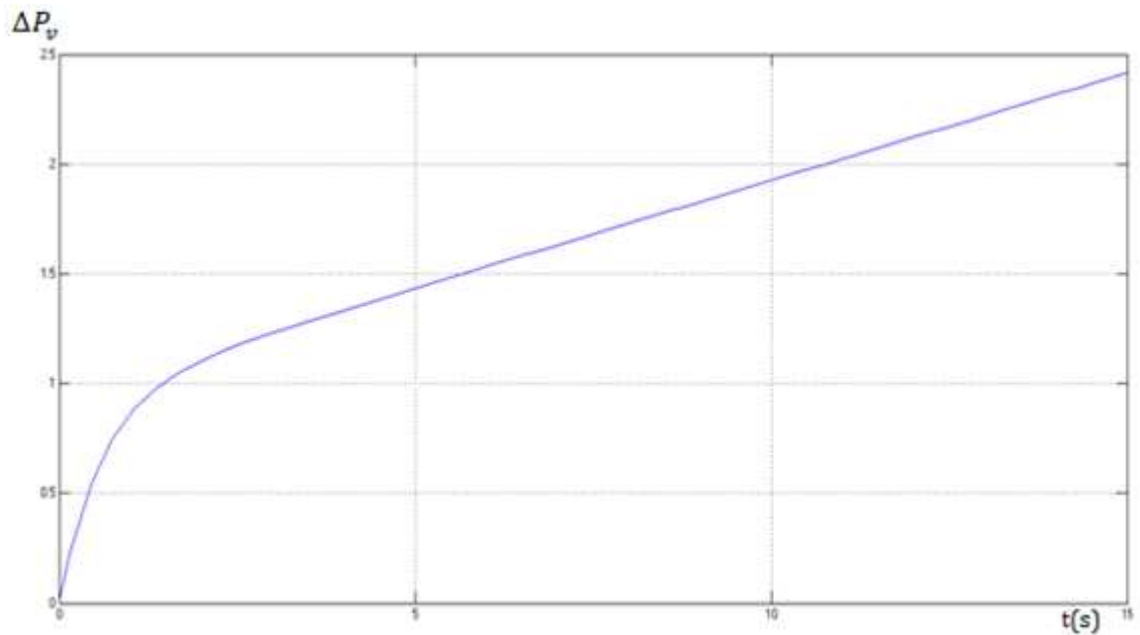
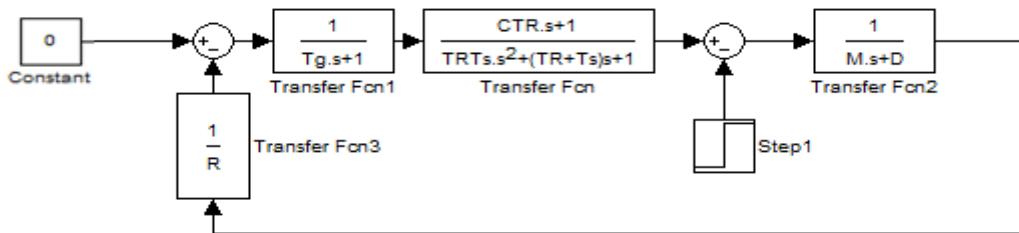


Figura 4.10 – Simulação do regulador com compensação de queda transitória.

- Nos instantes iniciais a inclinação da curva é dada pelo inverso da regulação transitória e após o joelho da curva sua inclinação é dada pelo inverso da regulação de estado equilíbrio.
- **4.8 – COMPORTAMENTO DO CONTROLE PRIMÁRIO DE ÁREA ISOLADA**
 - Utilizando os modelos encontrados para turbina a vapor com rea aquecimento e regulador com queda de velocidade é simulado comportamento do controle primário de uma área isolada.

- Neste modelo a simulação usa os valores de $TR=5.4$, $R=0.05$, $Tg=0.6$, $M=5.6$, $D=0.8$, $Ts=0.25$ e $C=3$. O degrau de entrada, representado pela cor verde na simulação, é a variação de carga na área e começa em 0 para terminar em 0.01p.u. Pelo gráfico podemos observar que a resposta $\dot{p}\delta t$, representada pela cor azul na simulação, tem a amplitude dividida por R.

-



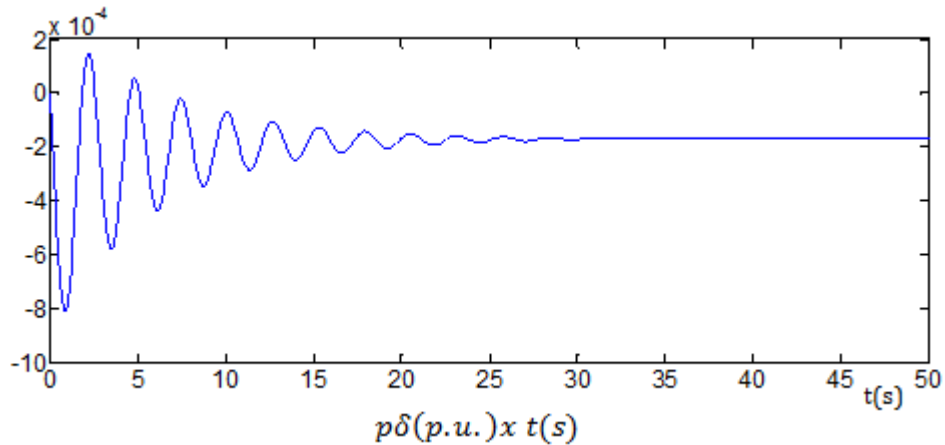
- Figura 4.11 – Diagrama de blocos de uma área isolada com uma turbina reaquecida com regulador com queda de velocidade.



- Figura 4.12 – Simulação do comportamento do controle primário de área isolada.
- A variação da frequência $p\delta$ está em p.u.
- Utilizando a fórmula (3.78) encontra-se o valor de desvio de frequência de $-3.571e-3$ p.u. A simulação vai de encontro com a análise apresentada.

• **4.9 – REGULADORES DE VELOCIDADE EM TRÊS MÁQUINAS EM UMA ÁREA ISOLADA**

- Esta simulação foi realizada por intermédio da representação no espaço de estados utilizando a programação apresentada no apêndice A. A Figura 3.4 mostra o sistema simulado.
- A entrada da simulação é uma variação de carga em forma de degrau com amplitude 0.01p.u.



• Figura 4.13 – Simulação de velocidade em três máquinas em uma área isolada.

• Os valores utilizados foram $RS=0.05$, $RH=0.05$, $Rr=0.05$, $R=0.05$, $TR=5$, $TG=0.5$, $M=7$, $D=0.75$, $Ts=0.2$, $C=3$, $r=0.38$, $Tr=2.63$ e $Tw=0.5$

• Utilizando a fórmula (3.79) encontra-se o valor de desvio de frequência de $-1.65e-4$ p.u. A simulação vai de encontro com a análise apresentada.

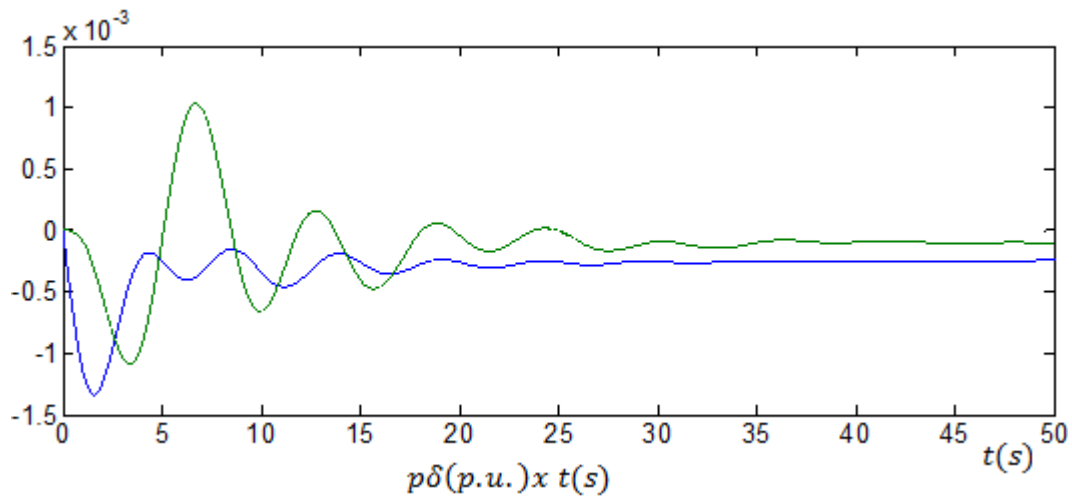
• A simulação realizada da representação no espaço de estados foi confirmada com a simulação do mesmo sistema utilizando-se do SIMULINK.

• 4.10 – REGULADOR DE VELOCIDADE EM ÁREAS INTERLIGADAS

• Esta simulação foi realizada mediante a da representação no espaço de estados utilizando a programação apresentada no apêndice B. A Figura 3.6 mostra o sistema simulado. Importante observar que em uma área a turbina é hidráulica na outra a turbina é a vapor com reaquecimento.

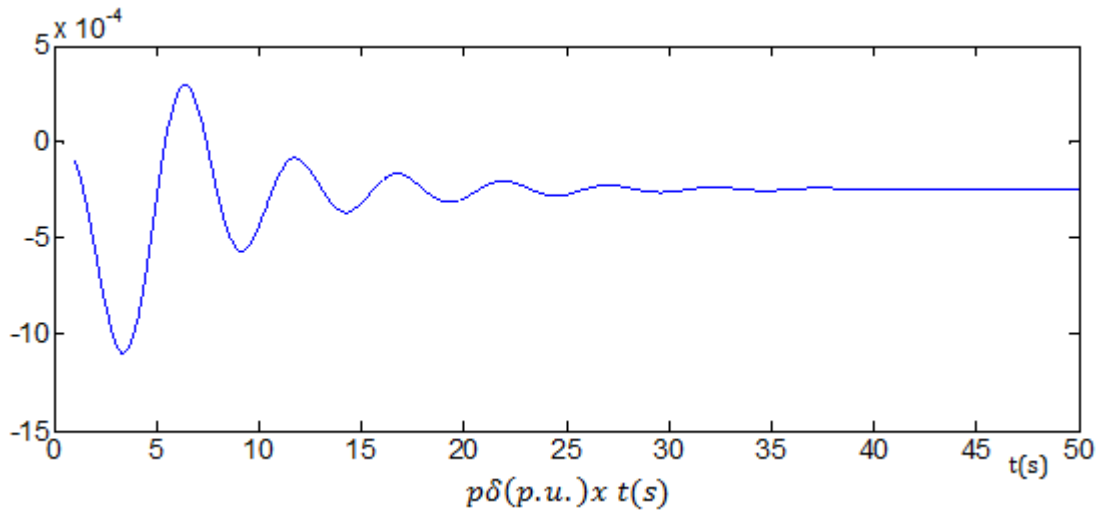
• Os valores utilizados foram $RH=0.05$, $Rr=0.05$, $R=0.05$, $TR=5$, $TG=0.5$, $M1=7$, $D1=0.75$, $M2=4.56$, $D2=0.8$, $Ts=0.2$, $C=3$, $r=0.38$, $Tr=2.63$ e $Tw=0.5$

• A entrada da simulação é uma variação de carga em forma de degrau com amplitude 0.01 p.u. É importante acrescentar que a simulação realizada da representação no espaço de estados foi confirmada com a simulação do mesmo sistema utilizando-se do SIMULINK.



• Figura 4.14 – Simulação de velocidade em áreas interligadas.

- A resposta em azul representa a resposta da frequência para a primeira área, e a em verde representa a da segunda área.
- Do gráfico é possível tirar algumas conclusões. A mais evidente é o defasamento da oscilação transitória.



• Figura 4.15 – Simulação de velocidade em áreas interligadas na interligação.

- Utilizando a fórmula (2.56) encontra-se o valor de desvio de frequência de $-2.41e-4$ p.u. O mesmo valor para o regime permanente apresentado na figura logo acima.

-
-

• 4.11 – CONTROLE SUPLEMENTAR – SISTEMAS INTERLIGADOS

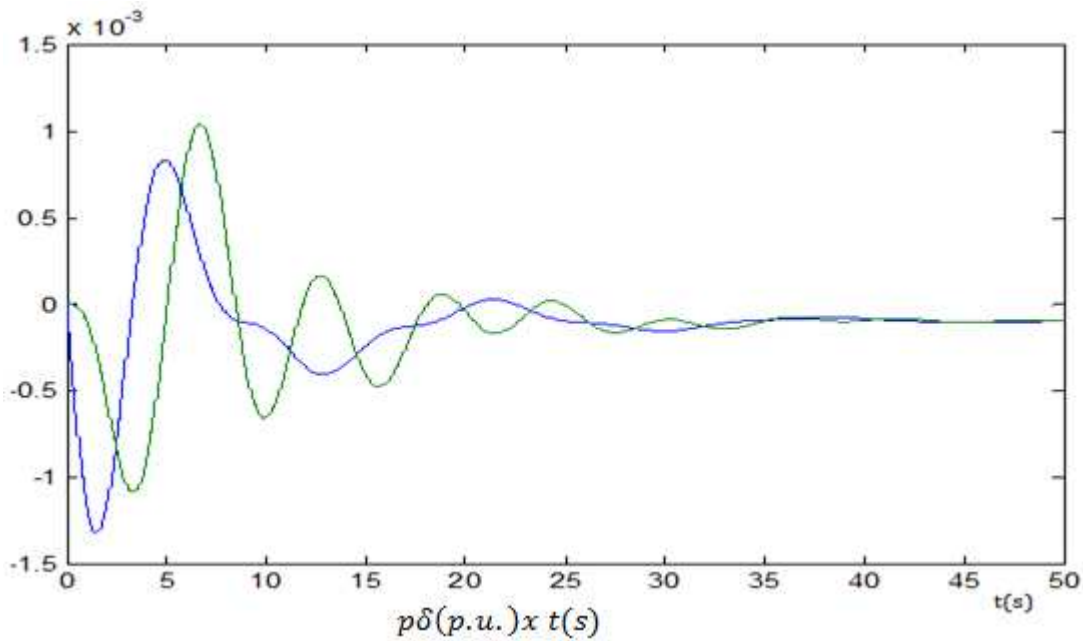
- Para esta simulação foi realizada através da representação no espaço de estados utilizando a programação apresentada no apêndice C.

- Foram utilizados os mesmos valores das duas simulações precedentes a esta. Acrescentando-se os valores $B1=120.75$, $B2=120.8$, $Y1=3$ e $Y3=3$. $B1$ e $B2$ foram encontrados pelas fórmulas (2.59) e (2.58) respectivamente.

- A entrada da simulação é uma variação de carga em forma de degrau com amplitude 0.01 p.u. É importante acrescentar que a simulação encontrada para o

modelo no espaço de estados foi de encontro com a simulação do mesmo sistema realizada no SIMULINK.

•



• Figura 4.16 – Simulação do controle suplementar – sistemas interligados.

- A resposta em azul representa a resposta da frequência para a primeira área, e a em verde representa a da segunda área.
- Do gráfico observa-se o objetivo de usar o controle suplementar, que é levar a velocidade do sistema novamente para a nominal.

•

•

• 5 – CONCLUSÃO

- O objetivo do presente trabalho é apresentar os aspectos básicos do controle carga-freqüência abordando a dinâmica do controle de geração.
- Foi feita uma descrição do funcionamento dos componentes fundamentais envolvidos neste problema, e a partir desta caracterização, apresentou-se modelos que pudessem os representar para uma futura análise e simulação.
- A análise mostra como cada componente do sistema se comporta mediante uma variação de carga. Abordou-se tanto aspectos transitórios como da resposta em regime permanente.
- É possível concluir que a análise realizada no texto, e encontrada na bibliografia, para os modelos apresentados, é satisfatória visto que as simulações dos modelos sempre foram de encontro com as informações previamente expostas pela análise.
- Desta maneira, o presente trabalho mostra que estudos e simulações realizados para o sistema de controle carga-freqüência a partir dos modelos descritos sempre poderão comparar suas respostas com a exposta na teoria.
- Os resultados encontrados para uma variação de carga para diversas montagens de sistemas, por exemplo, com diversas máquinas, ou com interligação, sempre apresentou os resultados esperados. Resultados estes que foram demonstrados na análise ou na descrição do modelo.
- Como sugestão para futuros trabalhos, pode-se mencionar a aplicação de técnicas de controle ótimo, para controle dos sistemas abordados, visando amortecimento de oscilações na faixa de freqüência de interesse.
-
-
-
-
-
-
-
-

• REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MELLO, F. P. *Dinâmica de controle de geração*, Rio Grande do Sul, Edições UFSM, 1983.
- [2] http://www.ucte.org/library/ohb/policy1_v22.pdf 28/06/2008
- [3] http://findarticles.com/p/articles/mi_qa3792/is_199804/ai_n8802558/pg_1?tag=art
[Body:col1](#) 28/06/2008
- [4] http://www.es.e.iitb.ac.in/~icaer2007/Latest%20PPT%20File/34_106_TS10%20A.pdf
- [5] http://ec.europa.eu/energy/electricity/florence/doc/florence9/position_paper/ucte/
[/](#)
[appendix1.pdf](#)
- [6] http://www.ee.pucrs.br/~sergio/fluidotermica/Cap09_TURBINAS_A_VAPOR.pdf.
27/06/2008
- [7] http://energiasap.blogspot.com/2007_10_23_archive.html. 27/06/2008
- [8] <http://professor.ucg.br/siteDocente/admin/arquivosUpload/8038/material/controlde%20de%20geracao.pdf>. 27/06/2008
- [9] <http://www.labspot.ufsc.br/~simoed/dincont/dc-cap2.pdf>. 27/06/2008
- [10] OGATA, K. *Engenharia de controle Moderno*, 4.^a Edição, Prentice Hall, São Paulo, SP, 2003.
- [11] ELGERD, Olle Ingemar. *Introdução a teoria de sistemas de energia elétrica*, São Paulo: Mcgraw-Hill do Brasil, 1976. 604 p.
-
-
-
-

-
-
-
-

- **APÊNDICE A**

- Neste apêndice, é apresentada a programação utilizada no MatLab para simular a representação do sistema ilustrado na Figura 3.4. Em que A é chamada de matriz de estado, B, de matriz de entrada, C, de matriz de saída, e D, de matriz de transmissão direta. O último bloco de comandos define apenas uma saída e uma entrada, e então, aplica um sinal de entrada em forma de degrau com amplitude 0.01.

-

- $A = [-1/0.5 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -1/(0.05*0.5)$
- $1/0.2 \ -1/0.2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0$
- $0 \ 0 \ -1/0.5 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -1/(0.05*0.5)$
- $0 \ 0 \ (0.75)/5 \ -1/5 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0$
- $0 \ 0 \ (0.25)/0.2 \ 1/0.2 \ -1/0.2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0$
- $0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -0.05/(0.38*2.63) \ 0 \ 0 \ -0.05*(0.38-0.05)/((0.38^2)*2.63*0.05)$
- $0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1/0.5 \ -1/0.5 \ 0 \ -0.05/(0.38*0.5*0.05)$
- $0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 6/0.5 \ -2/0.5 \ 0$
- $0 \ 1/7 \ 0 \ 0 \ 1/7 \ 0 \ -2/7 \ 1/7 \ -0.75/7]$

-

- $B = [0 \ 0 \ 1/0.5 \ 0$
- $0 \ 0 \ 0 \ 0$
- $0 \ 1/0.5 \ 0 \ 0$
- $0 \ 0 \ 0 \ 0$
- $0 \ 0 \ 0 \ 0$
- $0.05*(0.38-0.05)/((0.38^2)*2.63) \ 0 \ 0 \ 0$
- $0.05/(0.38*0.5) \ 0 \ 0 \ 0$
- $0 \ 0 \ 0 \ 0$
- $0 \ 0 \ 0 \ -1/7]$

-

- $C = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1$
- $0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ -2 \ 1 \ 0$
- $0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0$
- $0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0$
- $0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -2 \ 1 \ 0]$

-

-

- $D = [0 \ 0 \ 0 \ 0$

- 0 0 0 -1
- 0 0 0 0
- 0 0 0 0
- 0 0 0 0]
-
- C1 = C(1,:);
- D1 = D(1,4);
- B1 = B(:,4);
- sys = ss(A,B1,C1,D1);
- t = 0:0.01:50;
- Y = 0.01*step(sys,t);
- plot (t,Y);
- **APÊNDICE B**

- Neste apêndice, é apresentada a programação utilizada no MatLab para simular a representação do sistema ilustrado na Figura 3.6. Em que A é chamada de matriz de estado, B, de matriz de entrada, C, de matriz de saída, e D, de matriz de transmissão direta. O último bloco de comandos define apenas uma saída e uma entrada, e então, aplica um sinal de entrada em forma de degrau com amplitude 0.01.

-
- A = [-1/0.5 0 0 -1/(0.05*0.5) 0 0 0 0 0
- (1-0.25)/5 -1/5 0 0 0 0 0 0 0
- 0.25/0.2 1/0.2 -1/0.2 0 0 0 0 0 0
- 0 0 1/7 -0.75/7 0 0 0 0 -1/7
- 0 0 0 0 -0.05/(0.38*2.63) 0 0 -(0.38-0.05)/(0.38^2*2.63) 0
- 0 0 0 0 1/0.5 -1/0.5 0 -1/(0.38*0.5) 0
- 0 0 0 0 0 6/0.5 -2/0.5 0 0
- 0 0 0 0 0 -2/4.56 1/4.56 -0.8/4.56 1/4.56
- 0 0 0 2 0 0 0 -2 0]
-
- B = [1/0.5 0 0 0
- 0 0 0 0
- 0 0 0 0
- 0 0 -1/7 0
- 0 0.05*(0.38-0.05)/(0.38^2*2.63) 0 0
- 0 0.05/(0.5*0.38) 0 0
- 0 0 0 0
- 0 0 0 -1/4.56
- 0 0 0 0]
-
-
- C = [0 0 0 1 0 0 0 0 0
- 0 0 0 0 0 0 0 1 0]
-
- D = [0 0 0 0
- 0 0 0 0]
- C1 = C(1,:);

- $D1 = D(1,3);$
- $B1 = B(:,3);$
- $sys = ss(A,B1,C1,D1);$
- $t = 0:0.01:50;$
- $Y = 0.01*step(sys,t);$
- $plot (t,Y,t,Y2)$

•

- $C2 = C(2,:);$
- $D2 = D(2,3);$
- $B2 = B(:,3);$
- $sys2 = ss(A,B2,C2,D2);$
- $Y2 = 0.01*step(sys2,t);$
- $plot (t,Y2)$

• **APÊNDICE C**

- Neste apêndice, é apresentada a programação utilizada no MatLab para simular a representação do sistema ilustrado na Figura 3.7. Em que A é chamada de matriz de estado, B, de matriz de entrada, C, de matriz de saída, e D, de matriz de transmissão direta.

• Os dois últimos blocos de comandos definem apenas uma saída e uma entrada, e então, aplica um sinal de entrada em forma de degrau com amplitude 0.01. Desta forma temos a simulação de duas saídas para esta representação.

•

- $A = [-1/0.5 \ 0 \ 0 \ -1/(0.05*0.5) \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -1/0.5 \ 0$
- $(1-0.25)/5 \ -1/5 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0$
- $0.25/0.2 \ 1/0.2 \ -1/0.2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0$
- $0 \ 0 \ 1/7 \ -0.75/7 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -1/7 \ 0 \ 0$
- $0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -0.05/(0.38*2.63) \ 0 \ 0 \ -(0.38-0.05)/(0.38^2*2.63) \ 0 \ 0 \ -0.05*(0.38-0.05)/$
- $(0.38^2*2.63)$
- $0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1/0.5 \ -1/0.5 \ 0 \ -1/(0.38*0.5) \ 0 \ 0 \ -0.05/(0.5*0.38)$
- $0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 6/0.5 \ -2/0.5 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0$
- $0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -2/4.56 \ 1/4.56 \ -0.8/4.56 \ 1/4.56 \ 0 \ 0$
- $0 \ 0 \ 0 \ 2 \ 0 \ 0 \ 0 \ -2 \ 0 \ 0 \ 0$
- $0 \ 0 \ 0 \ 3/20.75 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 3 \ 0 \ 0$
- $0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1/20.8 \ -1 \ 0 \ 0]$

•

- $B = [0 \ 0 \ 0 \ 0$
- $0 \ 0 \ 0 \ 0$
- $0 \ 0 \ 0 \ 0$
- $0 \ 0 \ -1/7 \ 0$
- $0 \ 0 \ 0 \ 0$
- $0 \ 0 \ 0 \ 0$
- $0 \ 0 \ 0 \ 0$
- $0 \ 0 \ 0 \ -1/4.56$
- $0 \ 0 \ 0 \ 0$
- $3 \ 0 \ 0 \ 0$
- $0 \ 1 \ 0 \ 0]$

-
-
- C = [0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0
- 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0]
-
-
- D = [0 0 0 0
- 0 0 0 0]
-
- C1 = C(1,:);
- D1 = D(1,3);
- B1 = B(:,3);
- sys = ss(A,B1,C1,D1);
- t = 0:0.01:50;
- Y = 0.01*step(sys,t);
-
-
- C2 = C(2,:);
- D2 = D(2,3);
- B2 = B(:,3);
- sys2 = ss(A,B2,C2,D2);
- t = 0:0.01:50;
- Y2 = 0.01*step(sys2,t);
- plot (t,Y,t,Y2)
-
-
-
-