

2

Agregação Dinâmica de Modelos de Turbinas e Reguladores de Velocidade: Teoria

2.1

Introdução

O objetivo da agregação dinâmica de turbinas e reguladores de velocidade é a obtenção dos parâmetros do modelo equivalente, dados os modelos individuais usados em cada unidade geradora do grupo coerente.

O método assume que os parâmetros lineares e as características não-lineares dos modelos equivalentes podem ser tratados separadamente. Os parâmetros lineares de cada modelo equivalente são numericamente ajustados pelo método de Levenberg-Marquardt [14,15], de modo a se obter um erro mínimo entre a função de transferência equivalente (FTE) e a função de transferência agregada (FTA), que representa a soma das funções de transferência das unidades individuais. O erro que se objetiva minimizar é a soma dos quadrados da magnitude dessa diferença, para frequências discretas na faixa de 0,01 a 10 Hz [13], conforme a equação (2.1).

$$R = \sum_i \frac{|G(j\omega_i) - G^{eq}(j\omega_i)|^2}{|G(j\omega_i)|^2} \quad (2.1)$$

sendo,

R : Função erro.

$G(j\omega_i)$: Função de transferência agregada.

$G^{eq}(j\omega_i)$: Função de transferência equivalente.

O sistema elétrico original pode incluir uma variedade de modelos de turbinas e reguladores de velocidade, máquinas síncronas, sistemas de excitação [18] e estabilizadores de sistemas de potência [19,20]. O método permite obter um

modelo equivalente para cada componente com características compatíveis com os programas de estabilidade convencionais.

O diagrama de blocos da figura 2.1 representa as relações funcionais entre a potência mecânica (P_m) e a potência elétrica (P_e) como variáveis de saída, e a velocidade (ω) e a tensão terminal (V_T) como variáveis de entrada.

Um diagrama de blocos similar é usado para o modelo da unidade geradora equivalente, com as potências elétrica e mecânica individuais substituídas pelas potências elétrica e mecânica totais de cada grupo coerente [13].

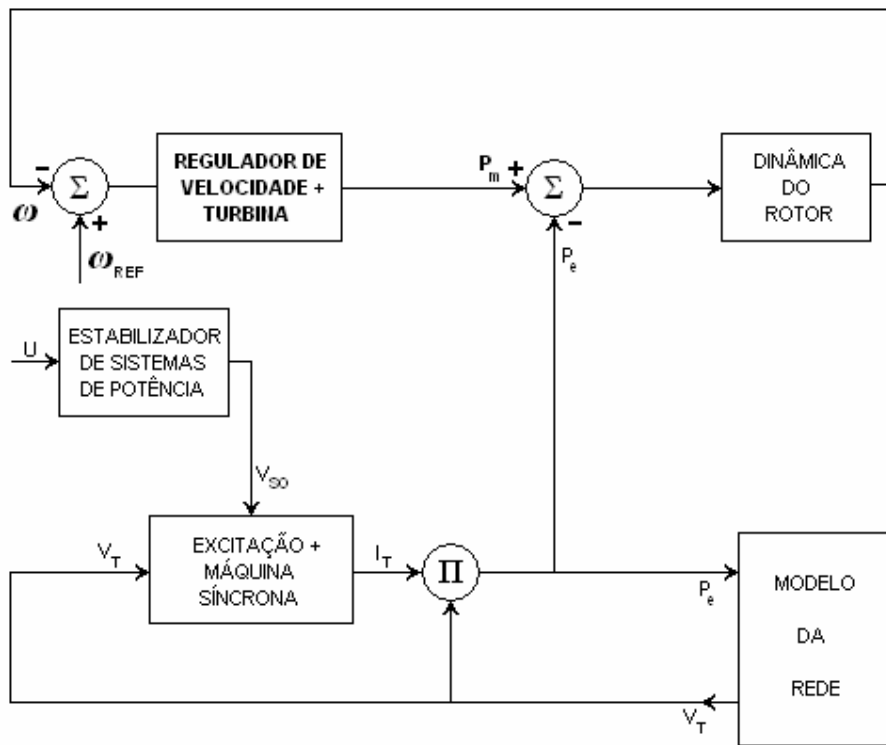


Figura 2.1- Modelo de Unidade Geradora.

Por definição, todas as máquinas do grupo coerente têm a mesma velocidade ω , portanto, as equações mecânicas de cada máquina do grupo coerente são somadas para se obter a equação mecânica da máquina equivalente.

Para cada grupo coerente, o modelo equivalente de turbina e regulador de velocidade é determinado após a obtenção do modelo equivalente da máquina

síncrona. No entanto, quando um grupo coerente é constituído por unidades térmicas e hidráulicas, deve ser formada uma unidade equivalente para cada tipo.

2.2

Turbinas e reguladores de velocidade [21]

As principais fontes primárias de energia elétrica utilizadas são a energia cinética da água e a energia térmica derivada de combustível fóssil e fissão nuclear. O motor primário transforma essas fontes de energia em energia mecânica que logo é convertida em energia elétrica pela máquina síncrona.

O regulador de velocidade realiza a função principal de atuar no sentido de elevar ou reduzir a potência da unidade, quando a velocidade (ou frequência) se afasta do valor de referência. Esta regulação automática exercida pelos reguladores de velocidade das máquinas do sistema é denominada *Regulação Primária*.

2.2.1

Turbinas hidráulicas e sistemas de regulação

As turbinas hidráulicas são basicamente de dois tipos: turbinas de impulsão e turbinas de reação. As turbinas de impulsão (também conhecidas como Pelton) são usadas para alturas maiores que 300 m. Para alturas inferiores a 360 m são utilizadas as turbinas de reação (Francis).

O desempenho de uma turbina hidráulica é influenciado pelas características da coluna de água que alimenta a turbina, incluindo os efeitos da inércia da água, a compressibilidade da água e a elasticidade da parede do tubo no conduto forçado.

2.2.1.1

Função de transferência da turbina hidráulica

A representação da turbina hidráulica e coluna de água nos estudos de estabilidade é usualmente baseada nas seguintes hipóteses:

- A resistência hidráulica é desprezível.
- A tubulação do conduto forçado é inelástica e a água é incompressível.
- A velocidade da água varia diretamente com a abertura do distribuidor e com a raiz quadrada da altura da queda.
- A potência de saída da turbina é proporcional ao produto da altura da queda e o volume do fluxo.

As características da turbina e do conduto forçado são determinadas por três equações básicas relacionadas a:

- (a) Velocidade da água no conduto forçado.
- (b) Potência mecânica da turbina.
- (c) Aceleração da coluna de água.

A equação (2.2) representa a função de transferência “clássica” de uma turbina ideal (sem perdas):

$$\frac{\overline{\Delta P_m}(s)}{\overline{\Delta G}(s)} = \frac{1 - sT_w}{1 + s\frac{T_w}{2}} \quad (2.2)$$

onde,

P_m : Potência mecânica da turbina.

G : Posição do distribuidor.

T_w : Tempo de partida da água.

“—”: Indica valores normalizados baseados nos valores de operação em regime permanente.

2.2.1.2

Regulador para turbinas hidráulicas

A função básica de um regulador é controlar a velocidade. Esta função primária é exercida através da realimentação do desvio da velocidade para controlar a posição do distribuidor. Para garantir a operação satisfatória e estável de várias unidades geradoras interconectadas, o regulador de velocidade possui uma característica de estatismo, cuja finalidade é a distribuição equitativa da carga entre as unidades geradoras. Tipicamente, o estatismo permanente é estabelecido em cerca de 5%, tal que o desvio de velocidade de 5% causa 100% da variação na posição do distribuidor ou saída de potência; isto corresponde a um ganho de 20. Para uma turbina hidráulica, um regulador com uma simples característica de estatismo permanente seria insatisfatório.

As turbinas hidráulicas têm uma resposta peculiar devida à inércia da água: a queda de pressão resultante da abertura do distribuidor provoca uma variação negativa de potência da turbina. Para controle estável, um estatismo transitório é necessário. Isto é conseguido através da redução do ganho transitório, como mostrado na figura 2.2. O resultado é um regulador que exhibe um alto estatismo (baixo ganho) para desvios rápidos de velocidade, e o normal baixo estatismo (alto ganho) em regime permanente.

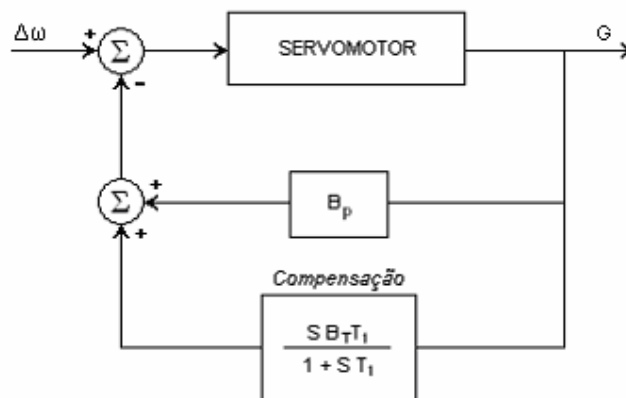


Figura 2.2 – Regulador com compensação de estatismo transitório.

onde,

B_P : Estatismo permanente.

B_T : Estatismo transitório.

T_1 : Tempo de recomposição.

2.2.2

Turbinas a vapor e sistemas de regulação

Uma turbina a vapor converte a energia armazenada no vapor em alta pressão e alta temperatura em energia de rotação, que é transformada em energia elétrica pelo gerador. A fonte de calor para a caldeira suprir o vapor pode ser um reator nuclear ou uma fornalha que utiliza combustível fóssil (carvão, óleo diesel ou gás).

Consistem normalmente de duas ou mais seções de turbinas acopladas em serie e podem ser *tandem-compound* ou *cross-coumpound*. No primeiro caso, as seções da turbina estão todas em um eixo com um único gerador, e o segundo caso consiste em dois eixos, cada um conectado a um gerador.

Dependendo da configuração da turbina, as unidades a combustível fóssil consistem de seções de alta pressão (HP), pressão intermediaria (IP) e baixa pressão (LP), e podem ser de dois tipos: *reheat* e *non-reheat*. No primeiro tipo, o vapor após deixar a seção HP retorna para a caldeira, onde ele passa através de um reaquecedor (RH) antes de retornar para a seção IP. Algumas unidades não têm a seção IP nem o reaquecedor e, nesse caso, o vapor passa diretamente para a seção LP.

2.2.2.1

Modelagem de turbinas a vapor

A configuração básica que identifica os elementos que precisam ser representados na modelagem da turbina a vapor é mostrada na figura 2.3.

O vapor entra na seção HP através da válvula de controle e a tubulação de admissão. A câmara de vapor contem as válvulas de controle. Uma quantidade

substancial do vapor é armazenada na câmara e na tubulação de admissão da seção HP. O vapor que deixa a seção HP passa através do reaquecedor. O fluxo de vapor reaquecido entra na seção IP da turbina através da válvula de interceptação do reaquecedor (IV) e da tubulação de admissão. O vapor deixa a seção IP e entra na seção LP através da tubulação de cruzamento.

A resposta do fluxo de vapor a uma variação na abertura da válvula de controle é representada pela constante de tempo T_{CH} , que considera o tempo de carregamento da câmara de vapor e a tubulação de admissão da seção HP.

O fluxo de vapor nas seções IP e LP podem variar somente com o crescimento da pressão no volume do reaquecedor. A constante de tempo T_{RH} é associada com a quantidade substancial de vapor que conserva o reaquecedor. O fluxo do vapor que entra na seção LP tem uma constante de tempo adicional T_{CO} , associada com a tubulação de cruzamento.

A figura 2.4 mostra a representação do diagrama de blocos de uma turbina com reaquecimento *tandem-compound*. O modelo considera os efeitos da câmara de vapor e o reaquecedor. A soma das frações de potência das várias seções de turbina ($F_{HP}+F_{IP}+F_{LP}$) é igual a 1,0.

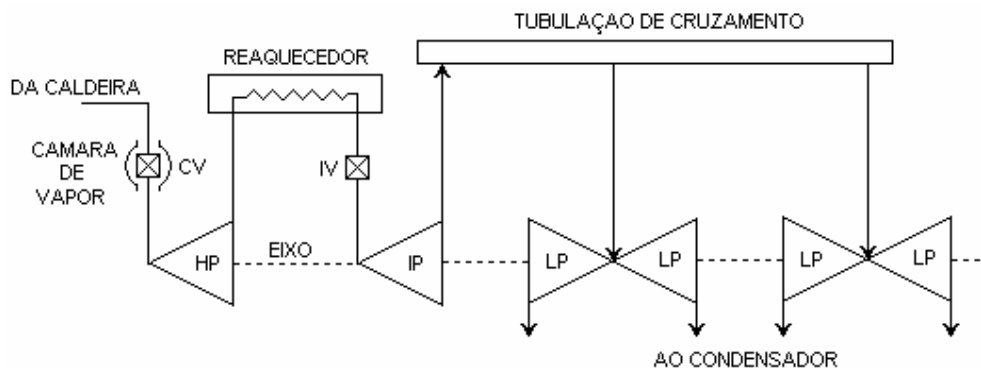


Figura 2.3 – Configuração da turbina a vapor.

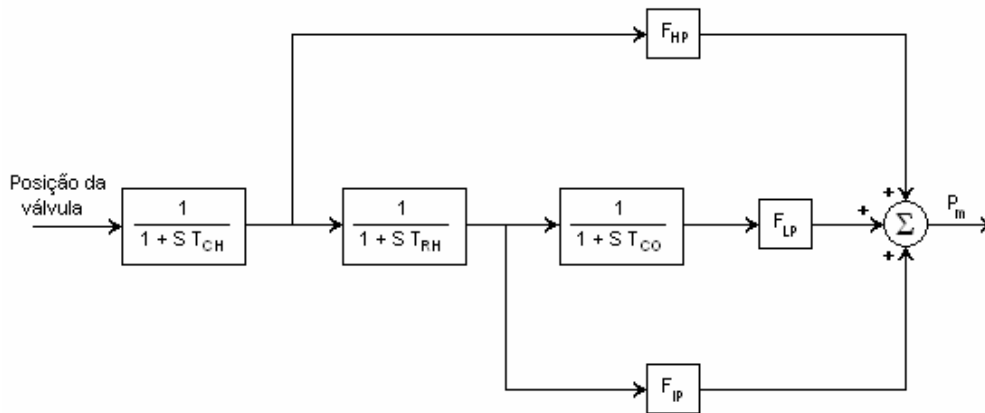


Figura 2.4 – Modelo linear de uma turbina a vapor com reaquecimento.

A partir do modelo da figura 2.4, pode se obter funções de transferência simplificadas da turbina a vapor.

2.2.2.2

Controle de turbinas a vapor

Os sistemas de regulação para turbinas a vapor têm três funções básicas: o normal controle de velocidade/carga, controle de velocidade excessiva e o controle de emergência.

A função de controle de velocidade/carga é similar à das turbinas hidráulicas. O regulador possui um estatismo de velocidade entre 4 e 5 %. Isto permite que a unidade geradora opere satisfatoriamente em paralelo com outras unidades com uma divisão apropriada da carga.

O controle de velocidade excessiva é uma característica inerente das turbinas térmicas e tem uma importância crítica para sua operação. É realizada através das válvulas do sistema.

O controle de emergência é uma proteção de reserva que atua no caso em que os controles anteriores não atuam.

Para estudos envolvendo desvios pequenos de velocidade (frequência), é preciso considerar apenas a regulação normal de velocidade/carga ou regulação primária de velocidade. Tais estudos incluem estudos de estabilidade transitória e

estabilidade a pequenos sinais. Assim, os elementos básicos do sistema de regulação são o regulador de velocidade, a válvula piloto, o relé de velocidade, e o servomotor.

2.3

Aplicação do método de agregação dinâmica a turbinas e reguladores de velocidade [13]

Assumindo uma variação de velocidade de pequena amplitude, e desprezando os limites não-lineares, a função de transferência do modelo turbina-regulador de velocidade de uma unidade geradora qualquer é dada pela seguinte equação.

$$G_i(s) = \frac{P_{mi}(s)}{\Delta\omega(s)} \quad (2.3)$$

Desde que o desvio de velocidade da entrada ($\Delta\omega = \omega_{REF} - \omega$) é o mesmo para cada unidade geradora do grupo coerente, a variação da potência mecânica do grupo é:

$$P_m(s) = \sum_i P_{mi}(s) = \left(\sum_i G_i(s) \right) \Delta\omega(s) \quad (2.4)$$

A função de transferência $G_i(s)$ da equação (2.4) é formada por dois elementos em serie: o regulador de velocidade e a turbina.

Para realizar a agregação de turbinas e reguladores de velocidade de unidades geradoras de um grupo coerente, primeiramente calcula-se o valor da função de transferência de cada modelo de turbina e regulador de velocidade do grupo coerente para várias frequências discretas entre 0,01 Hz e 10 Hz. O somatório dos resultados anteriormente obtidos é denominado função de transferência agregada (FTA), e é representada pela equação (2.5).

$$FTA = \sum_i G_i(s) = \sum_i G_{Gi}(s)G_{Ti}(s) \quad (2.5)$$

onde,

G_{Gi} : Função de transferência do regulador de velocidade.

G_{Ti} : Função de transferência da turbina.

A seguir, é feito o processo de ajuste dos parâmetros lineares do modelo equivalente de turbina e regulador de velocidade pelo método de Levenberg-Marquardt [14,15], de modo a minimizar o erro entre as respostas em frequência da função de transferência agregada e a função de transferência equivalente.

A figura 2.5 apresenta o diagrama de blocos do regulador de velocidade e turbina equivalentes.

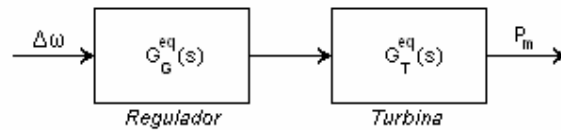


Figura 2.5 - Diagrama de blocos do regulador de velocidade e turbina equivalentes.

A função de transferência que representa o modelo equivalente é dada pela equação (2.6).

$$FTE = G^{eq}(s) = G_G^{eq}(s)G_T^{eq}(s) \quad (2.6)$$

O modelo equivalente do conjunto turbina-regulador de velocidade deve apresentar uma resposta em frequência similar à do grupo coerente que irá substituir.

2.4

Implementação de modelos lineares de turbinas e reguladores de velocidade

Nesta dissertação são considerados os modelos lineares 02, 03 e 05 do banco de dados de estabilidade do sistema elétrico brasileiro (modelos do ANATEM [17]) na solução do problema da agregação dinâmica de turbinas e reguladores de velocidade.

A seguir são apresentadas as funções de transferência de cada um dos modelos implementados.

2.4.1

Modelo 02

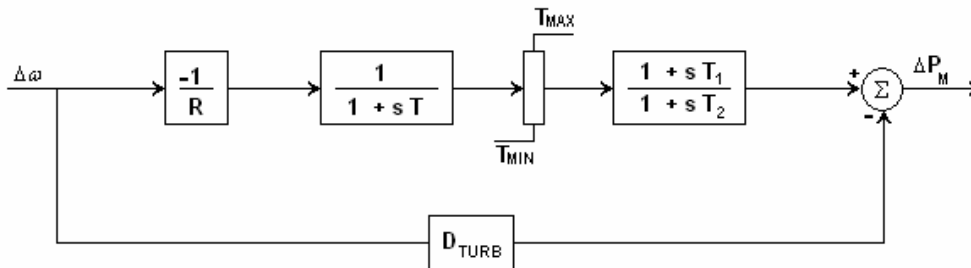


Figura 2.6 -Diagrama de blocos do modelo 02 do conjunto turbina-regulador de velocidade.

A figura 2.6 mostra o diagrama de blocos do modelo 02 do ANATEM [17], correspondente a um regulador de velocidade e uma turbina térmica representada por uma função de transferência simplificada. Desprezando os limites superior e inferior do regulador de velocidade, e considerando $s = j\omega$, a função de transferência linear $G(j\omega)$ deste modelo é:

$$G(j\omega) = \frac{A(\omega) + jB(\omega)}{C(\omega)} - D_{\text{TURB}}$$

onde:

$$\text{Re}[G(j\omega)] = \frac{A(\omega)}{C(\omega)} - D_{\text{TURB}}, e$$

$$\text{Im}[G(j\omega)] = \frac{B(\omega)}{C(\omega)}$$

Sendo:

$$A(\omega) = R[TT_2 - TT_1 - T_1T_2]\omega^2 - R$$

$$B(\omega) = RTT_1T_2\omega^3 + R(T - T_1 + T_2)\omega$$

$$C(\omega) = (RTT_2)^2\omega^4 + R^2(T^2 + T_2^2)\omega^2 + R^2$$

2.4.2

Modelo 03

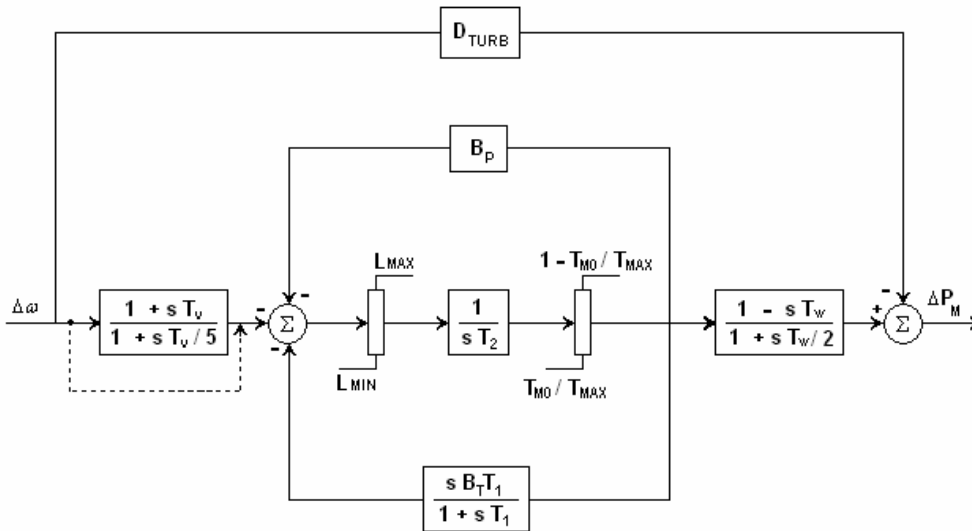


Figura 2.7 -Diagrama de blocos do modelo 03 do conjunto turbina-regulador de velocidade.

A figura 2.7 apresenta o diagrama de blocos do modelo 03 do ANATEM [17], correspondente a uma turbina hidráulica representada pela função de transferência clássica, associada a um regulador de velocidade e a um compensador em avanço na entrada. É possível reduzir este modelo a um modelo simplificado desconsiderando o primeiro bloco do diagrama da figura 2.7. Para isso, atribuímos o valor zero à constante de tempo T_v . O novo modelo é chamado de modelo 03a no presente trabalho.

Desprezando os limites e considerando $s = j\omega$, a função de transferência linear $G(s)$ deste modelo é dada por:

$$G(j\omega) = \frac{A(\omega) + jB(\omega)}{C(\omega)} - D_{TURB}$$

onde:

$$\operatorname{Re}[G(j\omega)] = \frac{A(\omega)}{C(\omega)} - D_{\text{TURB}}, e$$

$$\operatorname{Im}[G(j\omega)] = \frac{B(\omega)}{C(\omega)}$$

Sendo:

$$A(\omega) = \omega^6 \left\{ 30T_1^2 T_2 T_V^2 T_W + 40T_1^2 T_2 T_V T_W^2 + 10B_p T_1^2 T_V^2 T_W^2 + 10B_T T_1^2 T_V^2 T_W^2 \right\} -$$

$$\omega^4 \left\{ \begin{array}{l} 20B_p T_1^2 T_V^2 + 120B_p T_1^2 T_V T_W - 50B_p T_1^2 T_W^2 - 10B_p T_V^2 T_W^2 + 20B_T T_1^2 T_V^2 + \\ 120B_T T_1^2 T_V T_W - 30B_T T_1 T_V^2 T_W - 40B_T T_1 T_V T_W^2 - 50B_T T_1^2 T_W^2 + 80T_1^2 T_2 T_V - \\ 150T_1^2 T_2 T_W - 30T_2 T_V^2 T_W - 40T_2 T_V T_W^2 \end{array} \right\} -$$

$$\omega^2 \left\{ \begin{array}{l} 100B_p T_1^2 + 20B_p T_V^2 + 120B_p T_V T_W - 50B_p T_W^2 + 100B_T T_1^2 + 80B_T T_1 T_V - \\ 150B_T T_1 T_W + 80T_2 T_V - 150T_2 T_W \end{array} \right\} -$$

$$100B_p$$

$$B(\omega) = -10T_1^2 T_2 T_V^2 T_W^2 \omega^7 +$$

$$\omega^5 \left\{ \begin{array}{l} 20T_1^2 T_2 T_V^2 + 120T_1^2 T_2 T_V T_W - 50T_1^2 T_2 T_W^2 + 30B_p T_1^2 T_V^2 T_W + \\ 30B_T T_1^2 T_V^2 T_W + 40B_p T_1^2 T_V T_W^2 + 40B_T T_1^2 T_V T_W^2 - 10B_T T_1 T_V^2 T_W^2 - \\ 10T_2 T_V^2 T_W^2 \end{array} \right\} -$$

$$\omega^3 \left\{ \begin{array}{l} -100T_1^2 T_2 + 80B_p T_1^2 T_V + 80B_T T_1^2 T_V - 150B_p T_1^2 T_W - 150B_T T_1^2 T_W - \\ 20B_T T_1 T_V^2 + 50B_T T_1 T_W^2 - 120B_T T_1 T_V T_W - 20T_2 T_V^2 - 120T_2 T_V T_W - \\ 30B_p T_V^2 T_W - 40B_p T_V T_W^2 + 50T_2 T_W^2 \end{array} \right\} +$$

$$\omega \{ 100B_T T_1 + 100T_2 - 80B_p T_V + 150B_p T_W \}$$

$$C(\omega) = (T_1 T_2 T_V T_W)^2 \omega^8 +$$

$$\omega^6 \left\{ 4T_1^2 T_2^2 T_V^2 + 25T_1^2 T_2^2 T_W^2 + B_p^2 T_1^2 T_V^2 T_W^2 + 2B_p B_T T_1^2 T_V^2 T_W^2 + B_T^2 T_1^2 T_V^2 T_W^2 + \right. \\ \left. 2B_T T_1 T_2 T_V^2 T_W^2 + T_2^2 T_V^2 T_W^2 \right\} +$$

$$\omega^4 \left\{ 100T_1^2 T_2 + 4B_p^2 T_1^2 T_V^2 + 8B_p B_T T_1^2 T_V^2 + 4B_T^2 T_1^2 T_V^2 + 25B_p^2 T_1^2 T_W^2 + \right. \\ \left. 50B_p B_T T_1^2 T_W^2 + 25B_T^2 T_1^2 T_W^2 + 8B_T T_1 T_2 T_V^2 + 50B_T T_1 T_2 T_W^2 + 4T_2^2 T_V^2 + \right. \\ \left. 25T_2^2 T_W^2 + B_p^2 T_V^2 T_W^2 \right\} +$$

$$\omega^2 \left\{ 100B_p^2 T_1^2 + 200B_p B_T T_1^2 + 100B_T^2 T_1^2 + 200B_T T_1 T_2 + 100T_2^2 + 4B_p^2 T_V^2 + \right. \\ \left. 25B_p^2 T_W^2 \right\} +$$

$$100B_p^2$$

2.4.3

Modelo 05

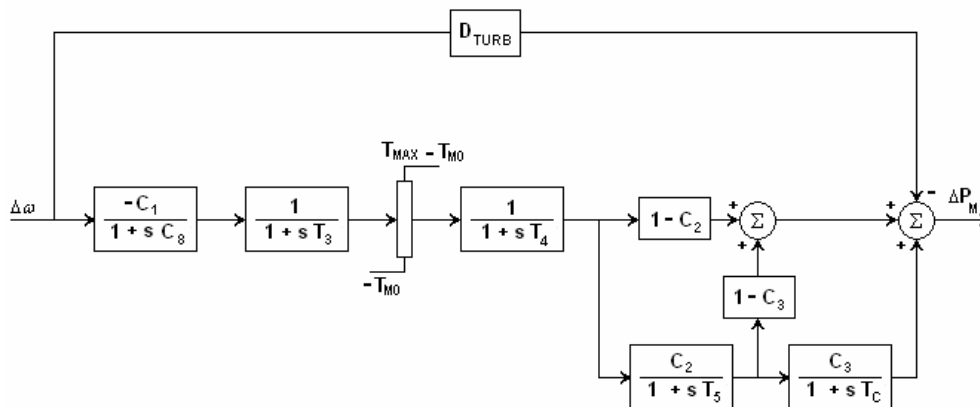


Figura 2.8 -Diagrama de blocos do modelo 05 do conjunto turbina-regulador de velocidade.

A figura 2.8 apresenta o diagrama de blocos do modelo 05 do ANATEM [17], correspondente a um regulador de velocidade associado ao modelo completo

de uma turbina térmica. Desprezando os limites do torque mecânico, e considerando $s = j\omega$, a função de transferência linear $G(s)$ deste modelo é dada por:

$$G(j\omega) = \frac{A(\omega) + jB(\omega)}{C(\omega)} - D_{\text{TURB}}$$

onde:

$$\text{Re}[G(j\omega)] = \frac{A(\omega)}{C(\omega)} - D_{\text{TURB}}, e$$

$$\text{Im}[G(j\omega)] = \frac{B(\omega)}{C(\omega)}$$

Sendo:

$$A(\omega) = \omega^6 C_1 \left\{ T_C^2 T_3 T_4 T_5^2 - C_2 T_C^2 T_3 T_4 T_5^2 - C_2 C_8 T_C^2 T_3 T_4 T_5 - C_2 C_8 T_C^2 T_3 T_5^2 + \right. \\ \left. C_8 T_C^2 T_3 T_5^2 + C_2 C_3 C_8 T_C^2 T_3 T_4 T_5 + C_8 T_C^2 T_4 T_5^2 - C_2 C_8 T_C^2 T_4 T_5^2 \right\} - \\ \omega^4 C_1 \left\{ \begin{array}{l} C_2 C_3 C_8 T_C^2 T_3 - C_8 T_C^2 T_3 + C_2 C_3 T_C^2 T_3 T_4 - T_C^2 T_3 T_4 + C_2 C_3 T_C^2 T_3 T_5 - \\ C_2 T_C^2 T_3 T_5 + C_2 C_3 C_8 T_C^2 T_4 - C_8 T_C^2 T_4 + C_2 C_3 T_C^2 T_4 T_5 - C_2 T_C^2 T_4 T_5 + T_C^2 T_5^2 - \\ C_2 T_C^2 T_5^2 - C_2 C_8 T_C^2 T_5 + C_2 C_3 C_8 T_C^2 T_5 + C_2 C_3 C_8 T_C T_3 T_4 + C_2 C_3 T_C T_3 T_4 T_5 + \\ C_2 C_3 C_8 T_C T_3 T_5 + C_2 C_3 C_8 T_C T_4 T_5 + C_2 T_3 T_4 T_5^2 - T_3 T_4 T_5^2 + C_2 C_8 T_3 T_4 T_5 + \\ C_2 C_8 T_3 T_5^2 - C_8 T_3 T_5^2 + C_2 C_8 T_4 T_5^2 - C_8 T_4 T_5^2 \end{array} \right\} + \\ \omega^2 C_1 \left\{ \begin{array}{l} C_2 C_3 T_C^2 - T_C^2 + C_2 C_3 C_8 T_C + C_2 C_3 T_C T_3 + C_2 C_3 T_C T_5 + C_2 C_3 T_C T_4 + C_8 T_3 + \\ T_3 T_4 + C_2 T_3 T_5 + C_8 T_4 + C_2 T_4 T_5 + C_2 T_5^2 - T_5^2 + C_2 C_8 T_5 \end{array} \right\} - \\ C_1$$

$$\begin{aligned}
B(\omega) = & -\omega^7 C_1 \{C_8 T_C^2 T_3 T_4 T_5^2 - C_2 C_8 T_C^2 T_3 T_4 T_5^2\} + \\
& \omega^5 C_1 \left\{ \begin{aligned} & C_2 C_3 C_8 T_C^2 T_3 T_4 - C_8 T_C^2 T_3 T_4 + C_2 C_3 T_C^2 T_3 T_4 T_5 - C_2 T_C^2 T_3 T_4 T_5 + T_C^2 T_3 T_5^2 - \\ & C_2 T_C^2 T_3 T_5^2 + C_2 C_3 C_8 T_C^2 T_3 T_5 - C_2 C_8 T_C^2 T_3 T_5 + T_C^2 T_4 T_5^2 + C_2 C_3 C_8 T_C^2 T_4 T_5 - \\ & C_2 C_8 T_C^2 T_4 T_5 - C_2 T_C^2 T_4 T_5^2 + C_8 T_C^2 T_5^2 - C_2 C_8 T_C^2 T_5^2 + C_2 C_3 C_8 T_C T_3 T_4 T_5 + \\ & C_2 C_8 T_3 T_4 T_5^2 - C_8 T_3 T_4 T_5^2 \end{aligned} \right\} - \\
& \omega^3 C_1 \left\{ \begin{aligned} & C_2 C_3 C_8 T_C^2 - C_8 T_C^2 + C_2 C_3 T_C^2 T_3 - T_C^2 T_3 + C_2 C_3 T_C^2 T_4 - T_C^2 T_4 + C_2 C_3 T_C^2 T_5 - \\ & C_2 T_C^2 T_5 + C_2 C_3 C_8 T_C T_3 + C_2 C_3 T_C T_3 T_4 + C_2 C_3 T_C T_3 T_5 + C_2 C_3 C_8 T_C T_4 + \\ & C_2 C_3 T_C T_4 T_5 + C_2 C_3 C_8 T_C T_5 + C_8 T_3 T_4 + C_2 T_3 T_4 T_5 + C_2 T_3 T_5^2 - T_3 T_5^2 + \\ & C_2 C_8 T_3 T_5 + C_2 T_4 T_5^2 - T_4 T_5^2 + C_2 C_8 T_4 T_5 + C_2 C_8 T_5^2 - C_8 T_5^2 \end{aligned} \right\} + \\
& \omega C_1 \{C_2 C_3 T_C + T_3 + T_4 + C_2 T_5 + C_8\}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C(\omega) = & \omega^{10} (C_8 T_C T_3 T_4 T_5)^2 + \\
& \omega^8 \{T_C^2 T_3^2 T_4^2 T_5^2 + C_8^2 T_C^2 T_3^2 T_4^2 + C_8^2 T_C^2 T_3^2 T_5^2 + C_8^2 T_C^2 T_4^2 T_5^2 + C_8^2 T_3^2 T_4^2 T_5^2\} + \\
& \omega^6 \left\{ \begin{aligned} & C_8^2 T_C^2 T_3^2 + C_8^2 T_C^2 T_4^2 + C_8^2 T_C^2 T_5^2 + C_8^2 T_3^2 T_4^2 + C_8^2 T_3^2 T_5^2 + C_8^2 T_4^2 T_5^2 + \\ & T_C^2 T_3^2 T_4^2 + T_C^2 T_3^2 T_5^2 + T_C^2 T_4^2 T_5^2 + T_3^2 T_4^2 T_5^2 \end{aligned} \right\} + \\
& \omega^4 \left\{ \begin{aligned} & C_8^2 T_C^2 + C_8^2 T_3^2 + C_8^2 T_4^2 + C_8^2 T_5^2 + T_C^2 T_3^2 + T_C^2 T_4^2 + T_C^2 T_5^2 + T_3^2 T_4^2 + \\ & T_3^2 T_5^2 + T_4^2 T_5^2 \end{aligned} \right\} + \\
& \omega^2 \{C_8^2 + T_C^2 + T_3^2 + T_4^2 + T_5^2\} + 1
\end{aligned}$$