



GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT

MÉTODO PARA A SINTONIA DE REGULADORES DE VELOCIDADE DE CENTRAIS HIDRELÉTRICAS COM TURBINAS TIPO FRANCIS

THIAGO LOPES DA SILVA BARROS(1); MARCOS VINÍCIUS PIMENTEL TEIXEIRA(1); RAFAEL BERTOLINI DE PAIVA(2)
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA(1); OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO ONS(2)

RESUMO

Este trabalho apresenta um método de ajuste do estatismo transitório de geradores hidrelétricos com turbinas do tipo Francis, que considera as principais não linearidades do processo controlado. Para verificar a eficácia do método, os ajustes obtidos são comparados com os ajustes propostos por Hovey por meio da simulação de transitórios eletromecânicos.

PALAVRAS-CHAVE

Estatismo Transitório, Regulador de Velocidade, Turbina Francis, Transitórios Eletromecânicos

1.0 INTRODUÇÃO

Este trabalho introduzirá um método para a sintonia do estatismo transitório de unidades hidrelétricas com turbinas do tipo Francis considerando as principais não linearidades oriundas do processo controlado, que são: taxa de abertura e fechamento do distribuidor; curva abertura x vazão; além do efeito da variação de pressão no conduto forçado em função do ponto de operação.

A análise teve enfoque nas turbinas tipo Francis por serem as turbinas mais utilizadas nas usinas hidrelétricas do Brasil. Usinas hidrelétricas, que possuem turbina Francis em suas unidades geradoras, são predominantes na base de dados de transitórios eletromecânicos do Sistema Interligado Nacional – SIN e representam em torno de 60% das usinas hidrelétricas modeladas nesta base de dados.

2.0 FÓRMULAS DE HOVEY

Em um artigo clássico sobre a regulação primária, Hovey (1) mostrou que um ajuste otimizado do regulador mecânico de uma unidade geradora hidrelétrica para uma condição isolada também proporcionava um bom desempenho na condição interligada.

Em seu trabalho, Hovey (1) apresentou fórmulas práticas retiradas de simulação e validadas em campo. Estas eram fundamentadas nos principais parâmetros do processo controlado, que são:

- T_w – Constante de tempo da água; e
- H – Constante de inércia H .

As equações obtidas por Hovey para um controlador PID são:

$$K_p = \frac{2H}{1.5T_w} \quad (1)$$

$$T_i = 3T_w \quad (2)$$

$$T_1 = \frac{T_w}{2} \text{ e } T_2 = \frac{T_1}{10} \quad (3)$$

Onde K_p é o ganho proporcional; T_i é a constante de tempo de integrador; e T_1 e T_2 são as constantes de tempo do controlador em avanço. Esses ajustes definem o estatismo transitório da unidade hidráulica.

Ainda em seu trabalho, Hovey (1) reconheceu que a precisão das fórmulas (1), (2) e (3) eram afetadas por fatores não lineares intrínsecos do processo. As fórmulas de Hovey (1) foram utilizadas para aferir os resultados de desempenho dinâmico em operação isolada em contrafação ao método proposto neste trabalho.

3.0 MODELOS MATEMÁTICOS

As principais não linearidades, intrínsecas do processo controlado pelo regulador de velocidade, foram modeladas conforme apresentado a seguir.

3.1 Modelo do Distribuidor

O modelo equivalente apresentado na FIGURA 1 representa a função de transferência em malha fechada do distribuidor e do seu controle de posição. Os parâmetros do modelo são definidos como:

- K_p – Ganho do controle para ajuste de tempo de resposta;
- T_{vp1} e T_{vp2} – Constantes de tempo da válvula proporcional e distribuidora, respectivamente;
- T_{axA} e T_{axF} – Taxas máximas mecânicas de abertura e fechamento do distribuidor, respectivamente; e
- K_h – Ganho hidráulico.

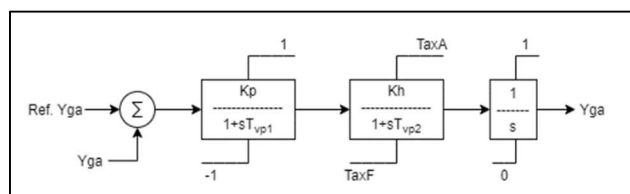


FIGURA 1 - Modelo equivalente do distribuidor.

A função de transferência da Figura 2 apresenta a estrutura conforme Equações (4) e (5).

$$D(s) = \frac{GD}{(s + p1)(s + p2)(s + p3)} \quad (4)$$

$$GD = Kp \times Kh \div Tvp^2 \quad (5)$$

A equação $GD = Kp \times Kh \div Tvp^2$ (5) considera $T_{vp1} = T_{vp2} = T_{vp}$.

3.2 Modelo da Turbina e Conduto

O modelo apresentado na FIGURA 2 é um modelo clássico, padronizado na literatura (HYGOV4).

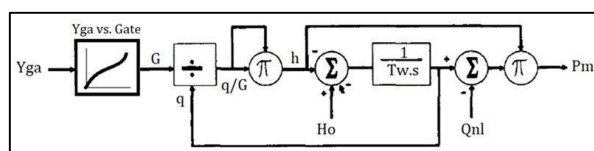


FIGURA 2 - Modelo da turbina e conduto.

Os principais dados são as perdas em vazio para a queda nominal (Q_{nl}), a queda líquida nominal (H_0), a curva abertura x vazão para a queda nominal (Y_{ga} vs. Gate) e a constante de tempo da água (T_w).

A curva abertura x vazão utilizada nas análises é apresentada na FIGURA 3 e TABELA 1.



FIGURA 3 - Curva abertura x vazão.

A taxa de abertura vs vazão em um ponto da curva da FIGURA 3 é calculado conforme a Equação (6).

$$GT = \frac{dQ(Yga_0)}{dYG} = tg(\delta) \quad (6)$$

Onde Yga_0 é a posição inicial do distribuidor.

TABELA 1 - Coordenadas da curva abertura x vazão.

Abertura do distribuidor (pu)	0	0,147	0,25	0,35	0,45	0,55	0,65	0,75	0,85	0,95	1,00
Vazão (pu)	0,000	0,217	0,356	0,481	0,596	0,701	0,796	0,881	0,956	1,021	1,050

Resalta-se que, para o modelo matemático, as aberturas máxima e mínima do distribuidor são, respectivamente, 1,0 e 0,0.

O modelo linearizado da turbina e do conduto foi obtido com o auxílio da ferramenta de simulação PacDyn do Cepel e possui função de transferência conforme indicada na Equação (7).

$$T(s) = GT(-\beta) \frac{(s - z0)}{(s + p0)} \quad (7)$$

3.3 Modelo do Regulador de Velocidade

O método proposto neste trabalho tem como objetivo determinar os parâmetros do controlador PID apresentado na FIGURA 4.

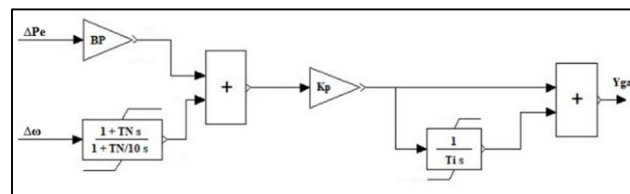


FIGURA 4 - Modelo do regulador de velocidade.

Os parâmetros do controlador PID são os seguintes: ganho proporcional (K_p), constante de tempo do integrador (T_i), e constante de tempo do derivador (T_n). Ressalte-se que, $K_i = 1/T_i$, para o integrador e que $K_d = 1/T_n$ para o derivador e que $T_n/10 = \alpha K_d$, onde α é fixado em 10.

Assim, a função de transferência do regulador de velocidade da FIGURA 4, desconsiderando a banda morta e o estatismo permanente de potência (B_p) é dado pela Equação (8).

$$R(s) = \frac{\alpha K_p (s + K_i)(s + K_d)}{s(s + \alpha K_d)}$$

(8)

3.4 Função de Transferência em Malha Fechada

O diagrama de blocos da FIGURA 5 apresenta o processo de realimentação do desvio de frequência pelo regulador de velocidade e introduz o efeito da inércia e do amortecimento através da função de transferência $M(s)$, que é a equação de *swing* conforme a Equação (9):

$$M(s) = \frac{1}{2H[s + (D/2H)]}$$

(9)

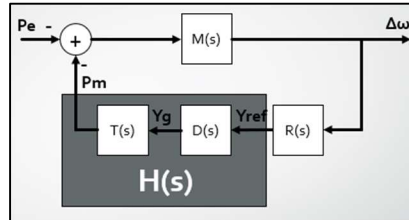


FIGURA 5 - Diagrama de blocos do sistema de regulação de velocidade.

A função de transferência $H(s)$ é definida como sendo a função que relaciona a potência mecânica com o sinal de referência de posição do distribuidor.

Assim, a função de transferência do diagrama da FIGURA 5 pode ser escrita segundo Equação (10):

$$G(s) = \frac{-M(s)}{1 + M(s)H(s)R(s)}$$

(10)

4.0 LINEARIZAÇÃO DE $H(s)$ E ELABORAÇÃO DOS CASOS DE ESTUDO

A avaliação do desempenho da regulação de velocidade ocorreu a partir da simulação de sucessivos degraus de carga no cenário de fluxo de potência modelado com a ferramenta Anarede do Cepel, conforme a FIGURA 6.

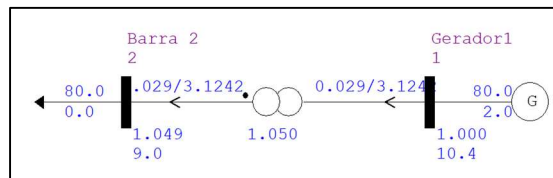


FIGURA 6 - Modelo de fluxo de potência.

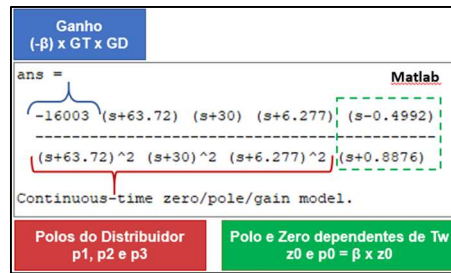
Foram utilizados os seguintes parâmetros para a montagem do caso de fluxo de potência:

- Transformador elevador: bases 100 MVA e 500 kV; $R = 0,029\%$ e $X = 3,1242\%$, tape 1,050.
- Carga: parcela ativa da carga 100% tipo P constante, sem parcela reativa.

Inicialmente, utilizando a ferramenta Anatem do Cepel, foram modeladas as funções de transferência das FIGURA 1 e FIGURA 2, substituindo-se o regulador de velocidade por um bloco tipo ENTRADA no lugar do sinal de referência do distribuidor (ref Yga). O caso Anatem foi carregado no programa PacDyn e a função de transferência, que relaciona a entrada Yref com a saída Pm (potência mecânica), foi linearizada utilizando a funcionalidade "MATLAB State Space Output → SISO Transfer Function".

O processo de linearização de $H(s)$ foi realizado para alguns pontos de operação que variaram de 10% a 90% da capacidade do gerador. O software Matlab da MathWorks foi utilizado para analisar $H(s)$ linearizado, obtido no PacDyn.

A Equação (7), supracitada, foi obtida por observação a partir da estrutura de $H(s)$ linearizado (FIGURA 7), uma vez que $D(s)$ é conhecida.

FIGURA 7 - Estrutura de $H(s)$ linearizado.

A função de transferência $H(s)$ foi analisada para: diferentes carregamentos (Pm_0), diferentes valores de T_w , diferentes valores de Qnl .

Assim, foi possível determinar as equações (11) e (12), que complementam a equação (7):

$$z_0 = \frac{1}{Pm_0 \times T_w} \quad (11)$$

$$p_0 = \frac{\beta}{Pm_0 \times T_w} \quad (12)$$

Onde Pm_0 é a potência mecânica inicial em pu e β é um fator que variou com o ponto de operação e com Qnl . Essas variações ocorreram da seguinte forma:

- β é inversamente proporcional à Qnl ;
- β é diretamente proporcional à Pm_0 ; e
- β assumiu valores no intervalo de 0 a 2, para todas as condições simuladas.

O efeito da fase não mínima é maximizado ou minimizado em função da posição do zero da equação (7). Assim, observou-se que:

(7). Assim, observou-se que:

- Quanto maior o valor de Pm_0 , mais próximos p_0 e z_0 estarão do eixo imaginário;
- Quanto maior for o valor de T_w , mais próximos p_0 e z_0 estarão do eixo imaginário; e
- Quanto maior for Qnl , mais próximo p_0 será do eixo imaginário.

O efeito do carregamento (Pm_0) pode ser observado no diagrama de Bode de $H(j\omega)$ da FIGURA 8.

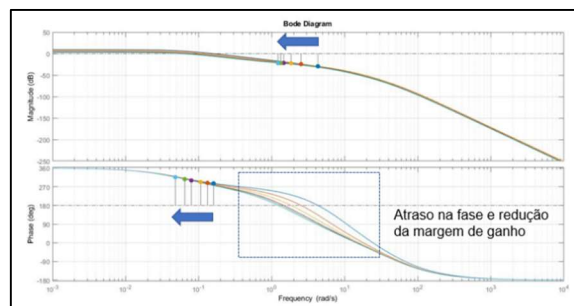


FIGURA 8 - Diagrama de Bode.

A FIGURA 8 apresenta o Diagrama de Bode traçado para Pm_0 variando de 10%, 30%, 50%, 70%, 80% e 90%. Observa-se que, o aumento do carregamento provoca um atraso na fase e, conseqüentemente, a redução da margem de ganho, diminuindo a margem de estabilidade do sistema.

5.0 AJUSTE DO ESTADISTMO TRANSITÓRIO

O ajuste do estatismo transitórios foi obtido a partir do estudo do lugar das raízes de $G(s)$ com $T(s)$ linearizado. Observou-se que o ajuste dos parâmetros do estatismo transitório (K_d , K_i e K_p) devem inserir, através da função de transferência descrita na equação (8), polos e zeros de forma a permitir a configuração de ramos no lugar das raízes de $G(s)$ conforme apresentado na FIGURA 9.

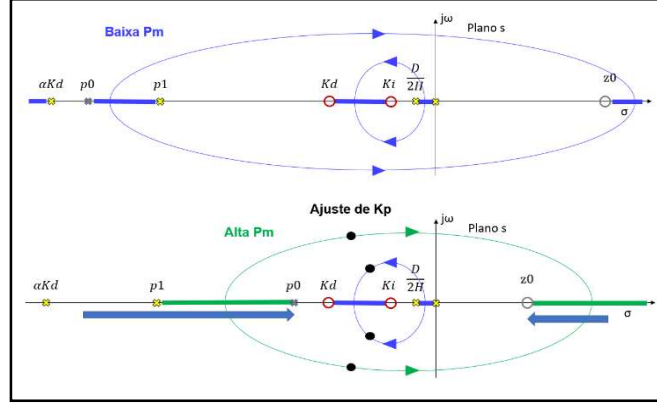


FIGURA 9 - Lugar das raízes de $G(s)$ esperado para baixa e alta potência mecânica (P_m).

Com base na FIGURA 9, para um ajuste robusto empírico, concluiu-se o seguinte:

- K_d deve ser sempre menor em módulo do que p_0 ; e
- p_0 assume o menor valor possível no máximo carregamento, considerando a análise de β .

Dessa forma, chega-se à equação (13).

$$K_d = \frac{1,5}{T_w} \quad (13)$$

pois, $p_{0\max} = \frac{\beta}{T_w} (P_{m\text{nominal}} = 1pu)$.

Destaca-se que, o efeito de Q_{nl} observado em β para um carregamento elevado foi verificado em torno de $\beta = 1,7$.

O parâmetro α foi mantido fixo em 10, conforme proposto por Hovey (1).

K_i precisa ser próximo o suficiente do par de polos $D/2H$ e 0 para atrair o ramo menor (FIGURA 9) para o semi-plano esquerdo e, também, precisa ser distante o suficiente de K_d para que o ramo maior (FIGURA 9) não seja atraído para o eixo real entre os zeros K_i e K_d .

Baseado nas considerações acima, o ajuste proposto para K_i é dado pela equação (14).

$$K_i = \frac{1}{2\alpha} \left(K_d - \frac{D}{H} \right) + \frac{D}{H} \quad (14)$$

K_p é ajustado de forma que os polos dominantes de $G(s)$ estejam posicionados, aproximadamente, conforme indicado na FIGURA 9.

$$K_p = 1,5 T_w$$

(13) e $K_i = 12\alpha K_d - D/H + D/H$

(14). Ajuste de K_p é calculado pela equação (15).

$$K_p = 10^{0,05(MG - 6)} \quad (15)$$

6.0 OPERAÇÃO EM REDE ISOLADA

Os casos a seguir apresentam o desempenho do regulador de velocidade de um gerador hidráulico, parametrizado conforme a TABELA 2, para a resposta ao degrau de 10 MW de carga com carregamentos de 10%, 45% e 80% da capacidade do gerador para o sistema da FIGURA 6.

Foram simulados reguladores de velocidade ajustados conforme o método proposto neste trabalho e conforme as fórmulas propostas por Hovey (1), utilizando o modelo da turbina e conduto da FIGURA 2 com $H_0 = 1$ pu e $Q_{nl} = 0,1$.

A curva abertura x vazão foi modelada conforme a FIGURA 3 e TABELA 1.

TABELA 2 – Parâmetros utilizados do trabalho.

Parâmetros da unidade geradora					Parâmetros do distribuidor				
Xd (%)	X'd (%)	X''d (%)	Xl (%)	Xq (%)	Kp	Kh	TaxA	TaxF	Tvp
106,6	35	29	17	74	60	0,085	0,032258	-0,083	0,02
T'd (s)	T''d (s)	T''q (s)	Ra (%)	H (s)	Parâmetros do regulador de velocidade				
Ajustes	Kp	TN	TN/10	TI					
Proposto	0,9451	1,6666	0,16666	3,7383					
Hovey	1,07	1,25	0,125	7,50					
D (pu/pu)	MVA	Ag	Bg	Tw (s)					
0,5	100	0,023453	7,797057	2,5					

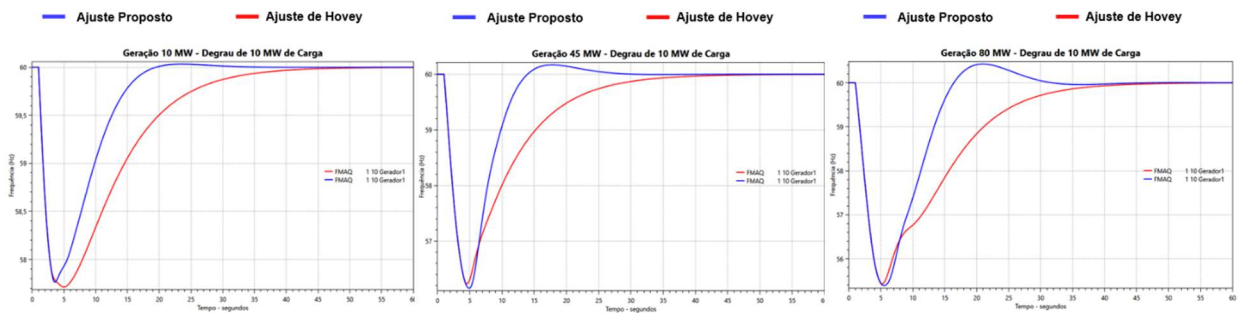


FIGURA 10 - Gráficos de frequência para baixo, médio e alto carregamento.

É possível observar nas curvas da FIGURA 10, que o ajuste proposto nesse trabalho proporcionou uma recuperação mais rápida da frequência quando comparado ao caso dinâmico utilizando os ajustes propostos por Hovey (1).

7.0 INFLUÊNCIA DO DISTRIBUIDOR

Foram avaliadas três diferentes parametrizações de distribuidores para verificar a sua influência, TABELA 3. O regulador de velocidade foi ajustado com o método proposto neste trabalho para os casos de distribuidores com tempos de atuação diferentes.

TABELA 3 – Parâmetros dos distribuidores e respectivo ajuste do regulador de velocidade

Atuadores	Kp	Kh	TaxA	TaxF	Kp	TN	TN/10	TI
10s	40	0,12	0,1	-0,1	0,9430	1,6666	0,16666	3,738318
30s	60	0,04	0,033	-0,033	0,9561	1,6666	0,16666	3,738318
60s	80	0,02	0,017	-0,017	0,9605	1,6666	0,16666	3,738318

A figura abaixo apresenta o desempenho do sistema de regulação de velocidade para um degrau de 10 MW de carga para distribuidores com atuadores de 10 s (D 10s), 30 s (D 30s) e 60 s (D 60s).

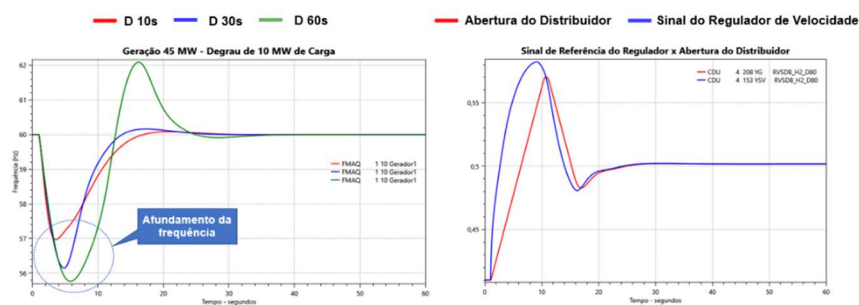


FIGURA 11- Afundamento da frequência e sinal de referência e abertura do distribuidor.

É possível observar na FIGURA 11 que, quanto mais lento for o atuador, maior é a variação de velocidade angular da máquina e mais próximo de eixo imaginário o seu polo dominante p_1 estará (FIGURA 9), o que influencia na estrutura dos ramos do lugar das raízes.

Ressalte-se que, a resposta do sistema de regulação de velocidade sempre estará limitada às taxas de abertura e fechamento do distribuidor, conforme verificado na FIGURA 11.

8.0 OPERAÇÃO EM PARALELO DE GERADORES

Utilizando o método proposto neste trabalho, foram ajustados os reguladores de velocidade de dois geradores (FIGURA 12), para três configurações distintas, cujos parâmetros são semelhantes aos da TABELA 2, porém com as seguintes modificações apresentadas na TABELA 4.

TABELA 4 – Configurações e ajustes da operação em paralelo.

Gerador	Configuração 1	Configuração 2	Configuração 3	T_w (s)	H (s)
G1	$S_n = 100$ MVA $P_g = 70$ MW	$S_n = 150$ MVA $P_g = 105$ MW	$S_n = 50$ MVA $P_g = 35$ MW	1,0	5,0
G2	$S_n = 100$ MVA $P_g = 70$ MW	$S_n = 50$ MVA $P_g = 35$ MW	$S_n = 150$ MVA $P_g = 105$ MW	2,5	3,0

Foi utilizado estatismo permanente de 5% ($BP = 0,05$).

Foi aplicado degrau de carga de 10 MW. O carregamento de todos os casos simulados foi ajustado em 70% da capacidade de ambos os geradores, somados.

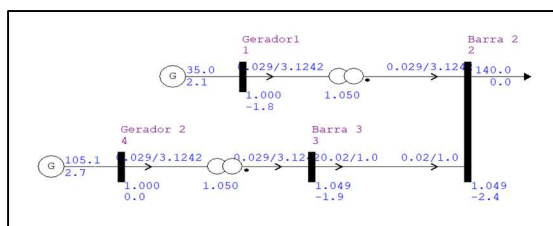


FIGURA 12 - Sistema de dois geradores.

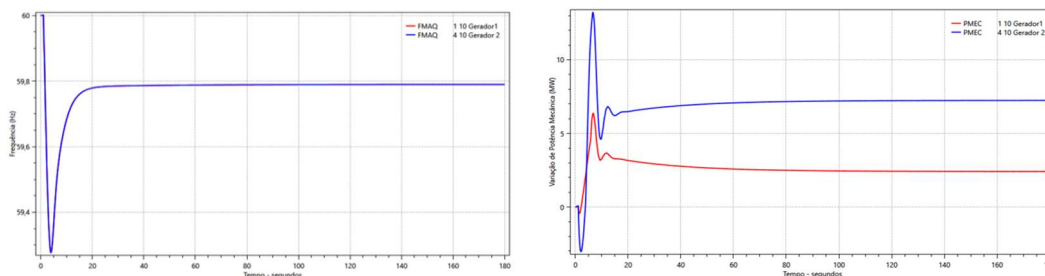


FIGURA 13 - Frequência e Potência Mecânica para configuração 3 da TABELA 4.

Conforme observado por Hovey (1), constatou-se na FIGURA 13 que o ajuste do estatismo transitório da unidade geradora operando de forma isolada, também, apresenta um desempenho adequado operando em paralelo com outras unidades geradoras.

9.0 CONCLUSÃO

Este trabalho introduziu um método de ajuste baseado na observação do efeito da variação da potência mecânica e das não linearidades do processo controlado no lugar das raízes e na resposta em frequência da função de transferência $H(s)$, previamente definida. Adicionalmente, as simulações indicaram que, a aplicação do ajuste proposto proveu à regulação de velocidade uma resposta transitória mais rápida, quando comparada à resposta obtida com os ajustes de Hovey, comprovando, também, a eficácia do ajuste durante a operação em paralelo.

10.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Hovey, L. M., “*Optimum Adjustment of Hydro Governors on Manitoba Hydro System*,” 1962, AIEE pag. 581.
- (2) KUNDUR, P.; *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, 1994.
- (3) Manual Anatem – Versão 12.0 – Eletrobras CEPEL – junho 2021.
- (4) Manual do Usuário – Anarede – Programa de Análise de Redes V11.05.02 – Eletrobras CEPEL – maio 2021.
- (5) Manual do Usuário – PacDyn – Small Signal Stability Anaysis Program – Versão 9.9 – Eletrobras CEPEL.

DADOS BIOGRÁFICOS



(1) THIAGO LOPES DA SILVA BARROS

Graduado em Engenharia Elétrica com Ênfase em Sistemas de Potência pela UERJ, mestrando em Engenharia Elétrica pelo IME. Atualmente, trabalha no Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, como Engenheiro de Estudos Elétricos. Suas áreas de atuação são: Análise de Transitórios Eletromecânicos, Análise da Estabilidade a Pequenos Sinais e Modelagem Matemática de Máquinas Elétricas.

(2) MARCOS VINÍCIUS PIMENTEL TEIXEIRA

Doutor e mestre em engenharia elétrica pela PUC-Rio, graduado em engenharia elétrica pela UFF e técnico em eletrônica pela FAETEC. Professor de magistério superior do departamento de engenharia elétrica do Instituto Militar de Engenharia - IME. Possui experiência como engenheiro de sistemas elétricos de potência do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e realiza pesquisa nas áreas de análise de redes elétricas em regime permanente, dinâmica e serviços auxiliares à operação elétrica.

(3) RAFAEL BERTOLINI DE PAIVA

Graduado em Engenharia Elétrica pela UFSC, pós-graduado em Proteção de Sistemas Elétricos pela UNIFEI e mestre em Engenharia Elétrica pela UNIFEI. Atualmente, trabalha no Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS como Engenheiro de Estudos Elétricos. Suas áreas de atuação são: Análise de Transitórios Eletromecânicos, Análise da Estabilidade a Pequenos Sinais, Modelagem Matemática, Validação e Otimização de Controladores com ênfase nos sistemas de controle de tensão e de velocidade de usinas hidroelétricas, termoeletrônicas e de compensadores síncronos.