DOI: 10.48011/asba.v2i1.1042

# VIABILIDADE DA ESTRUTURA LQR-2DOF NA REGULAÇÃO DE VELOCIDADE DE UMA UNIDADE DE GERAÇÃO HIDRELÉTRICA

Raschid D. Davila Espinoza*, Francisco J. Triveno Vargas†

*Engenharia Elétrica - Eletrônica, Universidade Mayor de San Simón, +591-4-4251515, Cochabamba, Bolívia.

†Universidade de Araraquara, Av. Maria Antônia Camargo Oliveira, 170 +55-16-3301-7400, SP, Brasil

Emails: rdaviladiego421@gmail.com, fjtvargas@uniara.edu.br

**Abstract**— The stability of energy systems is of vital importance; in this sense, new control structures have been studied and implemented to improve the performance of the units that are part of an interconnected system. This work proposes the robust control structure LQR-2DOF as a speed regulator for hydraulic turbines (or frequency controller in generators). To implement this technique, modifications are made to its structure so that it can be used as a regulator, this is because the original structure was proposed for tracking problems. The controller is designed and simulations are done to verify a possible improvement in its response and viability to be used in power systems and when compared to the PID structure.

**Keywords**— Power System Stabilizer, Voltage and Speed Regulators, Generator, Optimization

**Resumo**— A estabilidade dos sistemas de energia é de vital importância; nesse sentido, novas estruturas de controle vem sendo estudadas e implementadas para melhorar o desempenho das unidades que compõem um sistema interligado. Este trabalho propõe a estrutura de controle robusta LQR-2DOF como um regulador de velocidade para turbinas hidráulicas (ou controlador de frequência em geradores). Para implementar essa técnica, são feitas modificações na sua estrutura para que possa ser empregada como regulador, isto porque a estrutura original foi proposta para problemas de rastreio. O controlador é projetado e simulações são executadas para verificar uma possível melhoria na sua resposta e sua viabilidade de uso nos sistemas de energia quando comparado ao controle PID.

**Palavras-chave**— Controlador de dois graus de liberdade, reguladores de tensão e velocidade, geradores, otimização

## 1 Introdução

O constante crescimento da demanda de energia e a entrada de novas tecnologias em projetos de geração, transmissão e distribuição, exigem maior confiabilidade no fornecimento frente a curtos-circuitos ou á entrada e saída de cargas, é necessário ainda acrescentar custos operacionais e o impacto ecológico que apresentam os mesmos (Moura et al., 2019), (Pota, 2018).

Em termos de modelagem e controle de unidades de geração hidrelétrica, existe uma ampla literatura que considera os modelos dinâmicos de toda a cadeia (Dynamic et al., 2013) ou fornece uma revisão detalhada com propósitos de simulação (Koritarov and Guzowski, 2013). Neste contexto, sem duvida, o controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) é a estrutura consagrada para o controle de velocidade de unidades hidrelétricas, isto é constatado na publicação apresentada em 1979 (Hagihara et al., 1979) ou em publicações mais recentes como (Zhang and Zhang, 2006), (M.Sajnekar et al., 2018), (Naghizadeh et al., 2012) devido ao bom desempenho que apresenta em termos do atendimento dos requisitos exigidos em um sistema de geração (Padiyar, 2008).

Paralelamente, o avanço que tem experimentado os processadores permite a proposta de novas e mais complexas estruturas de controle (Guo Lei, 2017), (Ruzhekov et al., 2011), (Hannett et al., 1994) que pelo custo computacional não podiam ser implementadas no passado.

Uma proposta que contribui a melhorar a estabilidade dos sistemas de geração é usar estruturas de controle robustas (Zhou and Doyle, 1999), como a estrutura LQR-2DOF (Wolovich, 1994), que além de fornecer o controle das variáveis de interesse, permite um desempenho robusto rejeitando perturbações e atenuando ruído.

A estrutura LQR-2DOF teve propostas apresentadas para o controle de robôs manipuladores (Vargas and Paglione, 2015), e para o controle de aeronaves executivas (Vargas et al., 2015), estas propostas referem-se ao problema de rastreamento (minimização do erro entre o valor da saída e o valor da entrada de referência variável ver Fig.1). Em contra partida, a característica inerente dos sistemas de geração é que eles são sistemas reguladores, ou seja, existe um valor fixo na entrada de referencia e o controlador minimiza o erro entre a entrada fixa e a saída (ver Fig.2).

Uma vantagem dos controladores PID e de outras propostas (Kundur, 1993) que atuam diretamente no erro é que eles podem funcionar tanto em sistemas regulatórios quanto em sistemas de rastreamento. No entanto, os controladores LQR-2DOF ate aqui mencionados foram propostos para

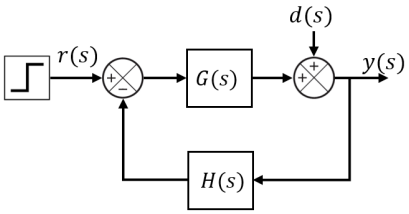


Figura 1: Estrutura de rastreio

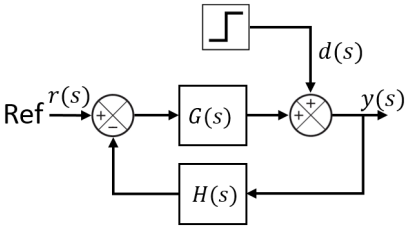


Figura 2: Estrutura de regulação

sistemas de rastreamento.

Este artigo propõe a viabilidade da estrutura LQR-2DOF para o controle de velocidade de uma unidade de geração hidrelétrica acrescentando mudanças na sua estrutura para seu funcionamento como regulador, após a mudança é feita uma comparação com o controlador PID em termos de desempenho e avaliadas suas possíveis vantagens.

## 2 Controle de Velocidade

O diagrama genérico de controle de velocidade em unidades de geração elétrica é ilustrado na Fig.3.

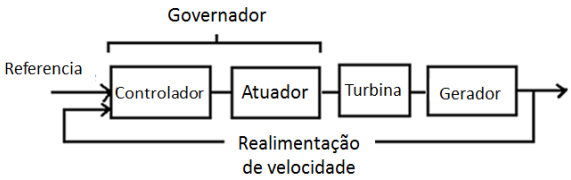


Figura 3: Controle de velocidade

### *2.1 Modelo de turbina ideal*

A Fig. 4 ilustra os parâmetros considerados em uma usina hidrelétrica para a obtenção do modelo da turbina.

A aceleração da coluna d'água devido à mudança de altura na turbina caracterizada pela segunda lei de Newton é dada por:

$$(\rho_0 LA)\,\frac{d\Delta U}{dt} = -A(\rho_0 a_g)\Delta H \tag{1}$$

onde $\rho_0$ é a densidade da massa, $L$ o comprimento do duto, $a_g$ a aceleração da gravidade, $\rho_0 LA$ a massa de água no duto e $(\rho_0 a_g)\Delta H$ a mudança incremental de pressão na porta da turbina.

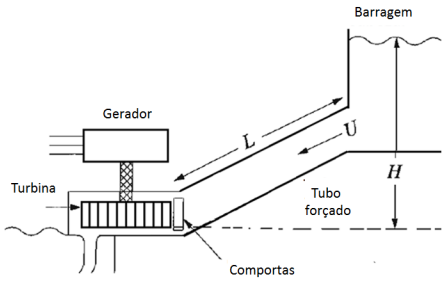


Figura 4: Esquemático de uma central hidrelétrica

Dividindo ambos os lados da equação (1) pelos seus valores iniciais ou condição operacional $(A\rho_0 a_g H_0 U_0)$, temos:

$$\frac{LU_0}{a_g H_0}\frac{d}{dt}\left(\frac{\Delta U}{U_0}\right) = -\frac{\Delta H}{H_0} \tag{2}$$

Por definição:

$$T_w = \frac{LU_0}{a_g H_0} \tag{3}$$

onde $T_w$ é conhecido como a constante de tempo da água. Representa o tempo necessário para acelerar a água no conduíte de $H_0$, do repouso até atingir a velocidade $U_0$. Observe que $T_w$ varia com a carga. Normalmente $T_w$ em carga total é entre 0,5 e 4,0 segundos.

A partir das equação (3), é possível expressar a relação entre a mudança na velocidade e a mudança na posição do portão como:

$$T_w\frac{d\Delta\overline{U}}{dt} = 2\left(\Delta\overline{G} - \Delta\overline{U}\right) \tag{4}$$

Substituindo pelo operador $s$ de Laplace, é obtido:

$$T_w s\Delta\overline{U} = 2\left(\Delta\overline{G} - \Delta\overline{U}\right) \tag{5}$$

$$\Delta\overline{U} = \frac{1}{1+0.5T_w s}\Delta\overline{G} \tag{6}$$

Sabendo que:

$$\Delta\overline{H} = 2\left(\Delta\overline{U} - \Delta\overline{G}\right) \tag{7}$$

$$\Delta\overline{U} = \frac{1}{3}\Delta\overline{P}_m + \frac{2}{3}\Delta\overline{G} \tag{8}$$

e substituindo as equações (7) e (8) na equação (6) é:

$$\frac{\Delta\overline{P}_m}{\Delta\overline{G}} = \frac{1-T_w s}{1+0.5T_w s} \tag{9}$$

que é a equação linear ideal da turbina (Modelo de fase não minima).

### *2.2 Modelo linear não ideal da turbina*

Para o modelo Linear - *Não Ideal* da turbina, a seguinte expressão é usada para valores da velocidade da água (fluxo) e a potência submetidos a

perturbações:

$$\Delta\overline{U} = \frac{\partial U}{\partial H}\Delta\overline{H} + \frac{\partial U}{\partial \omega}\Delta\overline{\omega} + \frac{\partial U}{\partial G}\Delta\overline{G} \quad (10)$$

$$\Delta\overline{P}_m = \frac{\partial U}{\partial H}\Delta\overline{H} + \frac{\partial U}{\partial \omega}\Delta\overline{\omega} + \frac{\partial U}{\partial G}\Delta\overline{G} \quad (11)$$

Os desvios de velocidade são pequenos e desprezíveis em sistemas sincronizados, portanto:

$$\Delta\overline{U} = a_{11}\Delta\overline{H} + a_{13}\Delta\overline{G} \quad (12)$$

$$\Delta\overline{P}_m = a_{21}\Delta\overline{H} + a_{23}\Delta\overline{G} \quad (13)$$

Das equações (2), (10) e (11), é obtida o modelo linear não ideal de uma turbina:

$$\frac{\Delta\overline{P}_m}{\Delta\overline{G}} = a_{23}\frac{1 + (a_{11} - a_{13}a_{21}/a_{23})T_w s}{1 + a_{11}T_w s} \quad (14)$$

O modelo *linear ideal* e o modelo *linear não ideal* da turbina foram extraídos de (Kundur, 1993).

### 2.3 Modelo do atuador

O modelo do atuador eletro-hidráulico corresponde ao modelo apresentado em (Dynamic et al., 2013), este é ilustrado na Fig. 5.

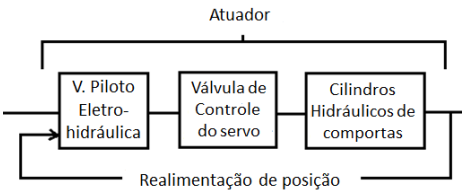


Figura 5: Atuador eletro-hidráulico

Ao modelo da Fig. 5, é acrescentado um interruptor condicional que permite alterar a velocidade de fechamento dos portões para a entrada de água na turbina (isto para evitar golpe de aríete), a velocidade máxima de fechamento dos portões na área próximo ao ponto de fechamento completo (zona de parada ZT) entre 0 e 0.08 p.u. é muito menor à velocidade máxima de fechamento dos portões na zona de operação normal, que está entre 0.08 e 1 p.u. A Fig. 6 apresenta a implementação do interruptor.

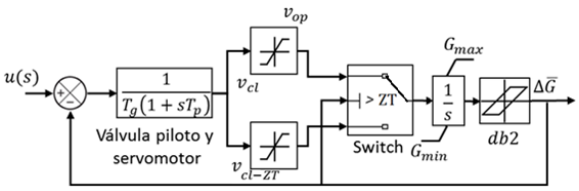


Figura 6: Atuador eletro-hidráulico modificado

O bloco *db2* simula a histerese inerente que o governador possui.

### 2.4 Modelo de gerador

No controle de velocidade, o rotor, a variação da carga e a potência mecânica da turbina são elementos envolvidos. A função de transferência de um gerador para controle de velocidade é:

$$\left(\Delta\overline{P}_m - \Delta\overline{P}_L\right)\left(\frac{1}{T_m s + D}\right) = \Delta\overline{\omega}_r \quad (15)$$

O diagrama de blocos da equação (15) é ilustrado na Fig. 7.

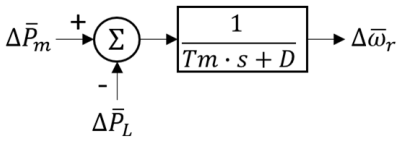


Figura 7: Diagrama de blocos do gerador

## 3 Controle LQR-2DOF

A estrutura LQR-2DOF é ilustrada na Fig. 8.

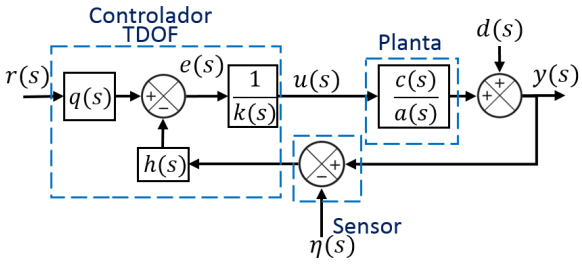


Figura 8: Estrutura genérica LQR-2DOF

A planta é representada pela função de transferência $G(s)$ (racional e estritamente própria) dada por:

$$G(s) = \frac{c(s)}{a(s)} \quad (16)$$

onde os polinômios $a(s)$ e $c(s)$ são co-primos de graus $n$ e $m$ ($m < n$). As entradas $d(s)$ e $\eta(s)$ correspondem as perturbações externas e à sinal de ruido. Os polinômios $h(s)$, $k(s)$ e $q(s)$ de grau $n-1$ são os ganhos do controlador.

A função de transferência de *malha fechada* sem considerar a perturbação $d(s)$ e o sinal de ruido $\eta(s)$ é:

$$\frac{y(s)}{r(s)} = \frac{c(s)q(s)}{a(s)k(s) + c(s)h(s)} = \frac{\alpha c(s)\hat{q}(s)}{\hat{\delta}(s)\hat{q}(s)} = \frac{\alpha c(s)}{\hat{\delta}(s)} \quad (17)$$

onde $\alpha \in \mathcal{R}$ e $q(s) = \alpha\hat{q}(s)$.

Os pólos desejados em malha fechada são dados pelas raízes do polinômio $\hat{\delta}(s)$ que garantem um acompanhamento adequado da referência em

relação ao eixo imaginário. No entanto, essa característica às vezes é obtida pela deterioração da entrada de controle $u(t)$, o que pode levar à saturação dos atuadores, este problema pode ser tratado minimizando o índice dado por:

$$J_{LQR} = \int_0^\infty \{\rho(y(t) - r(t))^2 + u(t)^2\}dt \quad (18)$$

O fator de ponderação $\rho \in \mathcal{R}^+$ é usado para atingir um apropriado desempenho em malha e de seguimento. A solução da equação (18) no domínio da freqüência é conhecida como *fatorização espectral* (Wolovich, 1994).

### *3.1 Fatorização Espectral*

Se $c(s)$ e $a(s)$ tem coeficientes reais, as seguintes restrições são satisfeitas:

$$\begin{aligned} a(j\omega)a(-j\omega) &= |a(j\omega)|^2 \geq 0 \\ c(j\omega)c(-j\omega) &= |c(j\omega)|^2 \geq 0 \quad \forall\, \omega \text{ real} \end{aligned} \quad (19)$$

ou seja, considerando $\rho > 0$ define-se:

$$\Delta(s) = a(s)a(-s) + \rho c(s)c(-s) \quad (20)$$

As $2n$ raízes de $\Delta(s)$ são obtidas variando $\rho$ de 0 a $\infty$ e representam um grupo especial de raízes chamada de Root-Square Locus,(i.e). se $\lambda_j$ é uma raiz de $\Delta(s)$ então $-\lambda_j$ é também uma raiz de $\Delta(s)$. Conseqüentemente, $\Delta(s)$ pode ser expressado como:

$$\begin{aligned} \Delta(s) &= \delta^{F^*}(s)\delta^{F^*}(-s) \\ &= [\Delta(s)]^+[\Delta(s)]^- \end{aligned} \quad (21)$$

onde as $n$ raízes estáveis de $\delta^{F^*}(s)$ são os valores desejados de $\hat{\delta}(s)$. De maneira similar pode-se obter as $n$ raízes estáveis de $\overline{\Delta}(s)$ como:

$$\begin{aligned} \overline{\Delta}(s) &= a(s)a(-s) + \sigma c(s)c(-s) \\ &= \delta^{H^*}(s)\delta^{H^*}(-s) \\ &= [\overline{\Delta}(s)]^+[\overline{\Delta}(s)]^- \end{aligned} \quad (22)$$

onde, cada escolha de $\sigma \in \mathcal{R}^+$ permite obter o respectivo $\delta^{H^*}(s)$, como conseqüência $\hat{q}(s)$ é calculado como uma função das $n$ raízes estáveis de $\delta^{H^*}(s)$.

De esta forma:

$$k(s) = s^{n-1} + k_{n-2}s^{n-2} + \cdots + k_1 s + k_0 \quad (23)$$

e

$$h(s) = h_{n-1}s^{n-1} + h_{n-2}s^{n-2} + \cdots + h_1 s + h_0 \quad (24)$$

são obtidas resolvendo a seguinte equação Diofantina:

$$a(s)k(s) + c(s)h(s) = \delta^{F^*}(s)\hat{q}(s) \quad (25)$$

A equação (25) em forma de matriz é reescrita como:

$$\mathcal{SV} = \overline{\delta} \quad (26)$$

onde $\mathcal{S}$, $\mathcal{V}$ e $\overline{\delta}$ estão apresentados por extenso em (Vargas et al., 2015).

### *3.2 Rejeição de perturbações e atenuação de ruido*

A rejeição de perturbações e atenuação de ruído, é avaliada a partir das funções de *sensibilidade* e *complementar de sensibilidade* definidas como:

$$S(s) = \frac{a(s)k(s)}{\delta(s)}; \quad C(s) = \frac{c(s)h(s)}{\delta(s)} \quad (27)$$

tal que:

$$|S(j\omega)| \approx \begin{cases} 0 & \text{para baixas freqüências} \\ 1 & \text{para altas freqüências} \end{cases} \quad (28)$$

$$|C(j\omega)| \approx \begin{cases} 1 & \text{para baixas freqüências} \\ 0 & \text{para altas freqüências} \end{cases} \quad (29)$$

Finalmente, as margens de ganho e fase são obtidos a partir do ganho de malha definido como:

$$L(s) = \frac{c(s)h(s)}{a(s)k(s)} \quad (30)$$

## 4 LQR-2DOF Como Regulador

A estrutura LQR-2DOF apresentada corresponde a um rastreador, ou seja, a sinal $r(s)$ deve receber as variações da referencia. Para estabelecer a configuração como regulador, partimos do diagrama que considera o sistema completo ilustrado na Fig. 9. tal que $A$, $T$ e $G$ são os modelos do Atu-

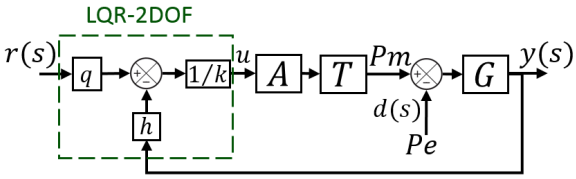


Figura 9: Controle de velocidade LQR-2DOF

ador, Turbina e Gerador, respectivamente. Para adaptar a função de transferência que a estrutura LQR-2DOF possui ao sistema de regulação de velocidade, levamos a estrutura da Fig. 9 à estrutura da Fig. 10:

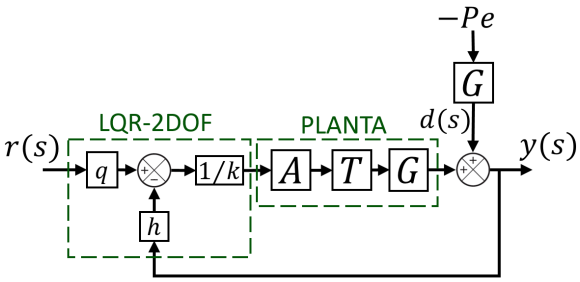


Figura 10: Controle de velocidade LQR-2DOF standard

A função de transferência de malha fechada da Fig. 10 é:

$$y(s) = \frac{c(s)q(s)}{\delta(s)}r(s) + S(s)d(s) + C(s)\eta(s) \quad (31)$$

Desconsiderando o ruido obtém-se:

$$y(s) = \frac{c(s)q(s)}{\delta(s)}r(s) + \frac{a(s)k(s)}{\delta(s)}d(s) \quad (32)$$

$$y(s) = T(s)r(s) + \frac{a(s)k(s)}{\delta(s)}\left(\frac{1}{T_m s + D}\right)\ldots (-P_e) \quad (33)$$

Para que a estrutura funcione como um regulador em regime permanente, é necessário fazer a saída $y(s)$ igual ao valor de referência (constante), em termos matemáticos, isso é representado pelo *Teorema do Valor Final*:

$$y(\infty) = \lim_{s\to 0} s \cdot y(s) = Ref \quad (34)$$

Ou seja:

$$y(\infty) = \lim_{s\to 0} s\left\{T(s)r(s)\right\} + \ldots$$

$$\lim_{s\to 0} s\left\{\frac{a(s)k(s)}{\delta(s)}\left(\frac{1}{T_m s + D}\right)(-P_e)\right\} = Ref \quad (35)$$

Para uma referencia de tipo degrau, empregando os limites obtém-se:

$$y(\infty) = r(s) + \frac{a_0 k_0}{\delta_0 D}(-P_e) = Ref \quad (36)$$

onde os valores $a_0$, $k_0$ e $\delta_0$ são os valores constantes dos polinômios de projeto e da planta, ou seja:

$$y(\infty) = r(s) = Ref + \frac{a_0 k_0}{\delta_0 D}(P_e) \quad (37)$$

Da equação (37), conclui-se que, para ter uma saída igual à entrada em regime, a entrada deve necessariamente ser a soma do valor de referência mais a entrada da perturbação (neste caso a carga elétrica) multiplicada por uma constante, neste sentido, a Fig. 11 ilustra a estrutura LQR-2DOF como regulador. Esta estrutura é proposta no trabalho de (Espinoza, 2019).

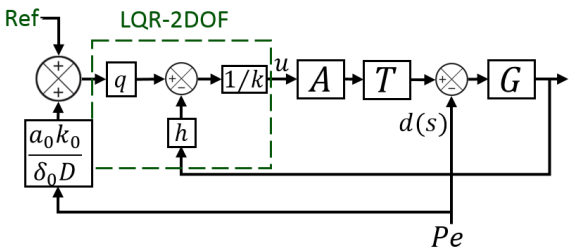


Figura 11: Controle LQR-2DOF como regulador

## 5 Projeto do Controlador

A usina utilizada em este trabalho corresponde à usina hidrelétrica Chojlla, que está sob a supervisão da empresa HidroBol S.A., dona de uma turbina Francis de 40 MW. A Tabela 1 apresenta os parâmetros de esta planta.

Tabela 1: **Parâmetros unidade hidrelétrica**

| Parâmetros | Valores | Unidades |
|---|---|---|
| $T_g$ | 0,50 | s |
| $T_p$ | 0,10 | s |
| $a_{11}$ | 0,58 | adm |
| $a_{13}$ | 1,10 | adm |
| $a_{21}$ | 1,40 | adm |
| $a_{23}$ | 1,50 | adm |
| $T_w$ | 0,91 | s |
| $T_m$ | 6,00 | s |
| $D$ | 1,50 | % |

O modelo da planta $\frac{c(s)}{a(s)}$ é determinado pelas séries dos modelos do atuador, da turbina e do gerador, como observado na Fig. 3. O modelo obtido é:

$$\frac{c(s)}{a(s)} = \frac{-3,21s + 7,89}{s^4 + 10,48s^3 + 35,01s^2 + 39,69s + 7,89} \quad (38)$$

Para um valor de $\rho > 0$, a Fig. 12 ilustra as $2n$ raízes do polinômio $\Delta(s)$.

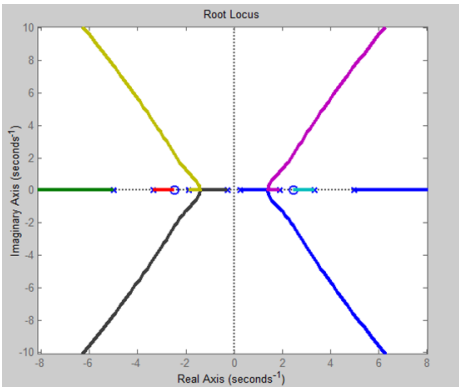


Figura 12: Raízes de $\Delta(s)$ no plano complexo

O valor de $\rho$ para obter um tempo de assentamento menor ao de um controlador PID é $\rho = 30$. A resposta ao degrau para o $\rho$ selecionado é ilustrada na Fig. 13.

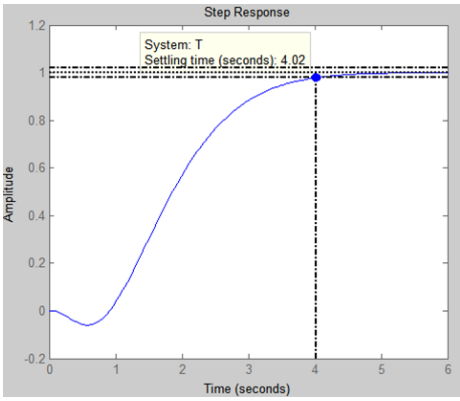


Figura 13: Tempo de assentamento do controlador

O polinômio característico $\hat{\delta}(s)$ obtido é:

$$\hat{\delta}(s) = s^4 + 11,33s^3 + 44,26s^2 + 72,27s + 43,95 \quad (39)$$

para:

$$\alpha = \frac{\hat{\delta}(0)}{c(0)} = 5,5678 \tag{40}$$

Para selecionar o valor de $\sigma$, deve-se verificar que a magnitude da sensibilidade do sistema $|S(s)|$ atender a condição:

$$\|S\|_\infty = max_\omega |S(j\omega)| \leq 2 \approx 6dB \tag{41}$$

O valor de $\sigma = 1$, permite verificar as magnitudes da função de sensibilidade $S(s)$ e complementar de sensibilidade de acordo à equação (27). Os ganhos do controlador são apresentados na Tabela 2, ressaltando que $q(s) = \alpha\hat{q}(s)$.

Tabela 2: **Ganhos controlador LQR-2DOF**

| $q(s)$ | $h(s)$ | $k(s)$ |
|---|---|---|
| $5{,}57s^3$ | $3{,}25s^3$ | $1{,}0s^3$ |
| $56{,}86s^2$ | $38{,}65s^2$ | $12{,}72s^2$ |
| $179{,}96s$ | $126{,}55s$ | $49{,}14s$ |
| 174,43 | 123,10 | 86,07 |

As Figs.14 e 15 ilustram as funções de sensibilidade e complementar de sensibilidade obtidas.

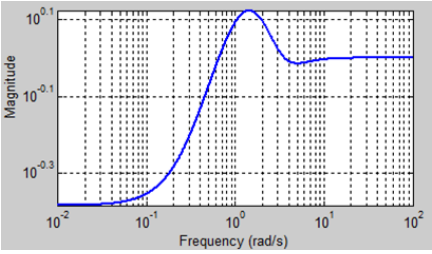


Figura 14: Sensibilidades

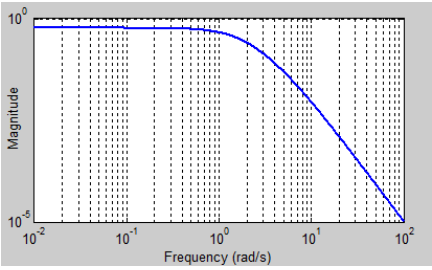


Figura 15: Complementar de sensibilidade

A partir de estes resultados e do ganho de malha são verificadas as margens de ganho e fase, a primeira com valor superior a 6 dB e a segunda com valor maior a 40 graus. Isto garante boas margens de estabilidade, condicão exigida pelas normas.

## 6 Resultados de Simulação

A estrutura ilustrada na Fig. 16 foi empregada na execução das simulações.

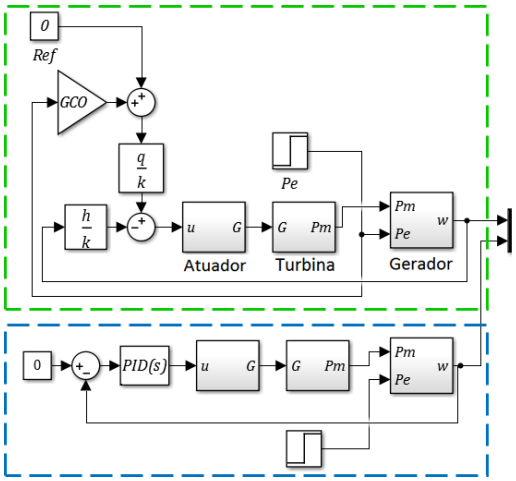


Figura 16: Sistemas reguladores PID e LQR-2DOF

A constante $GCO$ é o ganho acrescentado à medição da carga $P_e$, ele é calculado com as constantes $a_0$, $k_0$, $D$ e $\delta_0$, conforme apresentado na seção 4. Os dados adicionais para a simulação são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: **Dados simulação**

| Parâmetros | Valores | Unidades |
|---|---|---|
| $GCO$ | 0,275 | adm |
| $db2$ | 0,02 | % |
| $v_{op} - v_{cl}$ | 0,4 | p.u |
| $v_{cl} - ZT$ | 0,04 | p.u |
| $ZT$ | 0,08 | p.u |
| $G_{max}$ | 1,0 | p.u |
| $G_{min}$ | 0,0 | p.u |
| $K_p$ | 3,0872 | adm |
| $K_i$ | 0,6934 | adm |
| $D_d$ | 1,3800 | adm |
| $N$ | 78,3882 | adm |

Mencionar que o PID foi sintonizado empregando o algoritmo baseado em algoritmos genéticos do Matlab-Simulink®para efeitos de comparação. Os resultados de simulação para uma entrada repentina de carga são apresentados na Figs. 17 e 18.

Nestes resultados verifica-se que a velocidade de resposta do controlador LQR-2DOF é maior quando comparado ao PID. Não entanto o torque também é maior.

Já as Figs. 19 e 20 apresentam os resultados de simulação devido ao aumento ou redução da carga.

Nestes resultados, novamente é verificado que o controle LQR-2DOF é bem mais rápido que o controle PID.

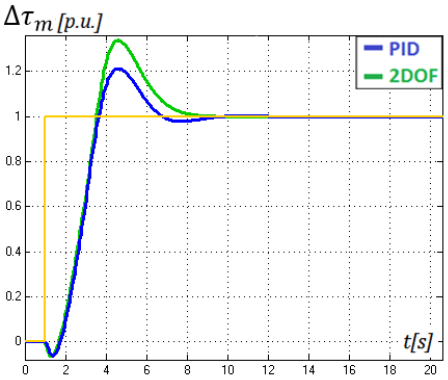


Figura 17: Torque entregue pela turbina

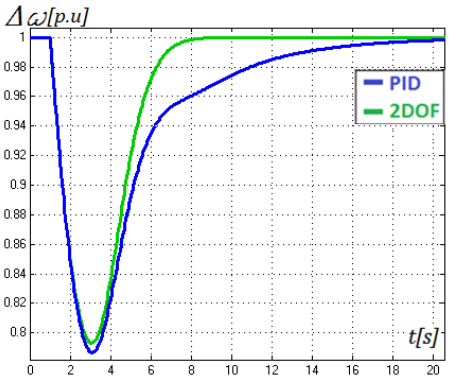


Figura 18: Velocidade da maquina

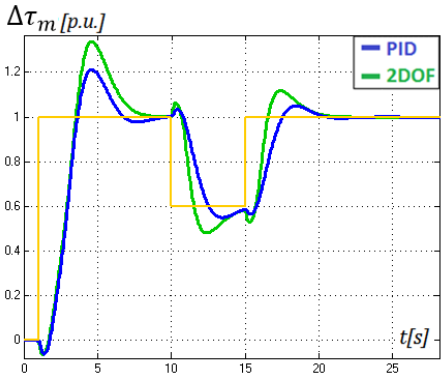


Figura 19: Torque entregue pela turbina

Pelo apresentado, a arquitetura proposta pode ser empregada como regulador em sistemas de geração de energia, ressaltar ainda que a estrutura tem uma vantagem extra em relação a outros controladores, esta vantagem diz com respeito à inclusão de outra variável no controle, esta variável corresponde à variação de carga. Esta caraterística permitiria uma detecção antecipada de erros quando comprada com as outras técnicas. Finalmente, as limitações de ambos os controladores correspondem a possíveis saturações de controle, isto porque na área de geração, as hidrelétricas apresentam maior saturação e resposta mais lenta, mas o controlador LQR-2DOF poderia melhorar

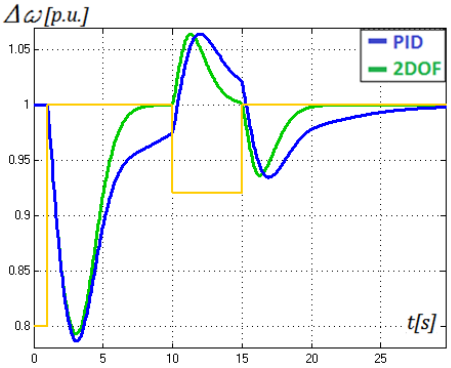


Figura 20: Velocidade da maquina

esta carateristica.

## 7 Conclusões

Neste trabalho foram apresentados os modelos da turbina, do gerador e feita a proposta para um regulador LQR-2DOF.

Foi verificado que o uso da estrutura LQR-2DOF como regulador na área de geração de energia é viável, isto quando comparado ao controlador PID amplamente utilizado em sistemas de energia, verificou-se também uma melhora significativa da resposta à entrada e saída de carga.

Algumas das vantagens que esta estrutura são:

1. Permite a rejeição de perturbações e atenuação de ruído no sistema,

2. Permite a utilização de dois parâmetros como meio de controle, um para medir a velocidade do rotor e outro para medir a carga elétrica,

3. Alta capacidade para melhorar os tempos de resposta de saída do sistema,

4. A integral do erro absoluto quando comparado ao PID é menor (PID = 1,365, 2DOF =0,95).

Estudos mais extensos são necessários para apreciar a relação indireta existente entre a melhoria na resposta das unidades de geração e a possibilidade de aumentar o percentual de unidades de geração não convencional ao sistema interligado nacional.

Acrescentar que a implementação de novas estruturas de controle em sistemas de geração devem enfrentar problemas de estabilidade inerentes aos sistemas interligados.

Finalmente, a Bolívia tem iniciado uma etapa de transferência de tecnologia em pequena escala na área de Energia, sendo este trabalho resultado desse esforço.

**Agradecimentos**

Os autores agradecem a Universidade Mayor de San Simon e a UNIARA pelo suporte.

**Referências**

Dynamic, P. S., Commitee, S. and on Turbine-Governor Modeling, T. F. (2013). Dynamic models for turbine-governos in power system studies, *Technical report*, IEEE Power and Energy Society.

Espinoza, R. D. D. (2019). Estructuras de control robustas e inteligentes aplicado a la regulación de velocidad en turbinas hidráulicas, *Technical report*, Universidade Mayor de San Simon.

Guo Lei (2017). Application of improved particle swarm optimization algorithm based on average position in parameter optimization of hydraulic turbine governor, *2017 3rd International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR)*, pp. 252–255.

Hagihara, S., Yokota, H., Goda, K. and Isobe, K. (1979). Stability of a hydraulic turbine generating unit controlled by p.i.d. governor, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* **PAS-98**(6): 2294–2298.

Hannett, L. N., Feltes, J. W. and Fardanesh, B. (1994). Field tests to validate hydro turbine-governor model structure and parameters, *IEEE Transactions on Power Systems* **9**(4): 1744–1751.

Koritarov, V. and Guzowski, L. (2013). Review of existing hydroelectric turbine-governor simulation models, *Technical report*, U.S. Departament of Energy - Wind and Water Power Technologies.

Kundur, P. (1993). *Power System Stability and Control*, first edn, McGraw-Hill.

Moura, A. P., Moura, A. A. F. and Rocha, E. P. (2019). *Geração Hidrelétrica e Eolioelétrica*, first edn, Universidade Federal do Ceara.

M.Sajnekar, D., Kolhe, M. L., S.B.Deshpande, Moharil, R. M., Patidar, N. P. and Ogura, K. (2018). Design of pid controller for automatic voltage regulator and validation using hardware in the loop technique, International Journal of Smart Grid and Clean Energy, pp. 75–89.

Naghizadeh, R. A., Jazebi, S. and Vahidi, B. (2012). Modeling hydro power plants and tuning hydro governors as an educational guideline, International Review on Modelling and Simulations, pp. 1780–1790.

Padiyar, K. (2008). *Power System Dynamics: Stability and Control*, second edn, BS Publications.

Pota, H. R. (2018). *The Essentials of Power System Dynamics and Control*, first edn, Springer.

Ruzhekov, G., Slavov, T. and Puleva, T. (2011). Modeling and implementation of hydro turbine power adaptive control based on gain scheduling technique, *2011 16th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems*, pp. 1–6.

Vargas, F. J. T., de Oliveira Moreira, F. J. and Paglione, P. (2015). Longitudinal stability and control augmentation with robustness and handling qualities requirements using the two degree of freedom controller, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, pp. 1–11.

Vargas, F. J. T. and Paglione, P. (2015). *Ferramentas de Algebra Computacional: Aplicações em Modelagem, Simulação e Controle para Engenharia*, first edn, LTC.

Wolovich, W. A. (1994). *Automatic Control Systems: Basic Analysis and Design*, second edn, Oxford University Press.

Zhang, X. and Zhang, M. (2006). An adaptive fuzzy pid control of hydro-turbine governor, *2006 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, pp. 325–329.

Zhou, K. and Doyle, J. C. (1999). *Essentials of Robust Control*, first edn, Prentice Hall.