Regulador de Velocidade Usando Técnicas de Otimização Multiobjetivo

Tainara Marques * Gilberto Reynoso-Meza *
Emerson Donaisky *

* Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Pontifícia
Universidade Católica do Paraná, PR, (e-mails:
tainara.marques@pucpr.edu.br, g.reynosomeza@pucpr.br,
emerson.donaisky@pucpr.br).

Abstract: Hydroelectric plants are the main sources of energy in Brazil. For their correct functioning is essential to maintain the stability of the system; one way to ensure this is through the stability of the frequency, via the speed controller for such a task. Proportional-integral (PI) type controllers are used, in order to achieve desired performance and stability. To find suitable gains of the controller, multi-objective control techniques are applied, because their usefulness to represent the trade-off between conflicting objectives. In this work we use such techniques to evaluate the trade-off between load rejection and robustness of the speed controller. For this different PI controls were tested for a plant representing the hydraulic mesh in order to validate its utility.

Resumo: Usinas hidrelétricas são as principais fontes geradoras de energia no Brasil. Para o correto funcionamento é essencial manter a estabilidade do sistema. Uma maneira de garantir esta é através da estabilidade de frequência, a qual é feita através do regulador de velocidade que nada mais é que um controlador para a malha hidráulica. Desta forma, o controlador do tipo proporcional-integral (PI) é utilizado a fim de obter um desempenho e estabilidade desejados. Para encontrar os ganhos do controlador são aplicadas técnicas de controle multiobjetivo, pois estas se mostram úteis pela capacidade de representar o câmbio entre os objetivos conflitantes. Neste trabalho utilizam-se tais técnicas para avaliar o *trade-off* entre rejeição de carga e robustez do regulador de velocidade. Para tal, diferentes controles PI foram testados para uma planta que representa a malha hidráulica de um regulador de velocidade, a fim de validar sua utilidade.

Keywords: Multi-objective optimization; PI control; Hydroelectric plants.

Palavras-chaves: Otimização multiobjetivo; Controle PI, Usinas hidrelétrica.

1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica se torna a cada dia mais indispensável para o desenvolvimento tanto social quanto econômico. A matriz elétrica do Brasil tem origem predominantemente renovável, sendo que estas representam 80,4% da oferta interna de eletricidade. A maior responsável por este resultado são as usinas hidrelétricas, que em 2017 produziram 65,2% deste total. Contribuíram também com 49,5% da expansão da capacidade instalada EPE (2018).

As usinas hidrelétricas funcionam através da transformação de energia potencial gravitacional de uma queda d'água em energia elétrica. Esta transformação se torna possível através do uso de turbinas hidráulicas, devidamente acopladas a um gerador. As turbinas hidráulicas hoje em dia são consideradas a forma mais eficiente na conversão de energia primária em secundária, podem chegar a 90% de eficiência ANEEL (2005).

É de extrema importância garantir a confiabilidade no

fornecimento de energia elétrica, pois a interrupção da mesma pode causar, pelo menos, grande inconveniência ao consumidor. Podendo levar a situações de risco de vida, problemas técnicos no setor industrial, grande perda de receita financeira, entre outros problemas Machowsky et al. (2008).

Nas hidrelétricas esta confiabilidade é feita através do regulador de velocidade (RV), que tem a importante função de regular a vazão de água. Através da abertura e fechamento do distribuidor da turbina, a manutenção da rotação do conjunto turbina/gerador é garantida. Desta forma, a frequência permanece no valor nominal, padrão que no Brasil é de 60 hertz quando operando em regime permanente. Outra importante função do regulador é restaurar a velocidade o mais rápido possível quando sofrer alguma perturbação.

Para manter a estabilidade do sistema elétrico de potência (SEP) a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabelece normas as quais dizem que em regime permanente e condições normais de operação os limites da frequência devem estar entre 59,9 Hz a 60,1 Hz. Na ocorrência de distúrbios no sistema de distribuição deve ser seguido os requisitos indicados em Procedimentos de Dis-

* O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) e da Fundação Araucária (FAPPR) - Brasil - Códigos de Financiamento: 304066/2016-8-PQ2, 437105/2018-0-Univ e PRONEX-042/2018.

rotor no conjunto turbina/gerador através da relação entre a velocidade angular do rotor (U) e o torque de aceleração (G), e podem ser aproximadas pela seguinte equação:

$$\frac{U(s)}{G(s)} = \frac{1}{T_M s + K_D} \quad (3)$$

Onde T_M é a constante de tempo da máquina, a qual representa o tempo que o torque nominal necessita para levar o rotor da máquina até sua velocidade nominal; e K_D representa o coeficiente de amortecimento, que surge quando o gerador está conectado a uma carga Munoz-Hernandez et al. (2013).

2.2 Controlador PID

Controladores do tipo PID são amplamente utilizados no controle de processos com realimentação, existem trabalhos que comentam que o uso desta estrutura chega em até 90% dos laços de controle Lima (2013).

Neste sistema de controle, a variável do processo, ou seja, o parâmetro do sistema a ser controlado é a frequência. O sinal de entrada do controlador é o desvio da frequência. Este sinal passa pelo controlador gerando um sinal de saída que atua sobre o amplificador hidráulico para a correção da frequência. A função de um controlador PID típico é mostrado na equação 4.

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (4)$$

Onde K_p , K_i , K_d são respectivamente os ganhos: proporcional; integral; e derivativo e s o operador de Laplace.

Os parâmetros PID são ajustáveis separadamente e podem ser sintonizados para atender às necessidades da planta Munoz-Hernandez et al. (2013). O problema de controle consiste em selecionar ganhos adequados para o controlador, a fim de alcançar um desempenho desejável do processo no *loop* de controle, bem como margens de estabilidade robustas. Objetivos conflitantes podem aparecer quando se busca um bom desempenho e um nível de robustez desejável; o que torna as técnicas de MOO atraentes para o ajuste do controlador PID (Reynoso-Meza et al. (2013); Reynoso-Meza et al. (2014)).

2.3 Otimização Multiobjetivo

Conhecida como a área de tomada de decisão de múltiplos critérios, que busca uma melhor solução para problemas matemáticos com mais de uma função objetivo a ser simultaneamente otimizada. Pode-se definir um problema multiobjetivo (MOP) da seguinte forma:

$$\min_{\theta} J(\theta) = [J_1(\theta), \dots, J_m(\theta)] \quad (5)$$

Sujeito a:

$$g(\theta) \leq 0 \quad (6)$$

$$h(\theta) = 0 \quad (7)$$

$$\theta_i \leq \theta_i \leq \bar{\theta}_i, i = [1, \dots, n] \quad (8)$$

Onde $\theta \in \mathbb{R}$ é colocado como o vetor de decisão; $J(\theta)$ o vetor objetivo; $g(\theta)$, $h(\theta)$, respectivamente, os vetores de restrição de desigualdade e igualdade, e $\theta_i \leq \theta_i \leq \bar{\theta}_i$ sendo a dimensão de pesquisa para o espaço de decisão para a variável θ Miettinen (1999).

Normalmente não existe uma única solução nos MOPs, porque não há uma solução que seja melhor para todos os

objetivos. Logo faz-se necessário determinar um conjunto de pontos que tenham uma definição predeterminada para um ótimo, denominado conjunto de Pareto Marler and Arora (2004). Cada solução no conjunto de Pareto define um vetor objetivo na frente de Pareto. Todas as soluções na frente de Pareto são um conjunto de soluções ótimas e não dominadas de Pareto: Otimidade de Pareto (Miettinen (1999)); Dominância (Coello and Lamont (2004)). A figura 3 demonstra tal definição.

Fonte: Reynoso-Meza et al. (2016)

Figura 3. Conceito de otimidade e dominância de Pareto.

Três passos fundamentais são necessários para correta implementação da abordagem multiobjetivo, esses passos são: a definição do MOP, a otimização multiobjetivo (MOO) e o estágio de tomada de decisão multicritério (MCDM). De agora em diante este processo integral e holístico será denotado com um procedimento de *design* multiobjetivo (MOOD) Reynoso-Meza et al. (2016).

A seguir, o MOOD será usado a fim de encontrar os ganhos PID que satisfaça os objetivos propostos para prover a estabilidade da planta.

3. PROPOSTA

Este trabalho propõe-se a simular a malha hidráulica, com o principal objetivo de ajustar o controlador através da técnica MOO. Para simulação da malha tem-se as equações, apresentadas no capítulo 2.1, das partes: controlador; amplificador hidráulico; e conjunto gerador/carga inseridos em um microcontrolador. Enquanto o conjunto gerador/carga pela planta da Figura 4, que demonstram as vistas frontal e lateral.

Figura 4. Vistas frontal e lateral da planta utilizada nos testes.

Figura 5. Componentes da malha hidráulica e demonstração de onde as partes são simuladas.

A planta é constituída de um motor universal com uma roda dentada acoplada à ponta, uma alavanca que funciona como freio para o motor, um circuito que converte a entrada de 4 a 20mA em sinal de tensão para o motor e um equipamento de leitura. Neste dispositivo a tensão imita a água após passar pelas outras partes da malha, o motor simula o gerador e a alavanca a carga exigida pelo sistema. Os valores encontrados para a equação 3, que representam este motor quando ligada sem aplicação de carga, são de 0,8 para T_M e 1 para K_D . Em busca de uma modelagem mais apropriada do sistema em questão são substituídos os valores aqui propostos nas equações apresentadas no capítulo 2.1, resultando na equação 9. Para melhor exemplificar a Figura 5 demonstra o caminho a ser percorrido pelo sinal.

$$\frac{G(s)}{U(s)} = \frac{1}{0,8s + 1} \quad (9)$$

Agora a definição MOP, processo MOO e o estágio de MCDM serão apropriadamente declarados.

3.1 Definição do problema multiobjetivo

A estrutura do PID é dada como um problema SISO (entrada única, saída única) como mostra a equação 4. Neste contexto, as variáveis de decisão para a otimização são $\theta = [K_p, T_i, T_d]$ e o controlador de referência $C_{ref}(s)$ é indicado com $\theta_{ref} = [1, 1183, 2, 4167, 0, 0000]$, sintonia de Ziegler-Nichols. O controlador de referência é considerado uma pratica útil de sistemas de controle, voltada para avaliar melhorias dos controladores.

Para a etapa de otimização será usada um procedimento analítico e orientado a modelo que não requer nenhum cálculo de funções no domínio do tempo. Este define um determinado valor da função de sensibilidade máxima (M_s) como objetivo de projeto. Também é utilizada uma otimização do valor de K_i , sujeito aos valores de (M_s), com o intuito de aumentar tanto quanto possível seu valor obtendo assim um *trade-off* entre rejeição e robustez Åström and Hägglund (1995). No primeiro caso será usado o erro integral (IE), no segundo, será usada o valor da sensibilidade máxima:

$$J_{IE}(\omega) = -\frac{K_p}{T_i} \quad (10)$$

$$J_{MS}(\theta) = \max_w \left| \frac{1}{1 + G_p(iw) G_c(iw)} \right| \quad (11)$$

Onde G_p e G_c são respectivamente funções de transferência do processo e do controlador. Åström and Hägglund (1995) colocam que valores típicos de M_s estão entre 1,2 e 2, sendo que os valores fora desta faixa tornam o sistema rápido, porém menos robustos. Será utilizado um programa para controladores PID para construir uma função de objetivo para IE e outra para M_s . Com isso em mente, e com

o propósito de obter objetivos de *design* significativos, a seguinte declaração de otimização é definida:

$$\min_{\theta} J(\theta) = [J_1(\theta), J_2(\theta)] \quad (12)$$

Sendo $J_1(\theta) = J_{IE}(\theta)$ e $J_2(\theta) = J_{MS}(\theta)$, submetido a: $k_{p1}, k_{p2} \in [0, 0, 2, 2]$; $T_{I1}, T_{I2} \in [0, 1, 15, 0]$; $T_{D1}, T_{D2} \in [0, 0, 0, 0]$; e $M_{s1}, M_{s2} \in [0, 0, 4, 0]$.

3.2 Processo de otimização multiobjetivo

Nesta etapa será utilizado a função *gamultiobj* do programa Matlab 2018a, com ajustes padrão. Este é um algoritmo genético utilizado para criar o conjunto de pontos da frente de Pareto, sendo o critério de parada quando alcança 3000 iterações ou uma diferença menor que $1e^{-6}$.

3.3 Estágio de decisão multicritério

Como o caso aqui estudado contém apenas dois objetivos declarados, nenhuma ferramenta adicional para análise e visualização do *trade-off* entre alternativas de projeto na frente de Pareto aproximada faz-se necessária. Os interessados podem consultar Tušar and Filipič (2015) para uma revisão de ferramentas e técnicas de visualização.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para mostrar o desempenho esperado dessa abordagem foram encontradas um total de 51 soluções de Pareto. O algoritmo foi rodado em um computador pessoal com Intel Core i7-3610QM, 2,3GHz e 8GB RAM, o programa executado Matlab levou 208 minutos para concluir.

Das soluções encontradas, será escolhida aquela frente com o valor de Hipervolume igual a mediana dos testes. Conhece-se este Hipervolume como uma escolha usual de avaliação do desempenho de aproximação da frente de Pareto Zitzler et al. (2003). Isto é feito para garantir que o resultado fique mais próximo do esperado devido à natureza estocástica do algoritmo. Tem-se na Figura 6 a frente de Pareto aproximada com o valor mediano dos Hipervolumes calculados.

Figura 6. Conjunto de Pareto obtido.

Todos os valores de ganho da Frente de Pareto mediana foram testados na planta. Os testes realizados procederam da seguinte forma, primeiro a planta é ligada por aproximadamente um minuto sem influência de carga, após este minuto aplica-se uma carga leve durante mais um minuto e no minuto final a carga é retirada. Para efeito de comparação o mesmo teste foi realizado com método de sintonia de controladores PI de Ziegler-Nichols em Malha Aberta. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 7.

Os resultados demonstrados tem o Ms na faixa de 1,2 e 1,5, pois notou-se que os controladores com valores de Ms entre 1,5 e 2 não foram capazes de estabilizar a planta quando operando sem carga, enquanto que os controladores apresentados são aptos para manter a planta estável em todos os pontos de operação.

5. CONCLUSÃO

A frente de Pareto escolhida possui controladores capazes de controlar a planta para todos os pontos de operação. Porém vários dos valores desta frente foram descartados ou por não serem capazes de estabilizar a planta ou pelo baixo nível de robustez.

Para os próximos trabalhos é indicado a busca de uma função de transferência com uma representação mais precisa da planta real considerando valores para G_o o qual foi desconsiderado visando manter o modelo da planta mais simples, testar a planta com outros objetivos, assim como trabalhar com o termo derivativo do PID considerando a aplicação de um filtro derivativo. Pode-se estender também a comparação da técnica com outras apresentadas na literatura.

REFERÊNCIAS

- Ali, W., Farooq, H., Abbas, W., Usama, M., and Bashir, A. (2017). PID vs PI control of speed governor for synchronous generator based grid connected micro hydro power plant. *Journal of Faculty of Engineering & Technology*, 24, 53–62.
- ANEEL, A.N.D.E.E. (2005). *Atlas de energia elétrica do Brasil*, 243. Brasília, 2. edition.
- Bevrani, H. (2009). *Robust Power System Frequency Control*. Springer Verlag, Sanandaj, 1. edition.
- Coello, C. and Lamont, G. (2004). *Applications of Multi-objective Evolutionary Algorithms*. Advances in natural computation. World Scientific.
- Donaisky, E. (2015). *Nova representação da malha hidráulica de regulador de velocidade em UHE através de modelos afins por partes*. In: Anais do XXIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. [S.l.: s.n.].
- EPE, E.D.P.E. (2017). Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional - PRODIST. Disponível em <www.epe.gov.br.> Acesso em dez. 2018.
- EPE, E.D.P.E. (2018). Balanço energético nacional 2018. Disponível em <www.epe.gov.br.> Acesso em dez. 2018.
- IEEE, W.G.R. (1992). Hydraulic turbine and turbine control models for system dynamic studies. 7(1), 167–179. doi:10.1109/59.141700.
- Júnior, L.C.D.F. (2016). *Máquinas elétricas*. Editora e Distribuidora S.A, Londrina-PR, 1 edition.
- Lima, O.M.D. (2013). Controle com estrutura PID fuzzy aplicado a plantas industriais. *Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*.
- Machowsky, J., Bialek, J.W., and James R., B. (2008). *Power system dynamics: Stability and Control*. John Wiley & Sons, Chichester, West Sussex, United Kingdom, 2. edition.
- Marler, R. and Arora, J. (2004). Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 26(6), 369–395. doi:10.1007/s00158-003-0368-6.
- Miettinen, K. (1999). *Nonlinear Multiobjective Optimization*, volume 12 of *International Series in Operations Research & Management Science*. Kluwer Academic Publishers, Boston, USA.

Figura 7. Resultado dos testes realizados na planta.

Tabela 1. Valores dos erros IAE e ITAE

Controladores	IAE	ITAE
C1	150,54	13219,91
C2	318,39	28546,65
C3	144,30	13264,90
C4	148,30	13220,87
Zigler Nichols	247,79	20605,51

Para análise de desempenho dos controladores foram utilizados os critérios Integral do valor absoluto do erro (IAE) e Integral do tempo multiplicado pelo valor absoluto do erro (ITAE). Os valores encontrados são arranjados da Tabela 1. Nota-se que três dos quatro controladores testados tem desempenho superior ao de Ziegler-Nichols.

- Munoz-Hernandez, A., German, Mansoor, S.P., and Jones, D. (2013). *Modelling and Controlling Hydropower Plants*. doi:10.1007/978-1-4471-2291-3.
- Åström, K.J. and Hägglund, T. (1995). *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*. Instrument Society of America, Research Triangle Park, NC, 2 edition.
- Reynoso-Meza, G., Ferragud, X.B., Saez, J.S., and Dur, J.M.H. (2016). *Controller Tuning with Evolutionary Multiobjective Optimization: A Holistic Multiobjective Optimization Design Procedure*. Springer Publishing Company, Incorporated, 1st edition.
- Reynoso-Meza, G., Sanchis, J., Blasco, X., and Martínez, M. (2014). Controller tuning using evolutionary multi-objective optimisation: Current trends and applications. *Control Engineering Practice*, 28, 58–73.
- Reynoso-Meza, G., Sanchis, J., Blasco, X., and Martínez, M. (2013). Algoritmos evolutivos y su empleo en el ajuste de controladores del tipo PID: Estado actual y perspectivas. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 10(3), 251 – 268. doi: <https://doi.org/10.1016/j.riai.2013.04.001>.
- Rosa, L.F., Oliveira, G.H.C., Leandro, G.V., Donaisky, E., Pena, A.M., and Souza, J.A. (2016). PID robusto com norma h_{∞} e otimização por algoritmos genéticos para controle frequência em usinas hidrelétricas. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE 2016)*, 1, 0355.
- Tušar, T. and Filipič, B. (2015). Visualization of pareto front approximations in evolutionary multiobjective optimization: A critical review and the prosecution method. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 19(2), 225–245. doi:10.1109/TEVC.2014.2313407.
- Zitzler, E., Thiele, L., Laumanns, M., Fonseca, C.M., and da Fonseca, V.G. (2003). Performance assessment of multiobjective optimizers: an analysis and review. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 7(2), 117–132. doi:10.1109/TEVC.2003.810758.