

Implementação de um Controlador Linear por Rejeição Ativa de Perturbações em um Processo de Dois Tanques no AVEVA Process Simulation

Ezequiel Jose Valencia Urbina^{a,*}, José Oniram de Aquino Limaverde Filho^b, Eugênio Libório Feitosa Fortaleza^a,
Heleno Bispo^c

^a Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas, Universidade de Brasília, Brasil

^b Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasil

^c Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

* urbina.ezequiel@aluno.unb.br; jose.oniram@unb.br; efortaleza@unb.br; heleno.bispo@eq.ufcg.edu.br

RESUMO

O uso de estratégias avançadas de controle em simuladores industriais de alta fidelidade ainda é limitado pela ausência de blocos nativos dedicados e pela baixa disponibilidade de metodologias replicáveis. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo implementar um Controlador Linear por Rejeição Ativa de Perturbações (LADRC) para um processo de dois tanques acoplados no AVEVA Process Simulation. O desempenho do controlador proposto foi comparado ao de um controlador PI sintonizado pelo método de Controle por Modelo Interno, considerando cenários de resposta servo e rejeição de perturbações. Os resultados demonstraram que o LADRC apresentou resposta mais rápida, maior capacidade de rejeição de perturbações e comportamento mais consistente para diferentes pontos de operação quando comparado ao PI-IMC. O estudo também demonstrou que o APS constitui uma plataforma viável para a validação numérica de estratégias avançadas de controle aplicadas a processos industriais.

Palavras-chave: Controle de Nível, LADRC, AVEVA Process Simulation, Controlador PI

1 Introdução

O controle de nível em sistemas de tanques acoplados permanece como um problema recorrente na indústria de processos, especialmente em operações nas quais a segurança, a estabilidade operacional e a continuidade produtiva dependem da adequada manutenção das variáveis de processo (International Energy Agency, 2019). Nesse contexto, controladores PI e PID continuam sendo amplamente empregados devido à sua simplicidade de implementação e elevada aceitação industrial (Åström & Hägglund, 2006; Seborg et al., 2016). Entretanto, em processos sujeitos a não linearidades, atrasos de transporte, saturação de atuadores e perturbações de carga, o desempenho dessas estratégias pode ser significativamente degradado (Skogestad, 2003).

Diante dessas limitações, o Controle por Rejeição Ativa de Perturbações (ADRC) tem se destacado por sua capacidade de estimar e compensar, em tempo real, dinâmicas não modeladas e perturbações externas por meio de um Observador de Estado Estendido (ESO) (Gao, 2003; Han, 2009). Em sua formulação linear, o LADRC reduz a complexidade de sintonia e tem apresentado resultados promissores em diferentes aplicações de controle (Ahi & Haeri, 2018; Herbst, 2013, 2021; Meng et al., 2022; Wu et al., 2021). Apesar disso, a maioria das implementações reportadas na literatura permanece concentrada em ambientes acadêmicos de simulação, com menor ênfase na validação em simuladores voltados a aplicações industriais.

Nesse cenário, o AVEVA Process Simulation (APS) destaca-se como uma plataforma relevante para estudos de processo, operação virtual e avaliação dinâmica de sistemas industriais. Entretanto, a ausência de blocos nativos dedicados a estratégias avançadas de controle dificulta a implementação direta de métodos como o LADRC nesse ambiente.

Diante disso, este trabalho propõe uma metodologia replicável para a implementação de um LADRC de segunda ordem no APS utilizando funcionalidades nativas da plataforma. A estratégia proposta é validada em um processo de dois tanques acoplados, considerando cenários de resposta servo e rejeição de perturbações, com comparação de desempenho em relação a um controlador PI sintonizado pelo método de Controle por Modelo Interno.

2 Metodologia

2.1 Formulação do LADRC

A formulação teórica do LADRC adotada neste trabalho segue a abordagem clássica proposta por Han (Han, 2009), posteriormente linearizada por Gao (Gao, 2003) e amplamente discutida por Herbst (Herbst, 2013, 2021).

Nessa abordagem, a dinâmica da planta é representada como um integrador duplo sujeito a uma perturbação generalizada

$$\ddot{y}(t) = f(t) + b_0 u(t), \quad (1)$$

em que $y(t)$ representa a saída do sistema, $u(t)$ corresponde ao sinal de controle, b_0 é o ganho nominal da planta e $f(t)$ representa a perturbação generalizada, englobando dinâmicas internas não modeladas, incertezas paramétricas e perturbações externas.

O LADRC emprega um Observador de Estado Estendido (ESO) para reconstruir simultaneamente os estados do sistema e a perturbação generalizada. Para um sistema de segunda ordem, o ESO pode ser descrito por:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 + B_1(y - z_1) \\ \dot{z}_2 = z_3 + B_2(y - z_1) + b_0 u \\ \dot{z}_3 = B_3(y - z_1) \end{cases} \quad (2)$$

em que z_1 e z_2 representam as estimativas da saída e de sua derivada, respectivamente, enquanto z_3 corresponde à estimativa da perturbação generalizada. Os parâmetros B_1 , B_2 e B_3 representam os ganhos do observador.

A ação de controle do LADRC é formulada a partir das estimativas fornecidas pelo ESO, permitindo a compensação ativa dos efeitos associados às dinâmicas não modeladas e às perturbações externas. Para o sistema considerado, a lei de controle pode ser expressa por

$$u = \frac{k_1(r - z_1) - k_2 z_2 - z_3}{b_0}. \quad (3)$$

em que r representa o sinal de referência, enquanto k_1 e k_2 correspondem aos ganhos do controlador.

Conforme proposto por Gao (Gao, 2003), os ganhos do controlador e do ESO foram ajustados por meio da abordagem de largura de banda. Para isso, adota-se uma dinâmica do observador mais rápida que a dinâmica de controle, escolhendo-se tipicamente a largura de banda do observador entre 3 e 10 vezes superior à largura de banda do controlador, de modo a assegurar a adequada estimação dos estados e das perturbações do sistema.

Nessa abordagem, os ganhos do controlador são obtidos a partir do polinômio característico desejado

$$(s + \omega_c)^2 = s^2 + 2\omega_c s + \omega_c^2, \quad (4)$$

em que ω_c representa a largura de banda do controlador, resultando nos ganhos $k_1 = \omega_c^2$ e $k_2 = 2\omega_c$.

De forma análoga, os ganhos do ESO são definidos a partir do polinômio característico

$$(s + \omega_o)^3 = s^3 + 3\omega_o s^2 + 3\omega_o^2 s + \omega_o^3, \quad (5)$$

em que ω_o representa a largura de banda do observador, resultando nos ganhos $B_1 = 3\omega_o$, $B_2 = 3\omega_o^2$ e $B_3 = \omega_o^3$.

2.2 Descrição do processo e implementação do LADRC no AVEVA Process Simulation

A Figura 1 apresenta a implementação, no APS, de um processo de dois tanques acoplados, incluindo o bloco do LADRC e as conexões utilizadas para leitura da variável medida e atuação sobre a válvula.

O processo consiste em dois tanques cilíndricos verticais em série, denominados T1 e T2, interconectados por duas válvulas de controle, com alimentação em T1 e descarga em T2. A variável de processo foi definida como o nível fracionário de T1, enquanto a variável manipulada correspondeu à posição de abertura da válvula XV2. Os tanques possuem diâmetro de 1,5 m e altura máxima de 3,0 m, utilizando água como fluido de processo. As pressões de alimentação e descarga foram definidas como 3,0 bar (abs) e 1,013 bar (abs), respectivamente.

Como o APS não dispõe de blocos nativos dedicados à estratégia LADRC, desenvolveu-se um modelo customizado a partir de funcionalidades nativas da plataforma. Nesse modelo, foram declaradas as variáveis internas associadas ao controlador e ao observador, conforme apresentado na Tabela 1, bem como implementadas as equações correspondentes ao LADRC, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 1: Diagrama do processo de dois tanques no ambiente de simulação do APS.

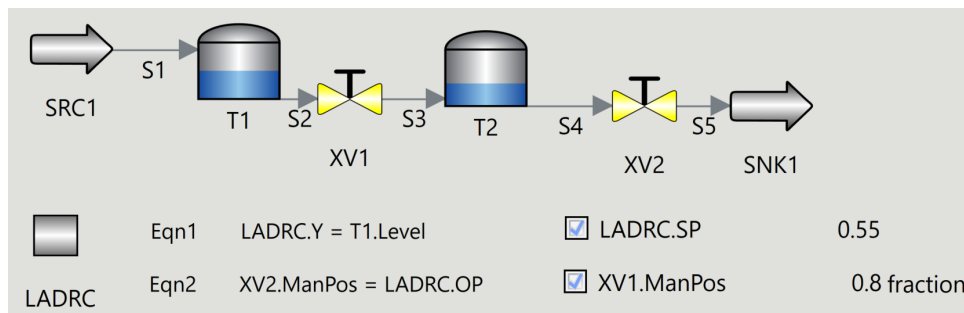


Tabela 1: Principais variáveis utilizadas na implementação do LADRC no modelo customizado do APS.

Variável	Descrição	Variável	Descrição
SP	Referência da variável de processo	k_1, k_2	Ganhos da lei de controle
Y	Variável de processo associada a T1.Level	B_1, B_2, B_3	Ganhos do ESO
e	Erro de estimação do ESO	ω_c	Largura de banda do controlador
z_1	Estimativa da variável de processo	ω_o	Largura de banda do ESO
z_3	Estimativa da perturbação generalizada	b_0	Ganho crítico de entrada
z_2	Estimativa da derivada da variável de processo	U	Ação de controle não saturada
OP	Ação de controle saturada aplicada a XV2.ManPos		

Figura 2: Equações implementadas no bloco do LADRC no APS.

Condition	Name	Status	Formula	Start	End	Description
	Eqn1	●	$B1 = 3*\omega_o$			Ganho do Observador
	Eqn2	●	$B2 = 3*\omega_o^2$			Ganho do Observador
	Eqn3	●	$B3 = \omega_o^3$			Ganho do Observador
	Eqn4	●	$K1 = \omega_c^2$			Ganho do Controlador
	Eqn5	●	$K2 = 2*\omega_c$			Ganho do Controlador
	Eqn6	●	$e = Y - z1$			Erro
	Eqn7	●	$der(z1) = z2 + B1*e$			ESO
	Eqn8	●	$der(z2) = z3 + B2*e + b0*U$			ESO
	Eqn9	●	$der(z3) = B3*e$			ESO
	Eqn11	●	$U = (K1*(SP - z1) - K2*z2 - z3) / b0$			Lei de Controle
	Eqn12	●	$OP = \min(\max(U, 0), 1)$			Lei de Controle

A Tabela 2 apresenta os parâmetros de sintonia adotados para o LADRC. Os ganhos do ESO e do controlador foram calculados a partir das larguras de banda ω_o e ω_c , respectivamente, as quais foram ajustadas empiricamente de modo a assegurar estabilidade da resposta em malha fechada, adequada rejeição de perturbações e consistência numérica na execução do ESO durante as simulações dinâmicas no APS.

O erro do ESO foi definido como $e = Y - z_1$, sendo utilizado na atualização dos estados estimados. As derivadas dos estados z_1 , z_2 e z_3 foram implementadas diretamente por meio das expressões em (2), permitindo a execução contínua do observador no ambiente dinâmico do APS. A partir dessas estimativas, foi calculada a ação de controle OP , limitada ao intervalo físico de operação da válvula XV2 entre 0 e 1. Por fim, o modelo customizado foi conectado à planta dinâmica por meio da leitura do nível de T1 e do envio do sinal de controle à válvula XV2, permitindo o fechamento da malha de controle de forma nativa no APS.

Tabela 2: Parâmetros de sintonia adotados para o LADRC no APS.

Parâmetro	Valor
ω_c	0,001 rad/s
ω_o	0,01 rad/s
b_0	$-2,17 \times 10^{-7}$

O valor negativo de b_0 reflete a relação inversa entre o sinal de controle aplicado à válvula XV2 e a dinâmica do nível de T1, uma vez que XV2 atua como válvula de saída do sistema.

2.3 Controlador PI baseado em Controle por Modelo Interno

Com o objetivo de avaliar o desempenho da estratégia LADRC proposta neste trabalho, utilizou-se como referência comparativa um controlador PI sintonizado pelo método de Controle por Modelo Interno (PI-IMC). A obtenção dos parâmetros do controlador PI-IMC requereu a definição prévia de um ponto de operação em regime permanente para o processo, estabelecido em 50% do nível máximo do tanque, com abertura de 50% da válvula de controle XV2.

Em seguida, a partir da resposta dinâmica obtida por meio da aplicação de um degrau descendente de amplitude igual a -5% na variável manipulada, ajustou-se um modelo de primeira ordem descrito por:

$$G_p(s) = \frac{-1,8753}{11220s + 1}, \quad (6)$$

Apesar de o sistema ser fisicamente composto por dois tanques acoplados, a dinâmica observada no ponto de operação analisado apresentou um comportamento dominante de primeira ordem. Dessa forma, a utilização de um modelo com essa estrutura mostrou-se suficiente para representar adequadamente a resposta do processo próximo a essa região e realizar a sintonia do controlador PI-IMC.

Com base no modelo identificado, adotou-se a abordagem de sintonia descrita em (Seborg et al., 2016), considerando como critério que a constante de tempo desejada em malha fechada correspondesse a 25% da constante de tempo do processo em malha aberta. A partir desse critério, obteve-se o seguinte controlador PI:

$$C(s) = -2,1330 \left(1 + \frac{1}{11220s} \right). \quad (7)$$

3 Resultados

Para a avaliação de desempenho dos controladores, foram considerados dois cenários sob condições operacionais idênticas. As simulações foram conduzidas com vazão de alimentação de 1 kg/s, utilizando água a temperatura de 24,85 °C e pressão de 1 atm, adotando-se tempo de amostragem de 1 s. No primeiro cenário, avaliou-se a resposta servo por meio de variações de diferentes magnitudes no valor de referência da variável de processo. No segundo cenário, analisou-se a capacidade de rejeição de perturbações mediante a aplicação de perturbações de $\pm 5\%$ na vazão de alimentação do sistema. Em ambos os casos, a válvula de controle XV1 se manteve fixada com uma abertura de 50%.

As Figuras 3 e 4 ilustram o desempenho do LADRC e do controlador PI-IMC nos cenários de resposta servo e rejeição de perturbações, respectivamente. No primeiro cenário, observa-se que o LADRC apresenta resposta mais rápida, caracterizada por menor tempo de acomodação em comparação ao PI-IMC, ainda que com pequeno sobressinal. Além disso, à medida que a referência é deslocada para pontos de operação mais distantes daquele utilizado na sintonia do PI-IMC, verifica-se degradação progressiva do desempenho desse controlador. Em contrapartida, o LADRC mantém comportamento mais consistente ao longo das diferentes condições operacionais, evidenciando maior capacidade de adaptação às variações do ponto de operação.

No segundo cenário, observa-se que o LADRC consegue rejeitar rapidamente perturbações positivas e negativas aplicadas à vazão de alimentação do sistema, restabelecendo o ponto de operação em menor intervalo de tempo. Em contraste, o controlador PI-IMC apresenta dinâmica de recuperação mais lenta, resultando em maior tempo de retorno ao regime permanente após a ocorrência das perturbações.

Figura 3: 1º Cenário (Resposta Servo)

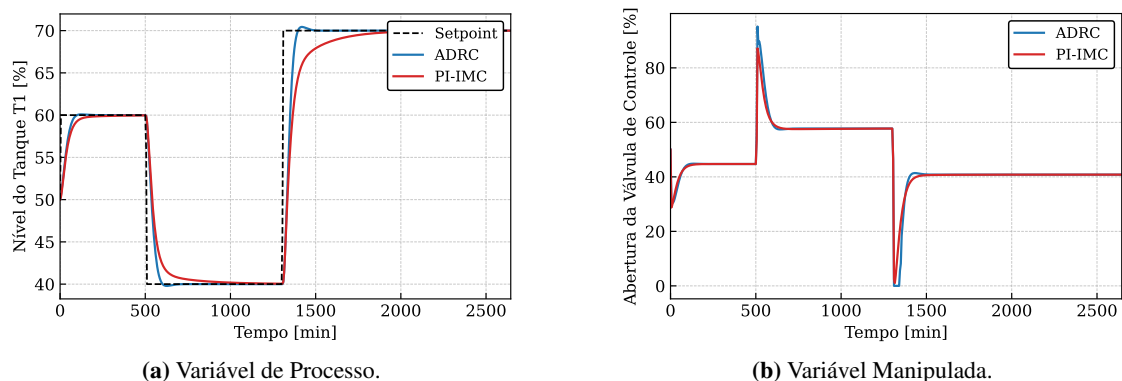
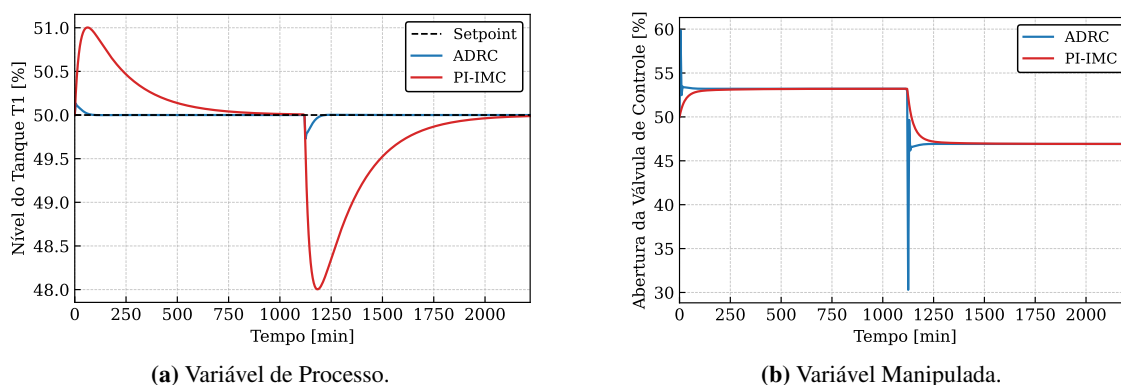


Figura 4: 2º Cenário (Rejeição de Perturbação de Entrada)



Em seguida, para avaliar quantitativamente os resultados, foram calculados alguns índices tradicionais de desempenho em controle (ver (Seborg et al., 2016; Skogestad, 2003) para mais detalhes). Para avaliar o desempenho da saída do sistema, foram considerados os seguintes índices: i) Integral do Erro Quadrático (ISE), ii) Integral do Erro Absoluto (IAE) e iii) Integral do Erro Absoluto ponderado no Tempo (ITAE). Para avaliar a magnitude do uso da variável manipulada, foi calculada a Variação Total da Ação de Controle (TV).

A partir dos índices de desempenho apresentados na Tabela 3, observa-se que, de forma geral, esses resultados corroboram as análises qualitativas observadas nas respostas temporais, evidenciando que a estratégia LADRC apresentou desempenho superior tanto em mudanças de referência quanto em cenários de rejeição de perturbações no processo avaliado. No primeiro cenário, associado à resposta servo, o LADRC reduziu os índices de erro em relação ao PI-IMC, especialmente para o ITAE, indicando menor persistência temporal do erro durante as transições entre pontos de operação. Apesar do leve aumento no índice TV, os resultados indicam que a maior intensidade de atuação do controlador contribuiu para uma resposta mais rápida e com menor tempo de acomodação.

No segundo cenário, relacionado à rejeição de perturbações, as diferenças entre os controladores tornaram-se ainda mais expressivas. O LADRC apresentou reduções significativas nos índices ISE, IAE e ITAE em comparação ao PI-IMC, refletindo sua maior capacidade de compensar rapidamente perturbações na vazão de alimentação do sistema. Entretanto, essa melhoria de desempenho foi acompanhada de aumento no índice TV, indicando maior intensidade de atuação da variável manipulada durante o processo de rejeição das perturbações.

4 Conclusões

Este trabalho apresentou a implementação de um Controlador Linear por Rejeição Ativa de Perturbações em um processo de dois tanques acoplados no AVEVA Process Simulation, utilizando funcionalidades nativas

Tabela 3: Índices de desempenho comparativos entre LADRC e PI-IMC.

Métrica	1º Cenário		2º Cenário	
	LADRC	PI-IMC	LADRC	PI-IMC
ISE	$3,216 \times 10^4$	$4,046 \times 10^4$	$1,658 \times 10^0$	$8,402 \times 10^2$
IAE	$2,112 \times 10^3$	$3,632 \times 10^3$	$1,262 \times 10^1$	$8,270 \times 10^2$
ITAE	$1,852 \times 10^6$	$3,654 \times 10^6$	$9,803 \times 10^3$	$7,972 \times 10^5$
TV	$2,239 \times 10^2$	$2,059 \times 10^2$	$6,500 \times 10^1$	$9,492 \times 10^0$

da plataforma, consolidando-o como uma plataforma viável para validação numérica de estratégias avançadas de controle aplicadas a processos industriais. Os resultados obtidos demonstraram que o LADRC apresentou desempenho superior ao controlador PI-IMC nos cenários avaliados, com respostas mais rápidas para alterações dos pontos de operação e melhor desempenho na rejeição de perturbações na vazão de alimentação.

Como continuidade deste trabalho, pretende-se investigar o impacto do ruído de medição no desempenho do LADRC, especialmente em relação à dinâmica do ESO e à sensibilidade da ação de controle. Também se destaca como perspectiva futura a avaliação da metodologia proposta em sistemas multivariáveis, considerando processos com maior grau de acoplamento e interação entre variáveis.

Agradecimentos: Os autores agradecem à AVEVA pela disponibilização de licenças de seus softwares, fundamentais para a realização deste estudo acadêmico, bem como pelo apoio institucional do Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas (PCMEC/UnB) e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE/UnB).

Referências

- Ahi, B., & Haeri, M. (2018). Linear active disturbance rejection control from the practical aspects. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 23(6), 2909–2919.
- Åström, K. J., & Hägglund, T. (2006). *Advanced PID Control*. ISA – The Instrumentation, Systems, Automation Society.
- Gao, Z. (2003). Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning. *Proc. American Control Conference*, 4989–4996.
- Han, J. (2009). From PID to active disturbance rejection control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(3), 900–906.
- Herbst, G. (2013). A simulative study on active disturbance rejection control (ADRC) as a control tool for practitioners. *Electronics*, 2(3), 246–279.
- Herbst, G. (2021). Transfer function analysis and implementation of active disturbance rejection control. *Control Theory and Technology*, 19(1), 19–34.
- International Energy Agency. (2019). *The Future of Hydrogen: Seizing Today's Opportunities* (rel. técn.). IEA. Paris, France.
- Meng, X., Yu, H., Zhang, J., Xu, T., Wu, H., & Yan, K. (2022). Liquid level control of four-tank system based on active disturbance rejection technology. *ISA Transactions*, 122, 146–162.
- Seborg, D. E., Edgar, T. F., Mellichamp, D. A., & Doyle, F. J. (2016). *Process Dynamics and Control* (4ª ed.). John Wiley & Sons.
- Skogestad, S. (2003). Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning. *Journal of Process Control*, 13(4), 291–309.
- Wu, Z., Li, D., Liu, Y., & Chen, Y. (2021). On transitioning from PID to ADRC in thermal power plants. *Control Theory and Technology*, 19(1), 3–18.