

CONTROLE HÍBRIDO TOLERANTE A FALHAS

Orlando Vinicyus Santos Martins¹; Mariella Maia Quadros²; Rodrigo Hiroshi Murofushi³

1 Orlando Vinicyus Santos Martins, Bolsista IFMG Campus Sabará, Engenharia de Controle e Automação, IFMG Campus Sabará, Sabará – MG; ovinicyus@gmail.com

2 Coorientador: Mariella Maia Quadros, Área de Controle e Processos Industriais, IFMG Campus Sabará, Sabará – MG; mariella.quadros@ifmg.edu.br

3 Orientador: Rodrigo Hiroshi Murofushi, Área de Controle e Processos Industriais, IFMG Campus Sabará, Sabará – MG; rodrigo.hiroshi@ifmg.edu.br

1 RESUMO

Ao projetar um sistema de controle para um processo industrial, deseja-se que ele seja confiável, seguro, que tenha a estabilidade garantida e que atenda às especificações de desempenho, com os menores valores de tempos de subida e de acomodação possíveis, com pequeno ou nenhum sobressinal, de modo que seja obtida uma resposta rápida e sem oscilações. Dessa forma, o controlador a ser implementado possui um importante papel, principalmente quando é o responsável por garantir a estabilidade e o desempenho do sistema sujeito à ocorrência de falhas. Mas o que se sabe é que na ocorrência de falhas de componentes do processo, como em sensores e atuadores, o desempenho do sistema de controle pode ser deteriorado, resultando em perda de eficiência, ou até mesmo em instabilidade. Desse modo, é importante que sejam projetados sistemas de controle tolerantes a falhas (FTC, do inglês *Fault Tolerant Control*), para que, mesmo na presença de falhas, possam garantir a estabilidade do sistema de malha fechada e assegurar um desempenho aceitável. Como estudo de caso, os controladores serão projetados para um sistema didático configurável de tanques acoplados compostos por dois tanques com capacidade de 3 litros cada e um reservatório de 5 litros. Assim, com o objetivo de obter um controlador capaz de ser tolerante a falhas e com um bom desempenho, foi realizado um estudo de controladores PI híbridos adaptativos, que são controladores que mudam de comportamento de acordo com novas circunstâncias e que possuem dinâmicas contínuas e discretas no tempo. Os controladores PI híbridos adaptativos tolerantes a falhas são propostos neste trabalho e, por meio de simulações computacionais, são comparados com outras abordagens para verificar seu desempenho. Os resultados das simulações mostraram que controladores PI híbrido e PI híbrido adaptativo apresentam menores valores de sobressinal e tempo de acomodação e que o controlador PI híbrido adaptativo é o mais adequado para controlar o sistema de tanques sujeito a falhas de atuadores, dentre os controladores explorados neste trabalho.

2 INTRODUÇÃO:

A crescente complexidade e automação de dispositivos e processos industriais exigem cada vez mais confiabilidade. No entanto, a ocorrência de falhas nos sensores e atuadores afeta negativamente a disponibilidade desses sistemas, implicando, na maioria dos casos, em prejuízos materiais e riscos à segurança. Neste contexto, a implementação de sistemas de controle tolerante a falhas (FTC, do inglês *Fault Tolerant Control*) é crucial para garantir a manutenção de certas propriedades do sistema, tais como estabilidade e desempenho (QUADROS et al., 2020; QUADROS et al., 2022).

Nos processos industriais, os controladores mais utilizados são do tipo PID (Proporcional-Integral-Derivativo), já que estão presentes em mais de 95% das malhas de controle, sendo a maioria do tipo PI (Proporcional-Integral) (ÅSTRÖM; HÄGGLUND, 1995; DESBOROUGH; MILLER, 2002). Isso se deve ao fato de serem suficientes para muitos problemas de controle, particularmente quando as dinâmicas do processo são simples e as especificações de desempenho pouco exigentes (ÅSTRÖM; HÄGGLUND, 2006). Dessa forma, esse tipo de controlador permite, com um algoritmo de realimentação relativamente simples, eliminar erros de regime permanente (para sinais de referência constantes) e obter um desempenho de malha fechada razoável em vários processos (NORMEY-RICO, 2007).

Geralmente, espera-se que o sistema de malha fechada seja robusto às incertezas do modelo utilizado para representar os processos de interesse, e que rejeite de forma satisfatória perturbações a que estão sujeitos. Além disso, deseja-se que o sistema tenha os menores valores de tempos de subida e de acomodação possíveis, com pequeno ou nenhum sobressinal (*overshoot*). Porém, ao deixar o sistema mais rápido, consequentemente o valor de sobressinal é aumentado, assim como o gasto de energia e a redução de margens de estabilidade, como pode ser visto em (MIDDLETON, 1991; GOODWIN et al., 2001; SERON et al., 2012).

Portanto, tendo em vista essas limitações, é necessário definir quais são as prioridades de controle e estabelecer um compromisso entre esses índices ao sintonizar um controlador linear que as atenda de forma equilibrada. Por outro lado, controladores não lineares com reiniciação ou chaveados, os chamados controladores híbridos, são capazes de superar as principais limitações dos controladores lineares, como discutido por Feuer et al. (1997), Beker et al. (2001) e Zhao et al. (2013), produzindo, por exemplo, uma resposta com baixos tempos de subida e acomodação e, ao mesmo tempo, com pequeno ou nenhum sobressinal. É importante ressaltar também que embora possa ser visto um aumento no estudo e aplicação de controladores híbridos nos últimos anos e de sua simples implementação, sua popularidade no ambiente industrial ainda não foi alcançada, devido ao próprio desconhecimento da abordagem e da complexidade matemática envolvida em sua formulação.

Já os sistemas dinâmicos híbridos ou, simplesmente, sistemas híbridos combinam comportamentos que são típicos de sistemas contínuos no tempo com os que são típicos de sistemas discretos no tempo (GOEBEL et al., 2009). Os controladores híbridos com reiniciação apresentam comportamento linear durante a maior parte do tempo, e tem seu estado reiniciado quando uma certa condição de salto é atendida, de acordo com seu projeto. Assim, um controlador PI híbrido se comporta como um PI convencional durante a execução do algoritmo de controle, mas também realiza reiniciações no estado do integrador, de modo a possibilitar uma considerável melhora no desempenho do sistema de malha fechada.

Nos trabalhos de Scola et al. (2017) Quadros et al. (2019) são propostos controladores PI híbridos adaptativos de simples implementação em processos industriais, capazes de fornecer uma maior eficiência energética que os controladores PI convencionais, além de rejeitar perturbações e incertezas paramétricas no modelo, presentes frequentemente nesses processos.

É importante ressaltar que esses trabalhos apresentam o projeto e a implementação dos controladores para condições nominais de funcionamento (sem a ocorrência de falhas). Portanto, este projeto propõe o desenvolvimento e implementação de controladores PI híbridos adaptativos semelhantes aos propostos nos trabalhos de Scola et al. (2017) e Quadros et al. (2019) em sistemas sujeitos a falhas de atuador. Ou seja, serão investigadas novas abordagens de FTC com utilização de controladores PI híbridos adaptativos com o objetivo de manter propriedades de estabilidade e desempenho de processos industriais, mesmo na presença de falhas de atuadores.

3 METODOLOGIA:

O projeto propõe um estudo teórico e revisão bibliográfica sobre abordagem de controle tolerante a falhas ativas e passivas e estudo dos controladores PI híbridos propostos por Scola et al., (2017) e Quadros et al., (2019). Além disso, serão desenvolvidas novas metodologias de controle tolerante a falhas com utilização dos controladores PI híbridos propostos por Scola et al., (2017) e Quadros et al., (2019) e por meio de simulações computacionais, será verificado o desempenho do controlador, sendo analisada sua possível aplicabilidade em processos industriais.

Para a aplicação dos controladores projetados será utilizado o sistema didático configurável de tanques acoplados. A plataforma possui dois tanques com capacidade de 3 litros cada e um reservatório (na base da plataforma) de 5 litros. Os níveis de água são medidos nos dois tanques com utilização de sensores ultrassônicos e a atuação é realizada por uma bomba hidráulica, cujo fluxo é direcionado totalmente ao tanque superior. A vazão da bomba é controlada por Arduino, por meio de PWM (Pulse Width Modulation) enviado à ponte H. A plataforma pode ser vista na Figura 1.



Figura 1: Sistema didático de tanques acoplados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES:

4.1 Modelagem do Sistema

Para a modelagem da planta foi considerada uma configuração que consiste no funcionamento do sistema com a utilização dos dois tanques e do reservatório, com a vazão da bomba direcionada para o tanque superior e o controle de nível a ser realizado no tanque inferior.

O método de modelagem utilizado é o de caixa preta, em que são aplicados degraus na entrada e as respostas temporais da saída são usadas para obtenção de um modelo matemático adequado. A partir das curvas resultantes, funções de transferência de primeira ordem com atraso foram aproximadas para cada um dos degraus e podem ser descritas como:

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-Ls}$$

em que K é o ganho estático da planta, T a constante de tempo e L o tempo de atraso. Após a determinação de cada modelo, foram realizadas simulações computacionais para verificação e comparação das respostas simuladas com as reais. Ao final, um modelo médio foi calculado e validado.

Como a bomba só apresenta vazão para valores de tensão superiores a 7,11V (equivalente a um valor de 151 aplicado à saída PWM do Arduino), o primeiro degrau possui esse valor inicial. Além disso, o último degrau possui valor final de 11,29V, pois a partir disso, o tanque superior se aproxima do limite máximo de altura de 20cm.

O modelo médio calculado para utilização no projeto dos controladores é dado por:

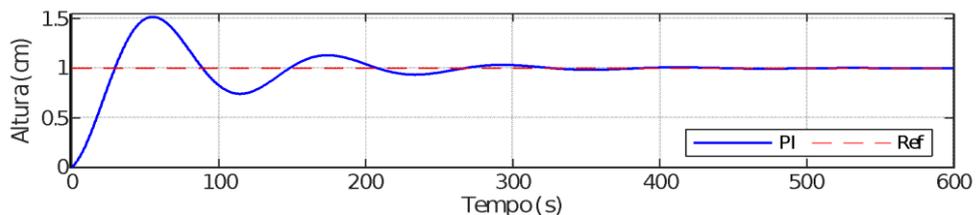
$$G(s) = \frac{0,1425}{95,0064s + 1} e^{-57,94s}$$

4.2 Sintonia de Controlador PI

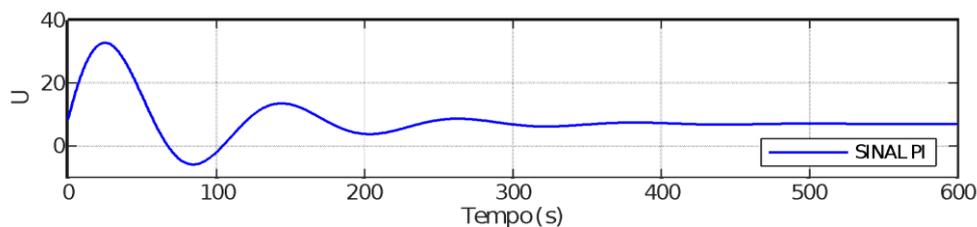
Neste trabalho, a sintonia de controladores PI utilizada será pelo método de alocação de polos para sistemas de primeira ordem sem tempo morto, uma vez que o preditor de Smith será utilizado para compensar o tempo morto. Dessa forma, as especificações de projeto são para obtenção de sobressinal de 50% e tempo de acomodação próximo de 345 segundos. Os ganhos do controlador PI são $K_p = 8,4531$ e $T_i = 4,3380$.

4.3 Controlador PI

Para verificar se as especificações de projeto foram atendidas, foi aplicado um degrau unitário de valor igual a 1cm no sistema de malha fechada. Os gráficos apresentados na Figura 2 mostram as respostas obtidas na simulação do sistema com o controlador calculado pelo método de alocação de polos.



(a)



(b)

Figura 2: Gráficos referentes a simulação do controlador PI linear: (a) Saída do sistema, (b) Sinal de controle.

Baseado na Figura 2, é possível observar no gráfico (a) um sobressinal de aproximadamente 50% e o tempo de acomodação de 311s. Dessa forma, pode ser considerado que o controlador PI projetado atende aos critérios de desempenho estabelecidas.

4.4 Controlador PI Híbrido

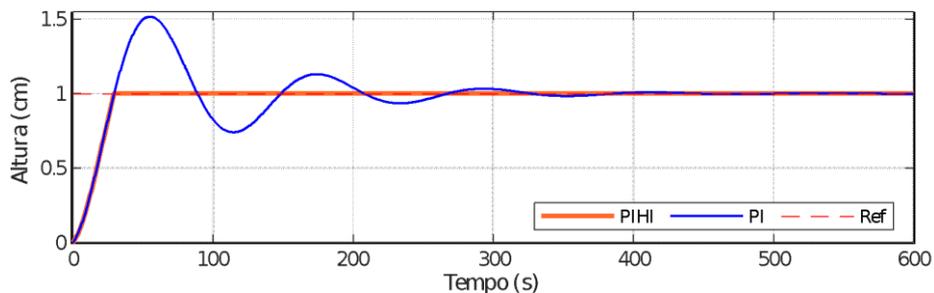
A partir do controlador PI linear obtido na Seção 4.2, foi projetado o controlador PI com reiniciação (híbrido). Então, os parâmetros que precisam ser determinados para implementação do controlador são K_p , K_i , ρ e a variável utilizada na reiniciação do integrador F . O ganho proporcional K_p é o mesmo utilizado no controlador linear e o ganho integral K_i é definido por K_p/T_i , em que T_i também é o mesmo do caso linear. Além disso, ρ foi utilizado como sendo igual a 1, pois pode ser determinado como sendo um número pequeno que representa o período de tempo a ser esperado para que seja permitido um novo salto, com o objetivo de evitar as soluções do tipo Zeno. Já a variável F é determinada como sendo o inverso do ganho estático da planta, ou seja, $1/K$.

Para o controlador PI híbrido foram considerados os seguintes valores para os parâmetros:

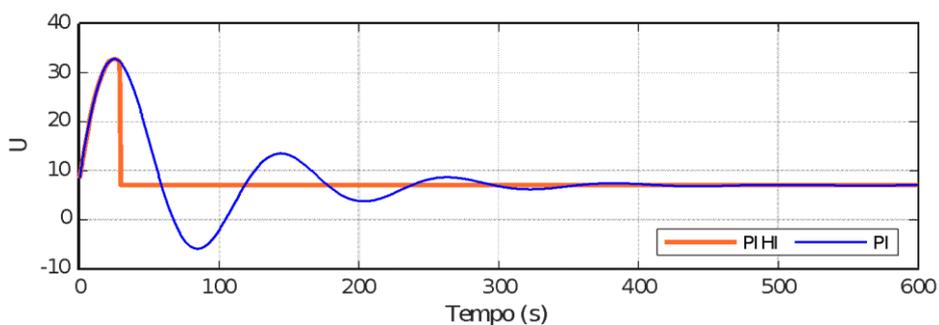
$$K_p = 8,4531; K_i = 1,9486; \rho = 1; F = 7,0175$$

Uma vantagem do controlador PI híbrido é fazer a resposta do sistema possuir um tempo de subida igual à do PI linear correspondente, no entanto sem apresentar sobressinal, além de diminuir o tempo de acomodação. Assim, tem-se como benefício maior eficiência energética, pois o valor de saída desejado é alcançado em menor tempo e com menos oscilações. Para verificar se as condições de desempenho foram atendidas, foi aplicado um degrau unitário de 1 cm no sistema linear em malha fechada com o controlador PI linear e com o PI híbrido.

A Figura 3 apresenta a resposta obtida na simulação do sistema linear com o controlador PI e com o controlador PI híbrido (PIHI).



(a)



(b)

Figura 3: Gráficos da simulação para os controladores PI e PI Híbrido. (a) Saída do sistema, (b) Sinal de controle.

Baseado no gráfico (a) da Figura 3, pode-se observar que até atingir o valor de referência, as respostas obtidas pelos controladores PI e PI híbrido são idênticas e, portanto, possuem o mesmo valor de tempo de subida. No entanto, depois que o valor da saída fica maior do que o valor de referência, o sistema com o controlador híbrido alcança quase que de imediato o valor desejado. Isso ocorre porque o sinal de controle reinicia para o valor de equilíbrio quando ultrapassa o valor de referência. Sendo assim, o sistema com o PI

híbrido não apresenta sobressinal. Comparando os controladores, conclui-se que o controlador PI híbrido é mais rápido que o controlador PI, pois possui menor tempo de acomodação e *overshoot* praticamente nulo, e por isso é mais eficiente.

4.5 Controlador PI, PI Híbrido e PI Híbrido com Adaptação (com falha de atuadores)

Os parâmetros para projetar o controlador PI híbrido adaptativo são os mesmos utilizados no projeto do controlador PI híbrido apresentado na seção anterior. A diferença é que para esse controlador o valor de reiniciação do integrador é adaptado (modificado) ao longo do tempo. Dessa forma, o controlador é capaz de rejeitar perturbações. Então, para testar e comparar os controladores projetados, foram simuladas falhas de atuadores.

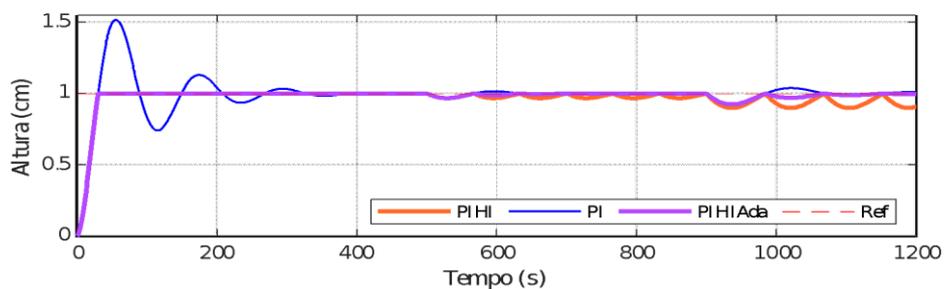
Primeiramente, foi representada a função de transferência no espaço de estados, como pode-se observar a seguir:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases}$$

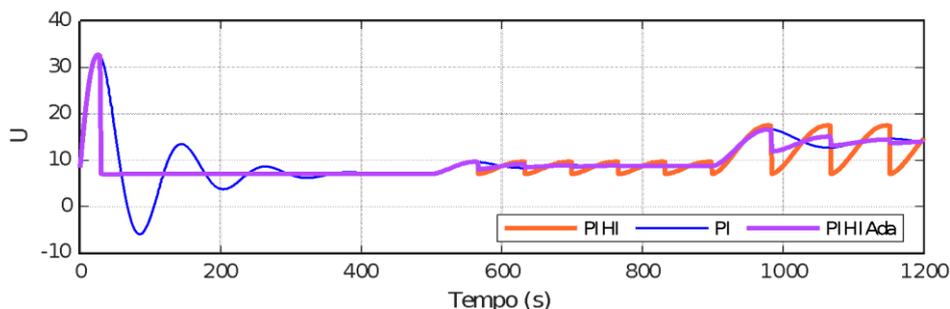
em que $A = -0,0106$, $B = 1$ e $C = 0,0015$.

Então, para simular as falhas do atuador é preciso modificar o valor da matriz B . Por exemplo, para que o atuador trabalhe apenas com 75% de sua eficiência, é necessário multiplicar o valor de B por 0,75.

Desse modo, a simulação foi feita variando o valor percentual da falha da seguinte forma. No primeiro momento, o valor de B entre o intervalo de tempo de 0 a 500 segundos é igual a $B = 1 \times 1$, sendo assim o atuador trabalha com 100% de eficiência (sem falhas). No segundo momento, o valor de B no intervalo de tempo de 501 a 900 segundos é igual a $B = 1 \times 0,80$, assim o atuador trabalha com 80% de eficiência (ou com falha de 20%). E no terceiro momento, o valor de B no intervalo de tempo de 901 a 1200 segundos é igual a $B = 1 \times 0,50$, dessa forma o atuador trabalha com 50% de eficiência (ou com falha de 50%).



(a)



(b)

Figura 4: Gráficos referentes à simulação de falha de atuador. (a) Saída do sistema, (b) Sinal de controle.

A Figura 4 mostra a resposta obtida na simulação do sistema linear com o controlador PI, com o controlador PI híbrido (PIHI) e controlador PI híbrido adaptativo (PIHIAda), utilizando também a estratégia apresentada anteriormente.

Com base no gráfico (a) da Figura 4, pode-se observar no primeiro momento (0 a 500s) um comportamento igual ao obtido na Seção 4.4. No segundo momento (501 a 900s) ocorre a falha de atuador equivalente a 20% de perda de eficiência e pode-se observar que o controlador PI apresenta oscilações

significativas, mas é capaz de manter o segmento de referência e de compensar as falhas. Já o controlador PI híbrido oscila obtendo ondulações próximas à referência, ao contrário do controlador PI híbrido adaptativo que devido à adaptação da lei de controle consegue manter o segmento de referência e compensar as falhas de atuador. No terceiro momento (901 a 1200s) ocorre a falha de atuador equivalente a 50% de perda de eficiência, ocorrendo o mesmo comportamento descrito no segundo momento, porém as respostas dos sistemas de controle apresentam oscilações de maior amplitude do que no momento anterior.

5 CONCLUSÃO:

Por meio das simulações computacionais, é possível concluir que os controladores PI híbrido e PI híbrido adaptativo em todos os testes de degrau unitário apresentam menores valores de sobressinal e tempo de acomodação que o PI linear, sendo mais rápidos e com menores oscilações, e como consequência, sendo mais econômicos. Também pode-se concluir, que o controlador PI híbrido adaptativo é o mais adequado para controlar o sistema de tanques, pois nos testes de seguimento de referência apresenta melhor desempenho que o controlador PI linear em todos os casos.

Também pode-se destacar que o controlador PI híbrido sem adaptação apresentou deficiência de desempenho quando o sistema apresenta falha de atuador, pois a resposta do sistema não consegue estabilizar no rastreamento de referência sem oscilações. Por outro lado, o controlador PI híbrido adaptativo, ao se deparar com as falhas de atuador acaba apresentando oscilações, mas rapidamente consegue estabilizar no valor de referência, por meio do ajuste do sinal de controle.

Assim, o PI híbrido adaptativo apresenta-se como um controlador eficiente para controle de sistemas sujeitos a falhas de atuador, apresentando o melhor desempenho quando comparados aos demais controladores explorados neste trabalho.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

BOUNEMEUR, Abdelhamid; CHEMACHEMA, Mohamed; ESSOUNBOULI, Najib. Indirect adaptive fuzzy fault-tolerant tracking control for MIMO nonlinear systems with actuator and sensor failures. **ISA transactions**, v. 79, p. 45-61, 2018.

COSME, Luciana Balieiro et al. A novel fault-prognostic approach based on interacting multiple model filters and fuzzy systems. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 66, n. 1, p. 519-528, 2018.

PIZZI, Noelia et al. Actuator fault tolerant control based on probabilistic ultimate bounds. **ISA transactions**, v. 84, p. 20-30, 2019.

NAKAMURA, Thiago A. et al. Adaptive fault detection and diagnosis using parsimonious Gaussian mixture models trained with distributed computing techniques. **Journal of the Franklin Institute**, v. 354, n. 6, p. 2543-2572, 2017.

ÅSTRÖM, Karl Johan; HÄGGLUND, Tore. **PID controllers: theory, design, and tuning**. Research Triangle Park, NC: Instrument society of America, 1995.

DESBOROUGH, Lane; MILLER, Randy. Increasing customer value of industrial control performance monitoring-Honeywell's experience. In: **AIChE symposium series**. New York; American Institute of Chemical Engineers; 1998, 2002. p. 169-189.

ÅSTRÖM, Karl Johan; HÄGGLUND, Tore; ÅSTROM, Karl J. **Advanced PID control**. Research Triangle Park: ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006.

NORMEY-RICO, Julio E. **Control of dead-time processes**. Springer Science & Business Media, 2007.

MIDDLETON, Rick H. Trade-offs in linear control system design. **Automatica**, v. 27, n. 2, p. 281-292, 1991.

GOODWIN, Graham C. et al. **Control system design**. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2001.

SERON, Maria M.; BRASLAVSKY, Julio H.; GOODWIN, Graham C. **Fundamental limitations in filtering and control**. Springer Science & Business Media, 2012.

FEUER, A.; GOODWIN, G. C.; SALGADO, M. Potential benefits of hybrid control for linear time invariant plants. In: **Proceedings of the 1997 American Control Conference (Cat. No. 97CH36041)**. IEEE, 1997. p. 2790-2794.

BEKER, Orhan; HOLLLOT, Christopher V.; CHAIT, Yossi. Plant with integrator: an example of reset SUAP: Sistema Unificado de Administração Pública
https://suap.ifmg.edu.br/pesquisa/imprimir_projeto/965/ 10 of 16 22/04/2021 17:18 control overcoming limitations of linear feedback. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 46, n. 11, p. 1797-1799, 2001.

ZHAO, Guanglei et al. Open problems in reset control. In: **52nd IEEE Conference on Decision and Control**. IEEE, 2013. p. 3326-3331.

GOEBEL, Rafal; SANFELICE, Ricardo G.; TEEL, Andrew R. Hybrid dynamical systems. **IEEE control systems magazine**, v. 29, n. 2, p. 28-93, 2009.

SCOLA, Ignacio Rubio; QUADROS, Mariella M.; LEITE, Valter J. S. Robust Hybrid PI Controller with a Simple Adaptation in the integrator reset state. **IFAC-PapersOnLine**, v. 50, n. 1, p. 1457-1462, 2017.

QUADROS, Mariella M. et al. A plug-in procedure for hybridization of PI controllers. **IFACPapersOnLine**, v. 52, n. 1, p. 892-897, 2019.

QUADROS, Mariella M. et al. Fault tolerant control for linear parameter varying systems: An improved robust virtual actuator and sensor approach. **ISA Transactions**, v. 104, p.356-369, 2020.

QUADROS, Mariella M. et al. Robust fault hiding approach for T–S fuzzy systems with unmeasured premise variables. **Information Sciences**, v. 589, p. 690-715, 2022.

NORMEY-RICO, Julio E. **Control of dead-time processes**. Springer Science & Business Media.2007.

ASTROM, K. J.; WITTENMARK, B. **Adaptive Control**. [S.l.]: Addison-Wesley Publishing Company, 1995.

STEPHANOPOULOS, G. Chemical Process Control: **An introduction to the theory and practice**. [S.l.]: Prentice Hall International Editions, 1984.

ZACCARIAN, L.; NESIC, D.; TEEL, A. R. First order reset elements and the Clegg integrator revisited. In: **AMERICAN CONTROL CONFERENCE, 2005. PROCEEDINGS OF THE 2005**. Anais. . . [S.l.: s.n.], 2005.