

AMBIENTE PARA ANÁLISE DE ROBUSTEZ DE ALGORITMOS DE CONTROLE

MARCELO BRANDÃO DOS SANTOS*, ALDAYR DANTAS DE ARAÚJO*

**Laboratório de Acionamento, Controle e Instrumentação
Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte
59072-970 Natal, RN, Brasil*

Emails: brandao@dca.ufrn.br, aldayr@dca.ufrn.br

Abstract— This paper presents a program for robustness analysis of control algorithms. Several control techniques can be simultaneously simulated, and adversities found in the "field" can be introduced in the simulations. The PI Control, the Model Reference Adaptive Control (MRAC), the Adaptive Pole Placement Control (APPC), the Variable Structure - Model Reference Adaptive Control (VS-MRAC), the Variable Structure - Adaptive Pole Placement Control (VS-APPC) and the Dual Mode Adaptive Robust Control (DMARC) can be compared by simulations. The analysis of robustness for disturbances, transport delay, actuator saturation, dead zone, parametric variations, unmodeled dynamics and measurement noise was made.

Keywords— Control Algorithms, Robustness, Simulation Environment and Variable Structure System.

Resumo— Este artigo apresenta um ambiente para análise de robustez de algoritmos de controle. Diversas técnicas de controle podem ser simuladas simultaneamente, e adversidades encontradas no "campo" podem ser incrementadas nas simulações. O controlador PI, o Controlador Adaptativo por Modelo de Referência (MRAC), o Controlador Adaptativo por Posicionamento de Pólos (APPC), o Controlador Adaptativo por Modelo de Referência e Estrutura Variável (VS-MRAC), o Controlador Adaptativo por Posicionamento de Pólos e Estrutura Variável (VS-APPC) e o Controlador Adaptativo Robusto em Modo Dual (DMARC) podem ser comparados em simulações. A análise de robustez a perturbações, ao atraso de transporte, a saturação do atuador, a zona morta, a variações paramétricas, a dinâmica não modelada e a ruídos de medida foi realizada.

Keywords— Algoritmos de Controle, Robustez, Ambiente de Simulação e Sistema com Estrutura Variável.

1 Introdução

A simulação de um sistema é uma etapa importante em um projeto de sistema de controle. Nesta fase, o processo é modelado, os cálculos teóricos do projeto do controlador são implementados e o sistema de controle é testado. Usualmente, alguns fatores existentes no "campo" são desconsiderados e isto pode distanciar o sistema simulado do sistema real.

Algoritmos de controle podem gerar resultados satisfatórios em simulações, e ao serem implementados na prática os resultados obtidos podem ser bastante diferentes se o sistema não for bem representado no ambiente de simulação. Assim, o estudo detalhado do processo em "campo" é importante na representação do sistema, e consequentemente, para que se possa obter resultados na prática semelhantes aos das simulações.

Neste trabalho, foi desenvolvido um ambiente de simulação para análise de robustez de algoritmos de controle. Podem ser simulados, simultaneamente, o controlador P, PI, PID, PI-D, MRAC na estrutura direta utilizando o método do gradiente, APPC na estrutura indireta utilizando o método polinomial, VS-MRAC na estrutura direta, VS-APPC na estrutura indireta e DMARC.

Alguns aspectos que podem estar presentes em um sistema e, usualmente, não são analisados em simulações foram incluídos. Foram inseridos no ambiente de simulação perturbações no sinal de controle e na saída da planta, limites no atuador, atraso de transporte no sinal de controle e na

saída da planta, região de zona morta, dinâmica não modelada, variações paramétricas e ruído na leitura do sinal de saída. A introdução de um desses fatores em um sistema pode levá-lo até a instabilidade, como pode ser visto em Rohrs et al. (1985).

Existem alguns trabalhos que comparam resultados entre algoritmos de controle, enfatizando robustez em determinadas adversidades, como em Vandeursen and Peperstraete (1996) e Alexandre and Trahan Jr. (2001). É desejado, neste trabalho, comparar diversos algoritmos de controle, principalmente algoritmos que utilizam estrutura variável, e incluir a possibilidade de analisar as condições de operação adversas citadas anteriormente. Assim o usuário pode configurar suas simulações de acordo com o sistema a ser analisado.

Esse ambiente de simulação foi desenvolvido sobre a ferramenta GUI do Matlab® MathWorks. Este tem uma interface gráfica amigável, e a programação foi feita na linguagem de programação do Matlab (linguagem de alto nível). O usuário tem a possibilidade de incluir novas técnicas de controle apenas acrescentando as leis do sistema de controle.

Foram analisados, neste ambiente de simulação, os desempenhos dos controladores PI, MRAC, APPC, VS-MRAC, VS-APPC e DMARC projetados para um sistema de 1ª ordem.

2 Algoritmos de Controle

O controlador PID é ainda hoje, apesar da existência de inúmeras técnicas de controle mais sofisticadas, o mais utilizado na indústria. O algoritmo discreto do PID que foi implementado no ambiente de simulação foi:

$$\begin{aligned} P &= K \cdot e \\ I &= I_{ant} + (K \cdot Ta \cdot e_{ant})/T_i \\ D &= T_d \cdot (D_{ant} + K \cdot h \cdot (e - e_{ant}))/ (N \cdot Ta + T_d) \\ u &= P + I + D \end{aligned}$$

onde e é o erro entre o sinal de referência e a saída da planta, e_{ant} é o erro no momento anterior, K é o ganho proporcional, P é a ação proporcional no sinal de controle, T_i é a constante de tempo integrativa, I é a parte da ação integrativa no sinal de controle, I_{ant} é a ação integrativa no momento anterior, Ta é o período de amostragem, D é a ação derivativa no sinal de controle, D_{ant} é a ação derivativa no momento anterior, N é a constante do filtro utilizada na parte derivativa, T_d é a constante de tempo derivativa e u é o sinal de controle.

O projeto de um sistema de controle na presença de incertezas significativas e, ou adversidades externas, requer um sistema adaptativo e robusto. Intuitivamente, adaptação em controle quer dizer que o controlador pode modificar seu comportamento em resposta a mudanças na dinâmica do processo e a perturbações (Astrom and Wittenmark, 1995).

Um sistema de controle é robusto quando tem baixa sensibilidade, é estável sobre um intervalo de variações paramétricas e seu desempenho é mantido na presença de um conjunto de mudanças nos parâmetros do sistema. Não ser robusto é ter sensibilidade aos efeitos não considerados na fase de análise e projeto, por exemplo: distúrbios, ruído de medição e dinâmica não modelada (Dorf and Bishop, 2001).

A teoria de controle adaptativo tem sido usada como uma das possíveis soluções no projeto de sistemas de controle para plantas com dinâmica muito complexa ou parcialmente desconhecida. As estruturas denominadas MRAC e APPC, também conhecida como self-tuning (auto ajustável), são consideradas uma das principais abordagens desta área (Astrom and Wittenmark, 1995).

A estrutura de controle adaptativo é classificada em indireta e direta. No controle adaptativo indireto (também chamado de controle adaptativo explícito) os parâmetros da planta são estimados on-line e usados para calcular os parâmetros do controlador. No controle adaptativo direto, o modelo da planta é parametrizado em termos dos parâmetros do controlador, os quais são estimados diretamente sem cálculos intermediários envolvendo estimativas dos parâmetros da planta. É também chamado de controle adaptativo implícito por ser baseado na estimação de um modelo

implícito da planta (Ioannou and Sun, 1996).

O MRAC tem como objetivo levar o sinal de saída da planta a acompanhar o sinal de saída de um modelo de referência. O erro entre as saídas do modelo e da planta é utilizado no algoritmo de adaptação para ajustar os parâmetros do controlador de tal forma que este erro tenda a zero.

Neste trabalho, é abordado o MRAC na forma direta. E o método utilizado para projetar a lei de controle é o método do gradiente. O algoritmo do MRAC utilizado em um sistema de 1ª ordem é dado por:

$$\begin{aligned} \dot{y}_m &= -a_m \cdot y_m + b_m \cdot u \\ e_o &= y - y_m \\ \dot{\theta}_1 &= -\gamma_1 \cdot e_o \cdot y \\ \dot{\theta}_2 &= -\gamma_2 \cdot e_o \cdot r \\ u &= \theta_1 \cdot y + \theta_2 \cdot r \end{aligned}$$

onde y_m é a saída do modelo de referência, a_m e b_m são os coeficientes do modelo de referência, θ_1 e θ_2 são parâmetros do controlador, γ_1 e γ_2 são os ganhos adaptativos, y é o sinal de saída da planta, e_o é o erro entre y e y_m , r é o sinal de referência e u é o sinal de controle.

O APPC é derivado do controle por posicionamento de pólos (PPC) e de problemas de regulação usados no caso de plantas lineares invariantes no tempo (LTI) com parâmetros desconhecidos. No APPC a lei de controle é modificada de acordo com sinais de referência e de saída da planta, com o intuito de levar os pólos em malha fechada para os valores desejados no projeto.

Neste trabalho, é abordado o APPC na forma indireta com técnica de projeção. E o método utilizado para projetar a lei de controle é o método polinomial. O algoritmo do APPC utilizado em um sistema de 1ª ordem é dado por:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{y}} &= -a_m \cdot \hat{y} + (a_m - \hat{a}) \cdot y + \hat{b} \cdot u \\ e_o &= y - \hat{y} \\ \dot{\hat{a}} &= -\gamma_1 \cdot e_o \cdot y, \\ \dot{\hat{b}} &= \gamma_2 \cdot e_o \cdot u, \quad se \quad \left| \hat{b} \geq b_0 \right| \quad e \quad e_o \cdot u \cdot \text{sgn}(\hat{b}) \geq 0 \\ \hat{b} &= \hat{b}_{ant}, \quad se \quad \left| \hat{b} \leq b_0 \right| \quad ou \quad e_o \cdot u \cdot \text{sgn}(\hat{b}) \leq 0 \\ \hat{p}_1 &= \frac{2 \cdot (-a_m) - \hat{a}}{\hat{b}} \\ \hat{p}_0 &= \frac{(-a_m)^2}{\hat{b}} \\ P_{appc} &= \hat{p}_1 \cdot e \\ I_{appc} &= I_{ant} + \hat{p}_0 \cdot e_{ant} \cdot Ta \\ u &= P_{appc} + I_{appc} \end{aligned}$$

onde \hat{y} é a saída estimada da planta, a_m é o pólo desejado de malha fechada, e_o é o erro de estimação, y é o sinal de saída da planta, \hat{a} e \hat{b} são os parâmetros estimados da planta, \hat{b}_{ant} é o parâmetro \hat{b} estimado no momento anterior, b_0 é o valor inicial de \hat{b} , γ_1 e γ_2 são os ganhos adaptativos, e e e_{ant} são, respectivamente, o erro entre o sinal de referência e a saída da planta no instante atual e anterior, \hat{p}_0 e \hat{p}_1 são parâmetros do controlador estimados, Ta é o período de amostragem,

u é o sinal de controle, e sgn é uma função que extrai o sinal de um termo.

A teoria de estrutura variável foi aplicada nas leis adaptativas do MRAC, do APPC, surgindo o VS-MRAC e VS-APPC, e no DMARC. Neste método, as funções de chaveamento das variáveis de controle devem ser projetadas de modo a restringir a dinâmica do sistema a uma Superfície Deslizante.

As principais características de um controle adaptativo com estrutura variável são: a rapidez no regime transitório e a robustez a variações paramétricas e perturbações, dentro de uma faixa de tolerância. Contudo tem também como característica um chaveamento em alta frequência no sinal de controle (VS-MRAC e DMARC) ou na lei de estimação (VS-APPC), fenômeno conhecido como chattering.

A técnica de estrutura variável é analisada, neste trabalho, aplicada nas leis de adaptação do MRAC na estrutura direta, do APPC na estrutura indireta e do DMARC.

O VS-MRAC é robusto a variações paramétricas da planta e a perturbações como pode ser visto em Hsu and Costa (1989); Hsu (1990); Araújo and Hsu (1990); Araújo (1993) e Hsu et al. (1994). Um algoritmo do VS-MRAC utilizado em um sistema de 1ª ordem é dado por:

$$\begin{aligned}\dot{y}_m &= -a_m \cdot y_m + b_m \cdot u \\ e_o &= y - y_m \\ \dot{\theta}_1 &= -\gamma_1 \cdot \text{sgn}(e_o \cdot y) \\ \dot{\theta}_2 &= -\gamma_2 \cdot \text{sgn}(e_o \cdot r) \\ u &= \theta_1 \cdot y + \theta_2 \cdot r + \theta_{1nom} \cdot y + \theta_{2nom} \cdot r\end{aligned}$$

onde y_m é a saída do modelo de referência, a_m e b_m são os coeficientes do modelo de referência, θ_1 e θ_2 são parâmetros do controlador, θ_{1nom} e θ_{2nom} são parâmetros nominais do controlador, γ_1 e γ_2 são os ganhos adaptativos, y é o sinal de saída da planta, e_o é o erro entre y e y_m , r é o sinal de referência e u é o sinal de controle.

A teoria do VS-APPC e alguns resultados satisfatórios podem ser vistos em Silva Jr. et al. (2004); Silva Jr. and Araújo (2005a) e Silva Jr. and Araújo (2005b). O algoritmo do VS-APPC aplicado a um sistema de 1ª ordem é dado por:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{y}} &= -a_m \cdot \hat{y} + (a_m - \hat{a}) \cdot y + \hat{b} \cdot u \\ e_o &= y - \hat{y} \\ \hat{a} &= -\bar{a} \cdot \text{sgn}(e_o \cdot y), \quad \bar{a} > |a| \\ \hat{b} &= \bar{b} \cdot \text{sgn}(e_o \cdot u) + b_{nom}, \quad \bar{b} > |b - b_{nom}| \\ \hat{p}_1 &= \frac{2 \cdot (-a_m) - \hat{a}}{\bar{b}} \\ \hat{p}_0 &= \frac{(-a_m)^2}{\bar{b}} \\ P_{vsappc} &= \hat{p}_1 \cdot e \\ I_{vsappc} &= I_{ant} + \hat{p}_0 \cdot e_{ant} \cdot T_a \\ u &= P_{vsappc} + I_{vsappc}\end{aligned}$$

onde a_m é o pólo desejado de malha fechada, e_o é o erro de estimação, y é o sinal de saída da planta, \hat{y}

é a saída estimada, \hat{a} e \hat{b} são os parâmetros estimados da planta, \bar{a} e \bar{b} são constantes da lei de adaptação, b_{nom} é o valor nominal para o parâmetro \bar{b} , e e e_{ant} são, respectivamente, o erro entre o sinal de referência e a saída da planta no instante atual e anterior, \hat{p}_0 e \hat{p}_1 são parâmetros do controlador estimados, T_a é o período de amostragem e u é o sinal de controle.

O DMARC incorporou em seu algoritmo as vantagens de desempenho transitório do VS-MRAC com as propriedades de regime permanente do MRAC. Desta forma, obtém-se um sistema de controle robusto a incertezas paramétricas e perturbações externas, com desempenho rápido e pouco oscilatório durante o transitório e um sinal de controle suave em regime permanente (Cunha et al., 2005).

Resultados satisfatórios foram obtidos utilizando o DMARC como pode ser visto em Cunha et al. (2002) e Cunha et al. (2005). Um algoritmo do DMARC aplicado a um sistema de 1ª ordem é dado por:

$$\begin{aligned}\dot{y}_m &= -a_m \cdot y_m + b_m \cdot u \\ e_o &= y - y_m \\ \mu &= e \left(\frac{-e_o^2}{l_{e_o}} \right) \\ \theta_{v1} &= -\bar{\theta}_{v1} \cdot \text{sgn}(e_o \cdot y) \\ \theta_{v2} &= -\bar{\theta}_{v2} \cdot \text{sgn}(e_o \cdot r) \\ \dot{\theta}_1 &= -\sigma \cdot \theta_1 - \sigma \cdot e_o \cdot y \\ \dot{\theta}_2 &= -\sigma \cdot \theta_2 - \sigma \cdot e_o \cdot r \\ \theta_{f1} &= \theta_1 \cdot \mu + \theta_{v1} \cdot (1 - \mu) \\ \theta_{f2} &= \theta_2 \cdot \mu + \theta_{v2} \cdot (1 - \mu) \\ u &= \theta_{f1} \cdot y + \theta_{f2} \cdot r\end{aligned}$$

onde a_m e b_m são os coeficientes do modelo de referência, y_m é o sinal de saída do modelo de referência, y é o sinal de saída da planta, e_o é o erro entre y e y_m , l_{e_o} é um parâmetro a ser ajustado, μ é um parâmetro que gera a transição do VS-MRAC para o MRAC, θ_{v1} e θ_{v2} são parâmetros do controlador relacionados ao VS-MRAC, $\bar{\theta}_{v1}$ e $\bar{\theta}_{v2}$ são constantes da lei de adaptação relacionados ao VS-MRAC, σ é um fator de esquecimento, θ_1 e θ_2 são parâmetros do controlador relacionados ao MRAC, θ_{f1} e θ_{f2} são os parâmetros utilizados na lei de controle, r é o sinal de referência e u é o sinal de controle.

Quando e_o se torna razoavelmente elevado, $\mu \rightarrow 0$ e o DMARC se comporta como o VS-MRAC. Quando $e_o \rightarrow 0$ ($\mu \rightarrow 1$), o DMARC se comporta como um MRAC com fator de esquecimento e normalização.

3 Ambiente de Simulação

O ambiente de simulação contém 6 janelas. Na principal (Figuras 1, 2 e 3), o usuário especifica o modelo da planta, o sinal de referência, o tempo de simulação, o passo de integração e o período de

amostragem (Figura 1). É possível simular algoritmos para plantas de 1ª e 2ª ordem, descrevendo os coeficientes da função de transferência ou os pólos e zeros.

Figura 1: Parâmetros da Simulação.

Além disso, é opcional incorporar nas simulações perturbações no sinal de controle e na saída da planta (Figura 2), limites do atuador, região de zona morta, atraso de transporte no sinal de controle e na saída da planta, variações paramétricas, dinâmica não modelada e ruído de medição (Figura 3).

Figura 2: Parâmetros dos Sinais de Perturbação.

Figura 3: Parâmetros das Condições Adversas de Operação.

O passo seguinte é escolher quais os controladores a serem simulados (Figura 4). Estes estão agrupados em 3 painéis: controlador PID, controlador adaptativo, controlador adaptativo com estrutura variável. Se pelo menos um controlador for escolhido em um painel a janela relativa a esse painel é executada.

Posteriormente, o usuário deve especificar os parâmetros do controlador escolhido. As simulações são processadas e os resultados são apresentados na janela de resultados (Figura 5). Nas simulações o método de integração utilizado é o método de Euler (fornece melhores resultados com estrutura variável).

Figura 4: Janela com os Possíveis Controladores.

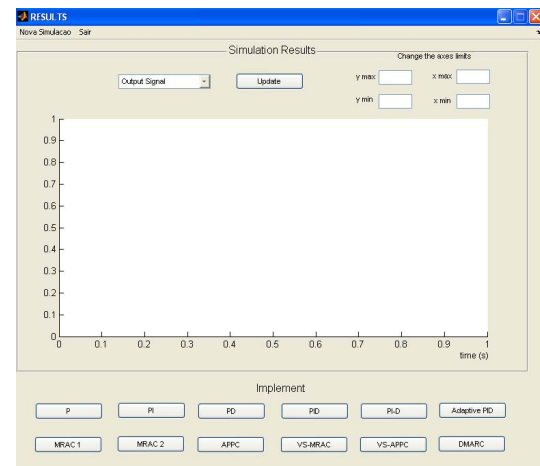


Figura 5: Janela do Resultado da Simulação.

Além do sinal de saída da planta, os sinais de controle e do erro entre a referência e saída podem ser analisados nesta janela. Após verificar os resultados das simulações, se for desejado implementar o controlador posteriormente, o usuário escolhe o sistema de controle de sua preferência (apertando um botão) e os parâmetros dos controladores são armazenados em um arquivo.

4 Resultados

A análise de robustez em algoritmos de controle foi realizada para um sistema de 1ª ordem, representado pela função de transferência abaixo.

$$G(s) = \frac{1}{s + 1}$$

Os controladores PI, MRAC, APCC, VS-MRAC, VS-APCC e DMARC foram projetados para rastrear um degrau unitário e ter um tempo de resposta menor ou igual a 5 s. Os valores dos parâmetros destes controladores foram:

- Controlador PI: $K=1, T_i=1$;
- MRAC: $a_m=1.5, b_m=1.5, \gamma_1=1, \gamma_2=1$;
- APCC: $a_m=1.5, \gamma_1=1, \gamma_2=1, \hat{b}_0=1.5, \hat{b}_0=0$ (valor iniciais);

- VS-MRAC: $a_m=1.5$, $b_m=1.5$, $\gamma_1=1$, $\gamma_2=1$, $\theta_{1nom}=0$, $\theta_{2nom}=0$;
- VS-APPC: $a_m=1.5$, $\bar{a}=1.2$, $\bar{b}=1.2$, $\hat{a}_0=0$, $\hat{b}_0=0$, $b_{nom}=1.5$;
- DMARC: $a_m=1.5$, $b_m=1.5$, $l_{e0}=0.0003$, $\bar{\theta}_{v1}=1$, $\bar{\theta}_{v2}=1$, $\sigma=0.01$.

As simulações foram executadas sem as adversidades opcionais. Os parâmetros das simulações foram: tempo de simulação 30 s, passo de integração 0.01 s, período de amostragem 0.02 s e as condições iniciais do sinal de saída igual a zero.

Analisando a resposta do sistema para cada controlador na Figura 6, verifica-se que todos os controladores obtiveram desempenho satisfatório.

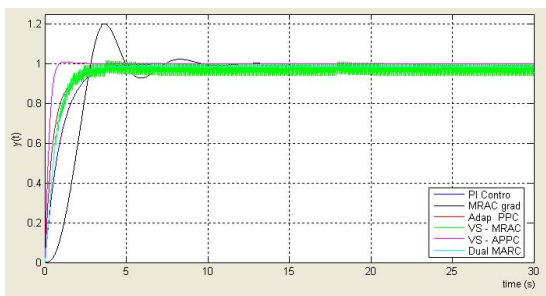


Figura 6: Resultado da Simulação 1.

Na prática, esse sistema ideal não existe. É desejado que os desempenhos dos controladores não sejam alterados quando estes forem implementados. Logo, as adversidades encontradas no "campo" devem ser introduzidas para analisar a robustez dos algoritmos de controle.

O sistema foi novamente simulado com o acréscimo de uma perturbação no sinal de controle, com amplitude de 0.5, entre 10 s e 15 s, uma variação paramétrica para 200% do valor do pólo após 15 s e um ruído de medição aleatório em torno de $\pm 2\%$ do valor do sinal de saída durante toda a simulação. Os sinais de saída da planta podem ser vistos na Figura 7.

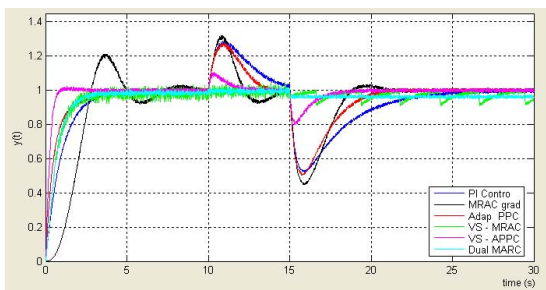


Figura 7: Resultado da Simulação 2.

Os controladores VS-MRAC, VS-APPC e DMARC foram robustos à perturbação e à variação paramétrica. O controlador PI, APPC e

MRAC foram menos robustos que os controladores anteriores.

O sistema foi simulado também introduzindo uma dinâmica não modelada. A função de transferência que representa a dinâmica não modelada é dada por:

$$G(s) = \frac{20}{s^2 + 10s + 20}$$

Os sinais de saída da planta podem ser vistos na Figura 8.

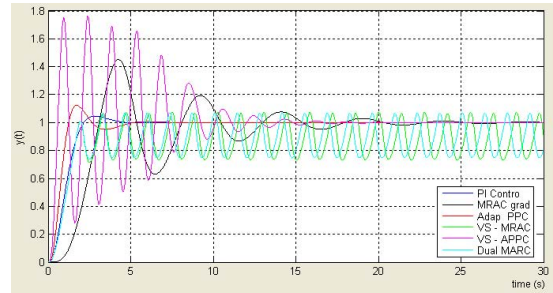


Figura 8: Resultado da Simulação 3.

O controlador PI e o APPC foram robustos às adversidades impostas, enquanto que as saídas do MRAC e APPC tiveram um regime transitório bastante lento. Os sinais de saída do VS-MRAC e do DMARC ficaram oscilando em torno da referência.

Por último, foi simulado um atraso de transporte no sinal de controle em 0.02 s e uma perturbação no sinal de saída da planta, com amplitude de 0.5, durante toda a simulação. Os sinais de saída da planta podem ser vistos na Figura 9.

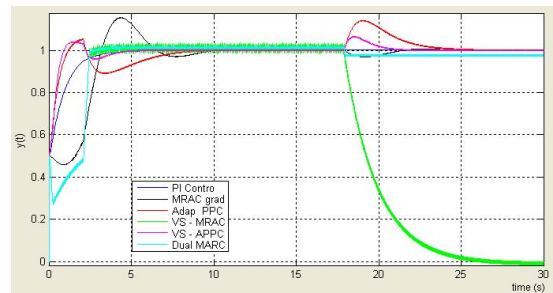


Figura 9: Resultado da Simulação 4.

O controlador PI, MRAC, APPC, VS-APPC e DMARC foram robustos às adversidades impostas, porém os sinais de saída do MRAC, APPC e VS-APPC saíram da referência no período entre 18 s e 21 s e o sinal de saída do DMARC ficou com um erro em regime permanente. O sinal de saída do VS-MRAC teve um transitório lento, ficou na referência até 17 s e depois o sinal de saída foi para zero.

Foi observado que a depender da adversidade simulada e de certos limites, determinados controladores obtiveram melhor desempenho que outros.

Logo, a avaliação de robustez de algoritmos de controle é um fator necessário em um projeto de um sistema de controle.

5 Conclusões

Neste artigo, foi apresentado um ambiente para análise de robustez de algoritmos de controle. Os controladores PI, MRAC, APPC, VS-MRAC, VS-APPC e DMARC foram aplicados em um sistema de 1ª ordem e simulados simultaneamente. Algumas adversidades encontradas no "campo" foram introduzidas e os resultados foram analisados.

Através das simulações pode-se concluir que um controlador pode ser robusto a um fator e não ser a outro. Então, um estudo detalhado do sistema deve ser realizado para que se possa escolher o controlador mais adequado para cada situação.

Este ambiente também pode ser utilizado no meio acadêmico demonstrando robustez de algoritmos de controle e as possíveis condições de operação adversas encontradas na prática.

Outros algoritmos de controle estão sendo implementados, como: PID adaptativo, MRAC com fator de esquecimento e normalização e controlador preditivo. A continuação deste trabalho será a comunicação deste ambiente de simulação com o meio externo. Assim, ao finalizar uma simulação o usuário poderá implementar o algoritmo de controle escolhido e comparar com resultados práticos.

Agradecimentos

Este trabalho contou com o apoio da CAPES.

REFERÊNCIAS

Alexandre, C. W. and Trahan Jr., R. E. (2001). *A comparison of Traditional and Adaptive Control Strategies for Systems with Time Delay*, ISA Transactions, v. 40, n 4, pp. 353-368.

Araújo, A. D. (1993). *Contribuição à Teoria de Controle Adaptativo por Modelo de Referência e Estrutura Variável: Uma Abordagem Entrada/Saída*, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Araújo, A. D. and Hsu, L. (1990). *Further Developments in Variable Structure Adaptive Control Based Only on Input/Output Measurements*, Proc. of the 11th IFAC World Congress, Tallinn, 4, pp. 293-298.

Astrom, K. J. and Wittenmark, B. (1995). *Adaptive Control*, Addison-Wesley.

Cunha, C. D., Araújo, A. D., Barbalho, D. S. and Mota, F. C. (2002). *A Dual-Mode Adaptive*

Robust Controller Applied to the Speed Control of a Three-Phase Induction Motor, 7th International Workshop on Variable Structure Systems, Sarajevo-Bosnia e Herzegovina, Vol. 1, pp. 253-264.

Cunha, C. D., Araújo, A. D. and Mota, F. C. (2005). *Controlador em Modo Dual Adaptativo Robusto para Plantas com Grau Relativo Unitário: prova de Estabilidade*, VII SBAI, São Luis-MA.

Dorf, R. C. and Bishop, R. H. (2001). *Modern Control Systems*, 9th ed., Prentice-Hall, Inc, New Jersey.

Hsu, L. (1990). *Variable Structure Model Reference Adaptive Control Using Only Input and Output Measurements: The General Case*, IEEE Trans. Aut. Control, AC-35, 11, pp. 1238-1243.

Hsu, L., Araújo, A. D. and Costa, R. R. (1994). *Analysis and Design of I/O Based Variable Structure Adaptive Control*, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.39 pp. 4-21.

Hsu, L. and Costa, R. R. (1989). *Variable Structure Model Reference Adaptive Control Using Only Input and Output Measurements: Part I*, Int. J. Control, Vol. 49, n 2, pp. 399-416.

Ioannou, P. A. and Sun, J. (1996). *Robust Adaptive Control*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs.

Rohrs, C. E., Valavani, L. S., Athaus, M. and Stein, G. (1985). *Robustness of Continuous-Time Adaptive Control algorithms in the Presence of Unmodeled Dynamics*, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. AC-30, N° 9, Pág. 881-889.

Silva Jr., F. C. and Araújo, A. D. (2005a). *Variable Structure Adaptive Pole Placement Control*, 44th IEEE Conference on Decision and Control, Sevilha-Espanha, pp. 2859-2864.

Silva Jr., F. C. and Araújo, A. D. (2005b). *A Variable Structure Adaptive Pole Placement Control applied to the Speed Control of a Three-phase Induction Motor*, VIII COBEP, Recife-PE, Pág. 438-442.

Silva Jr., F. C., Araújo, A. D. and Oliveria, J. B. (2004). *A Proposal for a Variable Structure Adaptive Pole Placement Control*, 8th International Workshop on Variable Structure Systems, Barcelona-Espanha.

Vandeursten, J.-M. E. and Peperstraete, J. A. (1996). *Model-based and PID Controllers for Disturbance Rejection in Processes with Time Delay: a Comparison*, ISA Transactions, v35 n 3, pp. 225-236.