

# Utilização do solidThinking Embed em projetos de controle para sistemas embarcados utilizando técnica de controle adaptativo por modelo de referência.

Rodrigo de J. Macedo

**Resumo** – Apresenta-se, neste artigo, uma abordagem diferente do convencional no projeto de controle para sistemas embarcados. É descrita uma estratégia de controle adaptativo, cujo objetivo é obter robustez quanto à incerteza nos parâmetros da planta, fazer com que o sistema se comporte como um sistema conhecido desejado pelo projetista e garantir uma operação estável em malha fechada. É explorada a utilização do software solidThinking Embed no projeto do controle de nível de diferentes tanques, largamente utilizados na indústria, cujas dinâmicas são não-lineares, porém, consideradas não conhecidas pelo projetista, bem como a validação dos resultados via simulação e a obtenção automática do software de controle para ser empregado em algum controlador. Neste artigo, é mostrado o exemplo de obtenção automática do software de controle para ser empregado no microcontrolador Arduino.

**Palavras-chave** – controle adaptativo, microcontrolador, robustez, sistema embarcado, solidThinking Embed.

## I. INTRODUÇÃO

É muito comum se utilizar a tão conhecida técnica de controle PID para os diversos tipos de problemas de controle encontrados na indústria, no entanto, este é um tipo de controle que requer um projeto de sintonia específico para cada planta que se quer controlar, mesmo que diversas plantas sejam de mesma natureza, porém, de diferentes parâmetros. É o caso, por exemplo, de diferentes tanques de base circular de raios e drenos diferentes, onde se pretende controlar o nível. Além disso, o controle PID não é robusto com relação às mudanças de parâmetros na planta e no processo frente à otimização, isto é, este tipo de controle requer uma sintonia periódica de modo a se obter um comportamento desejado e otimizado.

Por outro lado, com o avanço da tecnologia, os computadores estão cada vez mais potentes com relação a capacidade e velocidade de processamento, e os custos, que antes eram uma barreira, cada vez mais passam a ser um atrativo e viabilizam o uso de técnicas de controle adaptativo em sistemas embarcados. A técnica explorada neste artigo é a de controle adaptativo por modelo de referência. Como o próprio nome sugere, este controle se adapta às necessidades do processo e traz consigo uma característica altamente estabilizante e um alto grau de robustez frente às incertezas e mudanças nos parâmetros da planta a ser controlada. Desta forma, reduz-se a necessidade de sintonia periódica dos controladores e o projeto controle de várias plantas de mesma natureza e diferentes parâmetros reduz-se a um único projeto, reduzindo custos e riscos, além de não perder eficiência em produtividade.

## II. CONTROLE ADAPTATIVO POR MODELO DE REFERÊNCIA: MÉTODO DIRETO

Apresenta-se, nesta seção, os conceitos da metodologia direta de controle adaptativo por modelo de referência (*Model Reference Adaptive Control* - MRAC). O principal objetivo dessa metodologia é desenvolver um controlador em malha-fechada que faça com que uma planta, cujos parâmetros podem não ser conhecidos, se comporte como um modelo de referência de parâmetros conhecidos e cuja dinâmica é projetada. Os parâmetros do controlador são calculados e atualizados automaticamente com base no erro entre as respostas do sistema em malha-fechada e do modelo de referência, de forma a fazer com que a resposta do sistema em malha-fechada convirja para a resposta do modelo de referência e o erro se anule, alcançando assim a condição de *matching*. Esta condição é obtida através do reposicionamento dos polos do sistema em malha-fechada e do cancelamento dos zeros durante o período de adaptação do controle. O diagrama de blocos da Figura 1 ilustra o método direto do controle adaptativo por modelo de referência.

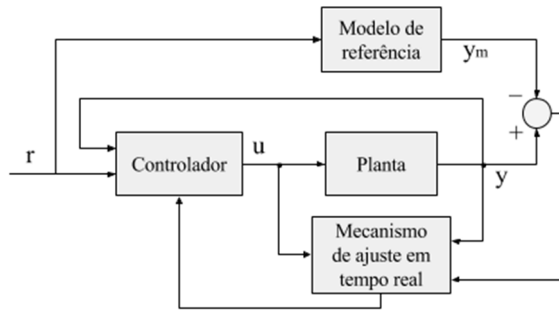


Figura 1 - Controle adaptativo por modelo de referência: método direto

Para o projeto do controlador, são consideradas as seguintes hipóteses:

- **Hipótese 1:** A planta é controlável e observável;
- **Hipótese 2:** O grau da planta é conhecido e a planta é de fase mínima;
- **Hipótese 3:** O sinal do ganho de alta frequência ( $b_p$ ) da planta é conhecido;
- **Hipótese 4:** O modelo de referência é de mesmo grau da planta, estável, de fase mínima e estritamente real positivo ( $b_m > 0$ ).

#### A. Controle Adaptativo por Modelo de Referência para Sistemas de Primeira Ordem

Um modelo de controle adaptativo para sistemas de primeira ordem foi apresentado em [1]. O diagrama de blocos desse modelo é apresentado na Figura 2, onde o mecanismo de ajuste é representado pelas linhas tracejadas e será descrito a seguir:

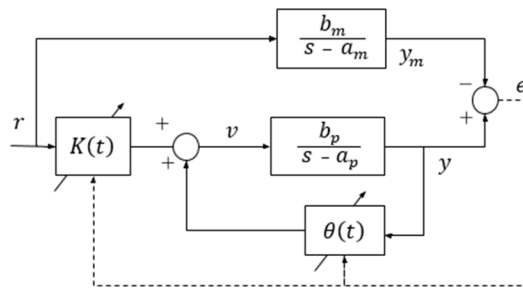


Figura 2 - Modelo proposto para uma planta de primeira ordem.

As equações diferenciais que descrevem  $y$  e  $y_m$  são:

$$\begin{aligned} \dot{y}(t) &= a_p y(t) + b_p v(t) \\ &= a_p y(t) + b_p (K(t)r(t) + \theta(t)y(t)) \\ &= (a_p + b_p \theta(t))y(t) + b_p K(t)r(t) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\dot{y}_m(t) = a_m y_m(t) + b_m r(t) \quad (2)$$

As funções de transferência equivalentes são:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{K(s) b_p}{s - a_p - \theta(s) b_p} \quad (3)$$

$$\frac{Y_m(s)}{R(s)} = \frac{b_m}{s - a_m} \quad (4)$$

O sinal de erro é definido como  $e = y - y_m$ , desta forma, observa-se que  $e = 0$ , se:

$$\frac{K(s) b_p}{s - a_p - \theta(s) b_p} = \frac{b_m}{s - a_m} \quad (5)$$

Portanto, o sistema em malha-fechada se comportará como o modelo de referência se os parâmetros de controle  $K$  e  $\theta$  forem ajustados de forma que:

$$K = K^* = \frac{b_m}{b_p} \quad (6)$$

$$\theta = \theta^* = \frac{a_m - a_p}{b_p} \quad (7)$$

A dinâmica do erro é descrita por:

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= \dot{y}(t) - \dot{y}_m(t) \\ &= a_p y(t) + b_p \theta(t) y(t) + b_p K(t) r(t) - a_m y_m(t) - b_m r(t) \\ &= a_m (y(t) - y_m(t)) + (a_p + b_p \theta(t) - a_m) y(t) + (b_p K(t) - b_m) r(t) \\ &= a_m e(t) + b_p (\theta(t) - \theta^*) y(t) + b_p (K(t) - K^*) r(t) \\ &= a_m e(t) + b_p \tilde{\theta}(t) y(t) + b_p \tilde{K}(t) r(t) \end{aligned} \quad (8)$$

Assim, para que o sistema em malha-fechada seja estável e que se comporte como o modelo de referência, deve-se garantir que a dinâmica do erro seja estável e evolua para zero. Como, por hipótese, o modelo de referência é estável, sabemos que  $a_m < 0$ , desta forma, deve-se propor uma lei de controle para  $\tilde{K}(t)$  e  $\tilde{\theta}(t)$  tal que seus valores evoluam para zero ou se anulem ao longo do tempo.

A solução encontrada e apresentada em [1] é descrita a seguir:

Sejam:

$$\theta(t) = -\text{sgn}(b_p) \alpha \int_0^t e(\tau) y(\tau) d\tau \quad (9)$$

$$K(t) = -\text{sgn}(b_p) \beta \int_0^t e(\tau) r(\tau) d\tau \quad (10)$$

As dinâmicas de  $\tilde{K}(t)$  e  $\tilde{\theta}(t)$  são descritas por:

$$\dot{\tilde{\theta}}(t) = \dot{\theta}(t) - \dot{\theta}^* = -\text{sgn}(b_p) \alpha e(t) y(t), \quad \alpha > 0 \quad (11)$$

$$\dot{\tilde{K}}(t) = \dot{K}(t) - \dot{K}^* = -\text{sgn}(b_p) \beta e(t) r(t), \quad \beta > 0 \quad (12)$$

Desta forma, o sistema realimentado é descrito pelas equações (8), (11) e (12). Assim, deve-se mostrar que a dinâmica do erro é estável, isto é,  $e(t) \rightarrow 0$  quando  $t \rightarrow \infty$ .

Para isto, emprega-se o uso do método de Lyapunov para análise de estabilidade de sistemas não-lineares. O desafio é encontrar uma função  $V(e, \tilde{\theta}, \tilde{K})$ , tal que:

$$V(e(t), \tilde{\theta}(t), \tilde{K}(t)) \geq 0, \quad e \quad (13)$$

$$\dot{V}(e(t), \tilde{\theta}(t), \tilde{K}(t)) < 0, \quad \forall t > 0 \quad (14)$$

A função de Lyapunov proposta é a seguinte:

$$V(e(t), \tilde{\theta}(t), \tilde{K}(t)) = \frac{1}{2} e(t)^2 + |b_p| \left( \frac{1}{2\alpha} \tilde{\theta}(t)^2 + \frac{1}{2\beta} \tilde{K}(t)^2 \right) > 0, \quad \forall t > 0 \quad (15)$$

A derivada de  $V(e(t), \tilde{\theta}(t), \tilde{K}(t))$  com relação ao tempo,  $\dot{V}(e(t), \tilde{\theta}(t), \tilde{K}(t))$ , é:

$$\begin{aligned} \dot{V}(e(t), \tilde{\theta}(t), \tilde{K}(t)) &= e(t) \dot{e}(t) + |b_p| \left( \frac{1}{\alpha} \tilde{\theta}(t) \dot{\tilde{\theta}}(t) + \frac{1}{\beta} \tilde{K}(t) \dot{\tilde{K}}(t) \right) \\ &= a_m e(t)^2 + e(t) \left( \tilde{\theta}(t) y(t) + \tilde{K}(t) r(t) \right) \left( b_p - |b_p| \text{sgn}(b_p) \right) \end{aligned} \quad (16)$$

Analisando a Equação 16, nota-se que a parcela  $b_p - |b_p|sgn(b_p)$  é sempre igual a zero. Desta forma,

$$\dot{V}(e(t), \tilde{\theta}(t), \tilde{K}(t)) = \begin{cases} a_m e(t)^2 < 0, & \forall e(t) \neq 0 \\ a_m e(t)^2 = 0, & \text{se } e(t) = 0 \end{cases} \quad (17)$$

Portanto,  $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) \rightarrow 0$ . Assim, pelo método de Lyapunov, o sistema em malha-fechada apresenta estabilidade assintótica.

Desta forma, o mecanismo de ajuste apresentado por linhas tracejadas na Figura 2 é apresentado junto ao modelo completo no diagrama da Figura 3.

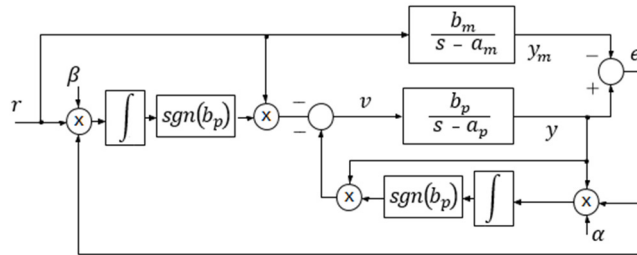


Figura 3 – Controle Adaptativo por modelo de referência para uma planta de primeira ordem – sistema completo.

### III. IMPLEMENTAÇÃO NO SOLIDTHINKING EMBED DO CONTROLE DE NÍVEL DE DIFERENTES TANQUES DRENADOS POR GRAVIDADE

Para demonstrar os resultados obtidos com a aplicação dessa técnica, foram utilizados três tanques drenados por gravidade, cujas características físicas diferem uns dos outros. A Figura 4 ilustra o controle implementado no ambiente de simulação do SolidThinking Embed.

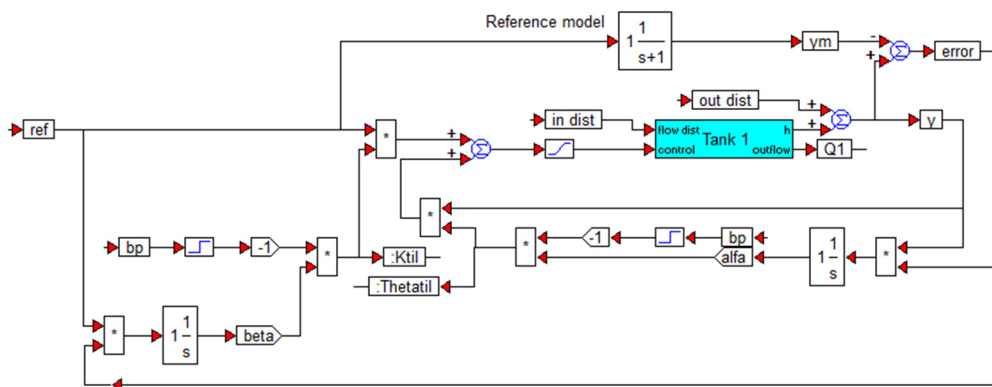


Figura 4 - Implementação do controle no solidThinking Embed.

Foi utilizado o seguinte modelo de referência de primeira ordem, representado pela Equação 18:

$$G(s) = \frac{y_m(s)}{ref(s)} = \frac{1}{s+1} \quad (18)$$

O modelo dinâmico dos tanques utilizados na simulação é representado pela Equação 19:

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{1}{A} (F_i(t) - F(t)) = \frac{1}{A} (F_i(t) - K\sqrt{h(t)}) \quad (19)$$

Onde  $h$  representa a altura do fluido no tanque,  $F_i$  e  $F$  representam os fluxos volumétrico de entrada e saída, respectivamente,  $A$  representa a área da base circular do tanque, e  $K$  representa a constante do dreno.

Tabela 1 - Parâmetros dos tanques utilizados nas simulações.

Tanque	Área da base circular (m <sup>2</sup> )	Constante do dreno
Tanque 1	1	2
Tanque 2	4	0.5
Tanque 3	8	1

Os resultados obtidos são mostrados nas figuras a seguir:

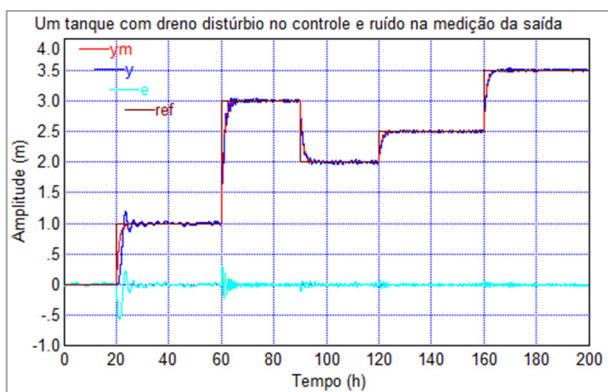


Figura 5 – Controle de nível do tanque 1.

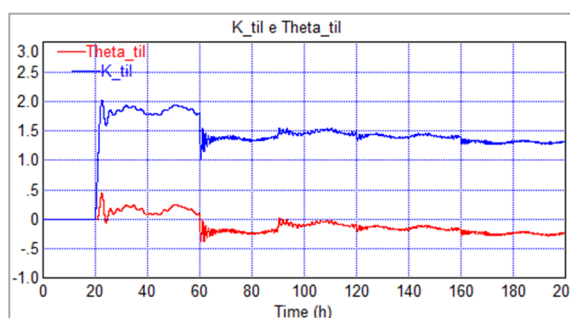


Figura 6 – Parâmetros de controle para o tanque 1.



Figura 7 – Controle de nível do tanque 2.

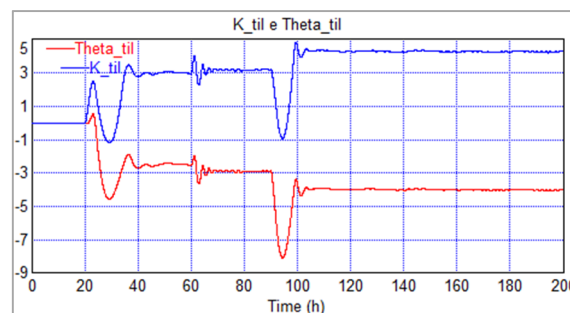


Figura 8 – Parâmetros de controle para o tanque 2.

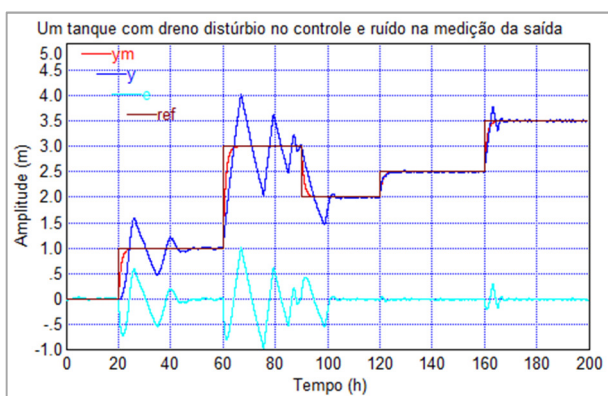


Figura 9 – Controle de nível do tanque 3.

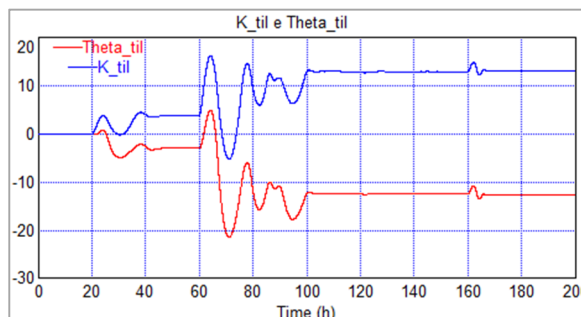


Figura 10 - Parâmetros de controle para o tanque 3.

Pode-se observar que, apesar da diferença nos parâmetros dos tanques, o controle se adapta durante um período de aprendizado e consegue manter o sistema em malha-fechada estável e se comportando como o modelo de referência, o que reforça a característica de robustez da técnica apresentada.

#### IV. OBTENÇÃO AUTOMÁTICA DO CÓDIGO DO CONTROLE PARA EMBARCAR EM ALGUM CONTROLADOR

Para a obtenção automática do código do controle para embarcar em algum controlador, utilizou-se a ferramenta CodeGen, nativa do SolidThinking Embed. Para isto, foi feita uma modificação no diagrama do controle, de forma que os sinais de referência e de nível sejam importados e o sinal de controle seja exportado, como pode-se observar na Figura 11.

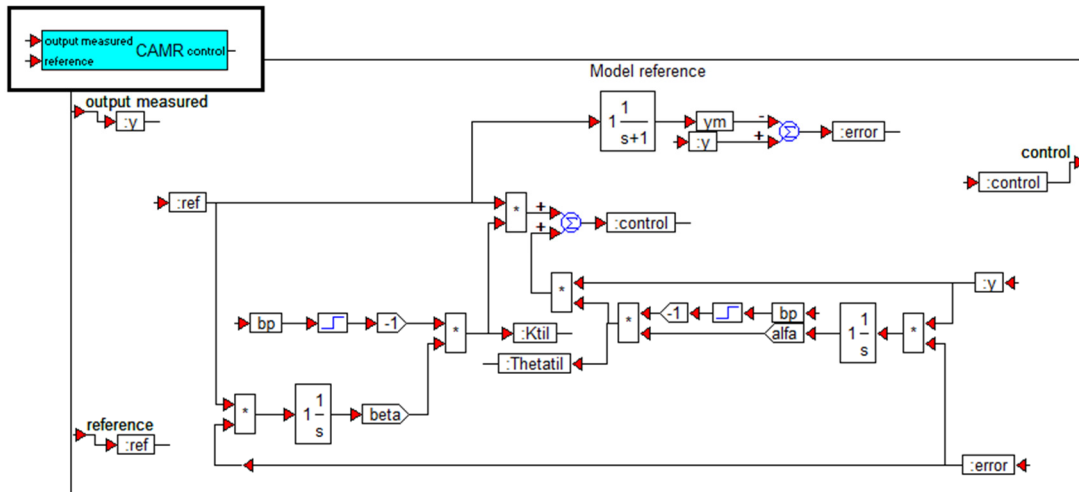


Figura 11 - Implementação no solidThinking Embed para obtenção automática de código para microcontrolador.

Para esse artigo, foi gerado o código do controle para embarcar no microcontrolador Arduino. O processo de obtenção do código é ilustrado pelas Figura 12 e Figura 13 a seguir:

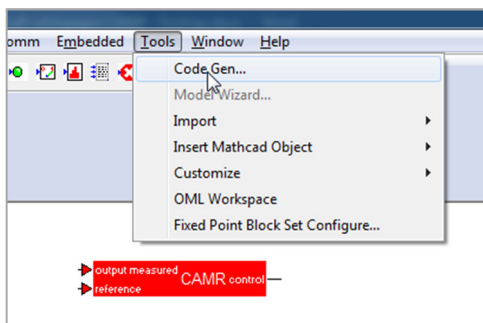


Figura 12 – Processo de geração do código do controle para Arduino – passo 1.

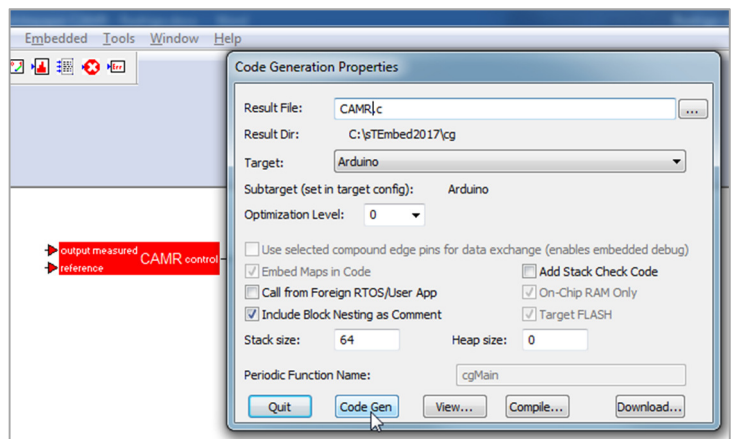


Figura 13 – Processo de geração do código do controle para Arduino – passo 2.

Nota-se que o código pode ser compilado e carregado diretamente no controlador caso o mesmo esteja disponível e conectado ao computador.

O código obtido do controle para o microcontrolador Arduino pode ser visto nas Figura 14 e Figura 15.



## V. CONCLUSÃO

Esse trabalho tem o objetivo de apresentar uma técnica de controle alternativa à utilização da técnica de controle PID, consolidada e largamente utilizada na indústria. Um dos principais pontos a serem observados em uma técnica de controle é a prova de estabilidade. Este trabalho mostrou que a técnica do método direto de controle adaptativo por modelo de referência para sistemas de primeira ordem e com grau relativo igual a um apresenta estabilidade assintótica global garantida pelo método de Lyapunov para o caso contínuo. A análise da estabilidade para o caso discreto, no entanto, leva em consideração o período de amostragem dos sinais, de forma que a estabilidade se torna função desse parâmetro. Porém, conforme a tecnologia avança e o poder computacional é cada vez maior, essa característica deixa de ser uma barreira para a aplicação de técnicas de controle adaptativo.

Para que uma técnica de controle nova seja utilizada em substituição à anterior, a mesma deve se mostrar vantajosa com relação a outra em alguns aspectos. A técnica apresentada leva vantagem com relação a robustez na adaptação às necessidades do processo. Como pôde-se notar, o método de controle adaptativo por modelo de referência apresenta uma característica altamente estabilizante frente as perturbações no processo, além de apresentar alto grau de robustez frente as mudanças nos parâmetros das plantas utilizadas. Os ganhos obtidos com essas características presentes nas malhas de controle dos processos industriais são: garantia de eficiência na produção com malhas de controle bem sintonizadas; redução de custos com manutenção de equipamentos desgastados devido comportamentos oscilatórios em malhas de controle mal sintonizadas; redução de custos com sintonia periódica das malhas de controle; e redução dos riscos na operação devido os distúrbios nos processos.

## VI. REFERÊNCIAS

[1] NARENDRA, Kumpati S.; ANNASWAMY, Anuradha M. **Stable adaptive systems**. Courier Corporation, 2012.

[2] JACOME, Isael Calistrato. **Controle adaptativo por modelo de referência e estrutura variável discreto no tempo**. 2013. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

[3] DUARTE, Manuel A.; PONCE, Rodrigo F. Discrete-time combined model reference adaptive control. **International journal of adaptive control and signal processing**, v. 11, n. 6, p. 501-517, 1997.

[4] AKHTAR, Suhail; BERNSTEIN, Dennis S. Lyapunov-stable discrete-time model reference adaptive control. **International Journal of Adaptive Control and Signal Processing**, v. 19, n. 10, p. 745-767, 2005.

[5] NARENDRA, KUMPATIS; ANNASWAMY, Anuradham. A new adaptive law for robust adaptation without persistent excitation. **IEEE Transactions on Automatic control**, v. 32, n. 2, p. 134-145, 1987.